



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO NUMÉRICO DE COLETOR
PARABÓLICO LINEAR COM AR COMO FLUÍDO
DE TRABALHO**

Por,
Pedro Rodrigo Molinero Martín

Brasília, 26 de Junho de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO NUMÉRICO DE COLETOR
PARABÓLICO LINEAR COM AR COMO FLUÍDO
DE TRABALHO**

POR,

Pedro Rodrigo Molinero Martín

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Mario Benjamim B. de Siqueira (Orientador) _____

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira _____

Prof. Antônio Cesar Pinho Brasil Júnior _____

Brasília, 26 de Junho de 2015

RESUMO

O crescimento da demanda de energia no mundo nas últimas décadas, junto com problemas ambientais, econômicos e o esgotamento dos combustíveis, faz que a energia renovável seja muito importante no futuro. No Brasil, um 80% da energia elétrica é hidroelétrica. Brasil precisa procurar outras fontes de energia para não depender só de uma, preferivelmente renováveis. A energia solar é uma opção interessante para o país devido aos altos índices de radiação solar que registra. No presente trabalho realizou-se a simulação de um fluxo de fluido num tubo absorvedor de um coletor parabólico nas condições de radiação da cidade de Brasília, com o objetivo de prever o comportamento deste tipo de equipamento nessa localização.

ABSTRACT

The growth of the energy demand in the world the last decades, along with environmental and economic problems, makes renewable energy very important in the future. In Brazil, 80% of the energy produced is hydroelectricity. Brazil needs to find some other sources to not depend only of one, preferably renewable. Solar energy is an interesting option for the country thanks to his high radiation rates. In this work, a simulation of a fluid flux in the absorber pipe of a parabolic collector under radiation conditions of Brasilia was done, with the objective of predicting the behavior of this type of equipment in this localization.

SUMÁRIO

1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS.....	3
2.1 A ENERGIA RENOVÁVEL.....	3
2.2 A ENERGIA SOLAR.....	5
2.3 ENERGIA SOLAR TÉRMICA.....	8
2.3.1 Energia solar térmica não concentrada.....	9
2.3.2 Energia solar térmica concentrada.....	10
2.4 ENERGIA HELIOTÉRMICA.....	11
2.4.1 Coletores de torre.....	13
2.4.2 Coletores Fresnel.....	15
2.4.3 Coletores parabólicos.....	16
2.4.4 Coletores de disco Stirling.....	19
2.5 ENERGIA HELIOTÉRMICA NO MUNDO.....	20
2.6 ENERGIA SOLAR NO BRASIL.....	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 DISPOSIÇÕES GERAIS.....	26
3.2 COMPONENTES DO SISTEMA.....	26
2.2.1 Coletor EuroTrough.....	26
2.2.2 Tubo Absorvedor SCHOTT PTR70.....	28
2.2.3 Fluido de trabalho.....	30
3.3 LOCALIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	31
3.4 DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO NO ABSORVEDOR.....	31
3.4.1 Radiação concentrada.....	33
3.4.2 Radiação direta.....	35
3.4.3 Radiação difusa.....	35
3.5 PERDAS NO SISTEMA.....	36
3.5.1 Perdas óticas.....	36
3.5.2 Perdas térmicas.....	36
3.6 MODELAGEM DO SISTEMA.....	37
3.7 CONFIGURAÇÃO DO ANSYS.....	39
3.7.1 Configuração da malha.....	39
3.7.2 Configuração do CFX.....	40
3.7.2.1 Domínios.....	40
3.7.2.2 Interfaces.....	42
3.7.2.3 Condições de contorno.....	42
3.7.2.4 Equações das radiações no CFX.....	44
3.7.2.5 Configuração do solver.....	45
4 RESULTADOS.....	47
4.1 RADIAÇÕES POR ZONA.....	47
4.2 PERDAS TÉRMICAS.....	49
4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM ABSORVEDOR.....	49
4.3.1 Resultados com I_d	51
4.3.2 Resultados com I_{d2}	51
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MODULO DO COLETOR.....	52
4.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA DOIS MODULOS DO COLETOR.....	53
4.6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MODULO DO COLETOR COM MODELO DE TURBULENCIA SST.....	54
5 CONCLUSÕES.....	56
5.1 RADIAÇÕES INCIDENTES.....	56
5.2 SOBRE OS PERFILES DE TEMPERATURA.....	57
5.3 EFICIENCIA GLOBAL DO COLETOR.....	58

5.4	GRAFICA COMBINADA.....	60
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	61
7	ANEXOS	63
7.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM I_d	63
7.1.1	Para um absorvedor (4,060 m)	63
7.1.2	Para um modulo (3 absorvedores).....	64
7.1.3	Para dois modulos (6 absorvedores)	65
7.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM ABSORVEDOR COM I_{d2}	66
7.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MODULO COM MODELO DE TURBULENCIA SST	67
7.4	TEMPERATURAS E PERDAS TERMICAS TOTAIS MEIAS PARA UM COLETOR E I_{d2}	68
7.5	DADOS UTILIZADOS NO CALCULO DAS EFICIENCIAS GLOBAIS DOS COLETORES	69
7.5.1	Para um absorvedor (4 m)	69
7.5.2	Para um modulo (12 m).....	70
7.5.3	Para dois modulos (24 m)	71
7.6	IMAGEM DA MALHA UTILIZADA	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema das diferentes fontes de energias renováveis de acordo com a sua origem.....	3
Figura 2. Consumo energético mundial desde 1820 até 2010 (blog Our Finite World, modificada)	4
Figura 3. Esquema da divisão da radiação solar incidente.....	5
Figura 4. Esquema da radiação incidente (amarelo) e emitida (vermelho) pela terra (Atlas brasileiro de energia solar, 2006).	6
Figura 5. Radiação incidente sobre a terra (National Geographic, Energy blog, modificada). [6]	7
Figura 6. Cozinha solar. [7]	9
Figura 7. Forno solar de Odeillo (França) (Wikimedia commons, 2005). [8]	10
Figura 8. Esquema de funcionamento dos diferentes coletores de concentração: (a) coletor de torre, (b) coletor Fresnel, (c) coletor parabólico e (d) coletor de disco stirling (Pralon, 2012). [12]	12
Figura 9. Central GEMASOLAR, Fuentes de Andalucia, Espanha.	13
Figura 10. Esquema de funcionamento da central GEMASOLAR (SolarReserve, 2011).[10].....	14
Figura 11. Esquema de funcionamento de um coletor Fresnel (Pralon, 2013). [12].....	15
Figura 12. Central Alba Nova 1 (Solar Euromed). [13]	16
Figura 13. Esquema de funcionamento de um coletor parabólico (Solar Millenium).[14]	17
Figura 14. Central SEGS, sectores III até VII. [15].....	18
Figura 15. Central Andasol - 3 (Solar Millenium). [16]	18
Figura 16. Disco Stirling.	19
Figura 17. Crescimento das energias renováveis desde o ano 2000 (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado). [18]	21
Figura 18. Top-5 dos países com mais energia instalada de cada tipo (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado). [18]	22
Figura 19. Previsões de geração de energia solar térmica por regiões segundo a IEA (Technology Roadmap, Solar Thermal Electricity, 2014, modificada). [20]	23
Figura 20. Previsões de custo da energia solar térmica segundo a IEA (Technology Roadmap, Solar Thermal Electricity, 2014, modificada). [20].....	23
Figura 21. Central fotovoltaica de Tubarão (SC) (Tractebel Energia, 2014). [23]	24
Figura 22. Perfil de um coletor EuroTrough.	27
Figura 23. Tubo absorvedor SCHOTT PTR 70. [27]	28
Figura 24. Gráfico das perdas térmicas do PTR 70.....	29
Figura 25. Esquema das radiações incidentes sobre o tubo absorvedor.....	32
Figura 26. Esquema da parte ativa do tubo absorvedor.....	32
Figura 27. Esquema de calculo das radiações	33
Figura 28. Transmissões térmicas no sistema.....	36
Figura 29. Modelagem do absorvedor no Catia.....	38
Figura 30. Configuração da malha.....	39
Figura 31. Configuração do domínio fluido na janela <i>Basic Settings</i>	40
Figura 32. Configuração do domínio fluido na janela <i>Fluid Models</i>	41
Figura 33. Configuração do domínio solido na janela <i>Basic Settings</i>	41
Figura 34. Configuração do domínio solido na janela <i>Solid Models</i>	42
Figura 35. Configuração da interface entre peças do tubo na janela <i>Additional Interface Models</i>	42
Figura 36. Configuração do Inlet na janela <i>Boundary Details</i>	43
Figura 37. Configuração do Outlet na janela <i>Boundary Details</i>	43
Figura 38. Configuração do solver na janela <i>Basic settings</i>	45
Figura 39. Perfil de radiações entrantes no tubo absorvedor com I_d (o problema é simétrico)	47
Figura 40. Perfil de radiações entrantes no tubo absorvedor com I_{d2}	48
Figura 41. Perfil das radiações entrantes no tubo	48

Figura 42. Gráfica das perdas térmicas no absorvedor	49
Figura 43. Imagem indicativa da temperatura na superfície do tubo (vista superior)	50
Figura 44. Imagem indicativa da temperatura na superfície do tubo (vista inferior)	50
Figura 45. Gráfica das condições de saída para um absorvedor e I_d	51
Figura 46. Gráfica das condições de saída para um absorvedor e I_{d2}	52
Figura 47. Gráfica das condições de saída para um modulo e I_d	53
Figura 48. Gráfica das condições de saída para dois módulos e I_d	54
Figura 49. Gráfica das temperaturas de saída para um modulo (3 absorvedores) com os diferentes modelos de turbulência	55
Figura 50. Gráfica da radiação recebida e as perdas térmicas meias	58
Figura 51. Gráfica da eficiência dos coletores estudados segundo a vazão mássica	59
Figura 52. Gráfica da temperatura de saída dos coletores estudados segundo a vazão mássica	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de coletores de concentração.	12
Tabela 2. Porcentagem de energia gerada por fontes renováveis desde o ano 2000 (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado). [18]	21
Tabela 3. Dados dos coletores EuroTrough. [26]	27
Tabela 4. Porcentagem de aumento da parte ativa do absorvedor usando os espelhos SCHOTT. [28]	28
Tabela 5. Especificações técnicas do tubo SCHOT PTR 70. [28][29].	29
Tabela 6. Temperatura meia das superfícies do tubo, nas condições de um absorvedor e I_{d2}	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

I	Radiação solar media diária em Brasília	[kWh/m ² /dia]
I_d	Radiação incidente máxima em Brasília	[W/m ²]
I_{d2}	Metade da radiação incidente máxima	[W/m ²]
$T_{entrada}$	Temperatura média de entrada do ar no absorvedor	[°C]
p	Distância focal do coletor	[m]
I_c	Radiação concentrada sobre o absorvedor	[W/m ²]
R	Radio exterior do absorvedor	[m]
I_{dt}	Radiação direta sobre o tubo	[W/m ²]
$T_{abs, °C}$	Temperatura na superfície do absorvedor	[°C]
$P_{W/m}$	Perdas térmicas no absorvedor	[W/m]
P_{W/m^2}	Perdas térmicas no absorvedor	[W/m ²]
D_{int}	Diâmetro interior do absorvedor	[m]
D_{ext}	Diâmetro exterior do absorvedor	[m]
D_{fluido}	Diâmetro do fluido	[m]
A_c	Área sobre o coletor	[m ²]
h	Entalpia do fluido	[J/kg]

Símbolos Gregos

τ	Transmitância
φ	Refletância
α	Absorbância

Subscritos

dt	Direta sobre o tubo
d	Direta
abs	Absorvedor
int	Interior
ext	Exterior
e	Entrada
s	Saída
in	Entrada
out	Saída
c	Concentrada

Siglas

CSP	Concentrated solar power
PTC	Parabolic trough collector
DSG	Direct steam generation
EUA	Estados unidos de América
SEGS	Solar energy generating systems
IEA	International energy agency
FT	Fluido de trabalho

USD	United states dólar
LER	Leilão de energia de reserva
ANEEL	Agencia Nacional da Energia Elétrica
ET	EuroTrough
FT	Fluido de trabalho

1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de energia mundial tem crescido exponencialmente. O desenvolvimento de alguns países, a taxa de crescimento da população e a necessidade de cobrir as necessidades da gente fazem que, de maneira previsível, o consumo de energia continue crescendo.

Atualmente, a maior parte da energia produzida no mundo vem de fontes de energia esgotáveis, principalmente carvão, gás e petróleo (os chamados combustíveis fósseis). O petróleo é responsável de um 32% da produção, o carvão de um 30% e o gás de um 24%. Um 4% da produção pertence á energia nuclear, também esgotável.

O resto de energia vem das chamadas fontes renováveis. Atualmente a mais importante das energias renováveis é a hidroeletricidade, com um 7% da produção, seguida de outras fontes como a eólica ou a solar com porcentagens ainda menores.

As previsões de duração dos combustíveis fósseis falam de 100 anos como máximo nas reservas mundiais descobertas até agora, e poderia ser ainda menos se o consumo de energia continua cresce mais do estimado. Além disto, este tipo de combustíveis produzem efeitos ambientais nocivos como o efeito estufa e outros problemas derivados da contaminação e seu preço é elevado e vai crescer mais com o tempo. Todas estas razões fazem que seja preciso incentivar outro tipo de fontes de energia.

A energia nuclear poderia ser uma opção interessante. As reservas de combustíveis deste tipo da para muitos anos de produção e o desenvolvimento da chamada fusão a frio, que poderia gerar quantidades enormes de energia, faz que este tipo de energia seja prometedora. O problema deste tipo de energia na atualidade é que fazer com os resíduos gerados pelas centrais deste tipo. Atualmente os resíduos radioativos são enterrados em recipientes especiais que não deixam a radiação sair, mas isto não parece uma opção muito correta. Isto, junto com alguns acidentes relacionados com centrais nucleares faz que a opinião da gente para as centrais nucleares não seja boa neste momento.

As energias renováveis são uma alternativa prometedora para o futuro. Destas energias, atualmente a energia hidráulica é a mais importante, mas não sempre pode ser usada devido as grandes massas de água necessárias. A energia eólica e solar são as principais alternativas á hidráulica.

A energia eólica tem um preço menor que a solar, mas precisa da instalação de grandes moinhos de vento, produzindo um impacto visual importante.

Tendo em conta tudo isto, a energia solar se apresenta como uma opção viável para o futuro da energia mundial. Na atualidade a energia solar é ainda cara em comparação com outras fontes de energia, mas é previsível que com o desenvolvimento desta tecnologia os preços sejam cada vez

menores. Além disto, as áreas aptas para a instalação deste tipo de energia é muito grande (praticamente tudo o espaço de terra entre os trópicos).

Dentro da energia solar tem dos tipos, fotovoltaica e térmica. A energia solar fotovoltaica tem a vantagem de que pode ser instalada em pequenos módulos, o que faz que seja muito útil para pequenos consumidores e em áreas isoladas da rede. Por seu lado, a energia solar térmica precisa coletores muito maiores e mais caros, o que faz que seja mais interessante para grandes centrais de produção. Além disto, as centrais solares térmicas permitem a armazenagem de energia térmica, muito mais eficiente que o armazenamento de energia elétrica, o que permite que estas centrais produzam energia incluso em horas sem sol.

Brasil é um dos países com mais energia solar instalada do mundo. Perto de um 80% da energia brasileira é energia hidráulica. Isto é algo bom, mas uma porcentagem tão alta de uma única fonte faz que o sistema eletro seja muito dependente dessa fonte, algo que não é bom se a fonte é renovável, devido a que as fontes renováveis são normalmente variáveis. A energia hidráulica é, dentro das energias renováveis, a mais fácil de controlar e administrar, mas ainda com isso épocas de sequia podem fazer que o sistema pare.

Para evitar isto, é preciso que o sistema de energia brasileiro nutra-se de outras fontes de energia, preferivelmente renováveis. Brasil é um país com índices de radiação altos numa extensão muito grande, o que faz que a energia solar seja a melhor opção para o futuro, e dentro da energia solar, a energia solar térmica ou heliotérmica.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente projeto é estimar o comportamento de um coletor solar na cidade de Brasília para diferentes condições de trabalho.

Serão estudadas as radiações recebidas pelo coletor e a distribuição delas ao redor da circunferência do absorvedor, além das perdas de energia no sistema, tanto óticas como térmicas.

Utilizando o software de simulação ANSYS, serão simulados diferentes tipos de fluxo em diferentes equipamentos com o objeto de conhecer as condições de saída do fluido. Para isso, é preciso também fazer a modelagem do sistema, a malha dele e as configurações necessárias (condições de contorno, etc.).

Por ultimo, vai se intentar conseguir gráficas do rendimento global e da temperatura de saída em relação á vazão mássica no coletor, com o fim de poder escolher o equipamento mais adequado nas diferentes condições de trabalho que podam ser precisadas.

2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

2.1 A ENERGIA RENOVÁVEL

Chama-se energia renovável á energia eléctrica que vem de uma serie de fontes de energia que se consideram virtualmente inesgotáveis, algumas pela imensa quantidade de energia que possuem (energia solar, energia geotérmica) e outras por que são capazes de regenerar-se a si mesmas (energia eólica, energia hidráulica, etc.)

Existem varios tipos de energias renovaveis dependendo da natureza da sua fonte, como pode-se ver na Fig. (1):

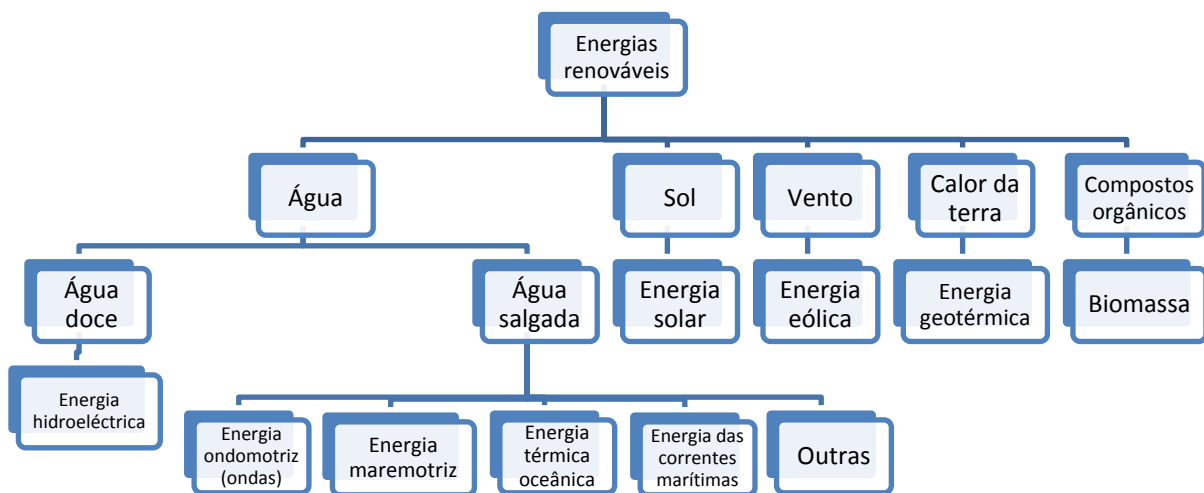


Figura 1. Esquema das diferentes fontes de energias renováveis de acordo com sua origem.

Note-se que, embora a energia solar é considerada a que aproveita a energia do sol, o resto das energias renováveis expostas (exceto a geotérmica e a maremotriz) dependem também indiretamente dela, pois é a energia solar a que propicia tanto o ciclo da água como o movimento do vento e o crescimento das plantas usadas na biomassa.

Apesar de que o conceito de energia renovável parece algo moderno, as energias renováveis eram as mais usadas pela humanidade ate a revolução industrial. Como exemplos, pode-se citar as velas dos barcos e os moinhos de vento (energia eólica) ou os moinhos de água (energia hidráulica). Com a revolução industrial deixou-se de lado algumas destas aplicações, substituindo-as por, num principio, maquinas a vapor, e depois geradores de energia mais complexos movendo-se com combustíveis fosseis. No inicio do século XIX um 95% da energia utilizada provinha das fontes renováveis, diminuindo ate um 38% no inicio do XX e ate um 16% no começo do presente (Fouquet, 2009).

A razão principal desta mudança é devido a que as energias renováveis consideram-se muito mutáveis e relativamente aleatórias, o que as fazia mais desconfortáveis para usar que as não renováveis. No momento, o escasso consumo energético (Fig. 2) não fazia prever o esgotamento das fontes naturais e outros problemas ambientais e econômicos que propiciam, há alguns anos, o ressurgir das energias renováveis.

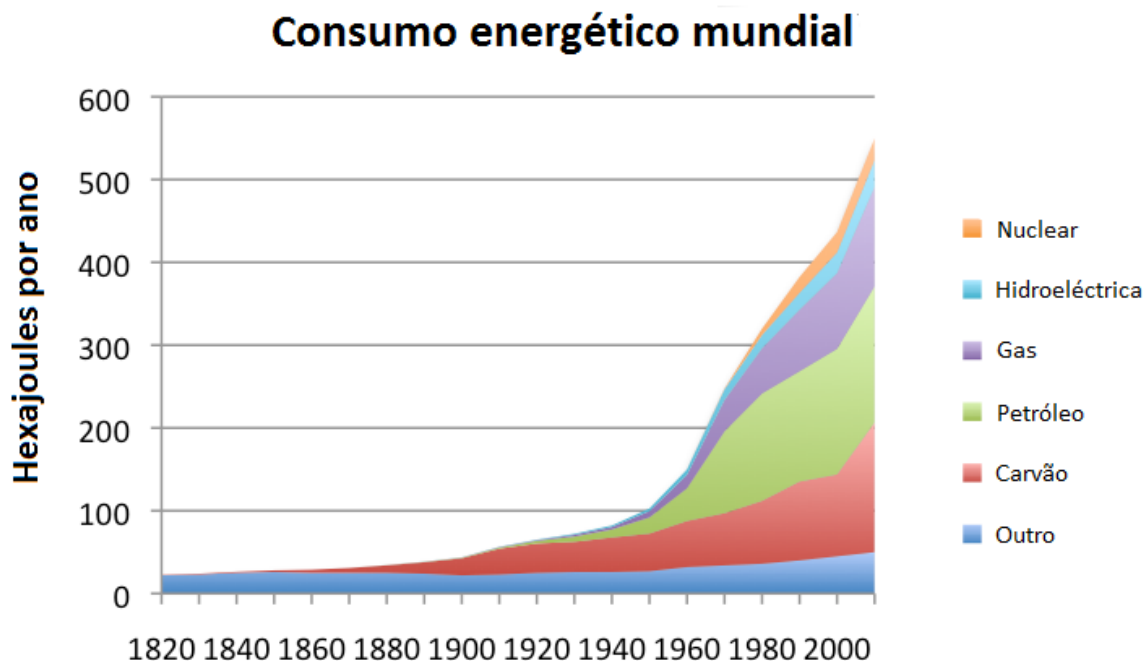


Figura 2. Consumo energético mundial desde 1820 até 2010 (blog Our Finite World, modificada).

De acordo com a web The Shift Project [1], no ano 2012 só um 22% da energia gerada no mundo vinha de fontes renováveis, sendo a mais importante a hidroeletricidade. Contudo, as previsões de esgotamento dos combustíveis fósseis nos próximos cem anos para o carvão, 60 para o gás e 45 para o petróleo (Marín Quemada & San Martín González, 2012, p. 3) [2], além dos problemas ambientais derivados deste tipo de combustíveis e o aumento regular dos custos deles fazem necessária uma recuperação deste tipo de energias.

Organismos internacionais de primeiro nível, como a Organização das Nações Unidas (*United Nations*) se pronunciaram sobre isto, exortando os países a inverter neste sentido, ou como a União Europeia (*European Union*), que propôs em 2007 um objetivo vinculativo de atingir um 20% de energia elétrica vindo de fontes renováveis e um 10% de bicombustíveis no consumo para os transportes no ano 2020 (Comissão Europeia, 2007)[3].

De acordo com o reporte do REN21 (2014), 144 países tem na atualidade políticas de apoio e objetivos definidos sobre as energias renováveis [4].

2.2 A ENERGIA SOLAR

Chama-se energia solar ao aproveitamento direto da radiação solar que incide na crosta terrestre a fim de aquecer fluidos ou produzir eletricidade. Como já foi dito, algumas energias renováveis como a eólica ou a hidráulica dependem também da energia do sol, mas o nome "energia solar" refere-se, neste contexto, somente ao aproveitamento direto da radiação solar para estes fins. A Figura (3) mostra os diferentes destinos da radiação solar incidente. Sob o nome de energia solar se encontram, neste trabalho, exclusivamente as que aparecem como energia solar térmica e energia solar fotovoltaica.

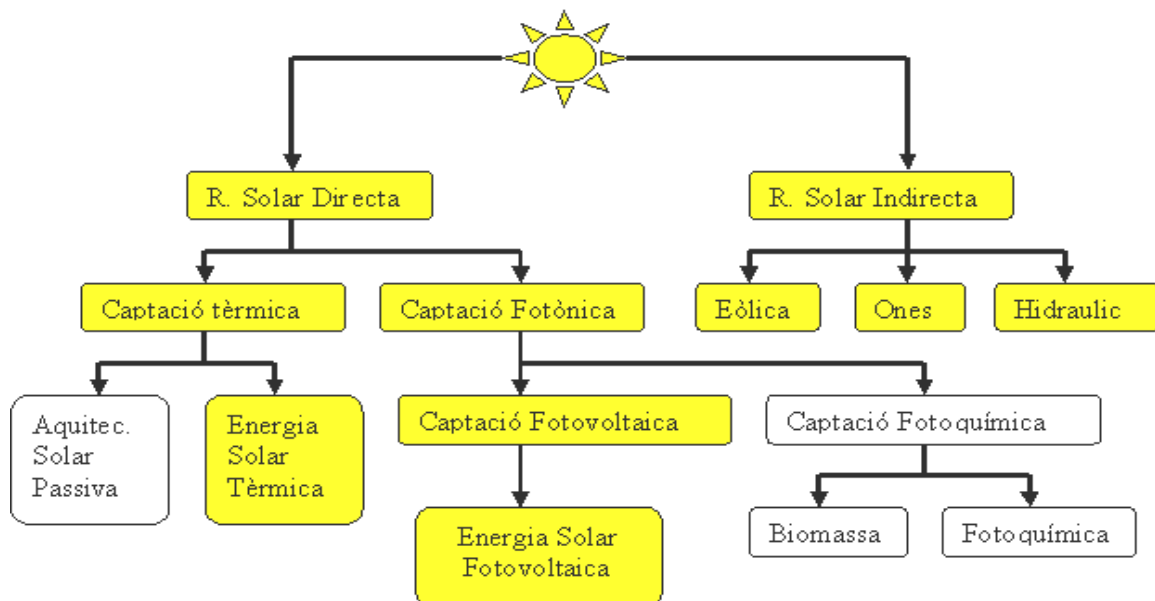


Figura 3. Esquema da divisão da radiação solar incidente.

O sol é uma esfera com uma temperatura na superfície de cerca de 6000K. Ela encontra-se no vazio, não troca calor por convecção ou condução, só por radiação. A irradiância é o fluxo de energia por unidade de superfície produzido pelo sol e é medida em W/m^2 .

A irradiância no sol é de $63450720 W/m^2$ (Conejo Badilla, 2009, p. 6)[5], mas enquanto nos afastamos dele a irradiância diminui. Na distância na qual a terra fica, o fluxo de energia meio sobre uma placa perpendicular aos raios solares é $1353 W/m^2$, numero indicado pela NASA (*National Space Agency*) com o nome de "constante solar".

Não entanto, como indicado na Fig. (4), a maior parte desta radiação é absorvida ou refletida pela atmosfera, e o resto é dividido em radiação direta e radiação difusa. A radiação global é a soma destas duas radiações, e é esta radiação global a que é interessante ao nível do aproveitamento energético.

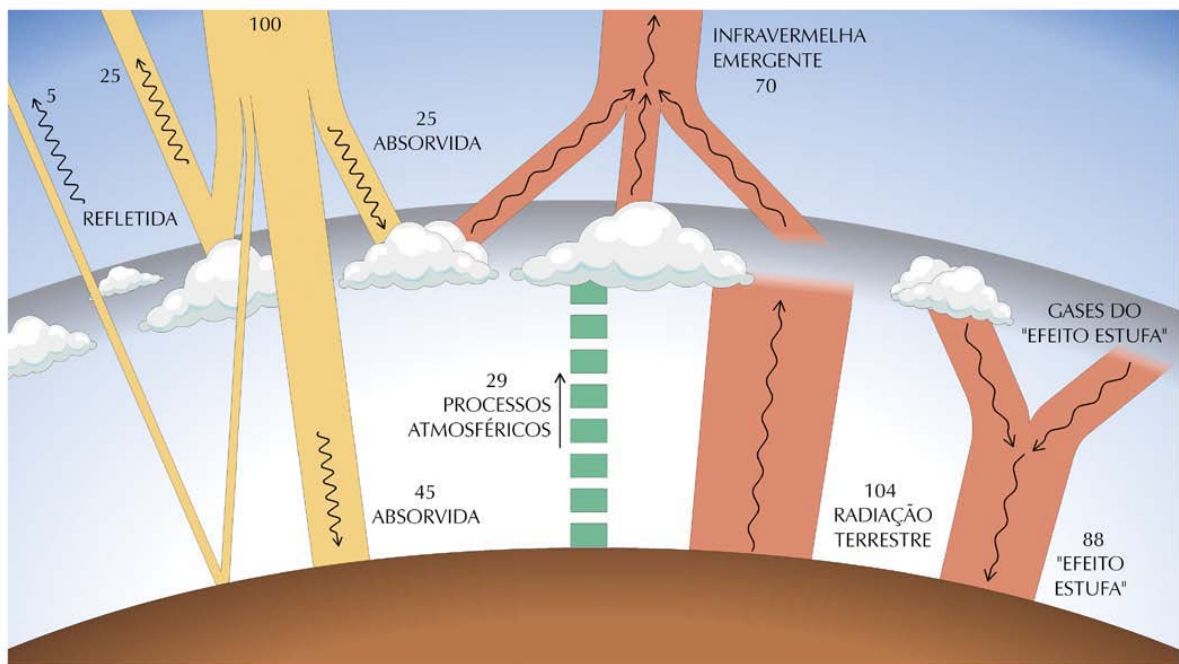


Figura 4. Esquema da radiação incidente (amarelo) e emitida (vermelho) pela terra (Atlas brasileiro de energia solar, 2006).

A radiação global incidente sobre um lugar depende em grande parte da geografia (zonas tropicais recebem mais energia) e efeitos do clima (nos dias nublados recebe-se menos energia). É importante entender a diferença entre irradiância (fluxo de energia que chega à terra em W/m^2) e irradiação ou radiação (quantidade de irradiância recebida num espaço de tempo, expressa em Wh/m^2). A Figura (5) mostra a radiação solar média sobre a terra.

Como já foi dito, a energia solar divide-se em dois tipos: energia solar fotovoltaica e energia solar térmica.

A energia solar fotovoltaica é a conversão direta da energia recebida em forma de radiação solar em energia elétrica através de placas solares. Estas placas solares são feitas de células solares ou células fotoelétricas ligadas em série. As células solares são semicondutores do tipo p-n, normalmente de silício, que são capazes de transformar a energia recebida em forma de fótons em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico (descoberto por Heinrich Hertz no ano 1887). Estas placas solares produzem corrente contínua com voltagem e intensidade diferente dependendo do seu tamanho e configuração. Um aparelho de nome inversor transforma esta corrente contínua em corrente alternada se for necessário.

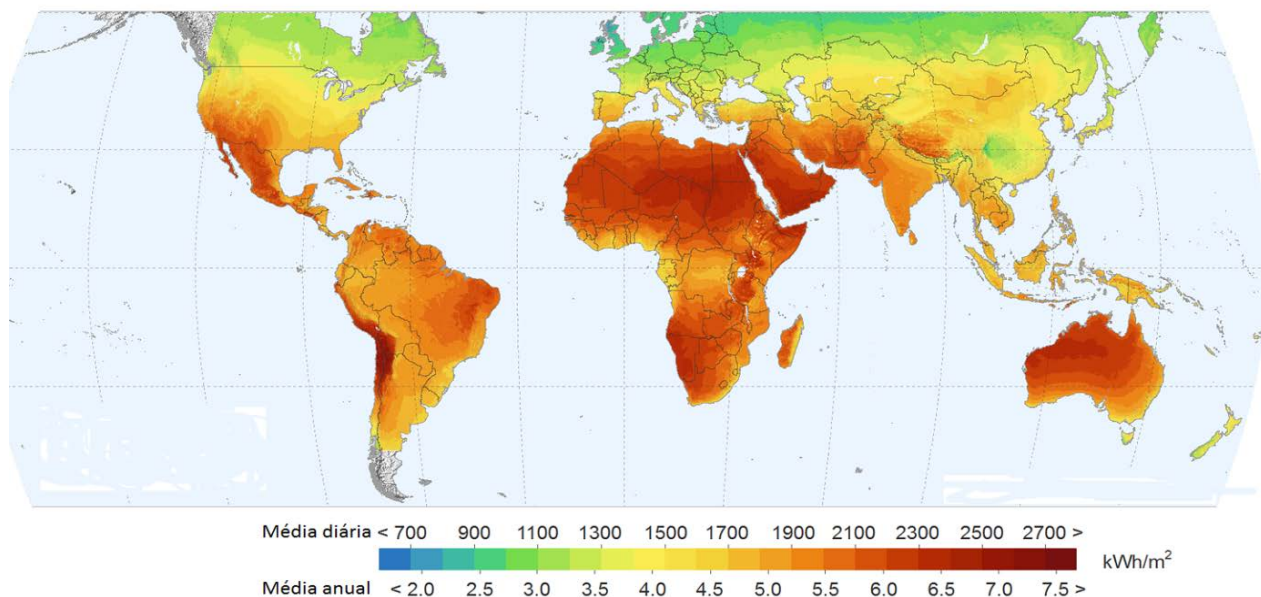


Figura 5. Radiação incidente sobre a terra (National Geographic, Energy blog, modificada).[6]

As aplicações da energia fotovoltaica são diversas. Ela é muito útil em situações isoladas da rede elétrica, como casas, sistemas de irrigação, etc. Também é utilizada em zonas não isoladas como contribuinte para a eletricidade consumida pelo usuário (usando a rede geral só quando a energia solar não é suficiente) ou é conectada à rede nacional ou regional como contribuinte ao total de energia elétrica. Outro dos usos mais importantes é no campo aeroespacial, como fonte de energia para satélites e sondas espaciais.

As células solares comercializadas atualmente têm um rendimento de 14% e 22% aproximadamente, mas tem modelos experimentais com rendimento de até 40% e continuam as investigações neste sentido.

A energia solar térmica consiste no aproveitamento da energia recebida em forma de radiação solar para esquentar um fluido com diferentes fins. Este tipo de energia vai ser explicado com mais detalhe nos pontos seguintes.

Em geral, a energia solar é considerada hoje a energia renovável com maior potencial. O rendimento de este tipo de energia não é ainda muito alto, mas é uma energia relativamente jovem e a sua margem para melhorias é ainda muito grande. Por outro lado, as zonas adequadas para este tipo de energia são muito extensas, tanto para centrais de geração solar grandes (cujas melhores zonas ficam entre os trópicos, nas áreas mais quentes da crosta terrestre) como para pequenos aproveitamentos, que poderiam ser colocados praticamente em qualquer ponto da geografia mundial.

Neste momento, o maior problema desta tecnologia é o preço. a energia solar é ainda cara em comparação com outras fontes de energia renováveis e não renováveis e muitos países oferecem ajudas econômicas para este tipo de energia, com a intenção de fazê-la mais atraente. Com tudo, nos últimos anos o preço vem diminuindo e tornando-a mais competitiva, e as expectativas são que o preço diminua ainda mais junto com o desenvolvimento dos sistemas de captação.

2.3 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

Energia solar térmica é o nome que recebe o aproveitamento da radiação solar principalmente para o aquecimento de fluidos. Os fins do aquecimento destes fluidos podem ser muito variados. Eles podem ser usados para aquecer água em casas, água ou outro tipo de fluido em indústrias e até a geração de energia elétrica mediante um ciclo Rankine (usando uma ou mais turbinas). Também pode ser usado para produzir frio mediante uma máquina de refrigeração por absorção. Outros usos da energia solar térmica são cozinhar alimentos (cozinhas solares) ou a síntese de compostos e materiais quando se precisam de temperaturas muito altas (fornos solares).

A energia solar térmica é dividida em três tipos dependendo da temperatura que alcance o fluido de trabalho. Assim, pode-se distinguir entre energia solar térmica de baixa, média e alta temperatura.

A energia solar de baixa temperatura é usada exclusivamente com fins térmicos (não para a geração de energia). O uso mais estendido deste tipo de energia solar térmica é o aquecimento de água quente sanitária (ACS) em casas, residências, etc., embora também possa ser usada na indústria quando a temperatura requerida não seja muito alta. Este tipo de instalações utiliza normalmente água como fluido de trabalho (na maioria de ocasiões misturada com aditivos como antigelante, etc.) e a sua temperatura pode atingir os 60°C no máximo.

A energia solar térmica de média temperatura produz temperaturas máximas de 100°C até 150°C. Este tipo de sistemas são mais complexos do que os de baixa temperatura e o fluido de trabalho normalmente é etilenglicol (nos sistemas que usam fluido de trabalho). Algumas aplicações de este tipo de energia são as cozinhas solares, o secado solar (utilizar calor para secar materiais, normalmente madeira) ou os destiladores solares (utilizados entre outras coisas para dessalinizar água mediante evaporação).

A energia solar térmica de alta temperatura é normalmente usada para a geração de energia elétrica, embora também é usada em algumas indústrias para outros fins. Este tipo de energia solar utiliza a concentração dos raios solares para conseguir temperaturas muito elevadas, normalmente entre 600°C e 800°C (embora os fornos solares possam atingir temperaturas muito mais altas, chegando aos 1500°C ou 2000°C). Os fluidos utilizados neste tipo de aplicações são diversos, desde os óleos sintéticos até as sais fundidas, dependendo do coletor.

Aparte desta classificação de acordo com a temperatura, a energia solar térmica também pode ser classificada de acordo com o modo de captação, sendo dividida em energia solar concentrada e energia solar não concentrada.

2.3.1 Energia solar térmica não concentrada

A energia solar não concentrada é o modo mais simples de aproveitamento de energia solar térmica. A energia solar não concentrada aproveita os raios solares incidentes sobre uma determinada superfície, como fazem as placas fotovoltaicas, para o aquecimento de fluidos ou outros fins.

Este tipo de energia solar abrange as aplicações de baixa temperatura e algumas das de média. Não é usada para a geração de eletricidade, por não atingir temperaturas suficientemente altas nos fluidos como para isto, mas é muito útil em aplicações que precisem de menos calor. Este tipo de energia pode chegar a atingir os 150°C.

O exemplo mais simples deste tipo de aplicações são as placas solares térmicas, que são caixas nas que tem tubos cobrindo a maior superfície possível. Por os tubos circula um determinado fluido que vai-se esquentando graças aos raios solares. A temperatura atingida depende obviamente da radiação solar, mas também dos materiais usados, o fluido de trabalho, forma e tamanho do coletor, etc. O uso mais comum destas placas é o aquecimento de água quente sanitária (AQS).

Um exemplo de energia solar não concentrada sem fluido são as cozinhas solares. Consistem numa caixa isolada que permite a entrada de energia em forma de raios solares, mas não permite esta escapar-se. Mediante um material transparente numa ou varias das suas faces, gera um efeito estufa que faz que o interior da caixa atinja temperaturas elevadas e continuas, o que permite-nos cozinhar alimentos. A Figura (6) mostra uma cozinha solar deste tipo.



Figura 6. Cozinha solar. [7]

Ao trabalhar com temperaturas relativamente baixas, tanto os materiais usados como os componentes mecânicos do sistema são mais baratos, fazendo a energia solar não concentrada a mais útil nos casos que não precisem temperaturas muito altas.

2.3.2 Energia solar térmica concentrada

Outro jeito de aproveitar a energia solar é concentrá-la numa superfície menor, conseguindo uma radiação muito maior sobre ela. Este é o princípio da energia solar térmica concentrada. Mediante espelhos redirecionam-se os raios solares de uma superfície grande sobre uma muito mais pequena, causando que a radiação recebida pela superfície de captação concentre-se numa área menor, conseguindo um fluxo de energia muito maior sobre ela, o que gera temperaturas mais altas.

A energia solar concentrada é capaz de atingir temperaturas no fluido de trabalho muito altas, desde os 500°C - 600°C de alguns coletores até os vários milhares de graus dos grandes fornos solares. Este tipo de energia cobre a seção de energia solar térmica de alta temperatura.

O uso mais importante e promissor deste tipo de tecnologia é a geração de eletricidade. Um fluido de trabalho esquentado-se mediante coletores de concentração e usando este fluido quente se geraria a eletricidade mediante uma turbina (ciclo Rankine). Este tipo de energia recebe o nome de energia heliotérmica.

A energia solar concentrada é também utilizada para outros fins. pode ser utilizada em algumas indústrias para esquentar fluidos necessários de um jeito alternativo ou também para cozinhar alimentos (cozinhas solares de concentração). Os grandes fornos solares são também utilizados para fundição de metais, obtenção de combustíveis de hidrogênio, etc. Destes, um dos maiores é o forno solar de Odeillo (França) (Fig. 7), com uma potência de 1MW.



Figura 7. Forno solar de Odeillo (França) (Wikimedia commons, 2005) .[8]

Dentro da energia solar concentrada tem dois grandes grupos, concentração em linha e concentração num ponto. Na atualidade os sistemas de concentração em linha estão mais difundidos, embora a concentração oferece geralmente rendimentos um pouco maiores.

A energia solar de concentração trabalha num rango de energias alto, o que provoca que muitas vezes sejam precisos materiais que se comportem bem em temperaturas altas. Os sistemas de recolha de energia deste tipo são mais complexos do que os sistemas de energia solar não concentrada. Normalmente tem seguidores solares (aparelhos que orientam o coletor para o sol, acompanhando o movimento deste) que podem ser de um ou dois eixos, utilizam espelhos especiais de alta refletância para a concentração dos raios solares e são normalmente muito maiores que os coletores de não concentração. Isto provoca que estes sistemas sejam geralmente caros, muito mais caros que os sistemas sem concentração, por isso somente são usados em grandes plantas de geração de energia ou para objetivos industriais muito concretos, não sendo usados num nível particular.

2.4 ENERGIA HELIOTÉRMICA

Energia heliotérmica é o nome que recebe a energia elétrica gerada graças á energia solar térmica concentrada. Esta energia é criada em grandes centrais utilizando coletores solares de concentração. É conhecida internacionalmente como CSP (do inglês *Concentrated Solar Power*)

Os coletores solares de concentração são aparelhos que concentram a energia solar que incide numa área grande numa pequena, e usam este fluxo de energia para distintos fines (neste caso a geração de energia elétrica). Os fornos solares são também coletores de concentração, mas não são usados para este fim.

Existem diversos tipos de coletores deste tipo, dependendo se a concentração é num pontos ou numa linha e se o coletor é fixo ou móvel. A Tabela (1) mostra os quatro tipos principais de coletores de concentração e a Fig. (8) mostra de um modo simplificado o funcionamento dos coletores citados.

Atualmente os coletores mais utilizados para a obtenção de energia elétrica são os coletores solares parabólicos ou (PTC (do inglês *parabollic trough collector*)), seguidos dos coletores de torre e dos Fresnel. Os coletores de disco stirling estão ainda em fase de melhora e só são utilizados em centrais de investigação de desenvolvimento.

As centrais de geração que usam coletores de torre, Fresnel ou PTC seguem um mesmo esquema. Um determinado fluido é esquentado utilizando um destes coletores. Este fluido pode ser diretamente água, gerando vapor de água (DSG, *direct steam generation*), ou pode ser usado outro fluido (normalmente sais fundidas, aceites térmicos ou água com antigelante ou outros aditivos) e um trocador de calor para gerar-lo. Este vapor é levado para uma ou varias turbinas para a geração de energia elétrica mediante um ciclo Rankine.

Tabela 1. Tipos de coletores de concentração.

Tipo de concentração receptor	Concentração em linha (Seguimento do sol num eixo, sistema mais simples)	Concentração num ponto (Seguimento do sol em dois eixos, maior rendimento)
Fixo (transporte do fluido até a turbina mais fácil)	Coletor Fresnel	Coletor de torre
Móvel (Recebe mais energia do sol)	Coletor parabólico	Coletor disco stirling

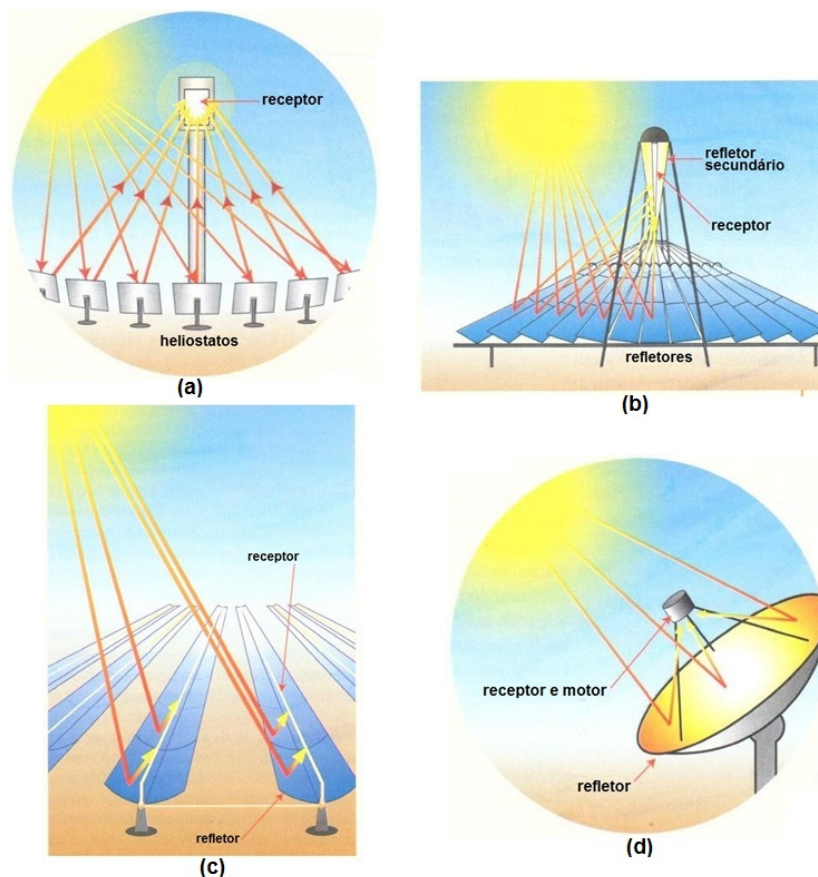


Figura 8. Esquema de funcionamento dos diferentes coletores de concentração: (a) coletor de torre, (b) coletor Fresnel, (c) coletor parabólico e (d) coletor de disco stirling (Pralon, 2012). [12]

Algumas destas centrais utilizam métodos de armazenagem de energia térmica para seguir produzindo energia por um tempo quando não tem luz solar. Normalmente estes métodos de armazenagem são tanques isolados nos que é guardado o fluido com uma alta temperatura para usar-lo depois, chegando algumas centrais a ter ate 15 horas de produção na máxima potencia sem receber radiação solar (central GEMASOLAR). Estes métodos de armazenagem são a maior vantagem da energia heliotérmica com respeito á fotovoltaica, já que o armazenamento energético deste tipo é mais eficiente que a armazenagem de eletricidade mediante baterias.

Devemos dizer também que algumas destas centrais têm também sistemas de aquecimento ou geração de energia mediante combustíveis fosseis (ou outros métodos de geração de energia), os quais são utilizados para satisfazer a procura de energia quando a radiação solar não seja suficiente, ou como apoio ao aquecimento do fluido em situações pontuais nas que a radiação não seja suficiente.

Por outro lado, os discos stirling produzem diretamente energia elétrica, por conseguinte seguem outro esquema.

2.4.1 Coletores de torre

Os coletores de torre são um dos tipos de coletores de concentração num ponto.

Diversos espelhos ou heliostatos são situados numa área ao redor da torre (Fig. 9). Estes espelhos refletem os raios solares para um ponto na torre, situado no alto dela, gerando fluido a alta temperatura. Esses espelhos costumam ter sistemas de movimento que fazem que o espelho siga o sol.



Figura 9. Central GEMASOLAR, Fuentes de Andalucía, Espanha.

A Figura (10) é um esquema do funcionamento da planta GEMASOLAR situada em Fuentes de Andalucía (Espanha), que conta com um sistema de armazenamento e trocadores de calor para gerar vapor de água. O vapor é usado em duas turbinas num ciclo Rankine com rea aquecimento.

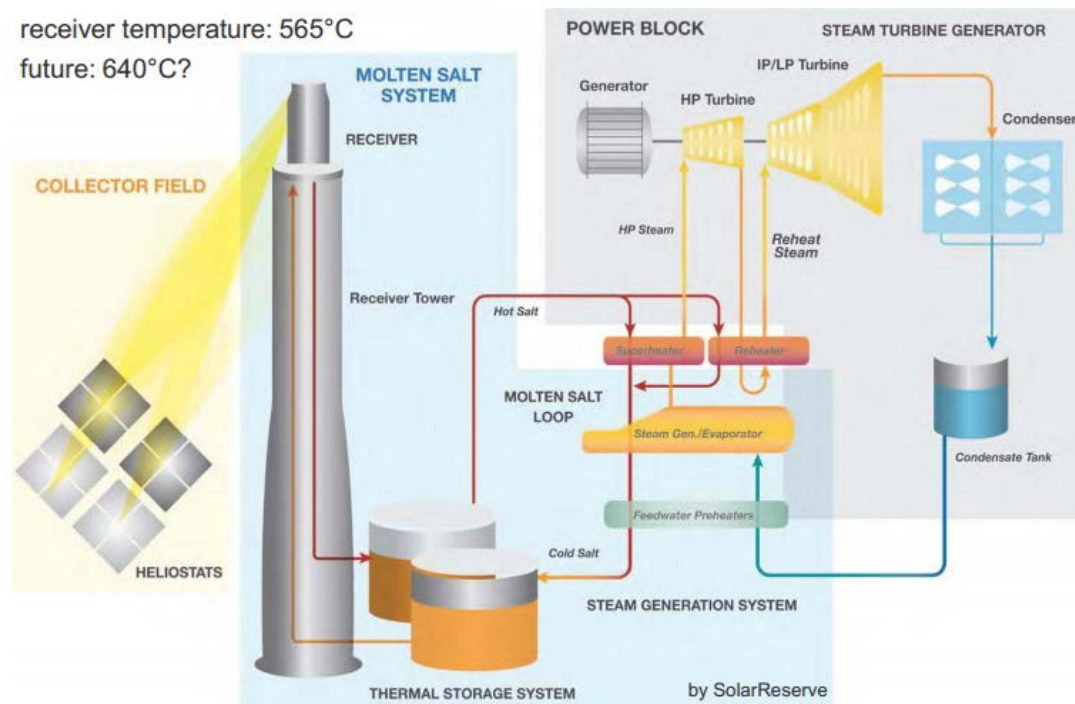


Figura 10. Esquema de funcionamento da central GEMASOLAR. Nota: no ciclo rankine da imagem falta a bomba. (SolarReserve, 2011).[10]

Este tipo de coletores são os mais caros entre os coletores de concentração, devido á grande infraestrutura que precisam.

A temperatura do fluido depende obviamente da radiação, mas também do numero de espelhos. Quanto mais alta seja a torre, mais espelhos podem ser colocados apontando para ela. Como exemplo, a instalação solar PS10 (Sanlucar la Mayor, Espanha) tem uma torre de 115 m de altura, 75000 m² de espelhos e trabalha com vapor de água a 250°C. A central solar GEMASOLAR tem uma torre de 140 m, uma área de espelhos de 304750m² e atinge os 565°C usando sais fundidas (nitratos de sódio e potássio) como fluido de trabalho (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL]).[11]

Como exemplos de energia gerada por estas centrais de torre, a central PS10 tem uma potencia nominal de 11MW, produzindo cada ano 23400MWh. Da sua parte a central GEMASOLAR conta com uma potencia de 19,9 MW, com uma produção anual de 110000 MWh. [11]

2.4.2 Coletores Fresnel

Os coletores do tipo Fresnel são um tipo de coletores de concentração em linha. O seu desenho consiste num tubo absorvedor elevado e espelhos planos no chão que redirecionam os raios solares para o tubo (refletores primários). Também tem um espelho parabólico cobrindo o tubo que ajuda a focalizar ainda mais os raios sobre ele, chamado refletor secundário (Fig. 11). Os espelhos situados no chão refletem os raios solares para o tubo e o refletor secundário reflete de novo os raios que não incidam sobre ele depois da primeira reflexão.

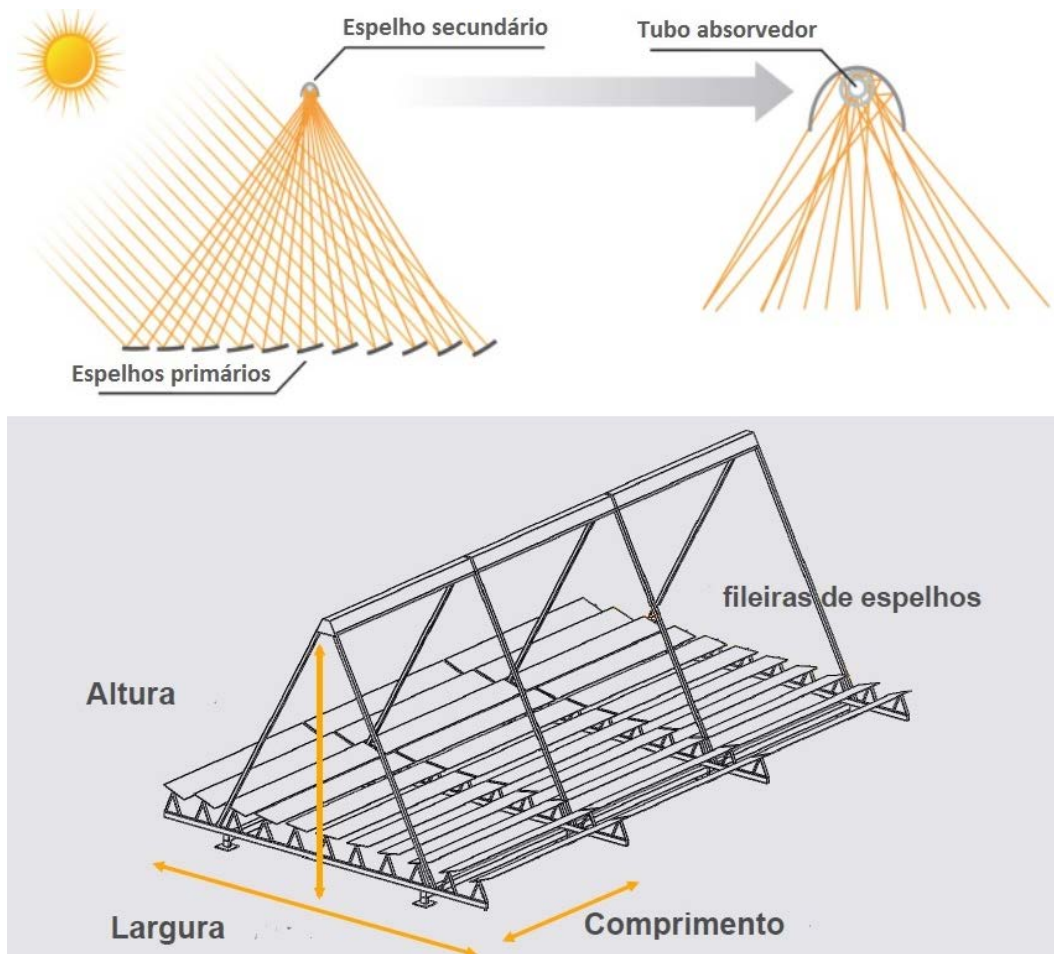


Figura 11. Esquema de funcionamento de um coletor Fresnel (Pralon, 2013). [12]

Estes espelhos podem ser fixos ou moveis (normalmente com um eixo). Os coletores deste tipo são colocados traçando uma linha de norte para sul, de modo a que o seguidor orienta os espelhos para o leste ou oeste.

A temperatura atingida por este tipo de sistemas fica normalmente entre os 250°C e os 350°C e o fluido de trabalho pode ser água, aceites, etc.

Economicamente, este tipo de coletores são mais baratos do que os PTC porque o tubo absorvedor não se move, o que permite economizar em mecanismos, e também graças ao uso de cristais planos nos refletores, que são mais econômicos que os cristais com forma curva.

A título de exemplo, se vão dar alguns dados referentes á central Alba Nova 1, que atualmente esta sendo construída em Ghisonaccia, na ilha de Córsega (França) (Fig. 12), que vai usar coletores Fresnel. Esta central vai ter uma área de captação total de 140000 m² distribuídos em 21 linhas de espelhos de 750 cada uma. O fluido de trabalho que vai ser utilizado é água e a temperatura de saída estimada será 300°C. A turbina a instalar é de 12 MW e é estimado que produza 25000 MWh/ano (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL]).[11]



Figura 12. Central Alba Nova 1 (Solar Euromed). [13]

2.4.3 Coletores parabólicos

Os coletores parabólicos são o tipo mais usado entre os coletores de concentração solar e também o tipo mais desenvolvido destes. São internacionalmente conhecidos como PTC (do inglês *Parabolic Trough Collector*).

As primeiras centrais deste tipo foram construídas em Califórnia (EUA) nos anos 80 e desde então muitas plantas foram construídas usando esta tecnologia. Tem muitos modelos diferentes de PTC (Luz System 1 e 2, ASTRO, EuroTrough, etc.) mas todos eles seguem o mesmo princípio.

Os coletores parabólicos consistem numa superfície de espelhos com perfil de parábola e um tubo absorvedor similar aos coletores Fresnel situado no foco desta. Desta forma, os raios solares que incidem nos refletores são rebotados para o tubo absorvedor, aumentando a temperatura do fluido que circula por seu interior. A Figura (13) mostra um esquema do funcionamento deste tipo de coletor.

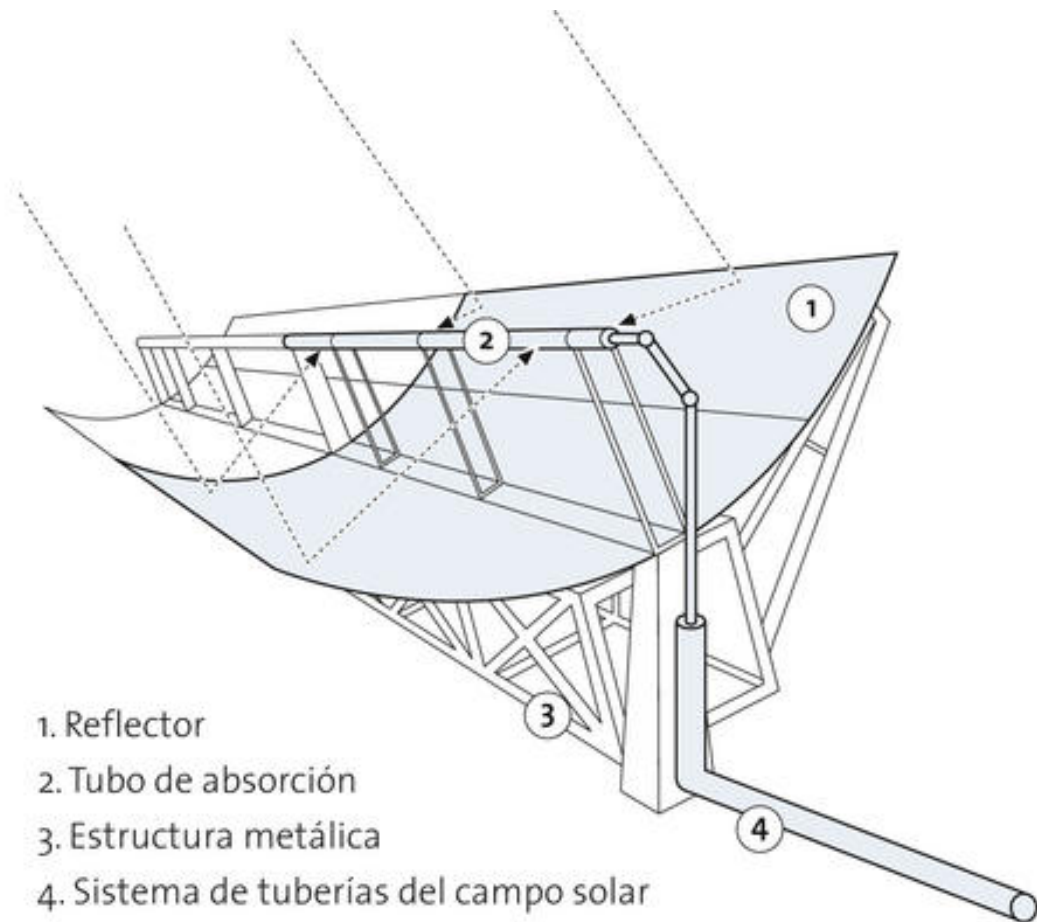


Figura 13. Esquema de funcionamento de um coletor parabólico (Solar Millenium). [14]

Os coletores solares de tipo parabólico são situados traçando uma linha de norte para sul e tem seguidores solares que orientam os refletores para o sol (este ou leste). Estes seguidores podem ser de um ou dois eixos. Os últimos são menos usados devido a que são mais caros e não oferecem uma melhora substancial na energia captada.

Economicamente, estes coletores são mais caros que os de tipo Fresnel devido ao uso de mecanismos para mover tanto os espelhos como o tubo absorvedor e principalmente devido ao maior custo de produzir espelhos com forma parabólica.

Uma das centrais mais antigas deste tipo de energia é a chamada SEGS, construída em 1990 no deserto de Mojave, em Califórnia (EUA) (Fig. 14). Esta planta consiste em linhas de coletores solares parabólicos (modelo LS-3) com uma área de captação total de 483960 m². O fluido de trabalho é thermanol que atinge os 390°C. A potencia instalada é de 80 MW (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL]).[11]



Figura 14. Central SEGS, sectores III até VII. [15]

Como exemplo duma central mais moderna que usa PTCs podemos citar a central Andasol-3 situada em Aldeire, Granada (Espanha)(Fig. 15). Construída em 2011, tem uma superfície de captação de 510120 m² e utiliza como fluido de trabalho aceite térmico que atinge temperaturas de 393°C. Esta central tem uma potencia instalada de 50 MW e produz perto de 175000 MWh ao ano. Seu custo foi de 350 milhões de euros (1050 milhões de reais aproximadamente) (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL]).[11]



Figura 15. Central Andasol - 3 (Solar Millenium). [16]

2.4.4 Coletores de disco Stirling

Os discos Stirling são o tipo menos usado atualmente de coletores de concentração para geração de eletricidade, limitando-se atualmente a plantas de investigação e não a fins comerciais.

Os discos Stirling consistem num disco parabólico que reflete os raios solares que incidem sobre ele num ponto chamado foco, onde se situa um motor Stirling conectado com um gerador de energia elétrica. O motor Stirling é um motor de combustão externa que trabalha com o denominado ciclo Stirling, um dos ciclos termodinâmicos com maior rendimento teórico. A Figura (16) mostra um destes discos.



Figura 16. Disco Stirling.

A principal diferença na geração de energia elétrica entre os discos Stirling e o resto de coletores é que os discos Stirling produzem diretamente eletricidade, deles não sai um fluido com alta temperatura. Isto supõe vantagens e também inconvenientes. Num lado, estes sistemas têm um rendimento aproximado de um 30%, bastante superior ao atual 15% ou 16% dos coletores de torre e parabólicos (Jason Deign, 2012). Como os discos Stirling têm um gerador em cada coletor é um sistema modular e não é preciso fazer grandes investimentos em infraestrutura. O seu desenho modular faz também que potencialmente seja possível instalar tantos discos como seja preciso, sem ter um mínimo deles.

Por outro lado, o fato de não produzir fluido a alta temperatura faz que não seja possível o armazenamento de energia térmica como nos outros tipos de centrais heliotérmicas, forçando-nos a usar baterias (um método de armazenamento menos eficiente). Neste sentido, os discos Stirling se

comportam como placas solares fotovoltaicas, com a desvantagem de que estas estão muito mais estendidas e são atualmente muito mais econômicas.

Estes problemas, junto com alguns problemas ao nível estrutural para suportar o peso e ter um bom seguimento do sol, fazem que esta tecnologia não se tenha estendido ainda. [17]

Na atualidade tem algumas plantas que utilizam esta tecnologia (embora não com fins comerciais, como já foi dito). Como exemplo, pode-se citar a central Maricopa Solar, situada em Peoria, Arizona, EUA. Esta planta tem 60 discos stirling (modelo SunCatcher) de 25 KW cada um, produzindo um total de 1,5 MW com uma eficiência média de um 26% (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL]).[11]

2.5 ENERGIA HELIOTÉRMICA NO MUNDO

A história da energia solar de concentração ou energia heliotérmica começou na conhecida como crise do petróleo, nos anos 70. Devido aos altos custos que alcançaram os combustíveis fósseis, muitos governos investiram dinheiro em energias renováveis nesta época, o que levou ao desenvolvimento de muitas destas tecnologias.

O presidente dos Estados Unidos nesses anos, Jimmy Carter, favoreceu a criação da primeira planta de geração elétrica usando esta tecnologia, a chamada SEGS-I (*Solar Energy Generating Systems - I*). Esta planta foi construída em 1984. A planta usava coletores solares parabólicos e num primeiro momento tinha uma potência instalada de 14 MW. Esta central foi crescendo nos anos seguintes, adicionando partes de nome SEGS-II, SEGS-III, etc., até a SEGS-IX citada anteriormente. O complexo SEGS tem no total uma capacidade instalada de 354 MW, o que fazê-la a planta com coletores parabólicos maior do mundo. A primeira planta deste tipo construída na Europa foi construída no ano 2008 em Espanha, com o nome de Andasol-1.

A primeira central no mundo em usar um coletor de torre foi construída também em Espanha no ano 2009, a PS10 (Sanlúcar la Mayor). A primeira planta que usava coletores Fresnel foi a *Kimberlina Solar Thermal Power Plant*, quem entrou em funcionamento em 2008 em Califórnia, Estados Unidos.

Como se pode ver pelas datas dadas, a energia térmica concentrada é uma tecnologia muito jovem. A central mais antiga acaba de fazer 30 anos (SEGS-I) usando coletores parabólicos, enquanto as primeiras centrais de torre e Fresnel ainda não têm 10 anos. Isso explica que os coletores parabólicos sejam os mais avançados tecnicamente e os mais usados na atualidade. No mundo tem atualmente funcionando aproximadamente 80 centrais de geração de eletricidade mediante energia solar concentrada, das quais um 90% utilizam PTCs. (Governo Federal do México, 2012)

Num nível global, a capacidade instalada de energias renováveis cresceu um 108% desde o ano 2000 ao 2013, passando de 748 GW até 1560 GW (Fig. 17) (Departamento de Energia dos EUA,

2013). [18]. As energias renováveis que mais cresceram nestes anos foram a eólica, com um fator de crescimento de 18 e a solar (fotovoltaica e térmica) com um fator de 68. No ano 2013 as energias renováveis constituíram o 23% da produção energética mundial, com 5095 TWh. [18].

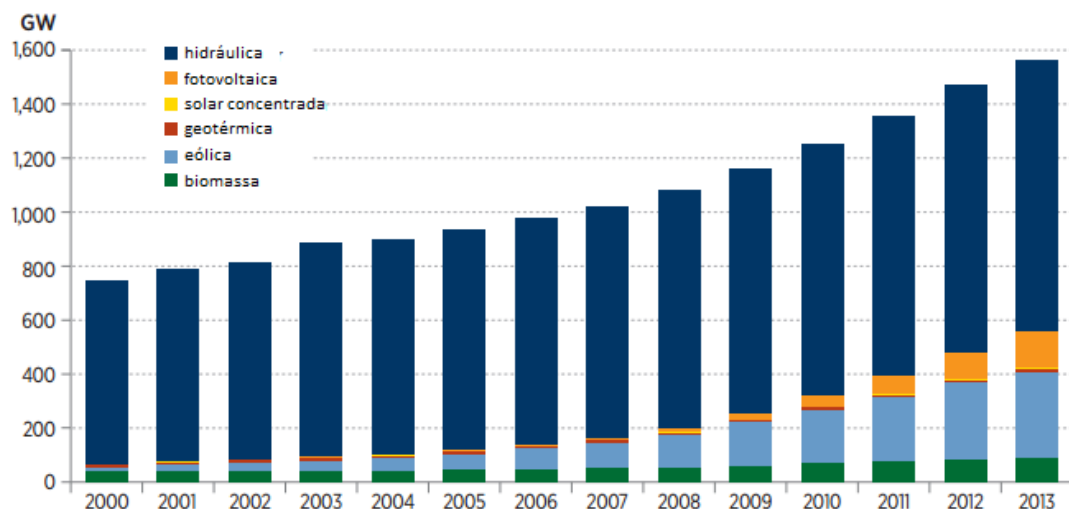


Figura 17. Crescimento das energias renováveis desde o ano 2000 (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado).[18]

Apesar deste aumento das energias renováveis na última década, a energia solar (de concentração e fotovoltaica) não começou a crescer até o ano 2007, como se pode ver na (Tab. 2), e atualmente sua percentagem dentro do mix de energias é ainda muito pequena (3,5% da energia renovável e 0,8% da total) produzindo da ordem dos 180000 GWh no ano 2013.

Tabela 2. Percentagem de energia gerada por fontes renováveis desde o ano 2000 (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado).[18]

	Hidroelétrica	Solar (PV & CSP)	Biomassa	Eólica	Geotérmica	Renováveis	Geração Renovável (GWh)
2000	16.8%	0.0%	1.2%	0.3%	0.3%	18.7%	2,727,082
2001	17.3%	0.0%	1.3%	0.4%	0.3%	19.3%	2,872,463
2002	17.1%	0.0%	1.2%	0.5%	0.3%	19.2%	2,953,879
2003	18.0%	0.0%	1.2%	0.7%	0.3%	20.2%	3,211,282
2004	17.3%	0.0%	1.1%	0.8%	0.3%	19.5%	3,247,899
2005	16.9%	0.0%	1.2%	0.9%	0.3%	19.4%	3,358,626
2006	16.7%	0.1%	1.2%	1.1%	0.3%	19.4%	3,488,055
2007	16.4%	0.1%	1.3%	1.3%	0.3%	19.3%	3,644,173
2008	16.6%	0.1%	1.3%	1.7%	0.3%	20.0%	3,822,689
2009	17.2%	0.1%	1.5%	2.2%	0.4%	21.3%	4,064,206
2010	16.6%	0.3%	1.6%	2.6%	0.3%	21.3%	4,319,733
2011	16.4%	0.4%	1.7%	3.0%	0.3%	21.7%	4,582,578
2012	16.3%	0.6%	1.8%	3.4%	0.3%	22.4%	4,891,891
2013	15.9%	0.8%	1.8%	3.7%	0.3%	22.6%	5,095,079

Por países, o país líder neste tipo de energia instalada é Espanha, com 2300 MW (no 31 de dezembro de 2014) (dados da Red Electrica Espanola, 2014)[19] seguido de Estados Unidos, com 918 MW (em 2013, de acordo com o Departamento de Energia dos EUA, 2013) [18] (Fig. 18). No total há no mundo instalado cerca de 3GW de energia heliotérmica, com mercados emergentes como China, Austrália ou Índia.

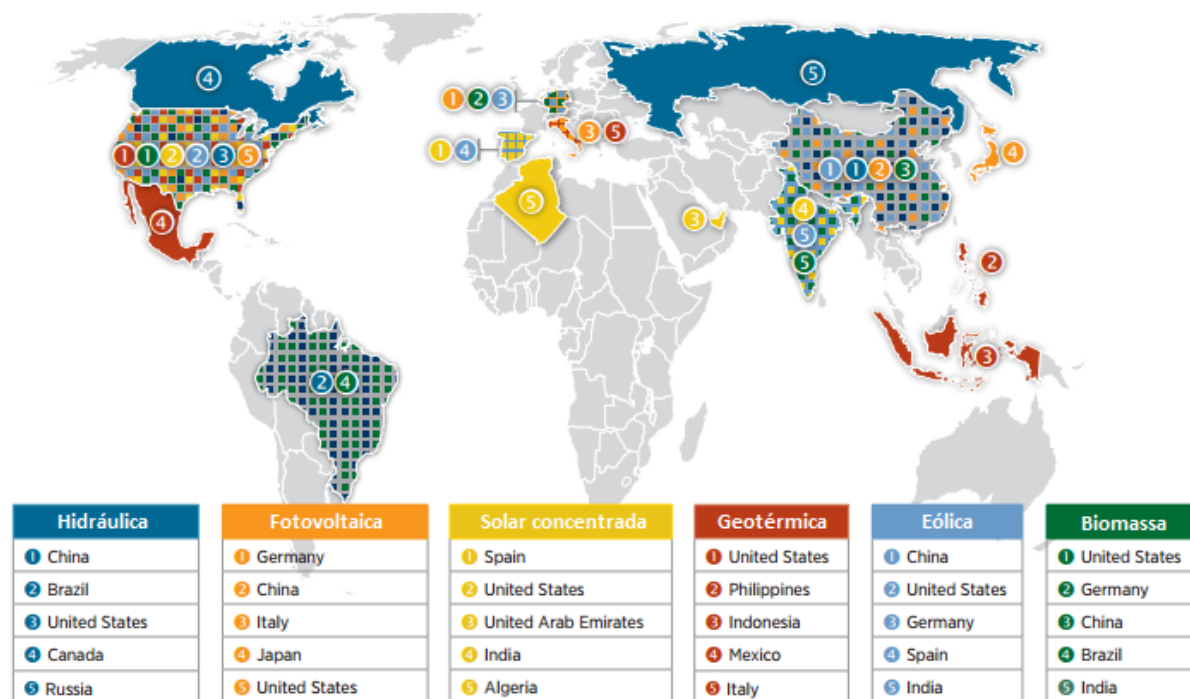


Figura 18. Top-5 dos países com mais energia instalada de cada tipo (U. S. National Renewable Energy Laboratory [NREL], modificado).[18]

Sobre o futuro da energia heliotérmica a Agencia Internacional da Energia ou IEA (*International Energy Agency*) é otimista no documento anual "Technology Roadmap" do ano 2014, prevendo uma produção elétrica deste tipo de um 11% do total para o ano 2050 (objetivo que conservam desde 2010), que junto com o 16% que prevêm para a fotovoltaica formaria um 27% da energia mundial proveniente do sol. A quantidade prevista de energia heliotérmica instalada no ano 2050 é de 1000 GW, o que evitaria a emissão de 2,1 gigatoneladas (gT) de dióxido de carbono cada ano.

A IEA prediz um crescimento muito mais importante da energia heliotérmica que da fotovoltaica principalmente devido aos sistemas de armazenagem usados, muito mais eficientes e ainda com margem para melhoria.

A União Europeia tem o objetivo de gerar um 20% da energia com fontes renováveis para 2020. O atualmente líder no campo heliotérmica, Espanha, não tem nenhum projeto de novas centrais deste tipo devido aos recortes nas ajudas ao sector, mas outros países como Itália e França tem objetivos

fixados para o citado ano de 600 MW e 540 MW respectivamente. Atualmente 20 MW em França e 115 MW em Itália de energia heliotérmica já estão aprovados e preparados para começar a construção das plantas, enquanto o resto está ainda na fase de projeto.

Fora da Europa, Arábia Saudita anunciou em 2012 a criação de 32 GW de CSP para o ano 2032, enquanto outros países como China ou Índia não têm objetivos específicos marcados a este respeito mas foram incrementando a sua capacidade instalada nos últimos anos e espera-se que a tendência continue. A Figura (19) mostra as previsões da IEA por regiões.

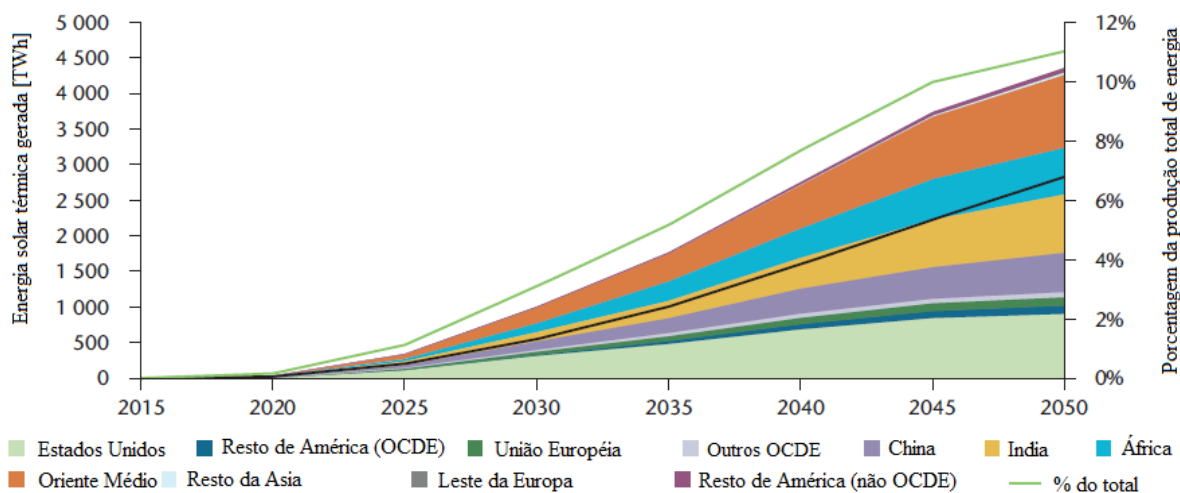


Figura 19. Previsões de geração de energia solar térmica por regiões segundo a IEA (Technology Roadmap, Solar Thermal Electricity, 2014, modificada).[20]

Também se espera que com o crescimento desta tecnologia os custos baixem, chegando a situar-se embaixo do 50% do preço atual (Fig. 20).

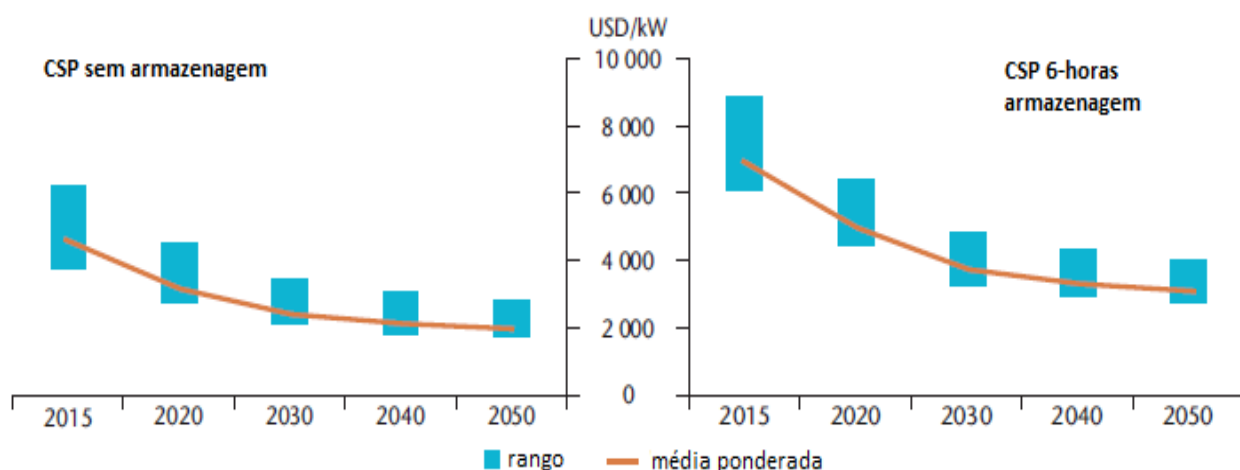


Figura 20. Previsões de custo da energia solar térmica segundo a IEA (Technology Roadmap, Solar Thermal Electricity, 2014, modificada). [20]

Para lograr estes objetivos, a IEA estima uma inversão total de 44 trilhões de USD. Esta cifra pode parecer muito grande, mas ao compará-la com a poupança gerada em combustíveis fósseis de 115 trilhões de USD, deixa um balanço positivo de 71 trilhões (na perspectiva mais otimista).

2.6 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

Brasil é atualmente um dos países com mais energia renovável do mundo. A matriz energética brasileira esta formada num 85% por energias renováveis. A energia mais contribuinte é a energia hidráulica, responsável de um 79% do total (Rodrigues Marques, 2014). [21]

O fato de que é difícil que a energia hidráulica cresça ainda mais no Brasil (pois os recursos ainda inexplorados encontram-se maiormente no Amazonas), a necessidade de complementar o sistema elétrico brasileiro com outras fontes de energia preferivelmente renováveis e que Brasil tem índices de radiação solar bastante elevados, faz que a energia solar seja uma das fontes de energia com maior futuro no país.

Atualmente a energia solar no Brasil é praticamente inexistente [22]. A maior planta de energia solar operando atualmente no Brasil esta situada em Tubarão (SC) e tem uma capacidade instalada de 3 MW (Fig. 21). Essa usina entrou em funcionamento em agosto de 2014 e a sua potencia é umas 100 vezes menor que a maior central deste tipo no mundo (SEGS, Califórnia, EUA). Esta central, operada por Tractebel, utiliza energia solar fotovoltaica.



Figura 21. Central fotovoltaica de Tubarão (SC) (Tractebel Energia, 2014) [23]

Sobre a energia solar térmica concentrada no Brasil, não foram encontradas referencias a nenhuma planta operando na atualidade, e se houvesse, teria uma potencia menor de 3 MW, com o que teria uma importância mínima.

O principal obstáculo a superar pela energia solar no Brasil é o mesmo que no resto do mundo: o custo elevado em comparação com outras fontes renováveis. Enquanto o seu custo esta entre os 250 e

os 350 R\$/MWh, a biomassa esta em 200 R\$/MWh, a energia eólica em 100 R\$/MWh e as grandes centrais hidrelétricas em 80 R\$/MWh.

No ano 2013 o governo brasileiro fez dois leilões de energia solar, mas devido ao preço-teto fixado (140 R\$/MWh) não houveram interessados [24]. Em outubro deste ano (2014) celebrou-se a leilão de Energia de Reserva (LER) na qual se contratou uma capacidade instalada de 889,7 MW em 31 projetos. Esta subasta considera-se um êxito, já que a expectativa de contratação era de entre 300 MW e 1000 MW, objetivo que foi cumprido. O êxito foi ainda maior ao considerar que o preço meio foi de 215,12 R\$/ MWh, abaixo do preço teto fixado pelo governo, 250 R\$/MWh. A entrega desta energia esta prevista para o 1 de outubro de 2017 e os contratos são para 20 anos.

O Plano Decenal da Empresa de Pesquisa Energética prevê atingir os 2,3 GW de energia solar instalada no ano 2023. Isso é principalmente devido á necessidade que Brasil tem de diversificar as suas fontes de energia renovável.

Nos últimos anos a escassez de chuvas criou em alguns momentos uma crise hídrica que ameaçou mesmo com racionalizar o consumo de água e energia. Agora o governo esta tentando fomentar a energia solar e eólica com o fim de não depender tanto da energia hidráulica e poder cobrir as demandas também nas épocas de menos chuvas sem precisar de combustíveis fósseis.

Uma grande ajuda á energia solar foi também a iniciativa da ANEEL (Agencia Nacional da Energia Elétrica), por meio da Resolução Normativa 482 do dia 17/04/2012, documento que permite que particulares instalem placas fotovoltaicas nas suas casas ou fincas conectadas á rede e reduzir essa energia gerada das suas contas de energia. Isso faz que qualquer pessoa, não só grandes empresas, podam contribuir á matriz elétrica nacional com energia solar.

No entanto tudo o citado nos parágrafos prévios refere-se quase exclusivamente á energia solar fotovoltaica e não a energia heliotérmica, um campo que parece não estar ainda muito presente na mente dos produtores de energia brasileiros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DISPOSIÇÕES GERALES

Neste trabalho, realizou-se um estudo matemático das transferências de calor ocorridas num coletor solar parabólico com o objetivo de estudar o aumento da temperatura do fluido em diferentes condições.

O estudo é feito sobre os seguintes componentes:

- Coletor: EuroTrough
- Absorvedor: Schott PTR70
- Fluido de trabalho: Ar

O coletor EuroTrough e o absorvedor PTR70 são os modelos mais comuns de componentes desse tipo no mercado atual.

O método seguido para a análise é o seguinte:

- Disposição de modelos a estudar, fluido de trabalho a empregar e localização do equipamento para o estudo (obtenção de valores de radiação solar na zona escolhida).
- Estudo das condições de contorno: distribuição de radiação entrante no absorvedor.
- Estudo das perdas térmicas no absorvedor: devidas á radiação e convecção com o ambiente.
- Modelagem do sistema num programa CAM
- Criação do sistema no programa ANSYS. Criação da malha e colocação das condições de contorno e perdas.
- Obtenção da temperatura meia de saída do fluido para diferentes condições de entrada.

A utilização do simulador ANSYS permite, uma vez introduzida as condições de contorno, mudar as condições de entrada do fluido e estudar as condições de saída obtidas de um jeito rápido. Desse modo será possível determinar qual é o ponto de maior rendimento do coletor.

3.2 COMPONENTES DO SISTEMA

3.2.1 Coletor EuroTrough

No ano 1998, a Comissão Europeia reuniu um grupo de empresas e laboratórios europeus com o objetivo de criar um novo modelo de coletor parabólico melhor do que o mais avançado naquela

época, o LS-3. Depois de vários anos de desenvolvimento, o produto foi o coletor EuroTrough. O EuroTrough apresenta varias vantagens em relação ao LS-3 (principalmente estruturais) que fazem com que o custo seja um 10% menor que ele. [25]

O EuroTrough foi testado entre os anos 2000 e 2002 na Plataforma Solar de Almeria (Espanha), com um fluido sintético como FT, alcançando temperaturas até 400°C.

Os coletores EuroTrough são formados por módulos de 12 m de comprimento. Os módulos estão constituídos de espelhos em forma de parábola, suportes para os tubos absorvedores e uma estrutura metálica que o sustenta. A Figura (22) mostra um perfil simplificado dum modulo de coletor EuroTrough.

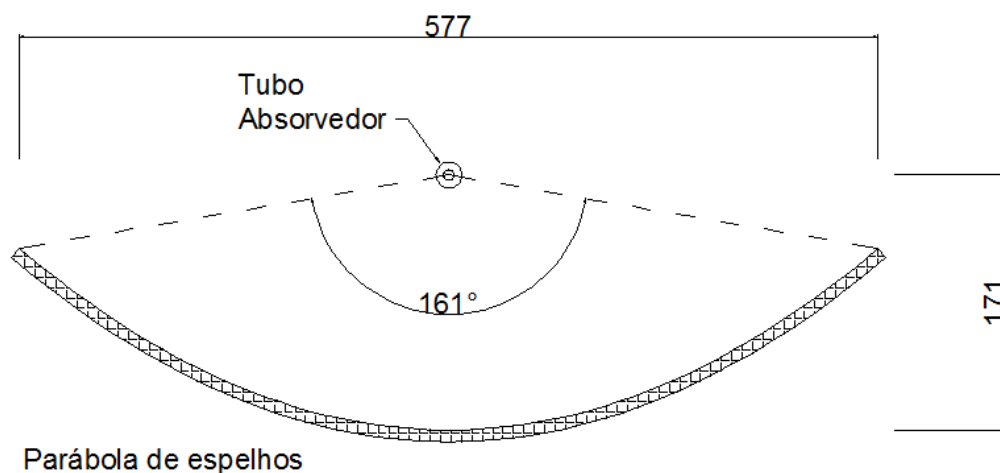


Figura 22. Perfil de um coletor EuroTrough.

A parábola de espelhos tem uma distancia focal de 171 cm e uma amplitude de 577 cm, e esta formada por 28 espelhos parabólicos (7 ao longo do eixo longitudinal x 4 em perpendicular a ele). A refletância dos espelhos considera-se 94%. [26]

Existem 2 modelos de coletor EuroTrough: ET-100 e ET-150. A diferença entre eles é simplesmente o comprimento. A Tabela (3) mostra alguns dados dos coletores ET-100 e ET-150:

Tabela 3. Dados dos coletores EuroTrough. [26]

Modelo EuroTrough	ET-100	ET-150
Distância focal	1,71 m	1,71 m
Abertura coletor	5,77 m	5,77 m
Área coletor	545 m ²	817,5 m ²

Comprimento do coletor	99,5 m	148,5 m
Número de módulos por coletor	8	12
Número de espelhos	224	336
Número de tubos absorvedores (4,1 m)	24	36
Refletividade dos espelhos	94%	94%
Peso da estrutura/m ² de coletor	19,0 kg	18,5 kg

3.2.2 Tubo absorvedor SCHOTT PTR70

O tubo absorvedor SCHOTT PTR 70 foi desenvolvido pela companhia alemã SCHOTT Solar entre os anos 2002 e 2005, e foi introduzido no mercado no ano 2006. É um dos absorvedores mais modernos do mercado e comum dos melhores rendimentos (junto com o SOLEL UVAC2008).

Cada absorvedor esta formado por um tubo de aço DIN 1.4541 recoberto por um material que melhora sua absorbância e diminui sua emissividade, dentro do qual vai o fluido de trabalho. Este tubo esta envolto num tubo de cristal anti-reflexo com alta transmitância e entre eles há um pequeno espaço vazio.

A Figura (23) mostra um absorvedor deste tipo.

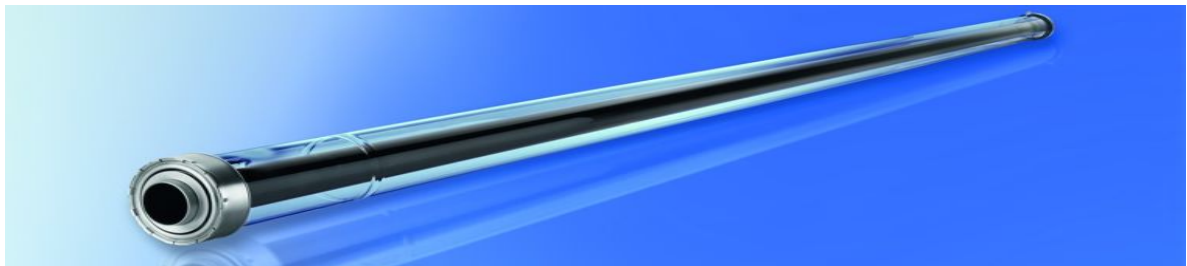


Figura 23. Tubo absorvedor SCHOTT PTR 70. [27]

Cada tubo tem um comprimento de 4,06 m, mas nem todo o tubo absorve. No começo e no final dele há suportes que unem o tubo ao coletor e nestas partes não tem transferência de calor. O comprimento ativo, segundo o fabricante, é de 96,7%.

A própria empresa patenteou os espelhos que são colocados nestas partes de sombra e refletem os raios solares de novo á parte ativa, aumentando-a como mostra a Tabela (4).

A Tabela (5) mostra alguns dados técnicos do PTR 70 indicados pelo próprio fabricante.

Tabela 4. Porcentagem de aumento da parte ativa do absorvedor usando os espelhos SCHOTT. [28]

Período do ano	Aumento da parte ativa
Inverno	0,48 %
Verão	2,04%
Média	1,26%

A figura (24) mostra uma gráfica simplificada das perdas térmicas no absorvedor nas distintas temperaturas de trabalho. A figura ta incluída no catalogo do fabricante e leva em conta as perdas por convecção e radiação com um ambiente a 25°C. Embora a figura possa dar uma idéia das perdas do tubo, no presente projeto é usado um estúdio mais detalhado (Burkholder &Kutscher, 2009) no calculo delas, que é explicado no ponto.

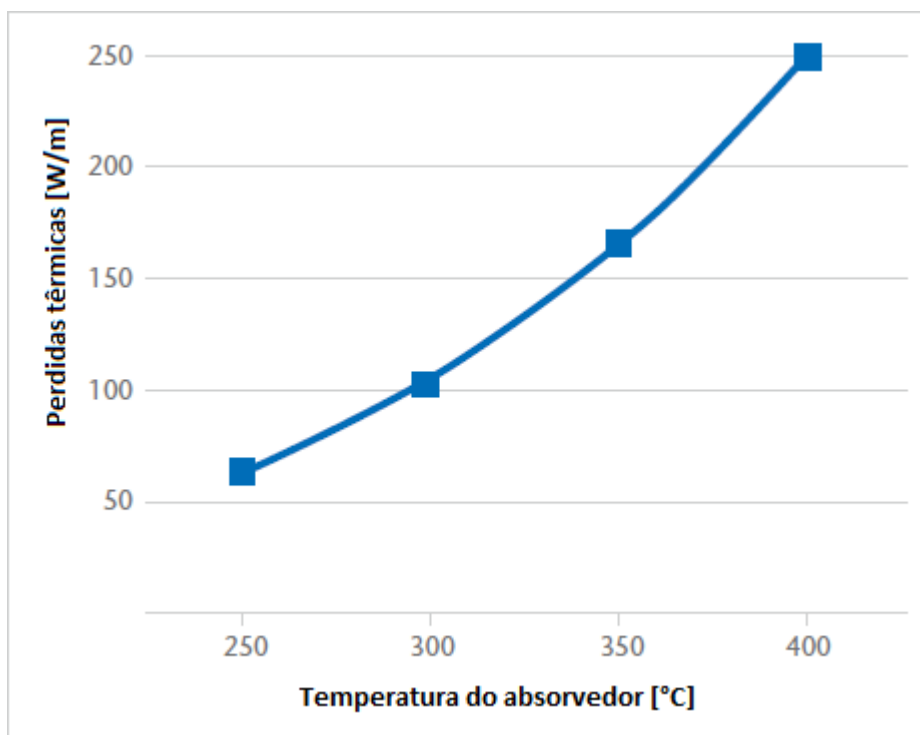


Figura 24. Gráfico das perdas térmicas do PTR 70

É preciso dizer que este tipo de coletores perde o vácuo entre o cristal e o tubo interior ao longo dos anos, aproximadamente 25 anos de uso segundo o fabricante, e enchendo-se de hidrogeno (isto é conhecido como "fenômeno do tubo quente" ou "*hot tube phenomenon*"), o que aumenta as perdas térmicas até 6 vezes. Este tipo de absorvedores está equipado com um sistema de faz que se isso acontece, uma cápsula com um gás nobre abre-se, enchendo o espaço entre tubo e o cristal com o gás e

diminuindo as perdas de novo ao nível do vácuo. No presente trabalho, o aumento da perda devida a esse efeito é desprezado.

Tabela 5. Especificações técnicas do tubo SCHOTT PTR 70. [28][29]

SCHOTT PTR 70	
Tamanho	Comprimento: 4060 mm a 20°C Zona ativa: >96,7% do comprimento na temperatura de trabalho (>300°C)
Absorvedor	Diâmetro exterior: 0,07 m (70 mm) Diâmetro interior: 0,066 m (66 mm) Tipo de metal: Alumínio AA1050 ou similar Condutividade térmica: $k_{abs} = 14,8 + 0,0153 \cdot T_{abs}$ [W/m·°C] Absorbância solar: $\alpha_{ISO} \geq 95,5\%$ Emissividade térmica (a 400°C aprox.): $\varepsilon \leq 9,5 \%$
Cristal	Vidro borossilicato Diâmetro exterior: 0,12 m (120 mm) Diâmetro interior: 0,115 m (115 mm) Condutividade térmica: $k_c = 1,11$ W/m·°C Antirreflexo Transmitância: $\tau \geq 96,5\%$
Vazio	Pressão $\leq 10^{-3}$ mbar (1000 Pa)
Pressão de trabalho	≤ 40 bar (absoluta)

3.2.3 Fluido de trabalho

O fluido de trabalho utilizado no estudo é o ar. No software de simulação, tem as seguintes características:

- Ar tratado como gás ideal
- $T_{entrada} = 20$ °C

3.3 LOCALIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

É importante a localização do equipamento no estudo, porque é o que condiciona a radiação incidente sobre ele.

Neste projeto, o equipamento ficaria na cidade de Brasília (Brasil, 15°47'38''S, 47°52'58''O). Na web do *Atmospheric Science Data Center* da NASA [40], é possível achar os valores da radiação solar média diária (calculada ao longo de um ano):

- $I = 5,43 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$

O valor dado mostra a energia incidente num dia num m^2 de superfície. No obstante, para as simulações no ANSYS, é preciso ter valores de radiação em W/m^2 .

Foram facilitados ao aluno dados de medições de radiação direta solar na cidade de Brasília em W/m^2 . Para as simulações são usados o valor máximo obtido e a metade dele:

- $I_d = 956 \text{ W/m}^2$
- $I_{d2} = 478 \text{ W/m}^2$

3.4 DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO NO ABSORVEDOR

O tubo utilizado é composto de um absorvedor e um vidro que cobre ele. O vidro origina uma pequena divergência dos raios solares além de absorver parte da energia que passa por ele. Do mesmo modo, os espelhos do coletor absorvem parte da energia que entra neles e possíveis imperfeições na superfície podem fazer que alguns raios não sejam refletidos em direção ao foco da parábola.

No projeto, foram consideradas as seguintes condições:

- O vidro não muda a direção dos raios de luz
- A transmitância do vidro é $\tau = 96,5\%$ (o vidro absorve um 3,5% da radiação)
- A refletância da parábola é $\varphi = 94\%$ (um 6% dos raios entrantes são absorvidos ou mal refletidos)

Aplicando essas condições, o efeito do vidro e do coletor no estudo da radiação é reduzido à aplicação de um coeficiente à energia que passa por eles.

Dividiu-se o absorvedor em três zonas, segundo a Fig. (25). Cada uma destas zonas recebe uma radiação diferente: radiação direta, radiação difusa e radiação concentrada.

Na zona de radiação direta, os raios solares incidem de forma normal sobre a horizontal sobre o tubo. Isso faz que o ângulo dos raios solares respeito da superfície seja variável e que toda a superfície do tubo não receba a mesma quantidade de radiação. A radiação sobre essa zona é afetada pela transmissividade do vidro.

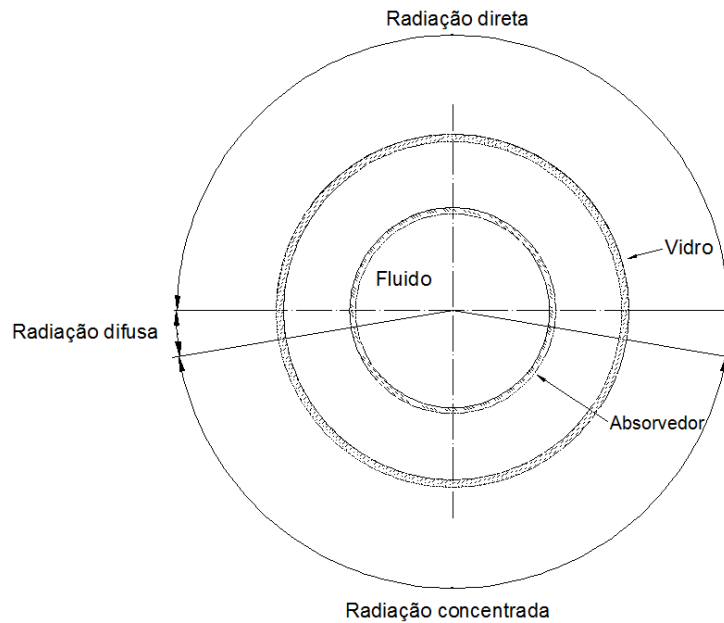


Figura 25. Esquema das radiações incidentes sobre o tubo absorvedor.

A zona de radiação concentrada é a radiação refletida pelo coletor sobre o tubo. A energia total transmitida nessa superfície é igual á recebida pelo coletor. A forma da parábola faz que a potencia não seja uniforme sobre toda a zona, mas neste caso os raios refletidos sim que incidem sobre a superfície de forma normal. A radiação sobre essa zona é afetada pela transividade do vidro e pela refletância do coletor.

Na zona de radiação difusa não tem incidência de raios solares diretos nem refletidos pela parábola, só raios refletidos pelos objetos ao redor do coletor.

Também se teve em conta que nem todo o absorvedor recebe radiação na direção axial, sendo a parte ativa dele um 96,7%. Conseqüentemente, existe uma zona de 67 mm em cada lado do absorvedor que não recebe radiação, mas que perde calor devido ás perdas térmicas.

A Fig. (26) é um esquema do tubo usado na simulação.



Figura 26. Esquema da parte ativa do tubo absorvedor.

3.4.1 Radiação concentrada

Na zona de radiação concentrada incide a radiação refletida pelos espelhos do coletor sobre a superfície inferior do tubo. O ângulo de abertura da zona de concentrada é o mesmo que o de abertura do coletor: 161° .

Os raios solares refletidos incidem de forma normal sobre a superfície do tubo, mas a forma de parábola do coletor faz que a radiação na superfície não seja uniforme.

O análise numérico é baseado no fato de que a quantidade de energia total incidente sobre a superfície do tubo é a mesma que a incidente sobre a projeção do tubo no plano horizontal, mas a potencia depende da relação das áreas do tubo e da projeção.

Desse modo, usando a figura (27), pode ser obtida a radiação incidente em cada ponto do absorvedor em função do ângulo ϕ .

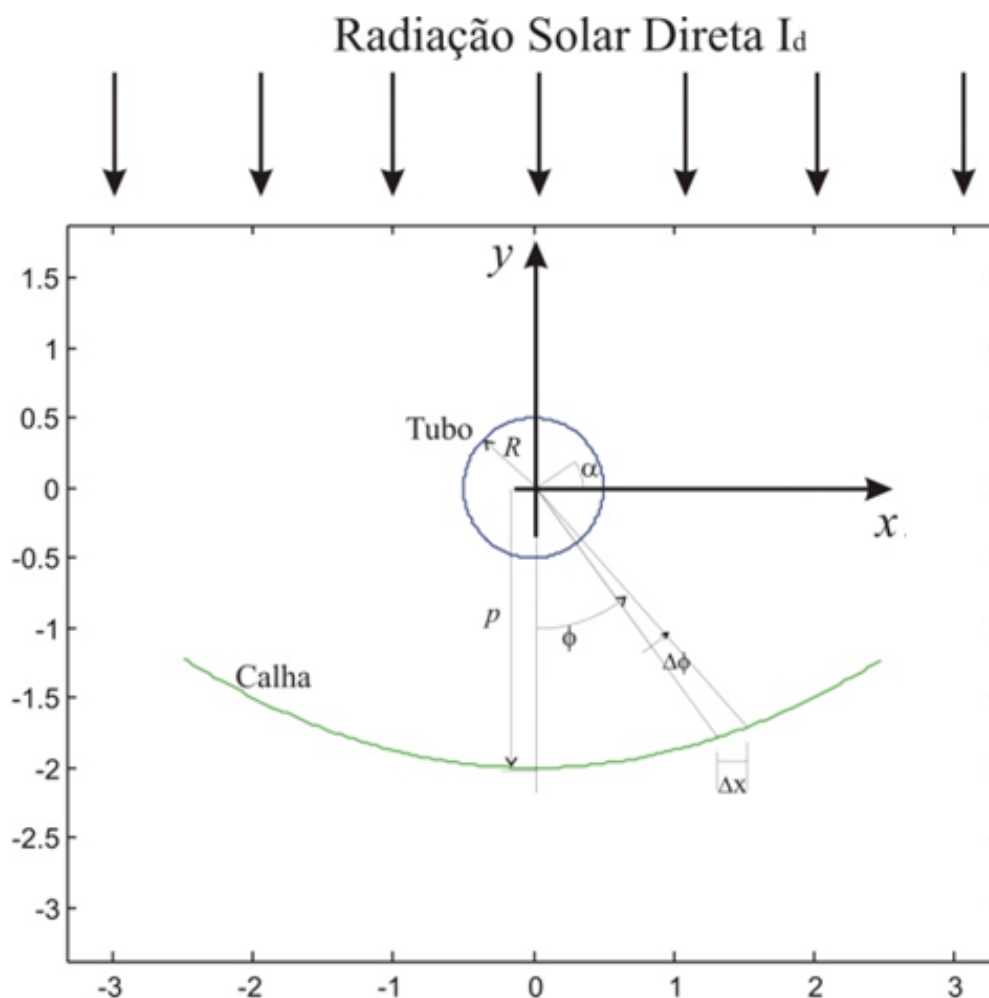


Figura 27. Esquema de cálculo das radiações.

A equação da parábola é dada por:

$$y(x) = a \cdot x^2 - \frac{1}{4 \cdot a} \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{4p} \quad (2)$$

A relação entre a radiação concentrada e incidente é proporcional á relação entre a área da projeção no plano horizontal e a área do tubo (ou num estudo 2D, a relação entre Δx e $R \cdot \Delta \phi$). Fazendo o limite quando $\Delta \phi \rightarrow 0$, é obtido o valor da radiação em função do ângulo ϕ , como mostra a Eq. (3):

$$\frac{I_c(\phi)}{I_d} = \lim_{\Delta \phi \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{R \Delta \phi} = \frac{1}{R} \frac{dx}{d\phi} = \frac{1}{R} \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^{-1} \quad (3)$$

I_c é a radiação concentrada sobre o tubo. Olhando a fig. (27) e usando a equação da parábola (Eq. 1) é obtido o valor de ϕ (Eq. 4):

$$\phi = \arctan\left(\frac{x}{-y}\right) = \arctan\left(\frac{4ax}{1-4a^2x^2}\right) \quad (4)$$

O ângulo é derivado em função de x e introduzido na Eq. (3):

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{4a}{1+4a^2x^2} \quad (5)$$

$$\left(\frac{d\phi}{dx}\right)^{-1} = \frac{1}{4a} + ax^2 \quad (6)$$

$$\frac{I_c(\phi)}{I_d} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{4a} + ax^2 \right) \quad (7)$$

Agora é preciso procurar o valor de x em função de ϕ . Isso é feito com as Eq. (4) e (1), substituindo y pela equação da parábola e clareando a variável x é obtido:

$$x(\phi) = \frac{1}{2 \cdot |a| \cdot \text{sen}(\phi)} - \frac{\text{cot}(\phi)}{2 \cdot a} \quad (8)$$

Substituindo na Eq. (7), é obtida a radiação concentrada em função de ϕ (Eq. 9):

$$I_c(\phi) = \frac{I_d}{R} \left(\frac{1}{4 \cdot a} + a \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot |a| \cdot \text{sen}(\phi)} - \frac{\text{cot}(\phi)}{2 \cdot a} \right)^2 \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

Essa é a equação que será utilizada como condição de contorno na zona de radiação concentrada.

3.4.2 Radiação direta

Na zona de radiação direta, o tubo recebe a radiação que vem diretamente do sol. Como já foi dito, nessa área os raios solares não são normais á superfície, o que faz que não toda a superfície receba a mesma quantidade de radiação.

O analise numérico feito para essa área segue os mesmos princípios do que o analise da radiação concentrada, relacionando o Δx com a longitude do arco e fazendo um limite quando $\Delta\phi \rightarrow 0$. Neste caso é considerado o Δx na parte superior do tubo. O ângulo é corrigido para que 0° fique sobre a horizontal, usando-se o ângulo α .

$$\frac{I_{dt}(\alpha)}{I_d} = \lim_{\Delta\phi \rightarrow 0} \frac{-\Delta x}{R\Delta\alpha} = -\frac{1}{R} \frac{dx}{d\alpha} = -\frac{1}{R} \left(\frac{da}{dx}\right)^{-1} \quad (10)$$

$$\alpha = \phi - \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

I_{dt} é o valor da radiação direta sobre o absorvedor e que para $\phi \geq \pi/2$, $\Delta x \leq 0$.

O valor de α é obtido, derivado e substituído na Eq. (11) do mesmo modo que na radiação concentrada:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{R^2-x^2}}{x}\right) \quad (12)$$

$$\frac{d\alpha}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{R^2-x^2}} \quad (13)$$

$$\left(\frac{da}{dx}\right)^{-1} = -\sqrt{R^2-x^2} \quad (14)$$

$$\frac{I_{dt}(\alpha)}{I_d} = \frac{\sqrt{R^2-x^2}}{R} \quad (15)$$

Da equação (12) é obtido x em função de α e substituído na eq. (15):

$$x(\alpha) = \frac{R}{\sqrt{\tan^2(\alpha)+1}} \quad (16)$$

$$I_{dt}(\alpha) = \frac{I_d \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{\sqrt{\tan^2(\alpha)+1}}\right)^2}}{R} \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

A equação (17) é a que vai ser usada na zona de radiação direta.

3.4.3 Radiação difusa

Nas zonas de radiação difusa, o tubo só recebe raios de luz refletidos pelos objetos ao redor do coletor. A energia recebida pelo coletor nesses raios é praticamente nula, o que faz que nesse trabalho seja considerado que nas zonas de radiação difusa a radiação recebida é 0.

3.5 PERDAS NO SISTEMA

No sistema estudado podem-se distinguir facilmente 2 tipos de perdas:

- Perdas térmicas: As perdas térmicas são localizadas no absorvedor e são devidas á diferencia de temperatura entre o absorvedor e o ambiente. Tem 2 tipos de perdas térmicas: Por radiação e por convecção (também um pouco de condução no suporte dos tubos, mas é desprezada).
- Perdas óticas: devidas á capacidade de absorção, transmitância e refletância dos componentes.

3.5.1 Perdas óticas

As perdas óticas são consideradas no trabalho aplicando ás distintas radiações entrantes os coeficientes de absorbância, transmitância e refletância segundo seja necessário:

- Zona concentrada: absorbância (0,955), transmitância (0,965) e refletância (0,94)
- Zona direta: absorbância (0,955), transmitância (0,965)

3.5.2 Perdas térmicas

O absorvedor é um corpo quente num ambiente mais frio e como tal transmite energia para ele. Essa energia são as chamadas perdas térmicas no absorvedor.

O absorvedor é um circuito térmico com a seguinte configuração (fig. 28):

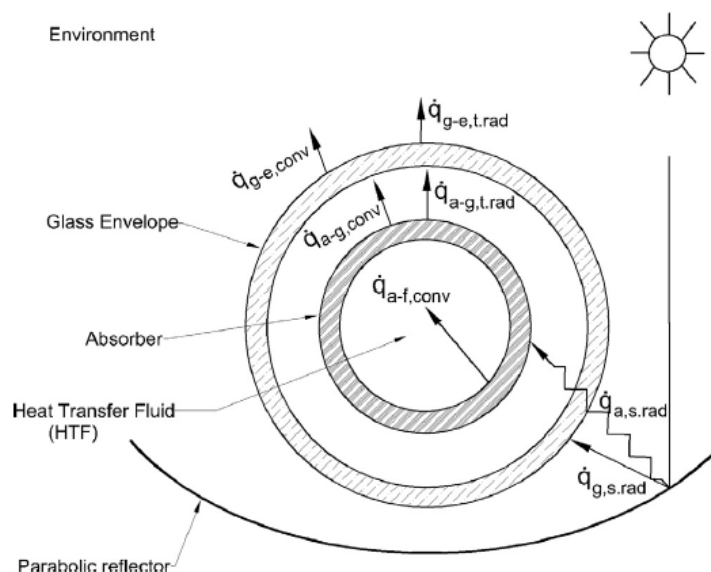


Figura 28. Transmissões térmicas no sistema.

O fluxo de calor a través do circuito poderia ser calculado utilizando os dados da geometria do tubo e dos materiais facilitados pelo fabricante.

Pode-se distinguir 2 tipos de perdas térmicas: perdas por convecção com o ambiente e perdas por radiação. As perdas por convecção poderiam ser por convecção forçada ou natural. Na zona entre o tubo e o vidro deveria ser considerado que não tem um vácuo perfeito (pero que tem um pouco de convecção). Do mesmo modo, nas zonas de suporte do tubo, as perdas seguem outro circuito, o que faz que o estudo seja mais laborioso.

Burkholder &Kutscher, no documento *Heat Lost Testing of SCHOTT'S 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver* (NREL, 2009) calcularam experimentalmente as perdas térmicas num coletor do tipo usado numa temperatura ambiente de 23-25°C. No experimento é considerada convecção natural. As perdas óticas não foram estudadas. No estudo feito por eles, todas as perdas (por convecção e por radiação) são simplificadas na eq. (18):

$$P = 0,141 \cdot T_{abs,^{\circ}C} + (6,48 \cdot 10^{-9}) \cdot T_{abs,^{\circ}C}^4 \quad [W/m] \quad (18)$$

Dividindo a eq. (19) pela longitude da circunferência exterior, são obtidas as perdas em W/m²:

$$P = \frac{0,141 \cdot T_{abs,^{\circ}C} + (6,48 \cdot 10^{-9}) \cdot T_{abs,^{\circ}C}^4}{2\pi R_{abs}} \quad [W/m^2] \quad (19)$$

A eq. (19) é a que vai ser aplicada no estudo para o calculo das perdas, que são aplicadas em toda a superfície, incluindo as zonas de suporte do absorvedor.

3.6 MODELAGEM DO SISTEMA

Uma modelagem simplificada do sistema foi modelada no software Catia com o fim de inserir ele no ANSYS para fazer as simulações.

Na modelagem utilizada, o tubo absorvedor foi simplificado. O tubo foi considerado com diâmetro exterior e interior constantes dos valores do absorvedor (incluindo as zonas de suporte). O vidro não foi modelado, dado que seu efeito é simplesmente aplicado no coeficiente de transmitância.

A modelagem foi dividida em 5 partes diferentes:

- Parte radiação direta
- Parte radiação concentrada
- Parte radiação difusa
- Partes dos suportes
- Fluido

A figura é dividida nessas partes para facilitar a colocação das condições de contorno no ANSYS. O fluido é incluído como um cilindro dentro do tubo.

Os coletores EuroTrough completos são formados de módulos de 12 m de comprimento aproximadamente, atingindo um total de 100 ou 150m segundo o modelo. No presente trabalho as simulações são feitas com um absorvedor de 4 m, um coletor de 12 m (3 absorvedores) e 2 coletores de 12 m (6 absorvedores). Entre os absorvedores não é considerada nenhuma resistência de contato.

As medidas usadas na modelagem são:

- $D_{\text{ext}} = 0,07 \text{ m}$
- $D_{\text{int}} = 0,66 \text{ m}$
- Amplitude da zona de radiação concentrada = 161° (simétrica respeito ao plano vertical axial)
- $D_{\text{fluido}} = 0,66 \text{ m}$

Os comprimentos das diferentes partes são os mostrados no capítulo 3.4. O comprimento do fluido é igual ao comprimento total do absorvedor, segundo a análise pode ser: $L_{\text{fluido, abs}} = 4,060 \text{ m}$, $L_{\text{fluido, coletor}} = 12,180 \text{ m}$ e $L_{\text{fluido 2 coletores}} = 24,36 \text{ m}$.

A fig. (29) mostra a modelagem do tubo absorvedor no software Catia (adaptado para facilitar a visão das partes). Na figura falta o fluido, que iria colocado dentro do absorvedor e vários absorvedores em linha como já foi dito.

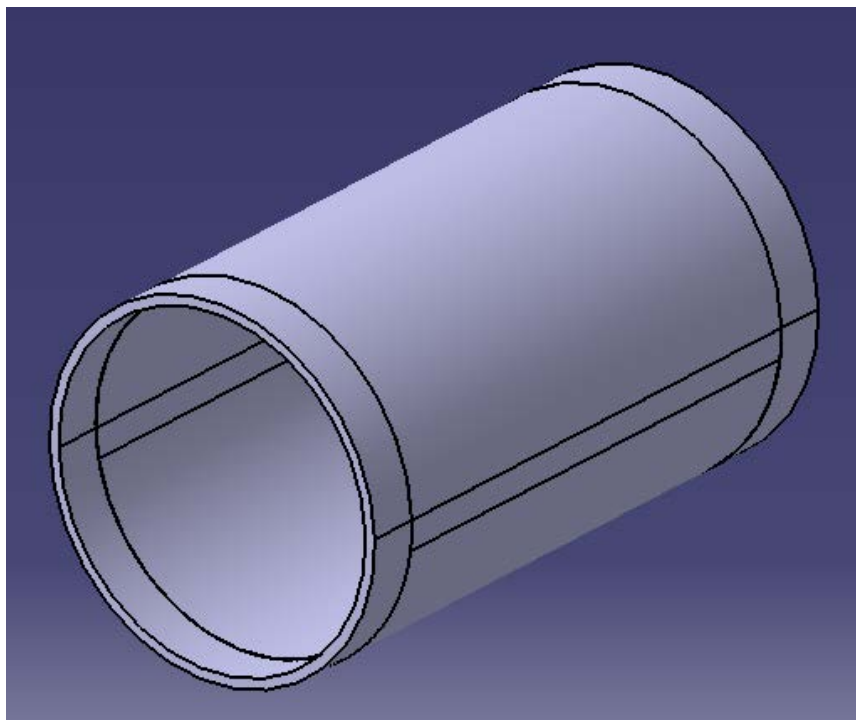


Figura 29. Modelagem do absorvedor no Catia.

3.7 CONFIGURAÇÃO DO ANSYS

Depois da modelagem dos tubos no Catia, a geometria é inserida no ANSYS com o objeto de fazer as simulações necessárias. Para facilitar o trabalho, o melhor é inserir todas as condições de contorno (incluindo as perdas) e só trocar os valores precisos em cada simulação, como o caudal, etc.

A modelagem feita anteriormente no Catia pode ser importada no ANSYS usando o modulo *Geometry* (unicamente é preciso guardar o arquivo com formato .igs no Catia). Uma vez é importado, é preciso fazer a malha do projeto e colocar as condições de contorno. As simulações são feitas com o modulo CFX.

É importante precisar que para a simulação ser correta, o centro da entrada do tubo deve ficar sobre a origem e a cara da entrada sobre o plano XY.

3.7.1 Configuração da Malha

Uma vez importada a modelagem do absorvedor no modulo *Geometry*, é criada a malha do sistema usando o modulo *Mesh*. Sendo peças com dimensões pequenas e muitas curvas, é preciso fazer uma malha com muitas divisões, conseguindo superfícies mais suaves.

Neste ponto também foram criados grupos das superfícies na superfície do tubo:

- Com radiação direta
- Com radiação concentrada
- Com radiação difusa + zonas sem radiação

A seguinte figura mostra a configuração de malha utilizada (Fig. 30). No anexo 7.6 pode se encontrar uma imagem da malha:

Defaults		Patch Conforming Options	
Physics Preference	Mechanical	Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Relevance	0	Advanced	
Sizing		Shape Checking	Standard Mecha...
Use Advanced Size Function	Off	Element Midside Nodes	Program Control...
Relevance Center	Coarse	Straight Sided Elements	No
<input type="checkbox"/> Element Size	Default	Number of Retries	Default (4)
Initial Size Seed	Active Assembly	Extra Retries For Assembly	Yes
Smoothing	High	Rigid Body Behavior	Dimensionally R...
Transition	Slow	Mesh Morphing	Disabled
Span Angle Center	Fine	Defeaturing	
Minimum Edge Length	2,e-003 m	Pinch Tolerance	Please Define
Inflation		Generate Pinch on Refresh	No
Use Automatic Inflation	None	Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Inflation Option	Smooth Transition	<input type="checkbox"/> Defeaturing Tolerance	Default
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272	Statistics	
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5	<input type="checkbox"/> Nodes	485437
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2	<input type="checkbox"/> Elements	105192
Inflation Algorithm	Pre	Mesh Metric	None
View Advanced Options	No		

Figura 30. Configuração da malha.

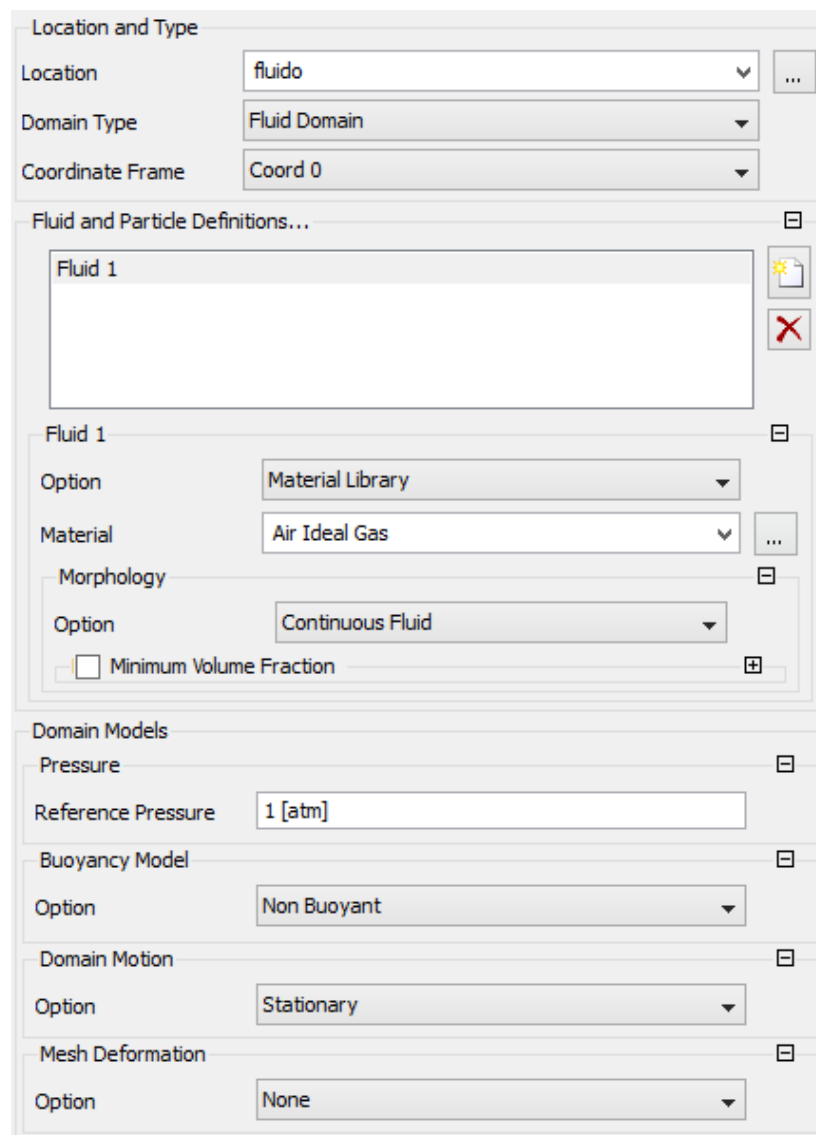
3.7.2 Configuração do CFX

Uma vez temos a malha, as condições de contorno são colocadas no modulo CFX, o utilizado para fazer as simulações.

3.7.2.1 Domínios

Primeiro foram criados os domínios ou *domains*:

- **Fluido:** localizado no cilindro de fluido, é do tipo *fluid domain*. Como material é escolhido ar como gás ideal. O modelo de turbulência utilizado nas simulações é o K-Epsilon, mas também vai ser feito um estudo com o modelo SST (*Shear Stress Transport*) com o objetivo de ver as diferenças. As fig. (31) e (32) mostras as configurações do domínio.



The image shows the 'Basic Settings' dialog box for a fluid domain in CFX. The settings are organized into several sections:

- Location and Type:**
 - Location: fluido
 - Domain Type: Fluid Domain
 - Coordinate Frame: Coord 0
- Fluid and Particle Definitions...**
 - Fluid 1: (empty list)
- Fluid 1:**
 - Option: Material Library
 - Material: Air Ideal Gas
 - Morphology:
 - Option: Continuous Fluid
 - Minimum Volume Fraction
- Domain Models:**
 - Pressure:
 - Reference Pressure: 1 [atm]
 - Buoyancy Model:
 - Option: Non Buoyant
 - Domain Motion:
 - Option: Stationary
 - Mesh Deformation:
 - Option: None

Figura 31. Configuração do domínio fluido na janela *Basic Settings*.

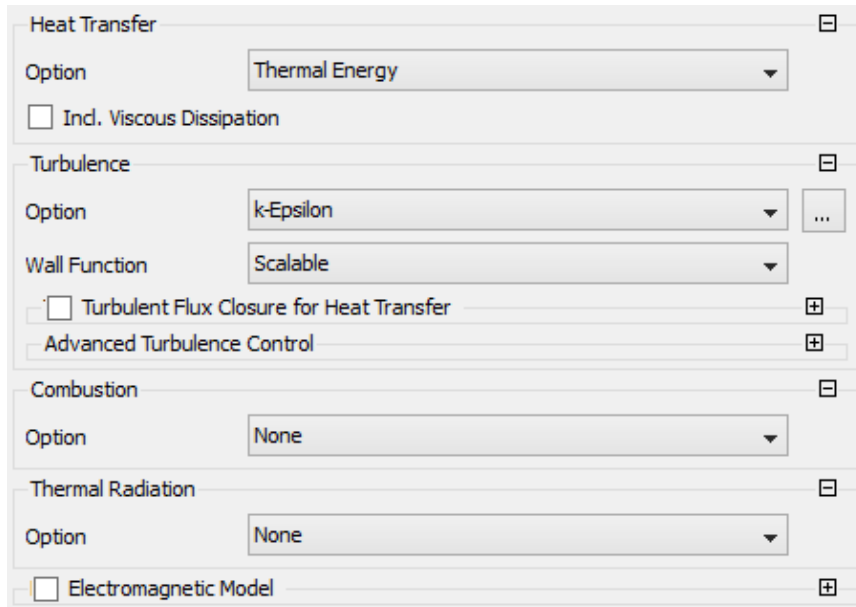


Figura 32. Configuração do domínio fluido na janela *Fluid Models*.

- **Sólido:** localizado no resto de peças, é do tipo *solid domain*. Como material é escolhido alumínio. As fig. (33) e (34) mostras as configurações do domínio.

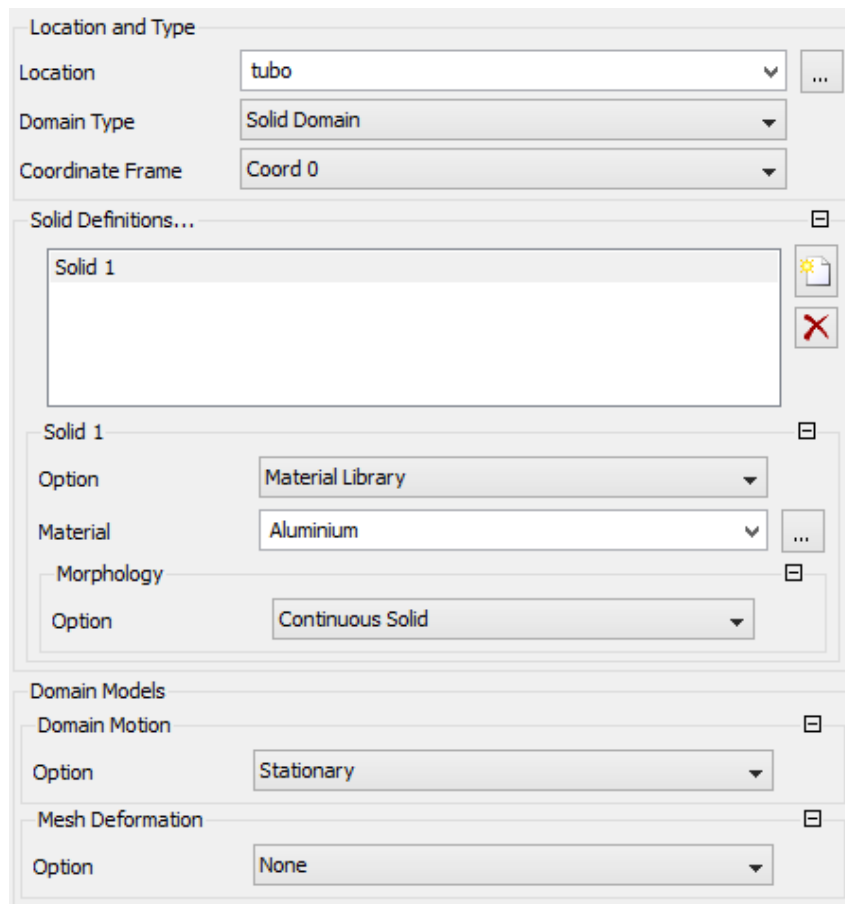


Figura 33. Configuração do domínio sólido na janela *Basic Settings*.

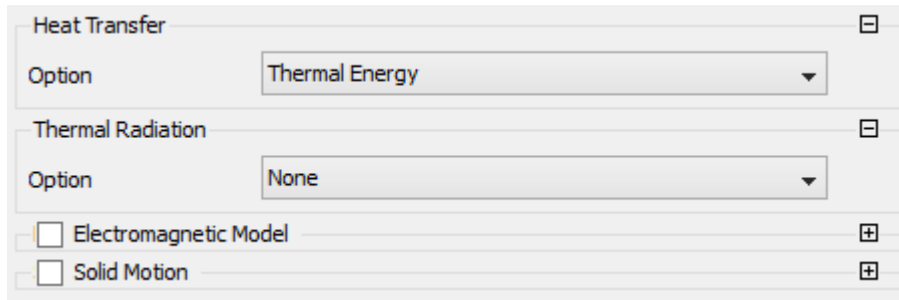


Figura 34. Configuração do domínio sólido na janela *Solid Models*.

3.7.2.2 Interfaces

Depois dos fluidos, foram criadas interfaces entre os diferentes corpos:

- **Entre as peças do tubo:** como o tubo foi criado em peças separadas, as temos que unir para a simulação mediante interfaces. Todas as peças são do mesmo material e não é considerada nenhuma resistência de contacto entre elas, o que faz que se comportem como um sólido contínuo. As interfaces entre os 3 absorvedores são também feitas assim. Na janela *Additional Interface Models* é preciso ativar a opção *Heat Transfer* e colocar *Conservative Interface Flux* (Fig. 34).

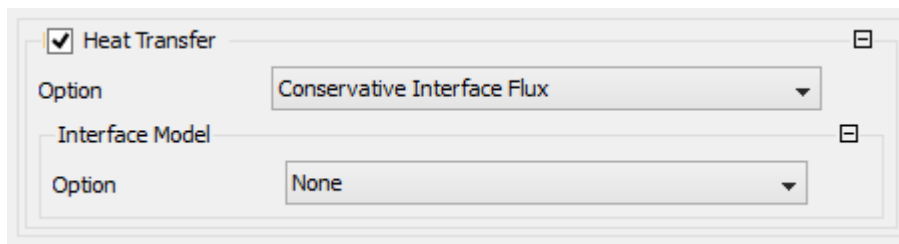


Figura 35. Configuração da interface entre peças no tubo na janela *Additional Interface Models*.

- **Entre o fluido e o tubo:** A interface entre o fluido e o tubo também é uma interface situada entre a parede do fluido e as paredes interiores das peças do tubo. É preciso ativar a opção *Heat Transfer* e *Conservative Interface Flux* como nas interfaces entre o tubo. O programa detecta automaticamente que sendo uma interface entre um fluido em movimento e um sólido, vai ter transferência de calor por convecção, e calcula automaticamente todos os parâmetros necessários.

3.7.2.3 Condições de contorno

Depois de criar as interfaces entre os corpos, são introduzidas as condições de contorno.

No domínio tubo todas as condições de contorno são do tipo *wall* (parede) e na janela *Boundary Details* é escolhida a opção *Heat Flux*. A equação da radiação recebida por cada superfície é colocada no apartado *Heat Flux In*. No capítulo 3.7.2.4 estão detalhadas as equações utilizadas.

No domínio fluido tem 2 condições de contorno distintas:

- **Tipo *Inlet*:** situada numa base do cilindro, é a entrada do fluido. A figura (35) mostra a configuração da janela *Boundary Details*. O *mass flow* é um dos parâmetros que serão alterados no estudo do coletor.

The image shows a software interface for configuring an inlet boundary. It consists of four vertically stacked sections, each with a title and a collapse icon (a square with a minus sign) on the right. The sections are: 1. **Flow Regime**: Option dropdown set to 'Subsonic'. 2. **Mass And Momentum**: Option dropdown set to 'Normal Speed', and a text input field for 'Normal Speed' containing '0.05 [m s^-1]'. 3. **Turbulence**: Option dropdown set to 'Medium (Intensity = 5%)'. 4. **Heat Transfer**: Option dropdown set to 'Static Temperature', and a text input field for 'Static Temperature' containing '20 [C]'.

Figura 36. Configuração do *inlet* na janela *Boundary Details*.

- **Tipo *Outlet*:** Situada na base oposta á entrada, é a saída do fluido. Considerou-se que a pressão relativa na saída do tubo é 0 (não tem nada que impede a saída livre). A figura (35) mostra as configurações da janela *Boundary Details*.

The image shows a software interface for configuring an outlet boundary. It consists of three vertically stacked sections, each with a title and a collapse icon (a square with a minus sign) on the right. The sections are: 1. **Flow Regime**: Option dropdown set to 'Subsonic'. 2. **Mass And Momentum**: Option dropdown set to 'Average Static Pressure', a text input field for 'Relative Pressure' containing '0 [Pa]', and a text input field for 'Pres. Profile Blend' containing '0.05'. 3. **Pressure Averaging**: Option dropdown set to 'Average Over Whole Outlet'.

Figura 37. Configuração do *outlet* na janela *Boundary Details*.

3.7.2.4 Equações das radiações no CFX

Nas equações de contorno sobre o tubo é preciso inserir as equações obtidas anteriormente para o cálculo da radiação incidente em cada zona:

- Na zona de radiação direta:

$$I_{dt}(\alpha) = \frac{I_d \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{\sqrt{\tan^2(\alpha) + 1}}\right)^2}}{R} \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

- Na zona de radiação concentrada:

$$I_c(\phi) = \frac{I_d}{R} \left(\frac{1}{4*a} + a * \left(\frac{1}{2*|a|*sen(\phi)} - \frac{cot(\phi)}{2*a} \right)^2 \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

- Também é preciso usar a equação das perdas térmicas, dada no capítulo 3.5.2:

$$P = \frac{0,141 \cdot T_{abs,^\circ C} + (6,48 \cdot 10^{-9}) \cdot T_{abs,^\circ C}^4}{2\pi R_{abs}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (19)$$

Ao inserir as equações no CFX, temos que utilizar alguns coeficientes para corrigir o origem dos ângulos, evitar divisões entre 0 e manter a homogeneidade de unidades.

Como o CFX só permite uma condição de contorno por cada parede, temos que combinar na zona de radiações concentrada e direta as equações da radiação com a de perdas. Nestas zonas também são aplicados os coeficientes devidos às perdas óticas. Nas zonas de radiação difusa e de suporte só há perdas.

As anteriores equações são inseridas no CFX do seguinte jeito:

- Para a radiação direta:

$$\left(\text{absvancia} * \text{trans} * (\text{irradiancia}/\text{rad}) * \left(\left(\frac{\text{rad}}{\left(\left(\tan(\text{theta} + \pi) \right)^2 + 1 \right)^{1/2}} \right)^2 \right)^{1/2} \right) + \text{perdas}$$

- Para a radiação concentrada:

$$\left(\text{refl} * \text{trans} * \text{absvancia} * (\text{irradiancia}/\text{rad}) * \left(\left(\frac{1}{4*a} \right) + a * \left(\left(\frac{1}{0.000001*a + (2*a*\sin(\text{theta} + (\pi/2)))} \right) - \frac{1}{2*a} \right)^2 \right) \right) + \text{perdas}$$

- Para as perdas:

$$-kw * (ap * 0.141 * (T - \text{graus}) + (6.48 * 10^{-9}) * ((T - \text{graus})^4)) / (2 * \pi * \text{rad})$$

- As variáveis que aparecem são:

$$a = 1/(4*df)$$

df = distancia focal = 1,71 [m]

ap = 1 [K³] (parâmetro para manter as unidades)

graus = 273 [K]

irradiancia = irradiancias de calculo I_d e I_{d2}

kw = 1 [W/(K⁴*m⁻¹)] (parâmetro para trocar unidades)

rad = radio exterior do absorvedor = 0,035 [m]

refl = 0,94

trans = 0,965

absvancia = 0,955

Os parâmetros que podem ser manipulados com o fim de estudar o comportamento do coletor são o fluxo mássico, distancia focal, etc.

3.7.2.5 Configuração do solver

A configuração do solver é um parâmetro importante na hora da simulação. A fig. (35) mostra as configurações usadas na janela *Basic Settings* das simulações (o resto de janelas não foi alterado):

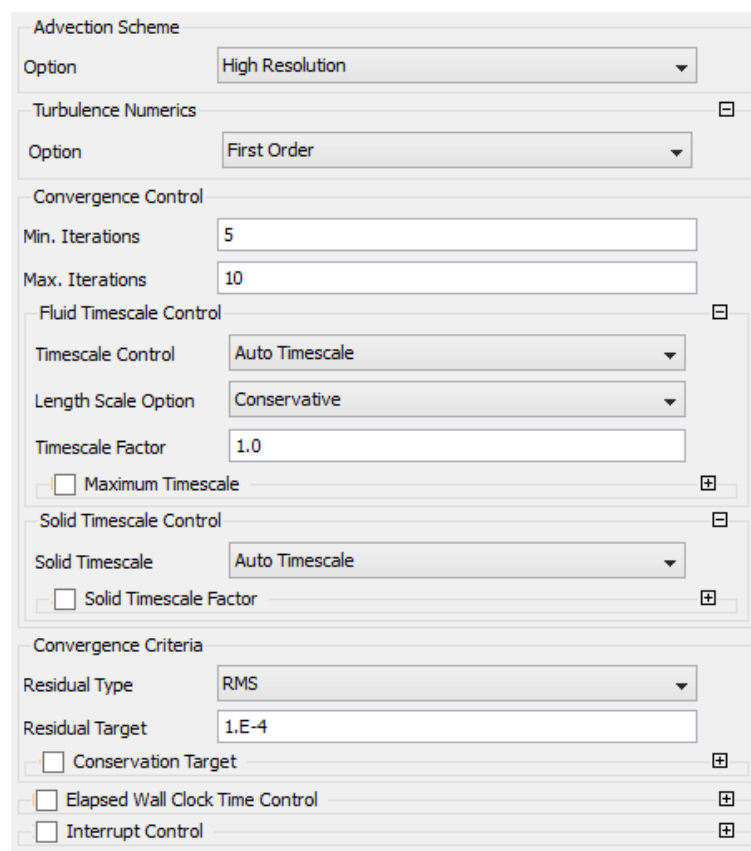


Figura 38. Configuração do *solver* na janela *Basic Settings*.

No numero de iterações usado, foram escolhidos os valores mostrados na figura, mas se é preciso resultados ainda mais exatos, o numero poderia ser aumentado.

4 RESULTADOS

4.1 RADIAÇÕES POR ZONA

Os valores de entrada dados para o calculo das radiações entrantes são os seguintes:

$$I_d = 956 \text{ W/m}^2$$

$$I_{d2} = 478 \text{ W/m}^2$$

$$R = 0,035 \text{ m}$$

$$D_{\text{focal}} = 1,71 \text{ m}$$

As equações (9) y (17) foram estudadas com ajuda do programa Matlab, e a radiação sobre o tubo têm os seguintes perfis para as radiações incidentes usadas:

Usando I_d (fig. 36):

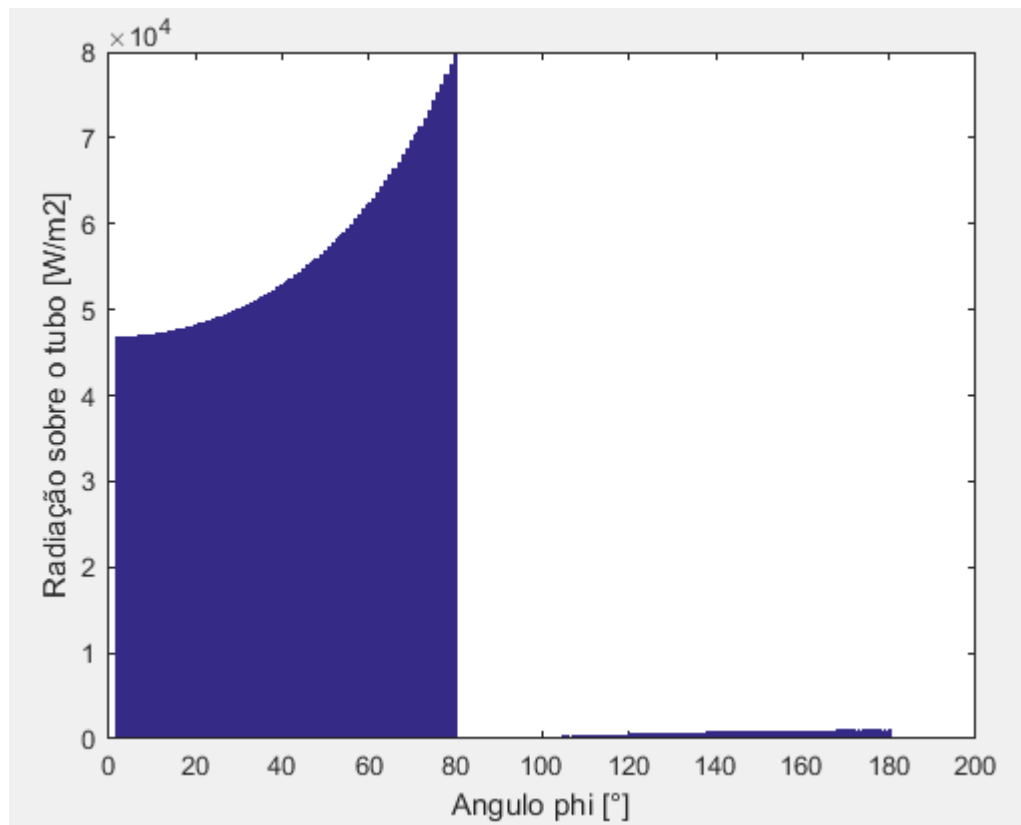


Figura 39. Perfil de radiações entrantes no tubo absorvedor com I_d (o problema é simétrico).

Usando I_{d2} (fig. 37):

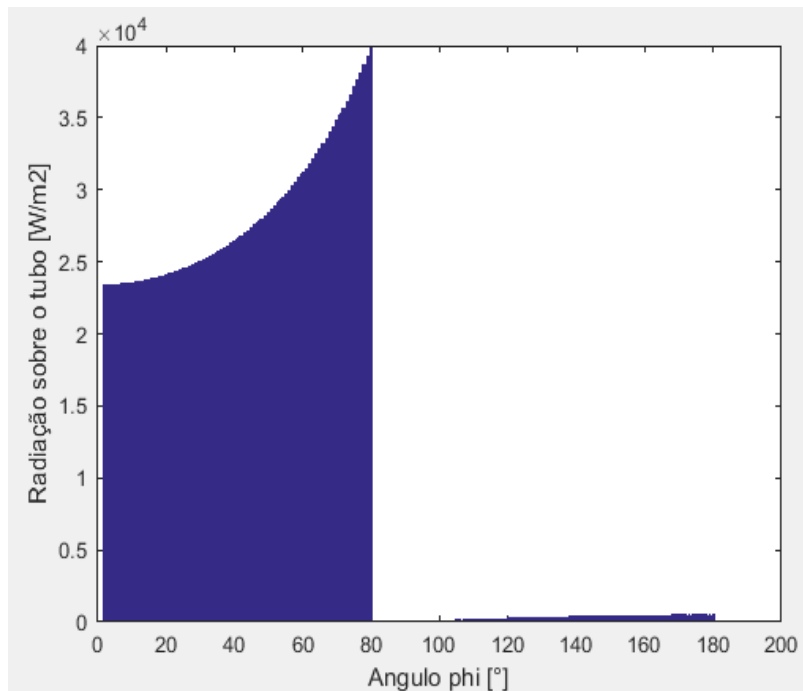


Figura 40. Perfil de radiações entrantes no tubo absorvedor com I_{d2} (o problema é simétrico).

Como se pode ver nas figuras, a radiação recebida pela zona de radiação direta é quase desprezível em comparação com a radiação recebida pela zona de concentrada.

Também dá para ver que na parte inferior do absorvedor tem uma zona sem radiação entrante. Essa zona é a devida à pequena sombra que o tubo projeta sobre a parábola de espelhos.

A figura (38) mostra qual é a forma do perfil de radiações sobre o tubo:

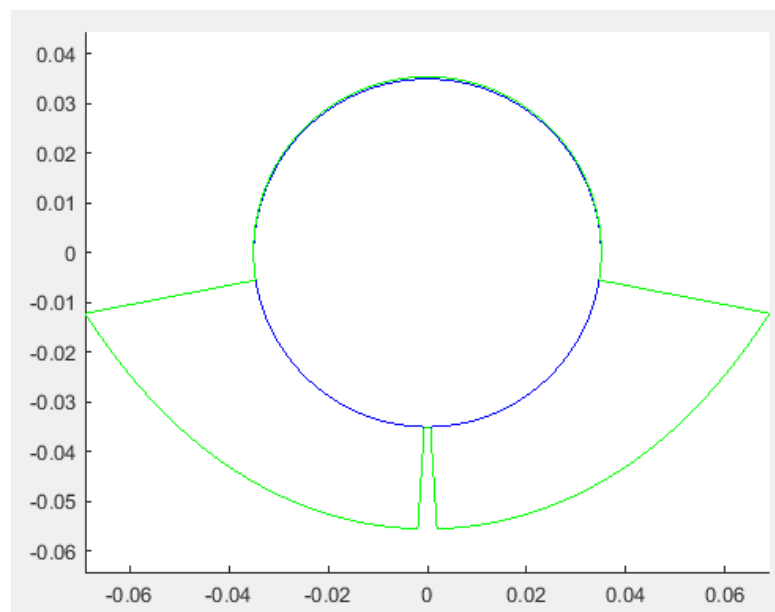


Figura 41. Perfil de radiações entrantes no tubo.

4.2 PERDAS TÉRMICAS

Usando a equação (19) é obtida a gráfica que relação o fluxo de energia com a temperatura da superfície do absorvedor (fig. 39):

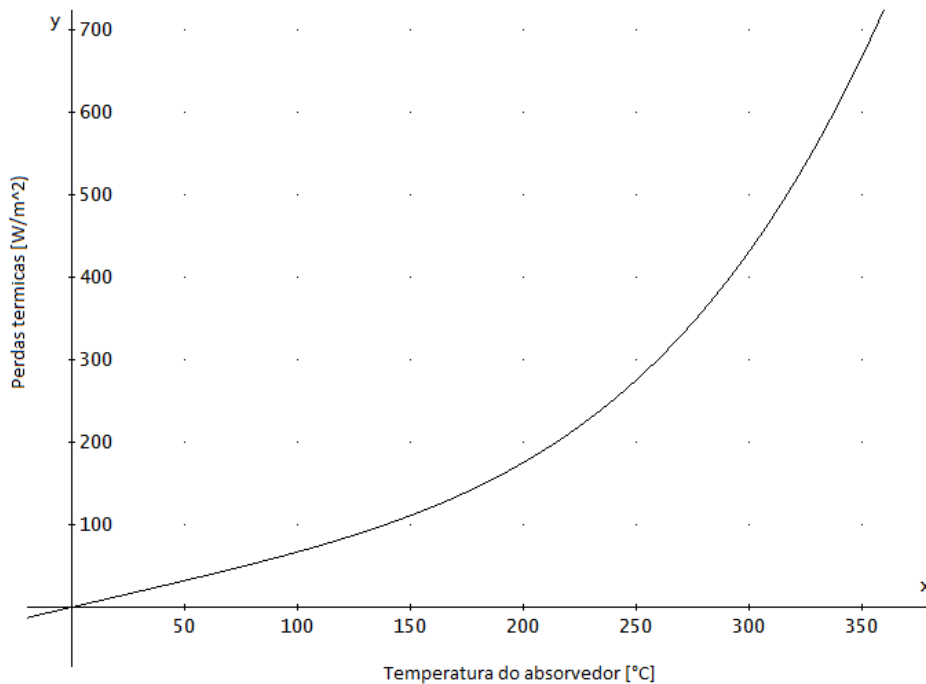


Figura 42. Gráfica das perdas térmicas no absorvedor.

Lembrar que as perdas térmicas mostradas na figura são a soma das perdas por radiação e por convecção natural com o ambiente, que é considerado com uma temperatura de 23-25°C.

Como se pode ver na figura, quanto maior temperatura no absorvedor mais temperatura no fluido, mas também mais perdas.

4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM ABSORVEDOR

A continuação são oferecidos os resultados das simulações para um solo absorvedor (4,060 m de comprimento).

A temperatura na superfície do tubo é dependente da velocidade de entrada colocada em cada momento além da radiação incidente utilizada, mas sempre segue um mesmo perfil, mostrado nas figuras (42) e (43).

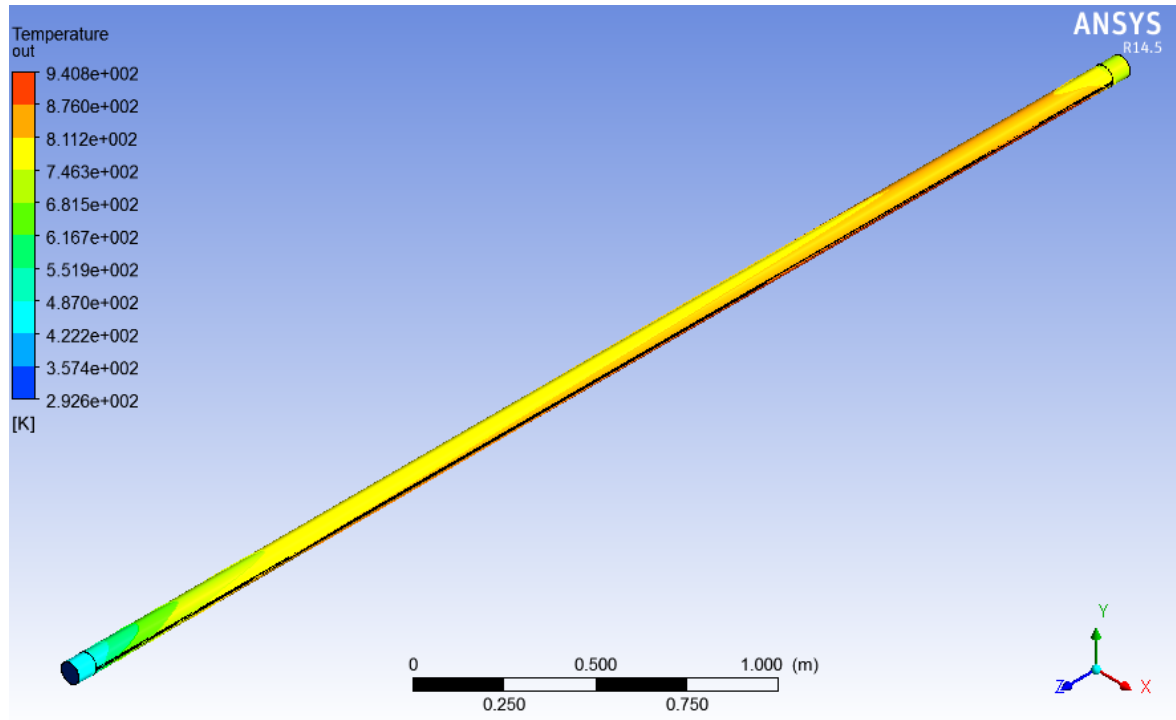


Figura 43. Imagem indicativa da temperatura na superfície do tubo (vista superior).

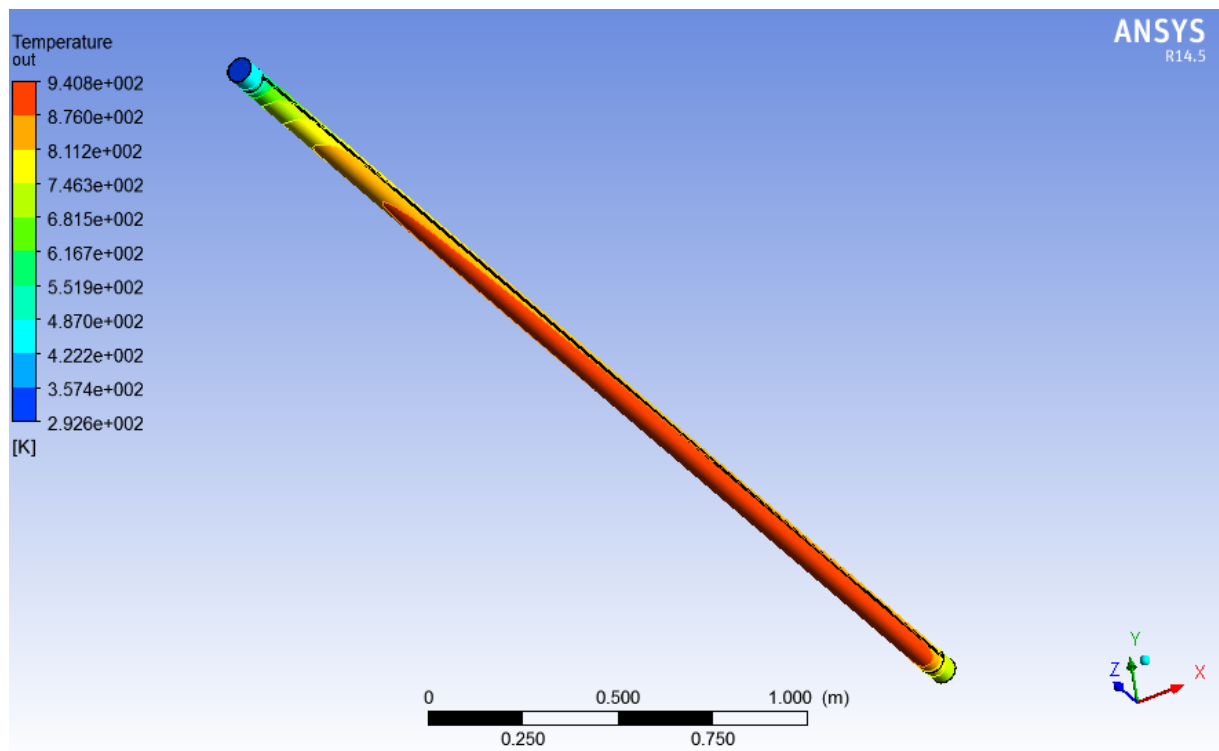


Figura 44. Imagem indicativa da temperatura na superfície do tubo (vista inferior).

4.3.1 Resultados com I_d

Para a radiação de $I_d = 956 \text{ W/m}^2$ são estudados os valores de velocidade e temperatura meios na saída. Para obter os resultados foi trocada a velocidade de entrada no tubo do jeito seguinte:

- Aumentos de 0,05 m/s até 0,5 m/s
- Aumentos de 0,5 m/s até 2 m/s
- Nas velocidades: 3 m/s, 5 m/s, 10 m/s e 20 m/s

A distribuição da temperatura sobre os tubos é mostrada nas figuras (56), (57) e (58):

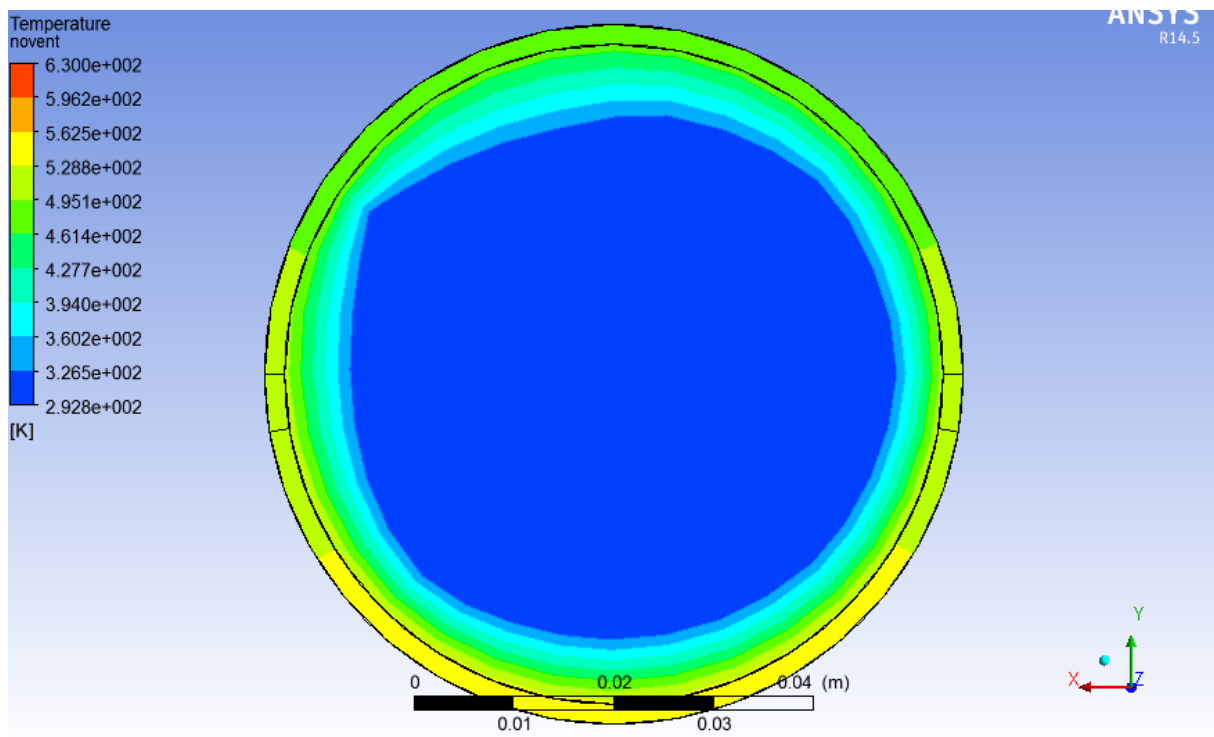


Figura 56. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 10% do total (0,406 m) para um fluxo mássico de 0,0824 kg/s.

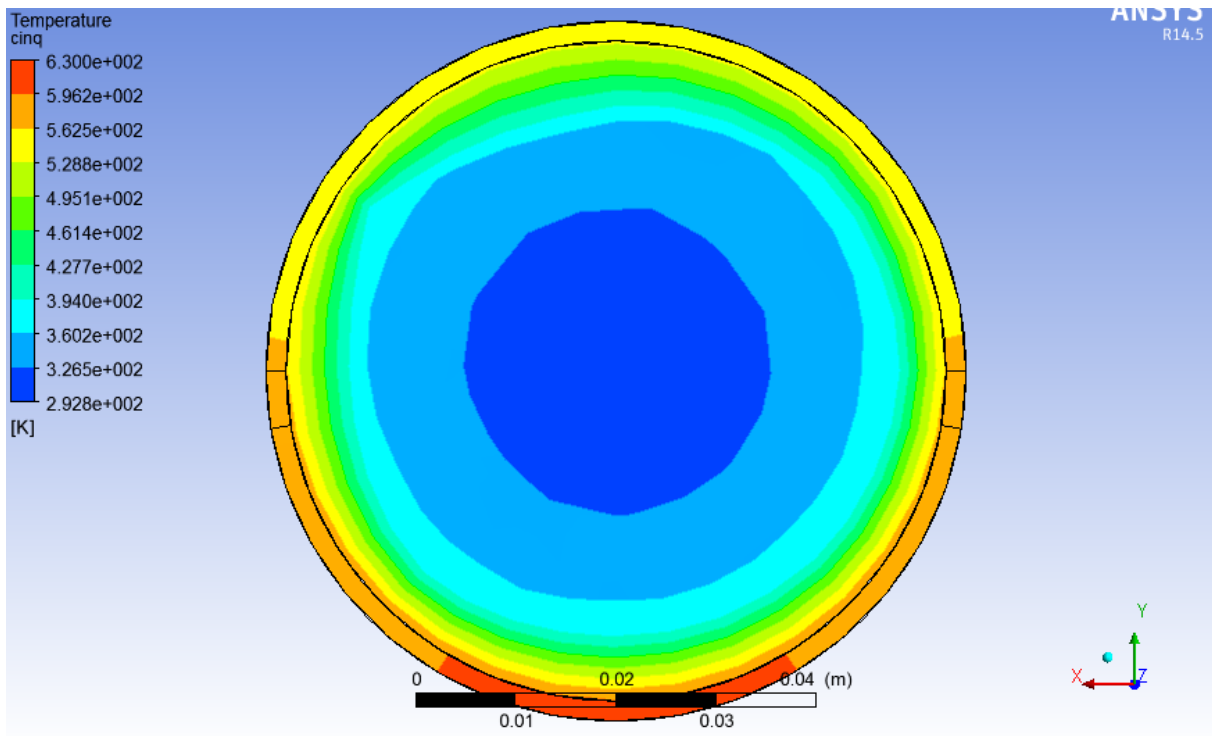


Figura 57. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 50% do total (2,03 m) para um fluxo mássico de 0,0824 kg/s.

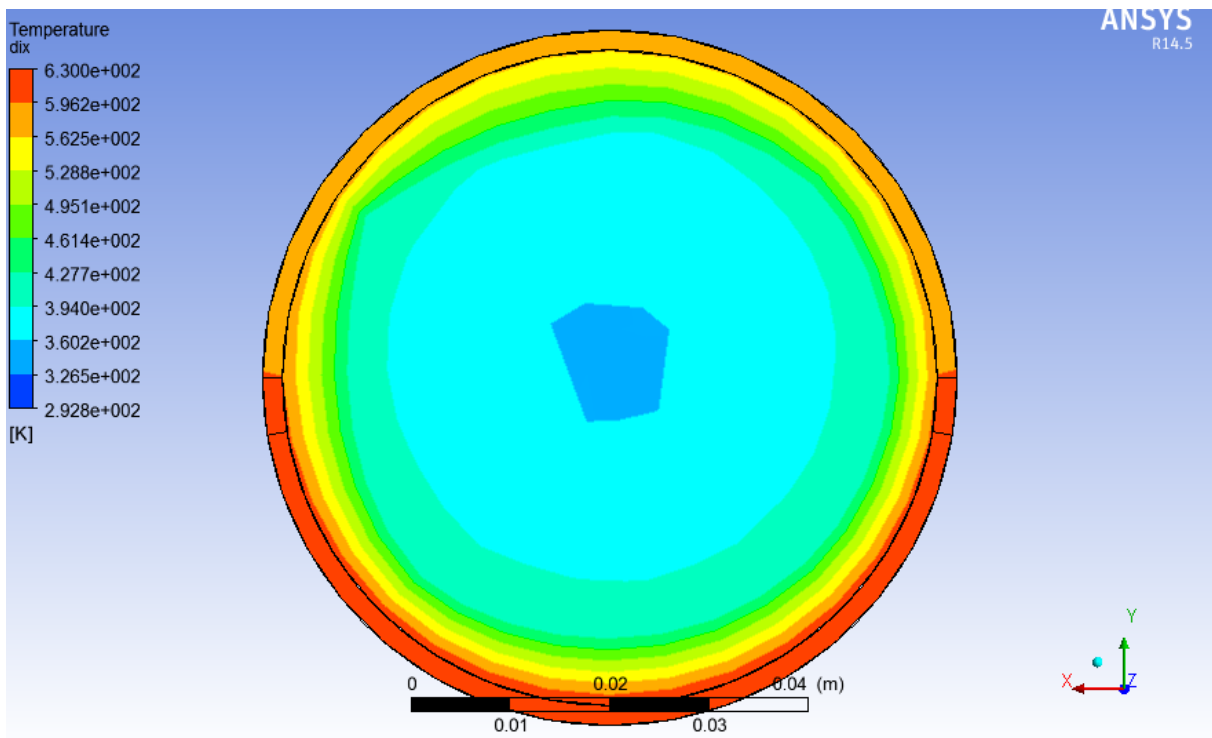


Figura 58. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 90% do total (3,654 m) para um fluxo mássico de 0,0824 kg/s.

Os dados obtidos são mostrados na gráfica seguinte (fig. 45). O resto de dados referentes a essa simulação podem ser consultados no anexo 7.1.1:

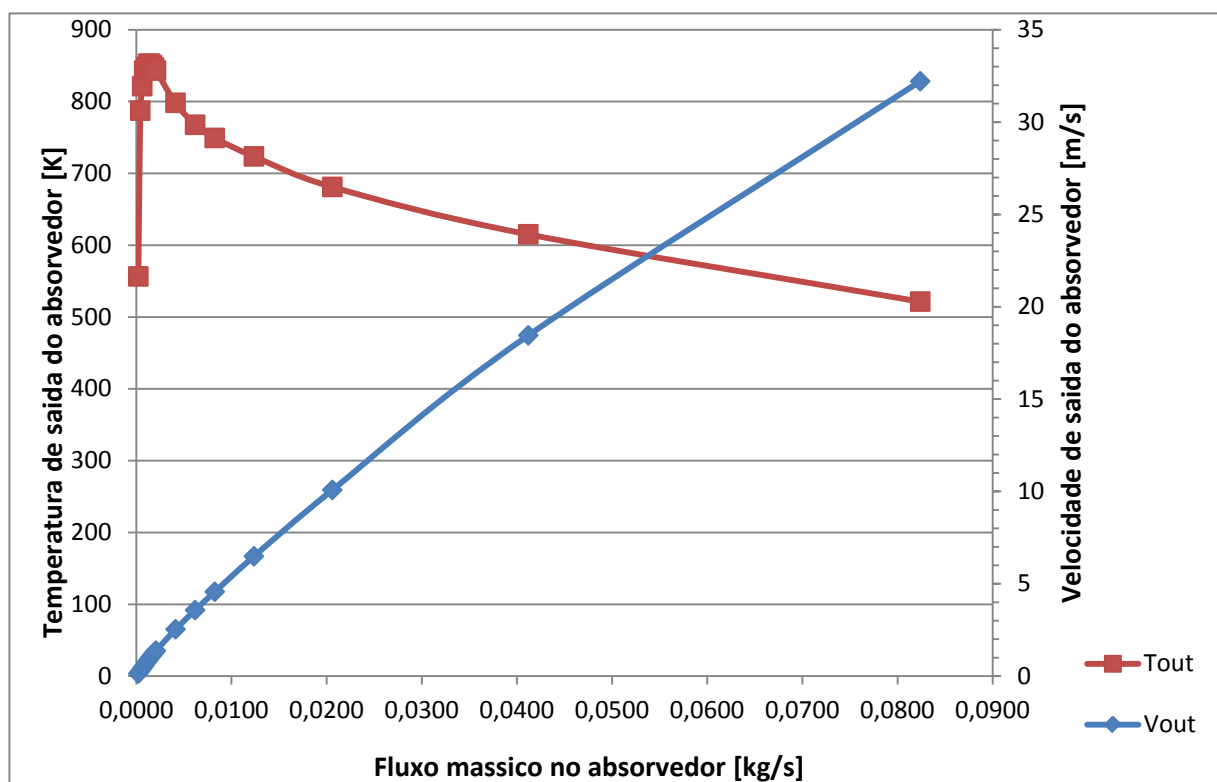


Figura 45. Gráfica das condições de saída para um absorvedor e I_d .

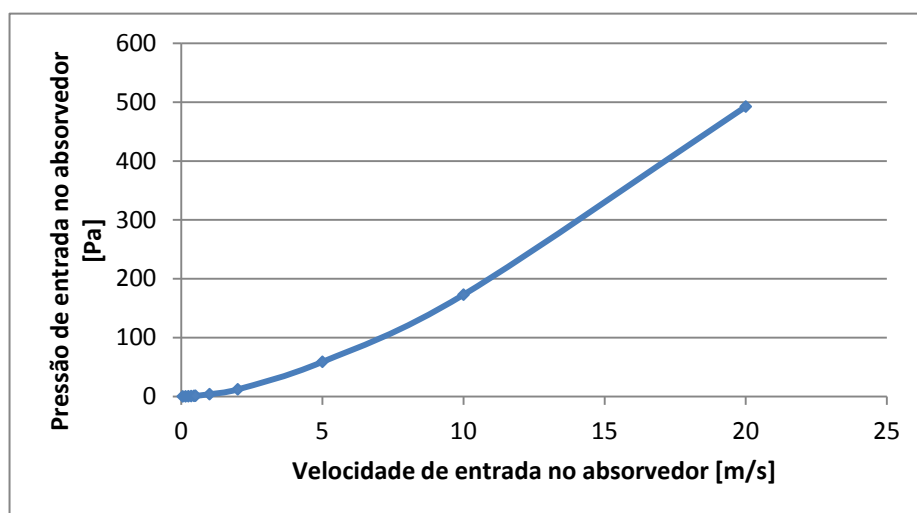


Figura 53. Gráfica da pressão de entrada no absorvedor.

4.3.2 Resultados com I_{d2}

Para a radiação de $I_d = 478 \text{ W/m}^2$ são estudados os valores de velocidade e temperatura meios na saída. Os seguintes dados foram obtidos (fig. 46). O resto de dados referentes a essa simulação podem ser consultados no anexo 7.2:

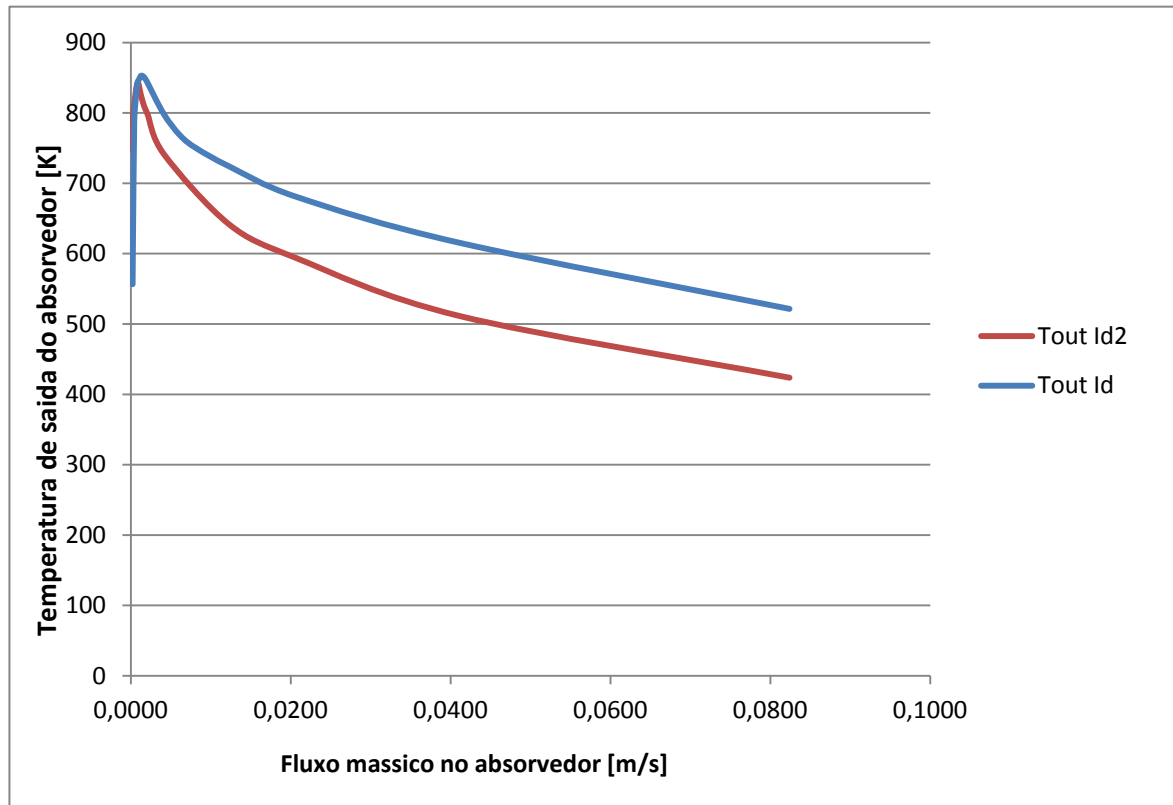


Figura 46. Gráfica das condições de saída para um absorvedor e I_{d2} .

Pode-se ver que as figuras (45) e (46) são similares. O perfil de temperaturas tem a mesma forma para ambas as radiações, sendo os valores um pouco menores para I_{d2} . O mesmo acontece com a linha da velocidade na saída.

O fato de que as 2 gráficas sejam tão similares quer dizer que o coletor ainda tem um bom comportamento em radiações menores do que a máxima, o que é uma vantagem.

Considera-se que no caso de 3 e 6 absorvedores o perfil de velocidades com I_{d2} é também similar ao obtido para I_d , por isso não vão ser feitas essas simulações.

O perfil da pressão de entrada respeito da velocidade de entrada é o mesmo que com I_d .

4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MÓDULO DO COLETOR

A continuação são oferecidos os resultados das simulações para um módulo do coletor, equivalente a 3 absorvedores em colocados em linha (12,18 m de comprimento total).

A distribuição da temperatura sobre os tubos é mostrada nas figuras (59), (60) e (61):

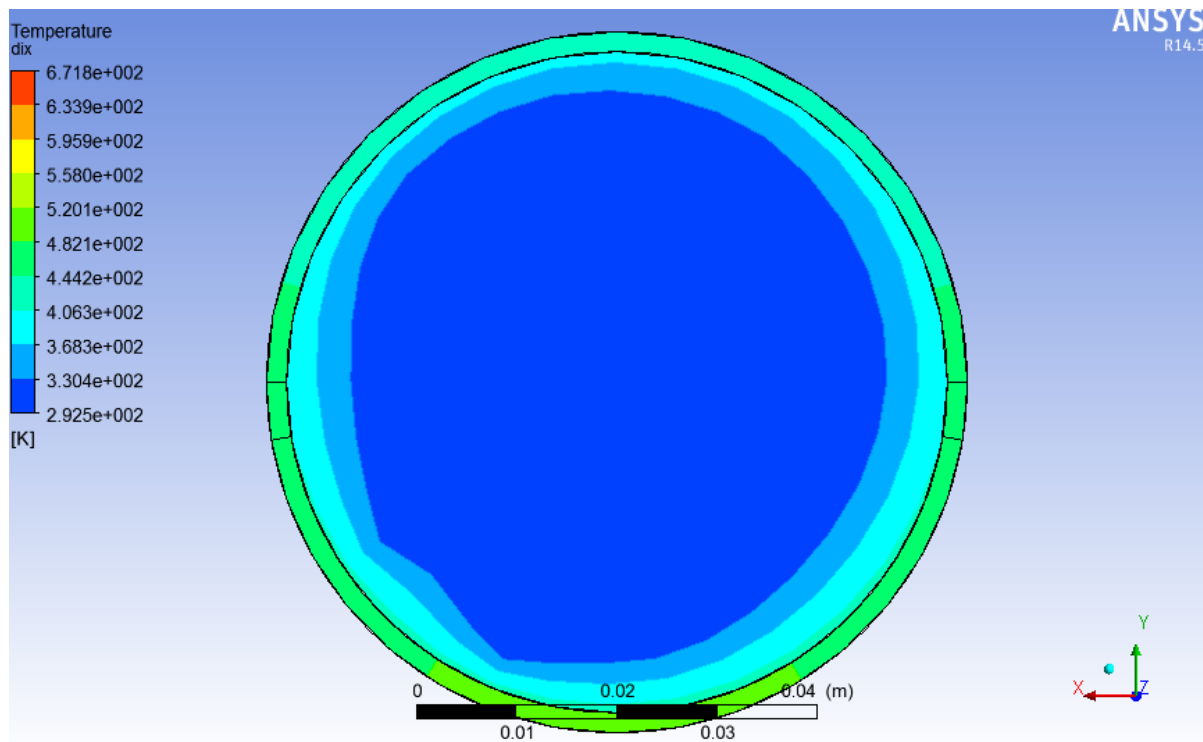


Figura 59. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 10% do total (1,2 m) para um fluxo mássico de 0,1236 kg/s.

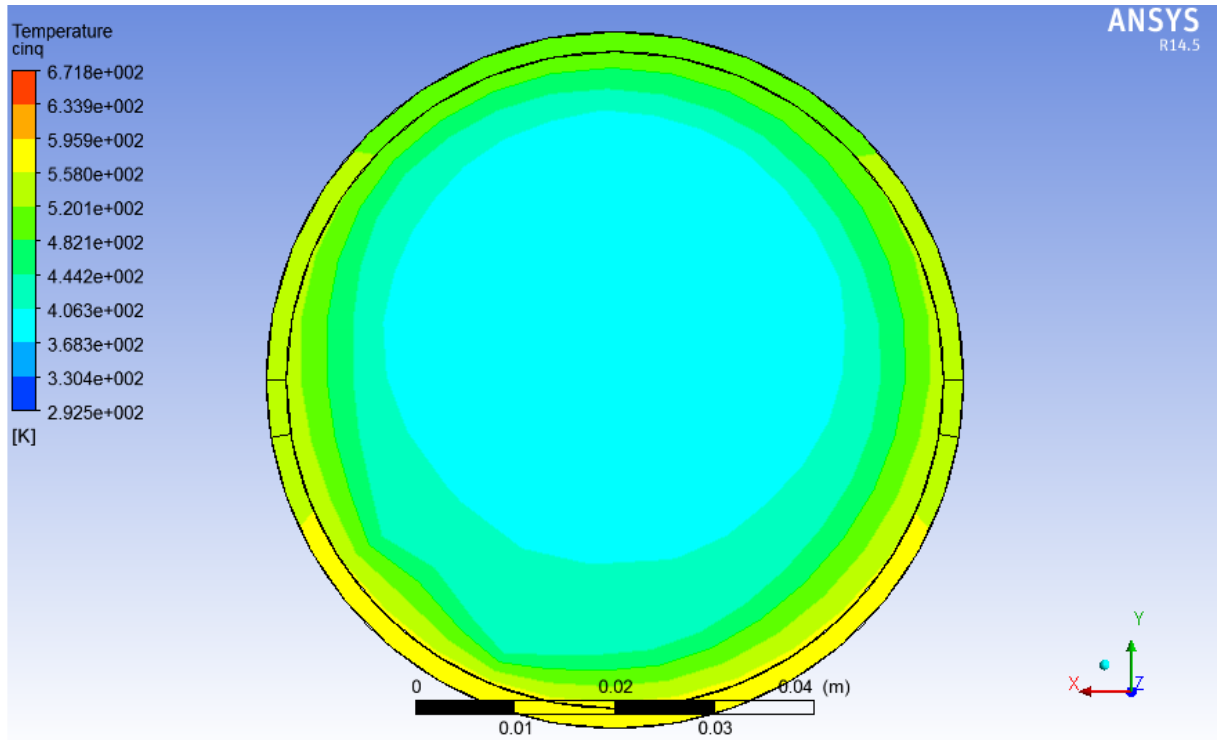


Figura 60. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 50% do total (6 m) para um fluxo mássico de 0,1236 kg/s.

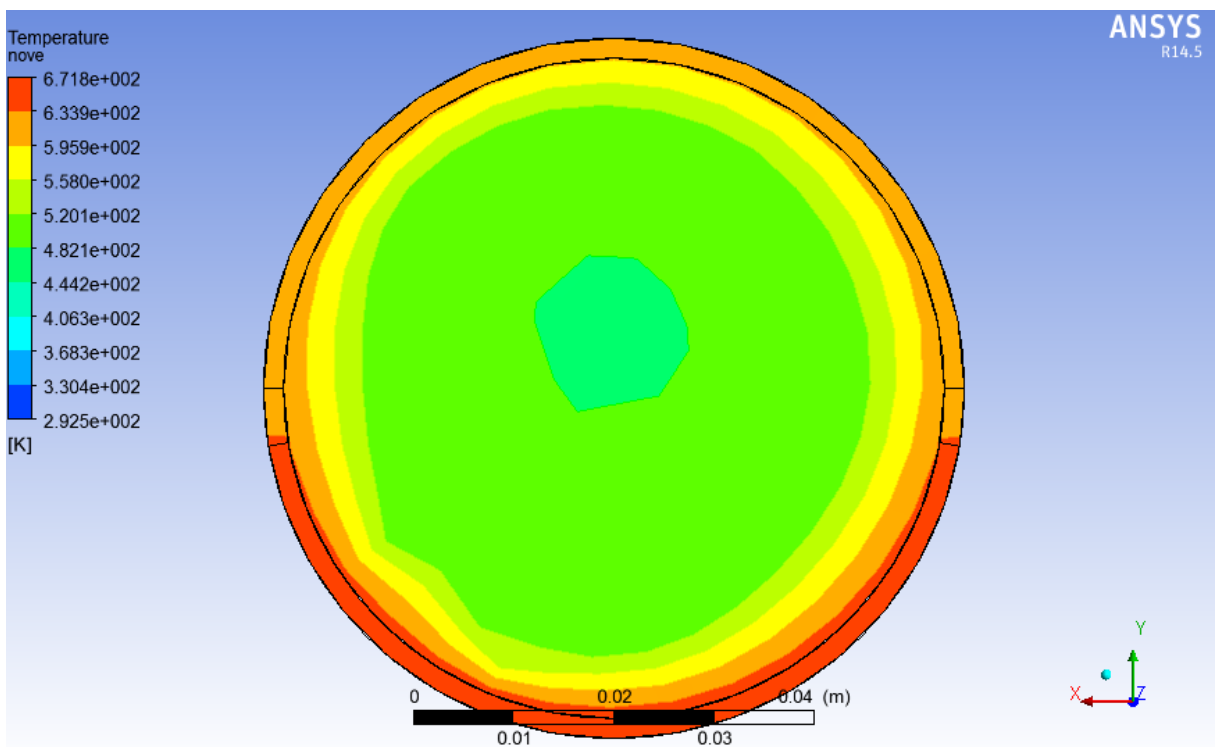


Figura 61. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 90% do total (10,8 m) para um fluxo mássico de 0,1236 kg/s.

Para a radiação de $I_d = 956 \text{ W/m}^2$ são estudados os valores de velocidade e temperatura meios na saída. Para obter os resultados foi trocada a velocidade de entrada no tubo do jeito seguinte:

- Aumentos de 1 m/s até 10 m/s
- Aumentos de 2 m/s até 20 m/s
- Nas velocidades 30 m/s e 40 m/s

Os dados obtidos são mostrados na gráfica seguinte (fig. 47). O resto de dados referentes a essa simulação podem ser consultados no anexo 7.1.2. A Fig. 54 mostra a pressão de entrada sobre V_{in} :

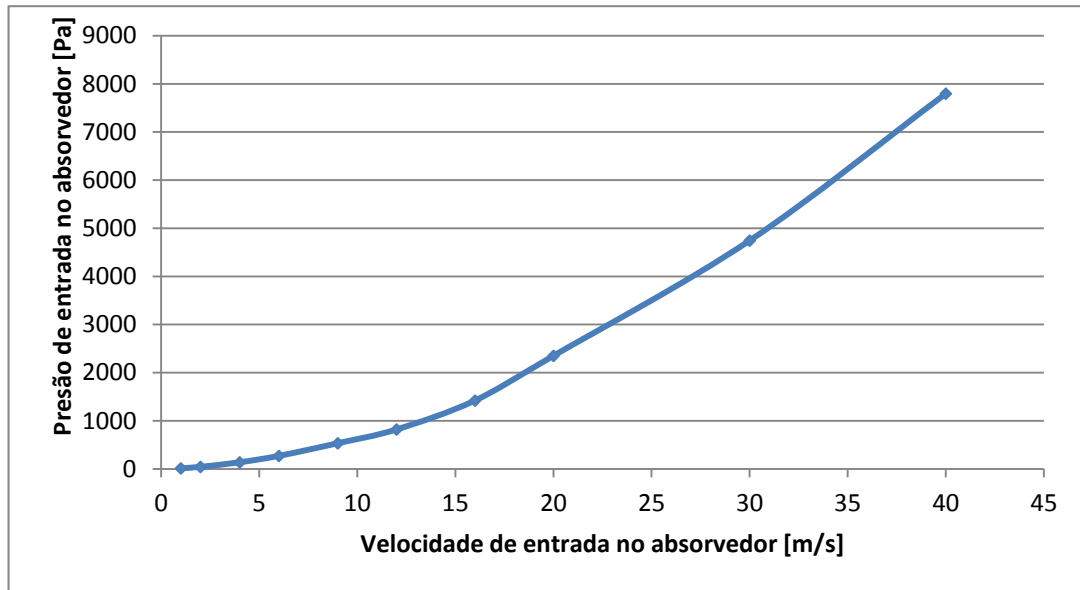


Figura 54. Gráfica da pressão de entrada no módulo (3 absorvedores).

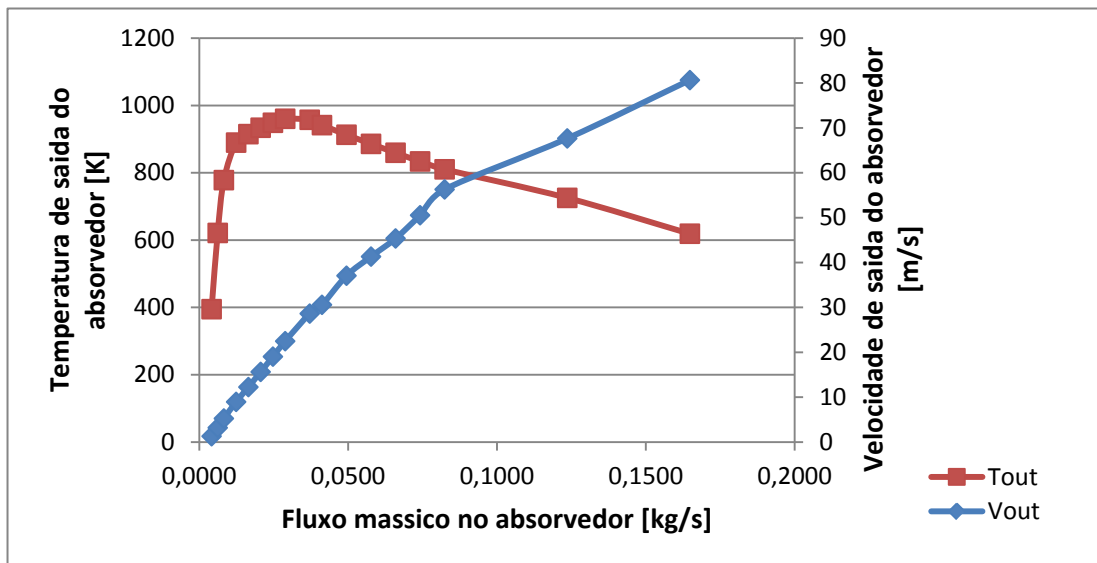


Figura 47. Gráfica das condições de saída para um módulo e I_d .

4.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA DOIS MODULOS DO COLETOR

A continuação são oferecidos os resultados das simulações para dois módulos do coletor, equivalente a 6 absorvedores em colocados em linha (24,36 m de comprimento total).

A distribuição da temperatura sobre os tubos é mostrada nas figuras (62), (63) e (64):

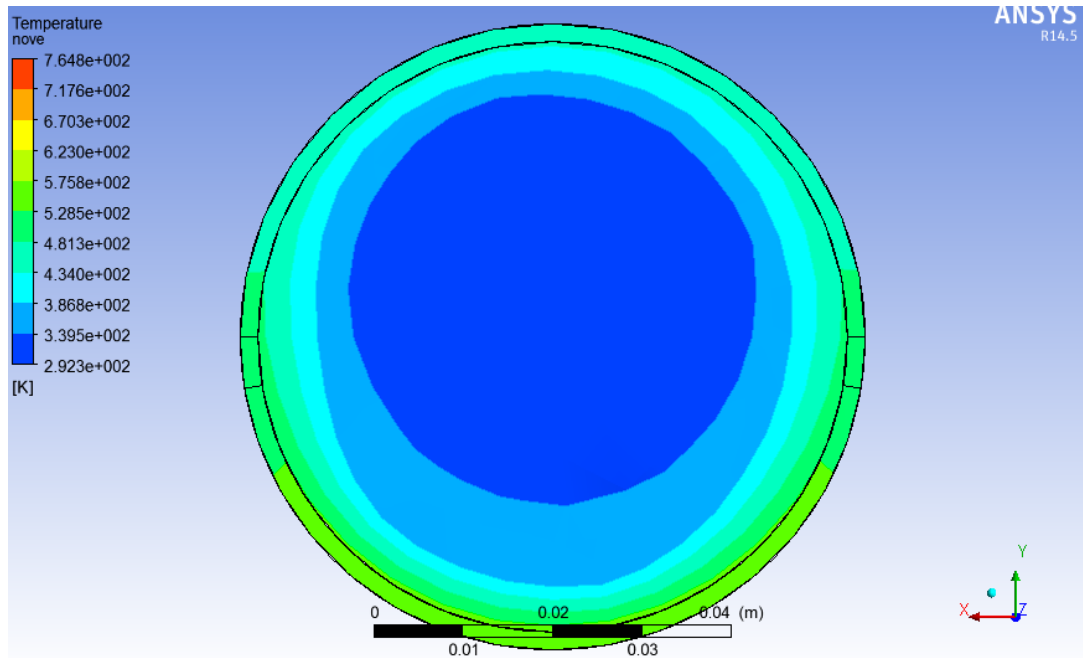


Figura 62. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 10% do total (2,4 m) para um fluxo mássico de 0,2060 kg/s.

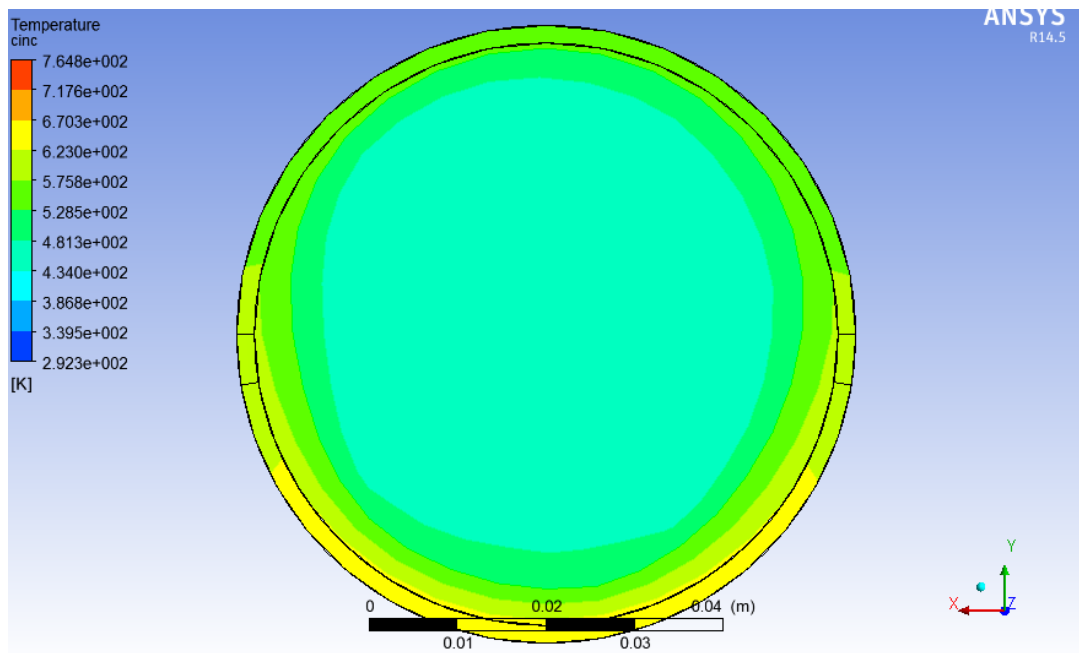


Figura 63. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 50% do total (12 m) para um fluxo mássico de 0,2060 kg/s.

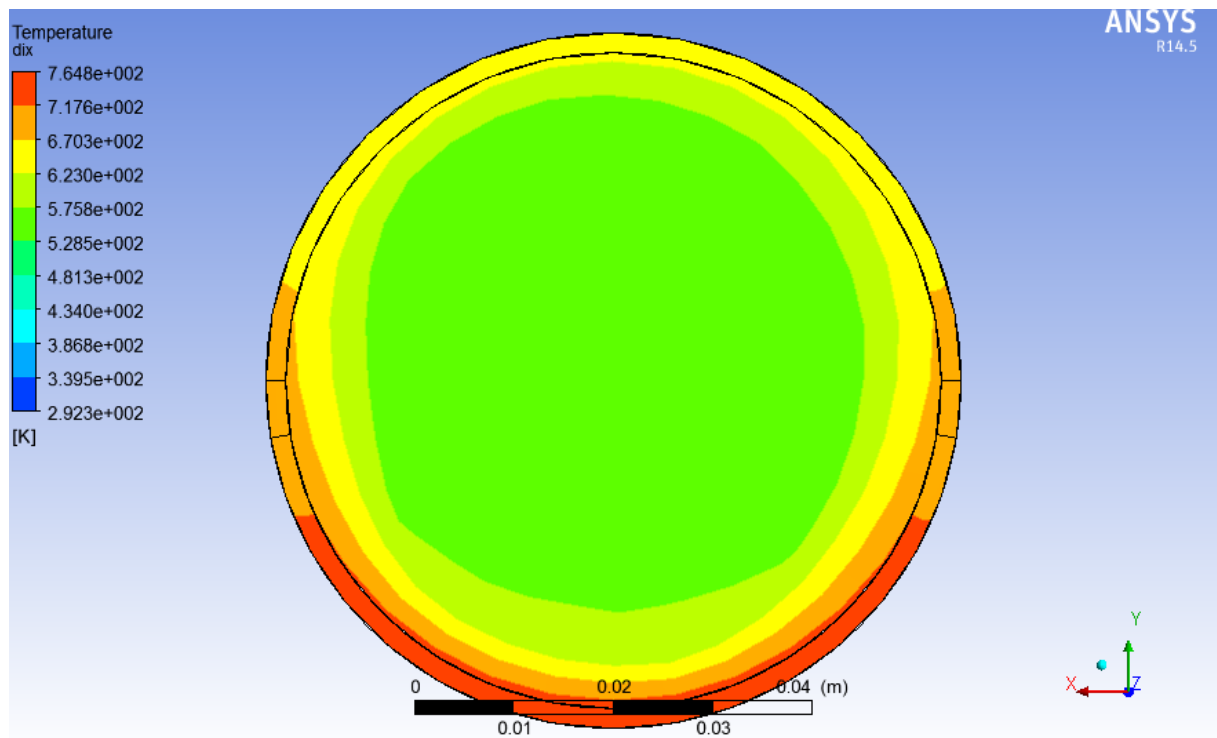


Figura 64. Perfil de temperaturas do tubo e do fluido para um comprimento do 90% do total (21,6 m) para um fluxo mássico de 0,2060 kg/s.

Para a radiação de $I_d = 956 \text{ W/m}^2$ são estudados os valores de velocidade e temperatura meios na saída. Para obter os resultados foi trocada a velocidade de entrada no tubo do jeito seguinte:

- Aumentos de 2 m/s desde 6 m/s até 20 m/s
- Aumentos de 5 m/s até 40 m/s
- Aumentos de 10 m/s até 70 m/s
- Nas velocidades 5 m/s, 8 m/s

Os dados obtidos são mostrados na gráfica seguinte (fig. 48). O resto de dados referentes a essa simulação podem ser consultados no anexo 7.1.3. A Fig. 54 mostra a pressão de entrada sobre V_{in} :

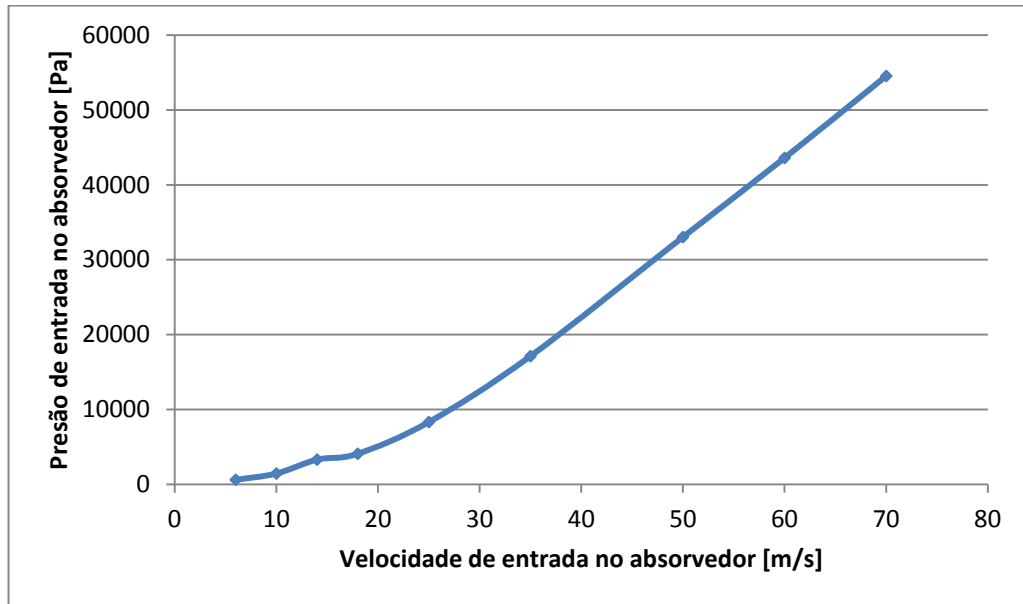


Figura 55. Gráfica da pressão de entrada nos módulos (6 absorvedores).

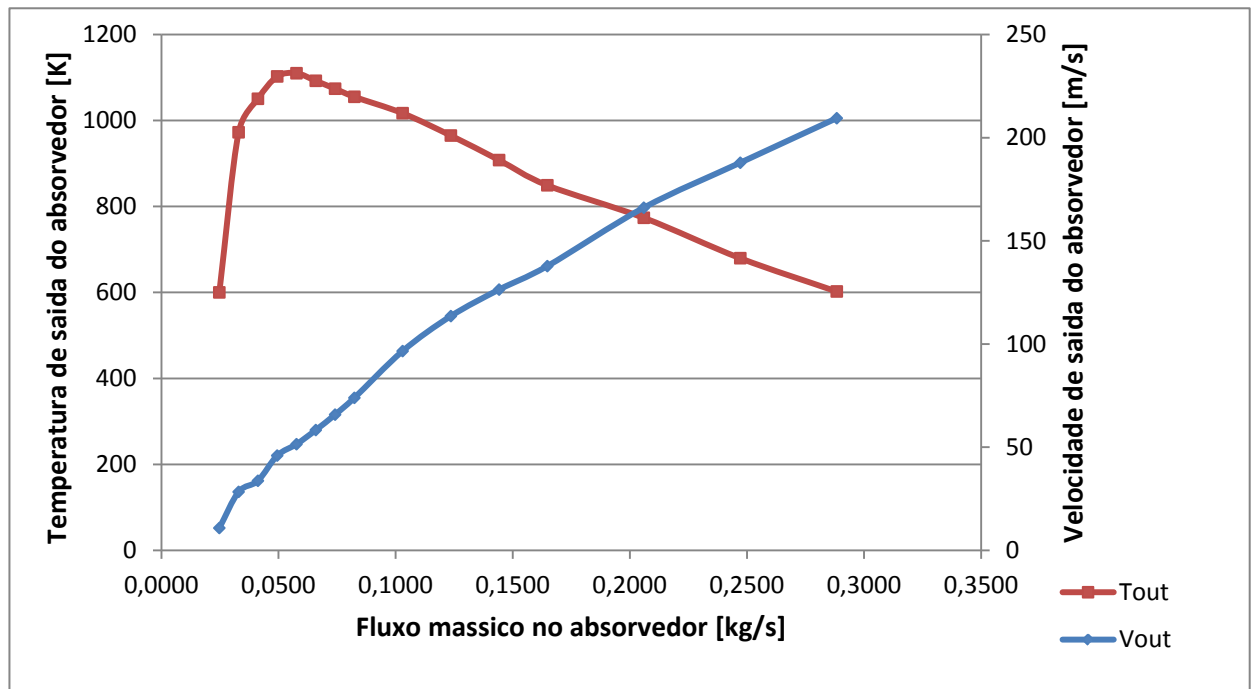


Figura 48. Gráfica das condições de saída para dois módulos e I_d .

4.6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MÓDULO DO COLETOR COM MODELO DE TURBULÊNCIA SST

Foram feitas também simulações para um módulo (12,18 m) e I_d utilizando o modelo de turbulência *Shear Stress Transport* com o fim de conhecer como afeta o modelo de turbulência usado na simulação nos resultados obtidos.

Para o estudo variou-se a velocidade normal de entrada no tubo do mesmo modo que nos apartados anteriores. As velocidades de estudo foram 1,5, 2, 3, 5, 7, 9, 12, 16, 20 e 40 m/s. Os resultados são mostrados na gráfica (Fig. 49).

Embora a diferença entre gráficas é mais visível no começo do gráfico, se faz nula na zona de trabalho dos absorvedores, pelo que pode se considerar que o modelo de turbulência utilizado nas anteriores simulações (o k-Epsilon) não está influenciando os resultados de forma significativa.

O resto de dados referentes ao estudo com turbulência SST podem ser achados no anexo 7.3.

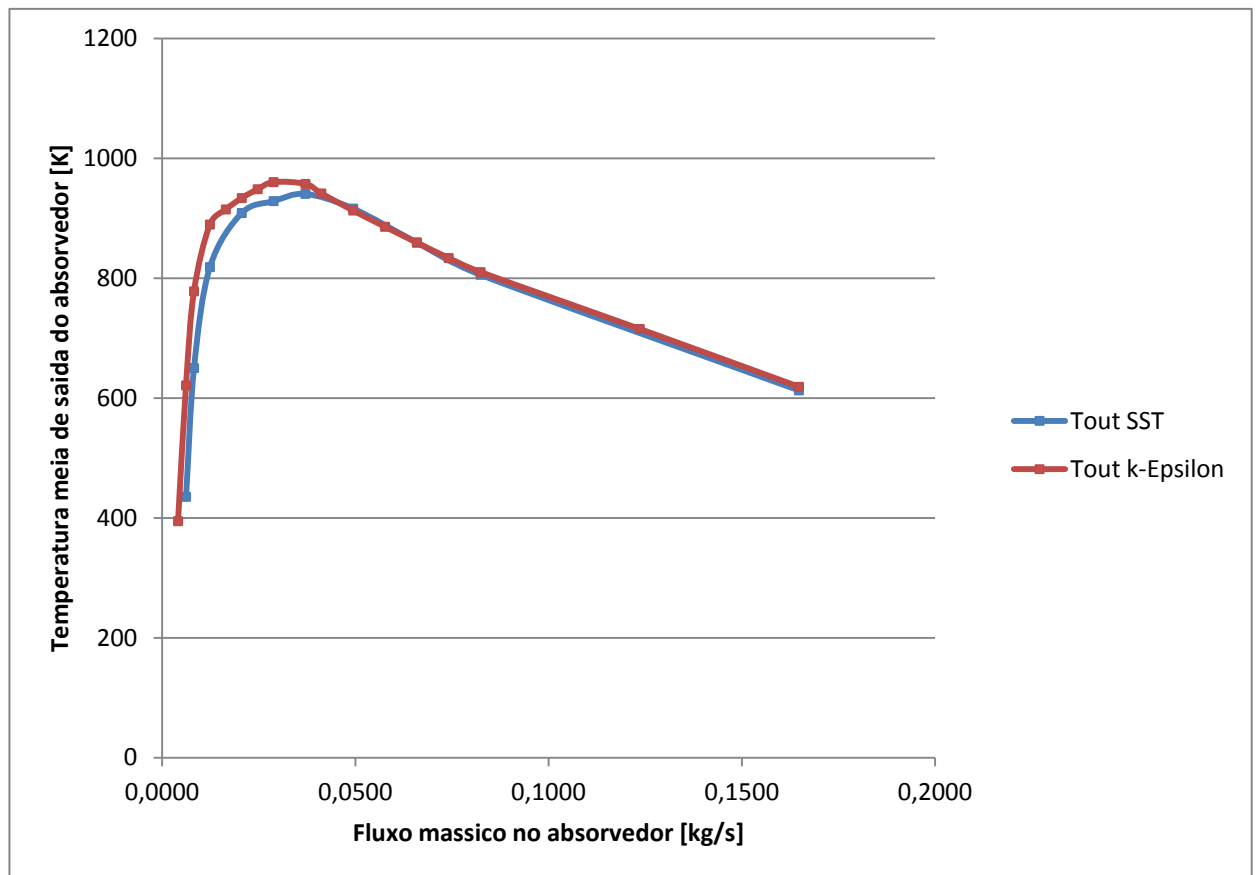


Figura 49. Gráfica das temperaturas de saída pra um modulo (3 absorvedores) com os diferentes modelos de turbulência.

5 CONCLUSOES

5.1 RADIAÇÕES INCIDENTES

As radiações entrantes calculadas foram mostradas no capítulo 4.1 nas figuras 39, 40 e 41. A continuação é mostrada a figura (39) de novo:

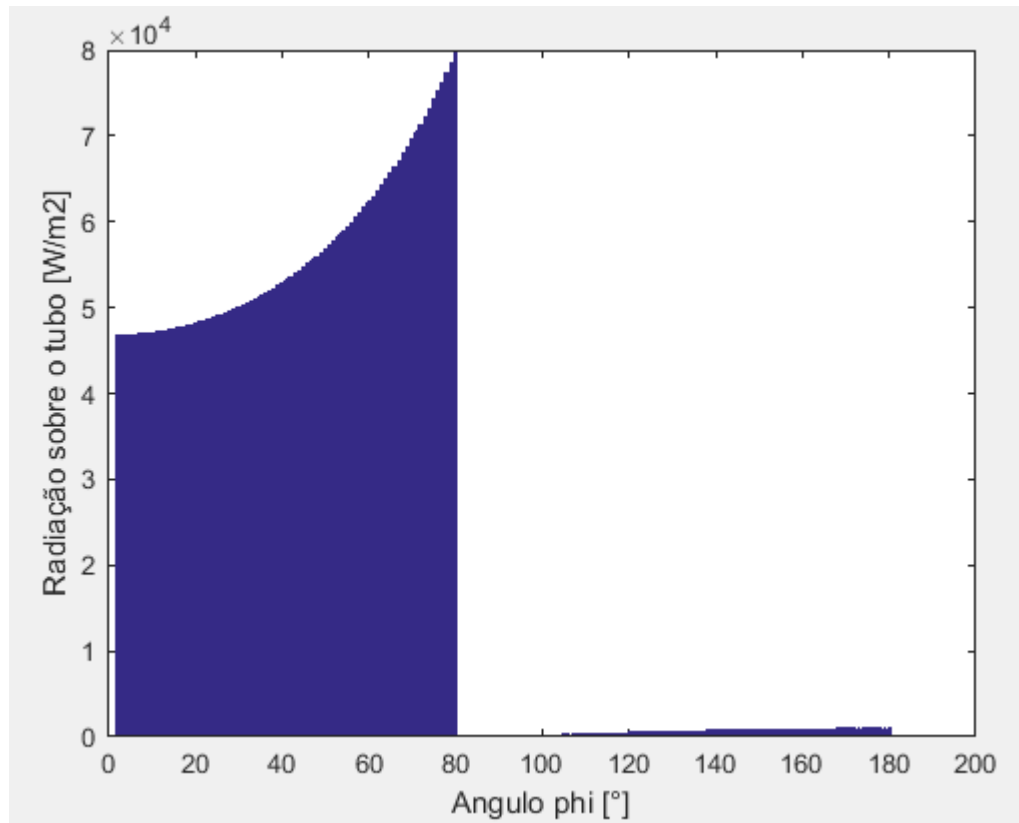


Figura 39. Perfil de radiações entrantes no tubo absorvedor com I_d (o problema é simétrico).

Como pode ser apreciar, a zona de radiação concentrada vai desde 0° até 80° , com um pequeno espaço sem radiação devido á sombra do absorvedor sobre os espelhos parabólicos (a origem fica no ponto mais baixo do tubo). A zona de radiação direta vai desde os 90° até os 180° . O problema é simétrico respeito da vertical.

A área embaixo da curva é a energia total transmitida ao tubo. Pode ser percebido facilmente que á área embaixo da zona de radiação direta é muito pequena (quase desprezível) em relação á zona de concentrada.

Segundo isso, pode ser considerado que toda a energia entrante no sistema entra pela zona de concentrada, desprezando a zona de radiação direta. Na realidade, a energia entrante é tão pequena na zona de direta que as perdas nessa zona devidas á temperatura do coletor vão ser maiores que ela, o que vai ocasionar que o fluxo de energia seja negativo. Isso significa que tem perda de energia na zona de direta (ainda que o valor é um pouco menor que nas zonas que só tem perdas).

5.2 SOBRE OS PERFILES DE TEMPERATURA

As perdas térmicas do sistema são dependentes da temperatura, como já foi dado na Eq. (19). Foram recolhidos dados de temperatura media das superfícies do tubo para o caso de um coletor e I_{d2} (tabela 6):

Tabela 6. Temperatura meia das superfícies do tubo, nas condições de um absorvedor e I_{d2} .

Vin [m/s]	Tcon med [K]	Tdir med [K]	Tper med [K]
0,01	1059,68	1018,19	952,519
0,02	1058,98	1017,92	952,59
0,05	1057,83	1016,5	950,867
0,1	1054,7	1013,68	947,925
0,2	1050,76	1009,65	943,874
0,3	1045,81	1004,59	938,27
0,4	1041,3	1000,04	932,845
0,5	1037,07	995,775	927,25
1	1019,05	977,521	900,17
3	960,89	918,63	813,48
5	902,754	859,925	742,398
10	760,3	716,83	608,59

Com essas temperaturas, foi calculada a temperatura meia de cada superfície e com ela, as perdas térmicas meias segundo a velocidade de entrada.

A radiação meia recebida foi calculada calculando a radiação meia concentrada e a radiação meia direta e somando ambas. A radiação meia recebida tem um valor de 28373,71 W/m².

A figura (50) mostra os 2 fluxos meios de calor segundo a velocidade de entrada.

Quando o fluido entra no tubo a baixas velocidades, a temperatura do absorvedor é mais alta e as perdas maiores. Quando essa velocidade é aumentada, a temperatura do absorvedor é menor (o fluido pega mais energia) e as perdas são menores.

É por isso que o perfil de temperatura do fluido tem a forma obtida. Em baixas velocidades as perdas são muito altas e o fluido não atinge temperaturas muito altas porque o coeficiente de

transferência é pequeno. Ao aumentar a velocidade, o coeficiente de transferência aumenta e a temperatura de saída do fluido também.

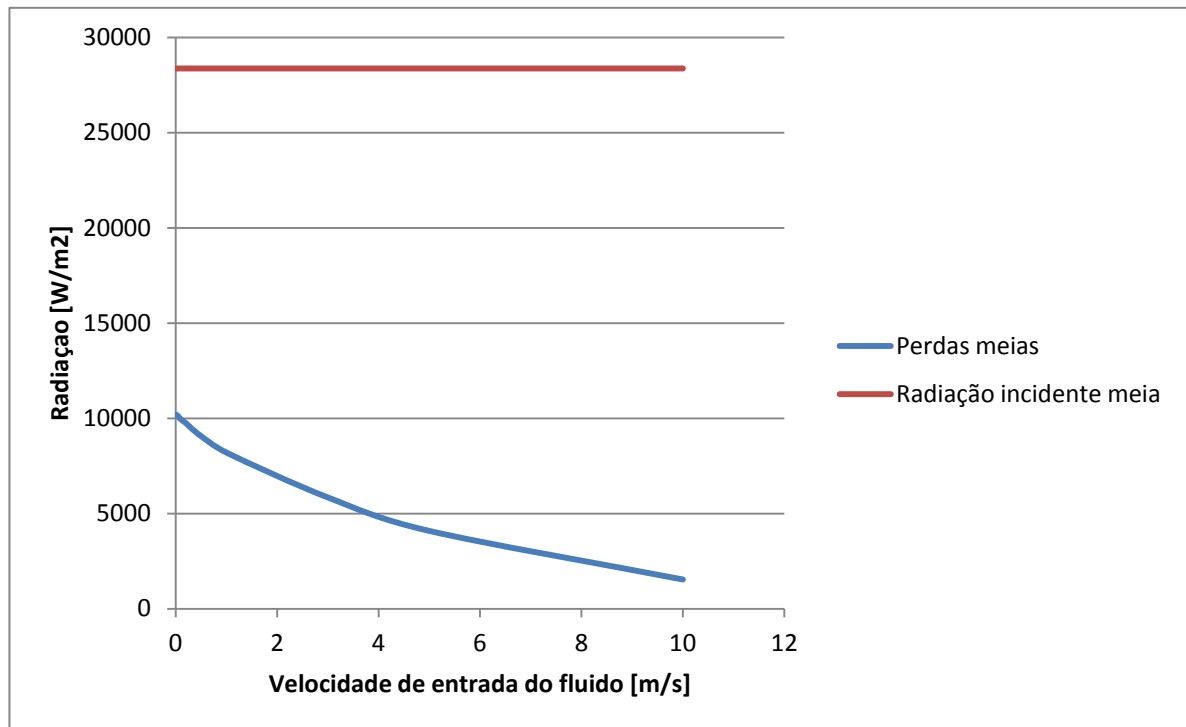


Figura 50. Gráfica da radiação recebida e as perdas térmicas médias.

Ao passar uma determinada velocidade, o coeficiente de transferência segue aumentando (a temperatura nas paredes do tubo segue descendo) e a energia absorvida pelo fluido segue aumentando também, mas ao ser maior a vazão mássica, não é suficiente para esquentar mais o fluido e a temperatura de saída vai descendo. Normalmente, será melhor trabalhar na zona depois da temperatura máxima, porque tem maior rendimento como pode se ver no próximo capítulo (5.3) e porque câmbios pontuais na vazão mássica não produzem variações tão pronunciadas da temperatura de saída.

O resto de dados utilizados nesta análise podem ser achados no anexo 7.4.

5.3 EFICIENCIA GLOBAL DO COLETOR

Com os dados obtidos nas simulações é possível calcular a eficiência global dos coletores em função da vazão mássica com a seguinte equação:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}(h_s - h_e)}{I_d A_c} \quad (20)$$

Sendo:

m: Vazão mássica [kg/s]

h : Entalpia do fluido [kJ/kg]

I_d : Radiação direta sobre o coletor (neste caso $I_d = 956 \text{ W/m}^2$)

A_c : Area total sobre o coletor (abertura x comprimento)

A entalpia h é dada por (lembrando que o ar é tratado no trabalho como gás ideal):

$$h = c_p \cdot T \quad (21)$$

Sendo:

C_p : Calor específico do fluido a pressão constante

T : Temperatura do fluido [K]

Como a variação de temperatura é grande, não pode ser considerado c_p constante, mas o seguinte polinômio dá o valor de c_p em função da temperatura do fluido com a suficiente precisão:

$$c_p = 1,9327 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 7,9999 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 1,1407 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4,4890 \cdot 10^{-1} \cdot T + 1,0575 \cdot 10^3 \quad (22)$$

A eficiência global do compressor é estudada para um absorvedor, um módulo de coletor e 2 módulos em função da vazão mássica. A figura (51) mostra os resultados obtidos:

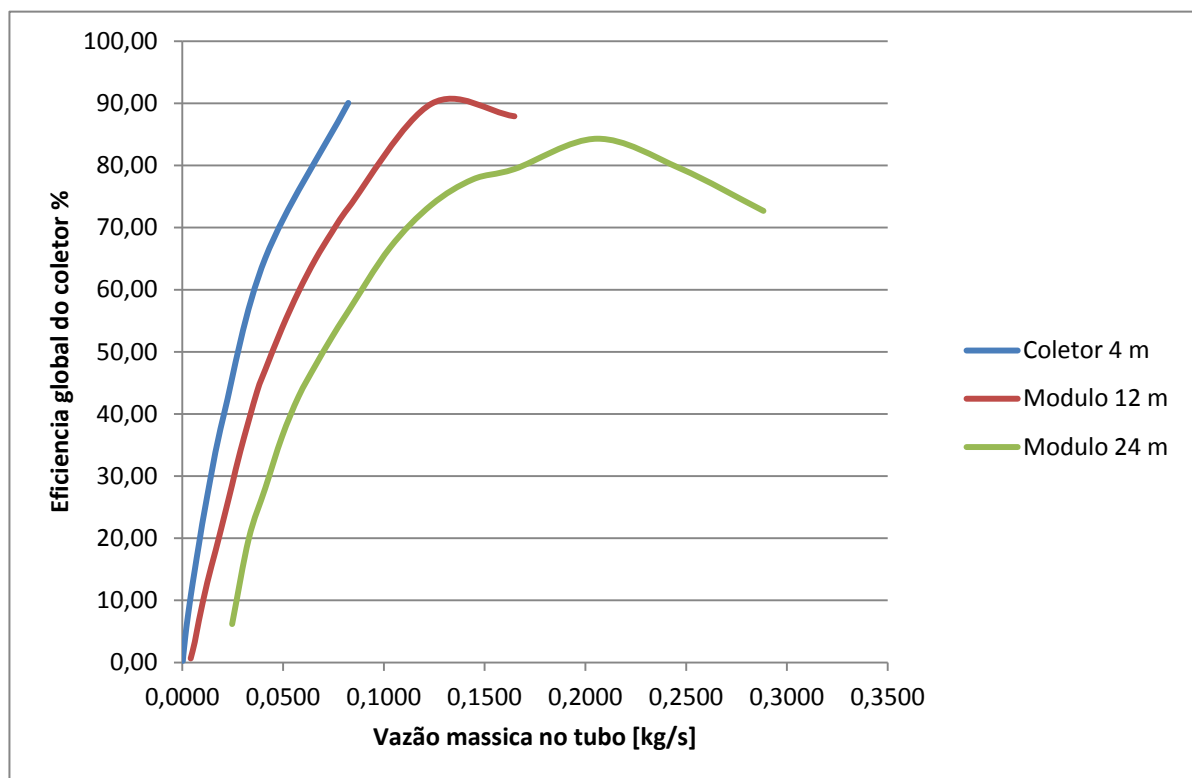


Figura 51. Gráfica da eficiência dos coletores estudados segundo a vazão mássica.

Para poder sacar conclusões mais certas seria preciso estudar mais comprimentos do coletor, mas seguindo a tendência, se pode entrever que quanto mais comprimento, menor será a eficiência global e mais vazão de fluido será necessária para atingir a eficiência máxima.

O resto de dados referentes a esse estudo podem ser encontrados no anexo 7.5.

5.4 GRAFICA COMBINADA

A figura (52) mostra os valores de temperatura na saída de todos os tubos com I_d sobre o mesmo gráfico, com o fluxo mássico entrante no eixo X:

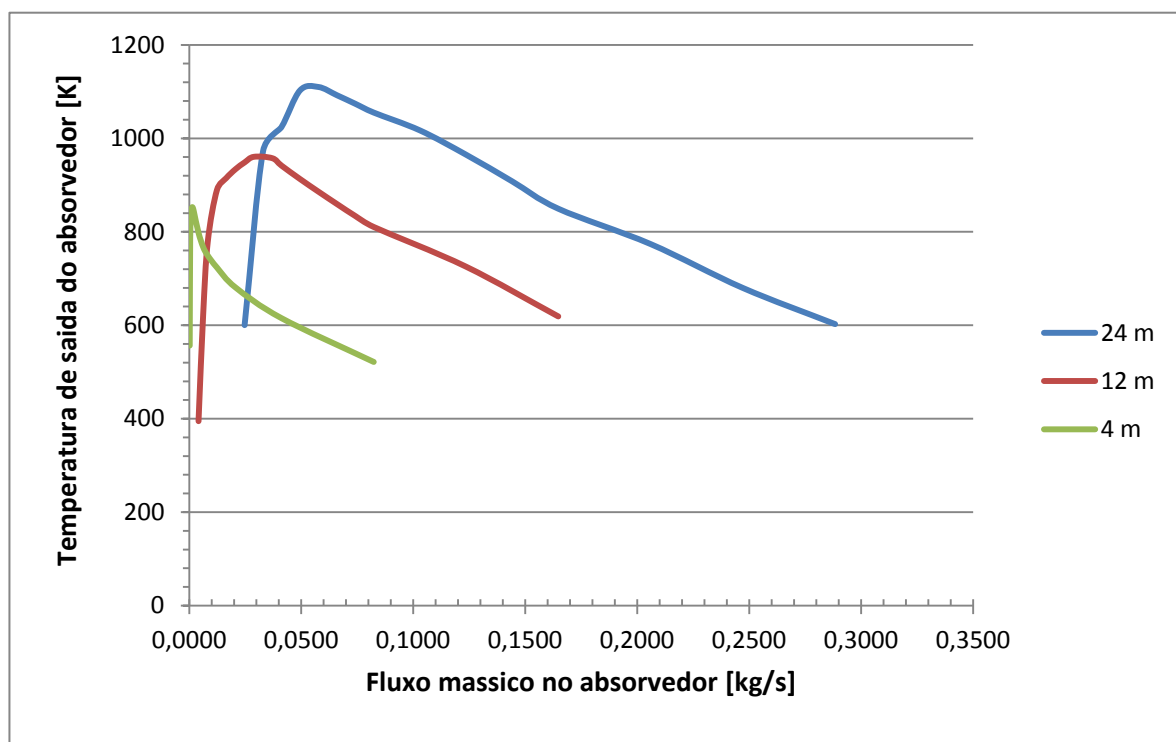


Figura 52. Gráfica da temperatura de saída dos coletores estudados segundo a vazão mássica.

A gráfica combinada pode ser utilizada para escolher o comprimento necessário de coletor conhecendo o fluxo mássico e a temperatura de saída necessária.

O ideal seria simular fluxos para mais comprimentos com o objeto de ter mais comprimentos entre os que escolher.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] The Shift Project. Breakdown of electricity generation by source.
- [2] Jose Maria Marín Quemada, Enrique San Martin Gonzalez. El futuro de los combustibles fosiles. Universidad Nacional de Educacion a Distancia – UNED. [3] European Comission. Renewable energy roadmap. Brussels, 2007
- [4] REN21. Reporte global sobre el estado de las energias renovables. 2013
- [5] J. A. Conejo Badilla. Fundamentos de energia solar fotovoltaica. Escuela de Ingenieria Electrica, Universidad de Costa Rica.
- [6] Molly Beauchemin. 4 Questions about New Caledonia’s planned heart-shaped solar field. National Geographic. 2014
- [7] Mercado Libre. Horno solar transportable. 2014
- [8] Wikimedia Commons. Four-solaire-Odeillo. 2005. Disponível em <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Four-solaire-odeillo-02.jpg>>. Acesso em 20/11/2014
- [9] Torresol Energy. Gemasolar solar plant. Disponível em <<http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en>>. Acesso em 20/11/2014
- [10] Dr. Reiner Buck. Solar Tower Systems – An example of innovative technology. Institute of Solar Research, DLR. Disponível em <http://www.irena.org/documentdownloads/events/iitc/presentations/16_buck_session_iv.pdf>. Acesso em 25/11/2014
- [11] National Renewable Energy Laboratory – NREL. Planta solar 10. Disponível em <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38>. Acesso em 25/11/2014
- [12] Blog O frio que vem do sol. Coletores de Fresnel:tecnologia solar para produção de calor, eletricidade e refrigeração. 2013. Disponível em <<http://ofrioquevemdosol.blogspot.com.br/2013/05/coletores-de-fresnel-tecnologia-solar.html>>. Acesso em 28/11/2014
- [13] Solar Euromed. Alba Nova 1. Disponível em <<http://www.solareuromed.com/en/alba-nova-1>>. Acesso 28/11/2014
- [14] Solar Millenium. El campo solar de uma central com colectores cilindro-parabolicos.
- [15] Land use database. SEGS 3-7. Disponível em <<http://www.rwe.com/web/cms/en/1115184/rwe-innogy/sites/solar-power/andasol-3/>>. Acesso em 2/12/2014
- [16] RWE. Andasol 3. Disponível em <<http://www.rwe.com/web/cms/en/1115184/rwe-innogy/sites/solar-power/andasol-3/>>. Acesso 2/12/2014
- [17] CSP Today. El problema con la termosolar de disco Stirling. Disponível em <<http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/el-problema-con-la-termosolar-de-disco-stirling>>. Acesso em 3/12/2014
- [18] U.S. Department of energy. 2013 Renewable Energy Data Book. 2013
- [19] Red Electrica Española. Avance del Informe sobre el Sistema Electrico Español 2014. 2014
- [20] International Energy Agency – IEA. Technology Roadmap: Solar termal electricity. 2014
- [21] Fernando Rodrigues Marques. Perspectivas para a energia solar no Brasil. Revista BSP. 2014
- [22] Naiana Oscar. A prova de fogo para a energia solar no Brasil. E&N. 2014

- [23] Tractebel Energia. Cidade Azul (Solar). Disponível em < <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-complementares/solar-cidade-azul>>. Acesso 15/12/2014
- [24] E&N. O Brasil esta perto de usar mais energia solar. Disponível em < <http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,o-brasil-esta-perto-de-usar-mais-a-energia-solar-imp-,1531033>>. Acesso 15/12/2014
- [25] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez. Parabolic-trough solar collectors and their applications.
- [26] M. Geyer, E. Lüpfert, R. Osuna, A. Esteban, W. Schiel, A. Schweitzer, E. Zarza, P. Nava, J. Langenkamp, E. Mandelberg. EuroTrough – Parabolic trough collector developed for cost eficiente solar power generation. 2002
- [27] SCHOTT. Shott PTR 70 Premium. Disponível em < <http://www.schott.com/csp/english/schottsolar-ptr-70-premium-receivers.html?so=brazil&lang=portuguese>>. Acesso em 15/12/2014
- [28] Catalogo SCHOTT PTR70.
- [29] F. Burkholder, C. Kutscher. Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 parabolic trough receiver. Disponível em < <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45633.pdf> >. Acesso 24/12/2014
- [30] National Renewable Energy Laboratory. Solar and Wind energy resource assesment.
- [40] NASA Atmospheric Science data center

7 ANEXOS

7.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM I_d

7.1.1 Para um absorvedor (4,060 m)

Coletor 4 m														
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Qin [m ³ /s]	Qin [L/s]	Qout [m ³ /s]	Qout [L/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	ρin [kg/m ³]	ρout	Δρ	m [kg/s]
0,05	0,1387	1,711E-04	1,711E-01	4,745E-04	4,745E-01	20	293	283,48	556,48	263,48	1,204	0,4340	0,7700	0,0002
0,1	0,2672	3,421E-04	3,421E-01	9,141E-04	9,141E-01	20	293	514,271	787,271	494,271	1,204	0,4506	0,7534	0,0004
0,15	0,4155	5,132E-04	5,132E-01	1,422E-03	1,422E+00	20	293	548,401	821,401	528,401	1,204	0,4347	0,7693	0,0006
0,2	0,562	6,842E-04	6,842E-01	1,923E-03	1,923E+00	20	293	570	843	550	1,204	0,4285	0,7755	0,0008
0,25	0,707	8,553E-04	8,553E-01	2,419E-03	2,419E+00	20	293	574,992	847,992	554,992	1,204	0,4257	0,7783	0,0010
0,3	0,8478	1,026E-03	1,026E+00	2,900E-03	2,900E+00	20	293	579,546	852,546	559,546	1,204	0,4260	0,7780	0,0012
0,35	0,9856	1,197E-03	1,197E+00	3,372E-03	3,372E+00	20	293	579,636	852,636	559,636	1,204	0,4276	0,7764	0,0014
0,4	1,119	1,368E-03	1,368E+00	3,828E-03	3,828E+00	20	293	577,64	850,64	557,64	1,204	0,4304	0,7736	0,0016
0,45	1,25	1,540E-03	1,540E+00	4,276E-03	4,276E+00	20	293	574,289	847,289	554,289	1,204	0,4334	0,7706	0,0019
0,5	1,376	1,711E-03	1,711E+00	4,708E-03	4,708E+00	20	293	570,101	843,101	550,101	1,204	0,4375	0,7665	0,0021
1	2,5344	3,421E-03	3,421E+00	8,671E-03	8,671E+00	20	293	525,215	798,215	505,215	1,204	0,4751	0,7289	0,0041
1,5	3,573	5,132E-03	5,132E+00	1,222E-02	1,222E+01	20	293	494,626	767,626	474,626	1,204	0,5055	0,6985	0,0062
2	4,567	6,842E-03	6,842E+00	1,562E-02	1,562E+01	20	293	476,278	749,278	456,278	1,204	0,5273	0,6767	0,0082
3	6,487	1,026E-02	1,026E+01	2,219E-02	2,219E+01	20	293	450,58	723,58	430,58	1,204	0,5568	0,6472	0,0124
5	10,079	1,711E-02	1,711E+01	3,448E-02	3,448E+01	20	293	408,064	681,064	388,064	1,204	0,5973	0,6067	0,0206
10	18,45	3,421E-02	3,421E+01	6,312E-02	6,312E+01	20	293	342,125	615,125	322,125	1,204	0,6526	0,5514	0,0412
20	32,2089	6,842E-02	6,842E+01	1,102E-01	1,102E+02	20	293	248,447	521,447	228,447	1,204	0,7476	0,4564	0,0824

7.1.2 Para um módulo (3 absorvedores)

Modulo 12,18 m

Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Qin [m ³ /s]	Qin [L/s]	Qout [m ³ /s]	Qout [L/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	pin [kg/m ³]	pout	Δp	m [kg/s]
1	1,0136	3,421E-03	3,421E+00	3,468E-03	3,468E+00	20	293	43,795	316,795	23,795	1,204	1,1878	0,0162	0,0041
1,5	3,1838	5,132E-03	5,132E+00	1,089E-02	1,089E+01	20	293	348,185	621,185	328,185	1,204	0,5672	0,6368	0,0062
2	5,2442	6,842E-03	6,842E+00	1,794E-02	1,794E+01	20	293	505,107	778,107	485,107	1,204	0,4592	0,7448	0,0082
3	8,9428	1,026E-02	1,026E+01	3,060E-02	3,060E+01	20	293	616,555	889,555	596,555	1,204	0,4039	0,8001	0,0124
4	12,243	1,368E-02	1,368E+01	4,189E-02	4,189E+01	20	293	641,75	914,75	621,75	1,204	0,3934	0,8106	0,0165
5	15,6248	1,711E-02	1,711E+01	5,346E-02	5,346E+01	20	293	660,74	933,74	640,74	1,204	0,3853	0,8187	0,0206
6	19,029	2,053E-02	2,053E+01	6,510E-02	6,510E+01	20	293	675,467	948,467	655,467	1,204	0,3796	0,8244	0,0247
7	22,4697	2,395E-02	2,395E+01	7,687E-02	7,687E+01	20	293	687,353	960,353	667,353	1,204	0,3751	0,8289	0,0288
9	28,6162	3,079E-02	3,079E+01	9,790E-02	9,790E+01	20	293	684,378	957,378	664,378	1,204	0,3787	0,8253	0,0371
10	30,5756	3,421E-02	3,421E+01	1,046E-01	1,046E+02	20	293	668,486	941,486	648,486	1,204	0,3938	0,8102	0,0412
12	37,056	4,105E-02	4,105E+01	1,268E-01	1,268E+02	20	293	639,901	912,901	619,901	1,204	0,3899	0,8141	0,0494
14	41,3192	4,790E-02	4,790E+01	1,414E-01	1,414E+02	20	293	612,786	885,786	592,786	1,204	0,4079	0,7961	0,0577
16	45,3594	5,474E-02	5,474E+01	1,552E-01	1,552E+02	20	293	586,421	859,421	566,421	1,204	0,4247	0,7793	0,0659
18	50,5319	6,158E-02	6,158E+01	1,729E-01	1,729E+02	20	293	560,654	833,654	540,654	1,204	0,4289	0,7751	0,0741
20	56,2859	6,842E-02	6,842E+01	1,926E-01	1,926E+02	20	293	537,199	810,199	517,199	1,204	0,4278	0,7762	0,0824
40	80,6436	1,368E-01	1,368E+02	2,759E-01	2,759E+02	20	293	345,837	618,837	325,837	1,204	0,5972	0,6068	0,1648

7.1.3 Para dois módulos (6 absorvedores)

Coletor 24 m														
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Qin [m ³ /s]	Qin [L/s]	Qout [m ³ /s]	Qout [L/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	ρin [kg/m ³]	ρout	Δρ	m [kg/s]
6	10,829	2,053E-02	2,053E+01	3,705E-02	3,705E+01	20	293	327,103	600,103	307,103	1,204	0,6671	0,5369	0,0247
8	28,3442	2,737E-02	2,737E+01	9,697E-02	9,697E+01	20	293	699,586	972,586	679,586	1,204	0,3398	0,8642	0,0330
10	33,7172	3,421E-02	3,421E+01	1,154E-01	1,154E+02	20	293	751,26	1024,26	731,26	1,204	0,3571	0,8469	0,0412
12	45,9339	4,105E-02	4,105E+01	1,571E-01	1,571E+02	20	293	829,51	1102,51	809,51	1,204	0,3145	0,8895	0,0494
14	51,4491	4,790E-02	4,790E+01	1,760E-01	1,760E+02	20	293	836,93	1109,93	816,93	1,204	0,3276	0,8764	0,0577
16	58,3054	5,474E-02	5,474E+01	1,995E-01	1,995E+02	20	293	819,34	1092,34	799,34	1,204	0,3304	0,8736	0,0659
18	65,7751	6,158E-02	6,158E+01	2,250E-01	2,250E+02	20	293	800,94	1073,94	780,94	1,204	0,3295	0,8745	0,0741
20	73,9113	6,842E-02	6,842E+01	2,529E-01	2,529E+02	20	293	782,1	1055,1	762,1	1,204	0,3258	0,8782	0,0824
25	96,5748	8,553E-02	8,553E+01	3,304E-01	3,304E+02	20	293	744	1017	724	1,204	0,3117	0,8923	0,1030
30	113,524	1,026E-01	1,026E+02	3,884E-01	3,884E+02	20	293	691,992	964,992	671,992	1,204	0,3182	0,8858	0,1236
35	126,378	1,197E-01	1,197E+02	4,324E-01	4,324E+02	20	293	634,897	907,897	614,897	1,204	0,3334	0,8706	0,1442
40	137,751	1,368E-01	1,368E+02	4,713E-01	4,713E+02	20	293	576,306	849,306	556,306	1,204	0,3496	0,8544	0,1648
50	166,056	1,711E-01	1,711E+02	5,681E-01	5,681E+02	20	293	500,661	773,661	480,661	1,204	0,3625	0,8415	0,2060
60	187,85	2,053E-01	2,053E+02	6,427E-01	6,427E+02	20	293	406,69	679,69	386,69	1,204	0,3846	0,8194	0,2471
70	209,427	2,395E-01	2,395E+02	7,165E-01	7,165E+02	20	293	329,272	602,272	309,272	1,204	0,4024	0,8016	0,2883

7.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM ABSORVEDOR COM I_{d2}

Coletor 4 m, I_{d2}															
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Pin [Pa]	Qin [m ³ /s]	Qin [L/s]	Qout [m ³ /s]	Qout [L/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	ρin [kg/m ³]	ρout	Δp	m [kg/s]
0,02	0,051	0,00113	6,842E-05	6,842E-02	1,745E-04	1,745E-01	20	293	475,565	748,565	455,565	1,204	0,4722	0,7318	0,0001
0,05	0,1355	0,0084	1,711E-04	1,711E-01	4,636E-04	4,636E-01	20	293	513,507	786,507	493,507	1,204	0,4443	0,7597	0,0002
0,1	0,262	0,0386	3,421E-04	3,421E-01	8,964E-04	8,964E-01	20	293	539,984	812,984	519,984	1,204	0,4595	0,7445	0,0004
0,2	0,5699	0,187	6,842E-04	6,842E-01	1,950E-03	1,950E+00	20	293	569,82	842,82	549,82	1,204	0,4225	0,7815	0,0008
0,3	0,813	0,433	1,026E-03	1,026E+00	2,781E-03	2,781E+00	20	293	552,65	825,65	532,65	1,204	0,4443	0,7597	0,0012
0,4	1,069	0,7603	1,368E-03	1,368E+00	3,657E-03	3,657E+00	20	293	536,426	809,426	516,426	1,204	0,4505	0,7535	0,0016
0,5	1,31	1,15	1,711E-03	1,711E+00	4,482E-03	4,482E+00	20	293	525,56	798,56	505,56	1,204	0,4595	0,7445	0,0021
1	2,37	3,8428	3,421E-03	3,421E+00	8,108E-03	8,108E+00	20	293	468,385	741,385	448,385	1,204	0,5080	0,6960	0,0041
3	5,9001	23,72	1,026E-02	1,026E+01	2,019E-02	2,019E+01	20	293	367,82	640,82	347,82	1,204	0,6122	0,5918	0,0124
5	9,13	55,81	1,711E-02	1,711E+01	3,124E-02	3,124E+01	20	293	321,011	594,011	301,011	1,204	0,6594	0,5446	0,0206
10	16,05	172,079	3,421E-02	3,421E+01	5,491E-02	5,491E+01	20	293	238,029	511,029	218,029	1,204	0,7502	0,4538	0,0412
20	25,175	413,841	6,842E-02	6,842E+01	8,613E-02	8,613E+01	20	293	150,56	423,56	130,56	2,204	1,7509	0,4531	0,1508

7.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MODULO COM MODELO DE TURBULENCIA SST

Modulo 12 m, SST															
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Pin [Pa]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	ρ_{in} [kg/m ³]	ρ_{out}	Δp	m [kg/s]	Qin [m ³ /s]	Qin [L/s]	Qout [m ³ /s]	Qout [L/s]
1,5	2,08	9,975	20	293	162,315	435,315	142,315	1,204	0,868	0,336	0,0062	0,0051	5,1318	0,0000	0,0211
2	4,263	28,34	20	293	377,121	650,121	357,121	1,204	0,565	0,639	0,0082	0,0068	6,8424	0,0000	0,0282
3	7,82123	75,71	20	293	545,611	818,611	525,611	1,204	0,462	0,742	0,0124	0,0103	10,2636	0,0000	0,0423
5	15,195	195,87	20	293	635,84	908,84	615,84	1,204	0,396	0,808	0,0206	0,0171	17,1060	0,0001	0,0705
7	21,049	373,37	20	293	655,67	928,67	635,67	1,204	0,400	0,804	0,0288	0,0239	23,9483	0,0001	0,0986
9	28,495	594,72	20	293	667,75	940,75	647,75	1,204	0,380	0,824	0,0371	0,0308	30,7907	0,0001	0,1268
12	38,15	1051,7	20	293	643,204	916,204	623,204	1,204	0,379	0,825	0,0494	0,0411	41,0543	0,0002	0,1691
16	45,41	1289,8	20	293	586,711	859,711	566,711	1,204	0,424	0,780	0,0659	0,0547	54,7391	0,0002	0,2255
20	58,04	2046,5	20	293	532,789	805,789	512,789	1,204	0,415	0,789	0,0824	0,0684	68,4238	0,0003	0,2818
40	80,39	2074,6	20	293	339,86	612,86	319,86	1,204	0,599	0,605	0,1648	0,1368	136,847	0,0006	0,5637

7.4 TEMPERATURAS E PERDAS TERMICAS TOTAIS MEIAS PARA UM COLETOR E I_{d2}

Vin [m/s]	Tcon med [K]	Tdir med [K]	Tper med [K]	Tcon med [°C]	Tdir med [°C]	Tper med [°C]	Ttot med (°C)	Ptot med [W/m]	Ptot med [W/m ²]
0,01	1059,68	1018,19	952,519	786,68	745,19	679,519	757,6128793	2242	10193
0,02	1058,98	1017,92	952,59	785,98	744,92	679,59	757,1855725	2237	10171
0,05	1057,83	1016,5	950,867	784,83	743,5	677,867	755,8568726	2222	10103
0,1	1054,7	1013,68	947,925	781,7	740,68	674,925	752,8925349	2188	9951
0,2	1050,76	1009,65	943,874	777,76	736,65	670,874	748,8996952	2144	9749
0,3	1045,81	1004,59	938,27	772,81	731,59	665,27	743,8415283	2089	9498
0,4	1041,3	1000,04	932,845	768,3	727,04	659,845	739,2352525	2039	9273
0,5	1037,07	995,775	927,25	764,07	722,775	654,25	734,8735546	1993	9065
1	1019,05	977,521	900,17	746,05	704,521	627,17	715,9786096	1804	8202
3	960,89	918,63	813,48	687,89	645,63	540,48	655,0662382	1286	5846
5	902,754	859,925	742,398	629,754	586,925	469,398	595,5665916	899	4089
10	760,3	716,83	608,59	487,3	443,83	335,59	453,5297497	338	1537

Acon [m ²]	0,385623
Adir [m ²]	0,430993
Aper [m ²]	0,074971
Atot [m ²]	0,891587

7.5 DADOS UTILIZADOS NO CALCULO DAS EFICIENCIAS GLOBAIS DOS COLETORES

7.5.1 Para um absorvedor (4 m)

Coletor 4 m															
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	ρin [kg/m ³]	ρout	Δp	m [kg/s]	cp out	cp in	h out	h in	eficiencia %
0,05	0,1387	20	293	283,48	556,48	263,48	1,204	0,4340	0,7700	0,0002	1041,6120	1005,2019	579636,2503	294524,1596	0,26
0,1	0,2672	20	293	514,271	787,271	494,271	1,204	0,4506	0,7534	0,0004	1094,9861	1005,2019	862050,8163	294524,1596	1,04
0,15	0,4155	20	293	548,401	821,401	528,401	1,204	0,4347	0,7693	0,0006	1103,0296	1005,2019	906029,6251	294524,1596	1,69
0,2	0,562	20	293	570	843	550	1,204	0,4285	0,7755	0,0008	1108,0645	1005,2019	934098,3917	294524,1596	2,35
0,25	0,707	20	293	574,992	847,992	554,992	1,204	0,4257	0,7783	0,0010	1109,2208	1005,2019	940610,3520	294524,1596	2,97
0,3	0,8478	20	293	579,546	852,546	559,546	1,204	0,4260	0,7780	0,0012	1110,2730	1005,2019	946558,7767	294524,1596	3,60
0,35	0,9856	20	293	579,636	852,636	559,636	1,204	0,4276	0,7764	0,0014	1110,2937	1005,2019	946676,4090	294524,1596	4,20
0,4	1,119	20	293	577,64	850,64	557,64	1,204	0,4304	0,7736	0,0016	1109,8329	1005,2019	944068,2622	294524,1596	4,78
0,45	1,25	20	293	574,289	847,289	554,289	1,204	0,4334	0,7706	0,0019	1109,0581	1005,2019	939692,7574	294524,1596	5,34
0,5	1,376	20	293	570,101	843,101	550,101	1,204	0,4375	0,7665	0,0021	1108,0879	1005,2019	934230,0544	294524,1596	5,88
1	2,5344	20	293	525,215	798,215	505,215	1,204	0,4751	0,7289	0,0041	1097,5750	1005,2019	876100,8562	294524,1596	10,70
1,5	3,573	20	293	494,626	767,626	474,626	1,204	0,5055	0,6985	0,0062	1090,3219	1005,2019	836959,4370	294524,1596	14,97
2	4,567	20	293	476,278	749,278	456,278	1,204	0,5273	0,6767	0,0082	1085,9527	1005,2019	813680,4981	294524,1596	19,10
3	6,487	20	293	450,58	723,58	430,58	1,204	0,5568	0,6472	0,0124	1079,8279	1005,2019	781341,8930	294524,1596	26,86
5	10,079	20	293	408,064	681,064	388,064	1,204	0,5973	0,6067	0,0206	1069,7399	1005,2019	728561,3608	294524,1596	39,92
10	18,45	20	293	342,125	615,125	322,125	1,204	0,6526	0,5514	0,0412	1054,4597	1005,2019	648624,5494	294524,1596	65,13
20	32,2089	20	293	248,447	521,447	228,447	1,204	0,7476	0,4564	0,0824	1034,4492	1005,2019	539410,4282	294524,1596	90,08

7.5.2 Para um modulo (12 m)

Modulo 12 m															
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	pin [kg/m3]	ρout	Δρ	m [kg/s]	cp out	cp in	h out	h in	eficiencia
1	1,29	20	293	121,705	394,705	101,705	1,204	0,9333	0,2707	0,0041	1013,5269	1005,2019	400044,1300	294524,1596	0,65
1,5	3,1838	20	293	348,185	621,185	328,185	1,204	0,5672	0,6368	0,0062	1055,8347	1005,2019	655868,7005	294524,1596	3,32
2	5,2442	20	293	505,107	778,107	485,107	1,204	0,4592	0,7448	0,0082	1092,8127	1005,2019	850325,2056	294524,1596	6,82
3	8,9428	20	293	616,555	889,555	596,555	1,204	0,4039	0,8001	0,0124	1118,7209	1005,2019	995163,7471	294524,1596	12,89
4	12,243	20	293	641,75	914,75	621,75	1,204	0,3934	0,8106	0,0165	1124,3544	1005,2019	1028503,2014	294524,1596	18,00
5	15,6248	20	293	660,74	933,74	640,74	1,204	0,3853	0,8187	0,0206	1128,5303	1005,2019	1053753,9131	294524,1596	23,27
6	19,029	20	293	675,467	948,467	655,467	1,204	0,3796	0,8244	0,0247	1131,7247	1005,2019	1073403,5406	294524,1596	28,65
7	22,4697	20	293	687,353	960,353	667,353	1,204	0,3751	0,8289	0,0288	1134,2737	1005,2019	1089303,1474	294524,1596	34,11
9	28,6162	20	293	684,378	957,378	664,378	1,204	0,3787	0,8253	0,0371	1133,6382	1005,2019	1085320,2576	294524,1596	43,63
10	30,5756	20	293	668,486	941,486	648,486	1,204	0,3938	0,8102	0,0412	1130,2154	1005,2019	1064081,9789	294524,1596	47,18
12	37,056	20	293	639,901	912,901	619,901	1,204	0,3899	0,8141	0,0494	1123,9445	1005,2019	1026050,0671	294524,1596	53,82
14	41,3192	20	293	612,786	885,786	592,786	1,204	0,4079	0,7961	0,0577	1117,8695	1005,2019	990193,1733	294524,1596	59,71
16	45,3594	20	293	586,421	859,421	566,421	1,204	0,4247	0,7793	0,0659	1111,8565	1005,2019	955552,7964	294524,1596	64,84
18	50,5319	20	293	560,654	833,654	540,654	1,204	0,4289	0,7751	0,0741	1105,8920	1005,2019	921931,3177	294524,1596	69,24
20	56,2859	20	293	537,199	810,199	517,199	1,204	0,4278	0,7762	0,0824	1100,4000	1005,2019	891542,9773	294524,1596	73,21
30	67,65	20	293	452,336	725,336	432,336	1,204	0,5339	0,6701	0,1236	1080,2462	1005,2019	783541,4932	294524,1596	89,94
40	80,6436	20	293	345,837	618,837	325,837	1,204	0,5972	0,6068	0,1648	1055,3011	1005,2019	653059,3737	294524,1596	87,93

7.5.3 Para dois módulos (24 m)

Coletor 24 m															
Vin [m/s]	Voutm [m/s]	Tin [°C]	Tin [K]	Toutm [°C]	Tout [K]	ΔT [K]	pin [kg/m3]	ρout	Δρ	m [kg/s]	cp out	cp in	h out	h in	eficiencia
6	10,829	20	293	327,103	600,103	307,103	1,204	0,6671	0,5369	0,0247	1051,0849	1005,2019	630759,2111	294524,1596	6,18
8	28,3442	20	293	699,586	972,586	679,586	1,204	0,3398	0,8642	0,0330	1136,8692	1005,2019	1105703,0496	294524,1596	19,89
10	33,7172	20	293	777,48	1050,48	757,48	1,204	0,3571	0,8469	0,0412	1152,7031	1005,2019	1210891,5053	294524,1596	28,09
12	45,9339	20	293	829,51	1102,51	809,51	1,204	0,3145	0,8895	0,0494	1162,6023	1005,2019	1281780,6431	294524,1596	36,32
14	51,4491	20	293	836,93	1109,93	816,93	1,204	0,3276	0,8764	0,0577	1163,9710	1005,2019	1291926,2790	294524,1596	42,80
16	58,3054	20	293	819,34	1092,34	799,34	1,204	0,3304	0,8736	0,0659	1160,7092	1005,2019	1267889,0963	294524,1596	47,74
18	65,7751	20	293	800,94	1073,94	780,94	1,204	0,3295	0,8745	0,0741	1157,2329	1005,2019	1242798,7041	294524,1596	52,32
20	73,9113	20	293	782,1	1055,1	762,1	1,204	0,3258	0,8782	0,0824	1153,6039	1005,2019	1217167,4247	294524,1596	56,57
25	96,5748	20	293	744	1017	724	1,204	0,3117	0,8923	0,1030	1146,0465	1005,2019	1165529,2448	294524,1596	66,75
30	113,524	20	293	691,992	964,992	671,992	1,204	0,3182	0,8858	0,1236	1135,2613	1005,2019	1095518,0945	294524,1596	73,66
35	126,378	20	293	634,897	907,897	614,897	1,204	0,3334	0,8706	0,1442	1122,8323	1005,2019	1019416,0837	294524,1596	77,77
40	137,751	20	293	576,306	849,306	556,306	1,204	0,3496	0,8544	0,1648	1109,5246	1005,2019	942325,9343	294524,1596	79,43
50	166,056	20	293	500,661	773,661	480,661	1,204	0,3625	0,8415	0,2060	1091,7567	1005,2019	844649,5707	294524,1596	84,32
60	187,85	20	293	406,69	679,69	386,69	1,204	0,3846	0,8194	0,2471	1069,4159	1005,2019	726871,3067	294524,1596	79,52
70	209,427	20	293	329,272	602,272	309,272	1,204	0,4024	0,8016	0,2883	1051,5691	1005,2019	633330,6063	294524,1596	72,70

7.6 IMAGEM DA MALHA UTILIZADA

