



PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL LINEAR

Por,
Diego Carvalho Maranhão

Brasília, 20 de novembro de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM
CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL
LINEAR**

POR,

Diego Carvalho Maranhao

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

Banca Examinadora

Prof. Mário Benjamim B. de Siqueira (Orientador)

Prof. Antônio Cesar Pinho Brasil Jr. (Co -orientador)

Prof. Dianne Magalhães Viana

Brasília, 20 de novembro de 2016

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha
Mãe Antônia Carvalho de
Sousa Neta.*

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Mario Benjamin, pela orientação prestada ao longo da elaboração deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, e de outros Departamentos por todos os ensinamentos e experiências que me foram passadas.

À minha mãe, Antônia Neta, um exemplo, que me apoiou, incentivou, e se esforçou para me dar as condições necessárias para que eu chegasse aonde cheguei e me torna-se o que sou hoje.

À meu pai que me criou e a minha família pela paciência, compreensão, apoio ao longo dos últimos anos em que me dediquei ao curso de Engenharia Mecânica.

À minha namorada, Karine Louise, que esteve ao meu lado todos esses anos, e foi um exemplo de dedicação que me deu forças e me incentivou sempre, durante todo o curso

Aos meus amigos, que desde o início do curso estiveram ao meu lado, mostrando o valor da verdadeira amizade, nos momentos de diversão e nos momentos de tensão, ajudando e apoiando as minhas ações.

A toda a equipe Apuama Racing de Fórmula SAE, tanto os antigos quanto aos atuais integrantes. Foram quatro anos de dedicação à equipe, onde aprendi e compreendi o que é trabalhar em equipe e se dedicar a um sonho, afim de se concluir um objetivo maior.

A todos os técnicos do Bloco SG9, em especial Seu Arthur, Seu Xavier, Marcão, Pereira, Tarsis e Wesley por todo o apoio e paciência prestados em meus momentos de trabalhos.

*Muito obrigado a todos.
Diego Carvalho Maranhao*

RESUMO

A busca por novas fontes de energia vem cada vez mais se intensificando, sendo que a busca concentra-se nas energias renováveis, que não afetam o meio ambiente, e possuam fontes que garantam sempre a produção de energia. Neste sentido algumas alternativas vem se destacando nos últimos anos, sendo elas energia eólica, maremotriz e principalmente a energia solar, pois esta é a única fonte disponível em quase 100% do território mundial. Porém as tecnologias envolvidas no processo de obtenção da energia elétrica através de fontes renováveis ainda apresenta um alto custo.

Com o crescimento da utilização da energia solar, os estudos se intensificaram a fim de se encontrar tecnologias viáveis economicamente, e de boa eficiência, que possam aproveitar da melhor forma possível a radiação solar incidente.

Dessa forma, deve-se achar um meio termo entre eficiência e custos, de modo que a obtenção da energia elétrica através de fontes renováveis se torne atraente a investidores e ganhe mercado, aumentando sua importância na matriz energética.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento e construção de um projeto de um coletor solar linear Fresnel de baixo custo que mantenha uma boa eficiência, de forma a encontrar uma solução inovadora para a obtenção de energia através da radiação solar.

ABSTRACT

The search for new sources of energy comes increasingly intensifying, and the search focuses on renewable energy sources, which does not affect the environment, and have means to ensure the intermittent energy production. In this sense, some alternatives have been emphasizing in recent years, being them wind power, tidal power and especially solar power, as this is the only source available in almost 100% of the world territory. However, the technologies involved in the process of obtaining electrical energy through renewable sources still has high costs.

With the growing use of solar energy, studies have intensified to find economically viable technologies, with good efficiency, which can enjoy the best possible way the solar radiation incident.

Thus, one must find a middle ground between efficiency and cost, so that the obtaining of electricity through renewable sources become attractive to investors and gain market, increasing its importance in the energy matrix.

The purpose of this essay is the development and realization of a project of a linear Fresnel solar collector of low cost to keep a good efficiency, in order to find an innovative solution for obtaining energy by solar radiation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	METODOLOGIA	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	ENERGIA	20
2.1	PREAMBULO HISTÓRICO BRASILEIRO	20
2.2	MATRIZ ENERGETICA	21
2.2.1	Matriz elétrica brasileira	25
3	ENERGIAS RENOVAVEIS	27
3.1	O INICIO DOS ESTUDOS	27
3.1.1	Estruturação	28
3.1.2	Incentivos	29
3.1.3	Barreiras ao desenvolvimento	30
3.2	TIPOS DE ENERGIAS RENOVAVEIS	30
3.2.1	Hídrica	30
3.2.2	Eólica	32
3.2.3	Energia solar	34
3.2.4	Energia Nuclear	38
4	ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA	40
4.1	RADIAÇÃO SOLAR	40
4.1.1	O espectro solar	41
4.2	BASE DE DADOS	42
4.3	BALANÇO ENERGÉTICO DE UM COLETOR SOLAR TÉRMICO	43
4.3.1	Funcionamento térmico de um coletor solar térmico	43
4.3.2	Mecanismos de transporte de energia	44
4.4	SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS: COLETOR PLANO AOS DISCOS DE CONCENTRAÇÃO	47
4.4.1	Coletores de baixa temperatura	48
4.4.2	Coletores de média e alta temperatura	49
4.5	TECNOLOGIA DE FOCO LINEAR	52
4.5.1	Componentes de coletores cilíndricos parabólicos	52
4.5.2	Concentradores lineares tipo Fresnel	54
4.5.3	Aplicações	54
4.5.4	Plantas de coletores de foco linear	55
4.6	TECNOLOGIA FOCO PONTUAL	56
4.6.1	Sistemas de receptor central	56
4.6.2	Sistemas de discos parabólicos	58
5	MODELOS E METODOS PARA UM CONCENTRADOR LINEAR TIPO FRESNEL	60

5.1	DIMENSIONAMENTO DO CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL	60
5.1.1	Distância entre espelhos	60
5.1.2	Altura do receptor	61
5.1.3	Rácio de concentração	62
5.1.4	Propriedades óticas dos materiais	63
5.2	MODELAÇÃO TÉRMICA	64
5.2.1	Balço de energia	64
5.2.2	Ganhos térmicos	64
5.2.3	Perdas térmicas	64
5.2.4	Refletores secundários	65
5.2.5	Superfície absorvedora seletiva	66
5.2.6	Eficiência térmica	66
6	PROJETO CONCEITUAL	67
6.1	POSSIVEIS SOLUÇÕES	67
6.1.1	Proposta 1: Concentrador linear Fresnel combinado com placas fotovoltaicas	67
6.1.2	Proposta 2: Concentrador linear Fresnel com parte refletora coberta por papel alumínio	67
6.1.3	Proposta 3: Concentrador linear Fresnel com espelhos de 1 metro	68
6.2	ESCOLHA DO SISTEMA	68
6.3	PARÂMETROS DE PROJETO	69
6.4	ESBOÇO DE PROJETO	69
6.4.1	Descrição geral de funcionamento	69
6.4.2	Lista de peças	69
7	PROJETO DE DETALHAMENTO	70
7.1	NORMAS E CÓDIGOS	70
7.2	FATOR DE SEGURANÇA	70
7.3	DETERMINAÇÃO DAS GEOMETRIAS	71
7.3.1	Condições climáticas e térmicas locais	71
7.3.2	Espelhos	73
7.3.3	Coletor	76
7.3.4	Mancais	77
7.3.5	Eixo de rotação	78
7.3.6	Estrutura	78
7.4	AJUSTE E TOLERÂNCIA	80
7.5	MONTAGEM	81
7.5.1	Fabricação	81
7.5.2	Sequência de montagem	81
7.6	SIMULAÇÃO	82
7.6.1	Utilização de programas comerciais	82
7.7	INSPEÇÃO	87
7.8	MANUTENÇÃO	88
7.8.1	Plano de manutenção	89
7.9	SEGURANÇA	90
7.10	CUSTOS DE PROJETO	90

8	RESULTADOS	92
8.1	MONTAGEM EXPERIMENTAL	92
8.2	PROCEDIMENTOS	92
8.3	CALCULOS SOLARES	93
8.4	DIMENSIONAMENTO (MEDIÇÕES)	94
8.5	CONCENTRADOR SOLAR	95
8.5.1	Temperaturas	95
8.5.2	Potências e Rendimentos	96
9	Conclusões	98
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
11	ANEXOS	104
11.1	IRRADIÂNCIA MÉDIA	104
11.2	COMPRESSOR	1
11.3	DIMENSIONAMENTO	2
11.3.1	Rácio de concentração	3
11.4	GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO PIRANÔMETRO	4
11.5	TABELA DE CONVERSÃO TERMORESISTOR	4
11.6	IRRADIAÇÃO	5
11.7	TEMPERATURAS	5
11.8	PROPRIEDADES MEDIDAS DURANTE O MELHOR TESTE	5

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da estrutura da oferta de energia, Brasil 1970 – 2000. (EPE)	22
Figura 2 - Matriz energética brasileira 2009. (Araújo & Goes, 2009)	22
Figura 3 - Matriz energética brasileira 2013/2014. (EPE)	23
Figura 4 - Variação percentual da oferta energética entre 2012 e 2013. (EPE)	24
Figura 5 - Previsão da oferta energética em 2030. (EPE)	24
Figura 6 - Comparativo entre a matriz elétrica 2012 e 2013 1 Gás de coqueira; 2 Inclui importação; 3 Inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações. (EPE)	25
Figura 7 - Evolução da potência instalada por fonte. (EPE)	26
Figura 8 - Usina Hidrelétrica de Itaipu. (EBC, 2014)	31
Figura 9 - Obras da Usina de Belo Monte. (Belo Monte, 2015)	32
Figura 10 - Parque eólico em Parnaíba-PI. (Jornal da Parnaíba, 2015)	32
Figura 11 - Fluxo de potência eólica anual. (Amarante, Brower, Zack, & Sá, 2001)	33
Figura 12 - – Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s. (Amarante, Brower, Zack, & Sá, 2001)	33
Figura 13 - Movimentos da Terra. (Nautilus, 2015)	34
Figura 14 - Variação da radiação solar no Brasil. (Ministerio de Minas e Energia, 2007).....	35
Figura 15 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)	36
Figura 16 - Sistema Fotovoltaico.	37
Figura 17 - Usina Heliotérmica tipo torre central.	38
Figura 18 - Angra I em primeiro plano, e ao fundo Angra II.....	39
Figura 19 - Construção da Usina de Angra III.	39
Figura 20 - Distribuição percentual da radiação solar incidente. (Departamento de Física UFPR, 2015).....	41
Figura 21 – Estudo de irradiação média da região Centro Oeste realizado no Atlas Brasileiro de Energia Solar. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006).....	42

Figura 22 - Balanço energético em um coletor solar térmico. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	44
Figura 23 - Condução de calor através de uma parede plana. (Çengel & Ghajar, 2012).....	45
Figura 24 - Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção. (Çengel & Ghajar, 2012).....	46
Figura 25 - Resfriamento de um ovo quente por convecção forçada e natural. (Çengel & Ghajar, 2012).....	46
Figura 26 - Radiação emitida por um corpo negro. (Çengel & Ghajar, 2012).....	47
Figura 27 - Temperaturas proporcionais por diferentes sistemas solares térmicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)...	48
Figura 28 - Esquemas gerais de coletores solar térmicos com cobertura. (Calefaccion solar, s.d.).....	49
Figura 29 - Métodos mais adotados na concentração da radiação solar direta. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	49
Figura 30 - Disco Parabólico. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	50
Figura 31 - Sistemas de receptor central. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	51
Figura 32 - Coletores cilíndrico parabólicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	51
Figura 33 - Concentradores lineares tipo Fresnel. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	52
Figura 34 - Princípio de funcionamento e componentes de um CCP. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	52
Figura 35 - Modelo de receptor de uma CCP. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	53
Figura 36 - Rotação do coletor sobre seu eixo. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	53
Figura 37 - Geração de vapor com coletores solares cilíndrico parabólicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	55

Figura 38 - Esquema e foto aérea de um campo típico de coletores cilíndrico parabólicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)...	55
Figura 39 - Heliostato típico. (PSA, 2015).....	57
Figura 40 - Mecanismo de acionamento (SENER). (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)	57
Figura 41 - A esquerda um esquema de um receptor e a direita uma foto externa de um receptor. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	58
Figura 42 - A esquerda um coletor parabólico convencional e a direita o esquema de um motor Stirling. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).....	59
Figura 43 - Espaçamento de espelhos (X): Erro de precisão Vs. Sombreamento dos espelhos. (Almeida, 2013)	60
Figura 44 - Altura do receptor (hr): Erro de precisão Vs. Obstrução dos espelhos. (Almeida, 2013).....	61
Figura 45 - Corte transversal de um sistema refletor Fresnel linear com um absorvedor de cavidade trapezoidal. (Singh, Sarviya, & Bhagoria, 2009)	61
Figura 46 - Refletor secundário trapezoidal.....	65
Figura 47 - Refletor secundário parabólico.....	65
Figura 48 - Montagem do concentrador.....	69
Figura 49 - Aplicativo para encontrar angulo azimutal local.....	72
Figura 50 - Anteparo em alumínio, nas dimensões especificadas, sem espelhos planos.....	73
Figura 51 - Esquema de um concentrador Fresnel linear. (Almeida, 2013)	74
Figura 52 - Desenho técnico do receptor.	76
Figura 53 - Vista em corte do receptor, onde é possível ver o coletor e o isolamento.	77
Figura 54 - Mancais, medidas em milímetros.....	77
Figura 55 - Eixos rotativos.....	78
Figura 56 - Estrutura do concentrador solar.....	78
Figura 57 - Desenho esquemático do cordão de solda.....	79

Figura 58 - Vista explodida do concentrador.	81
Figura 59 - Desenho de conjunto.	82
Figura 60 - Tipos de elementos finitos.	84
Figura 61 - Resultados de avaliação no software SAM.	87
Figura 62 - Custos Totais.	91
Figura 63 - Custos reais.	91
Figura 64 - Posições de inserção dos equipamentos.	92
Figura 65 - Piranômetro utilizado nos testes.	93
Figura 66 - Termoresistor instalado no concentrador.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta interna de energia 2012-2013 em Mtep.(EPE)	23
Tabela 2 - Dados da radiação solar. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)	35
Tabela 3 – Tomada de decisão	68
Tabela 4 - Valoração dos fatores.....	71
Tabela 5 - Resultados dos cálculos interativos.....	74
Tabela 6 - Rácio de concentração.	75
Tabela 7 - Tolerâncias lineares.....	80
Tabela 8 - Tolerância mancal - eixo rotativo.	80
Tabela 9 - Analise de resultados da simulação.	85
Tabela 10 - Resultados para 1 ano de utilização.	86
Tabela 11 - Plano de Manutenção.	89
Tabela 12 - Custos de projeto.....	90
Tabela 13 - Potências teóricas.....	96
Tabela 14 - Rendimento do protótipo relativo ao horario de teste.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Irradiação média (RADIASOL)	72
Gráfico 2 - Relação entre o rácio de concentração e o número de espelhos (largura do espelho, $W = 300$ mm, altura do receptor, $f = 1000$ mm).	75
Gráfico 3 - Irradiação Global.	94
Gráfico 4 - Relação temperatura e potência.	95
Gráfico 5 - Relação temperatura e irradiação global.....	96
Gráfico 6 - Rendimento e Irradiação Global.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área coberta pelo aerogerador
A	Área de superfície
A_A	Área Absorvente
A_c	Área útil do coletor
A_c	Área de captura (refletora)
A_c	Área de reflexão
A_{col}	Área coletor
A_{nc}	Área útil de concentração dos raios solares
A_R	Área do receptor
A_S	Área da superfície
C	Razão de concentração
c_p	Calor específico do fluido de trabalho
E_c	Irradiação solar
E_f	Energia entregue ao receptor
f	Altura do receptor (absorvedor)
F	Ponto focal
G	Radiação global
$G_b(H)$	Radiação solar direta sobre o plano horizontal
G_d	Radiação solar que chega a superfície sem trajetória definida
G_r	Radiação solar que chega a superfície por meio de reflexão
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
I	Irradiação solar direta no plano normal
I_g	Irradiação global no plano horizontal
k	Condutividade térmica
k	Fator de reflexão da cavidade
L	Comprimento do espelho
m	Massa do fluido de trabalho
n	Índice da fileira de espelhos
P	Potência eólica
$P_{absorvida}$	Potência absorvida pelo coletor
$P_{perdida}$	Potência que o coletor perde para o ambiente
P_{solar}	Potência procedente do Sol
$P_{útil}$	Potência térmica útil
Q_{conv}	Transferência de calor convecção
Q_n	Distância entre a fila n e o centro
\dot{Q}_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução
\dot{Q}_{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação
RC	Racio de concentração
S	Distância entre os espelhos
S_n	Espaçamento entre as filas de espelhos
S_r	Radiação refletida que efetivamente atinge o receptor
t	Tempo
T_∞	Temperatura do ambiente
T_A	Temperatura do coletor
T_{cir}	Temperatura das superfícies ao redor

T_f	Temperatura final do fluido
T_i	Temperatura inicial do fluido
T_s	Temperatura da superfície
U_L	Coefficiente global de perdas do receptor
v	Velocidade
W	Largura do espelho

Símbolos Gregos

α	<i>Absorvência</i>
γ	Fator de interseção
ε	Emissividade
η	Rendimento global
η	Rendimento de um coletor térmico
η	Rendimento ótico
ξ_0	Meio ângulo de subtensão solar
ρ	Densidade do ar
ρ	Índice de reflexão
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmitância

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde os primórdios, quando o homem começou a dominar a eletricidade, o mundo se tornou “refém” da mesma, atrelando o desenvolvimento humano à energia elétrica. Ficou evidenciado por diversas vezes o quão o progresso e o desenvolvimento mundial estão ligados intrinsicamente com a energia e sua produção, sendo assim, o homem passou a buscar formas de diversificar a produção de energia, sendo a partir da força da água, do sol, dos ventos ou por reações químicas, para que em um futuro, as fontes sejam altamente renováveis de forma a se tornarem “infinitas” e de não prejudicarem o meio ambiente.

Essa busca por diversificação energética permitiu o surgimento de diversas tecnologias que buscam aproveitar fontes energéticas naturais, com objetivo de transformá-las em fontes de eletricidade, a fim de se encontrar o equilíbrio entre grande eficiência de conversão e baixo impacto ambiental.

Nas últimas décadas houve destaque para duas técnicas de obtenção de energia, a solar, tanto a fotovoltaica quanto a heliotérmica e a energia eólica, pois o sol e os ventos, são fontes “inesgotáveis” e disponíveis de forma global. Porém mesmo com o avanço dos mais variados estudos e da utilização de tecnologias de ponta, no desenvolvimento de máquinas cada vez com maior eficiência, os custos ainda são altos e as eficiências não tão boas quando comparadas às usinas hidrelétricas e termoelétricas, sendo assim, grande parte dos estudos recentes buscam uma forma de baratear os custos dessas novas fontes renováveis, mantendo ou melhorando a eficiência, no intuito de tornar as energias renováveis interessantes a grandes investimentos, de maneira a ampliar globalmente a utilização das novas fontes energéticas.

Nessa conjuntura de encontrar novas formas de obtenção de energia de maneira eficiente e barata, surge a demanda de um projeto que tenha o intuito de inovar na geração de energia, tendo o foco no baixo custo, que é o principal impedimento no desenvolvimento de novas técnicas para aquisição de energia.

Dentro do contexto apresentado, a energia solar se destaca por apresentar versatilidade nas formas de gerar energia, o que permite inovações nas técnicas de geração. Nesse meio destacasse as técnicas heliotérmicas, que se baseiam principalmente na reflexão da luz solar com objetivo de criar um aquecimento concentrado. Dentre as diversas técnicas heliotérmicas, a técnica de lentes fresnel com foco linear se destaca por ser versátil, de forma de que pequenos ajustes permitam criar alternativas mais baratas de utilização da técnica.

Assim algumas hipóteses para a resolução do problema de baixo custo e boa eficiência surgem, como a criação de paines fensel mistos que unam a reflexão solar à geração fotovoltaica, ou a utilização de papel alumínio como material reflexivo ao invés das lentes fresnel ou mesmo a utilização de espelhos planos.

1.2 OBJETIVOS

O propósito desse trabalho é a de projetar, construir e analisar experimentalmente um protótipo de painel Fresnel onde os requisitos são baixo custo e boa eficiência, em que procura-se encontrar o equilíbrio entre custo e rendimento. A análise experimental é feita por meio de ensaios do painel construído realizados em campo.

Os resultados da análise experimental servirão como base para avaliar o modelo contruído, bem como para serem confrontados com os valores teóricos.

1.3 METODOLOGIA

Na concepção do projeto serão utilizados conceitos e técnicas de projeto de máquinas e de projetos de sistemas mecânicos, buscando o desenvolvimento de todo o projeto.

Em termos de fabricação serão utilizados conceitos de fabricação mecânica, seguindo todas os procedimentos e normas para à fabricação de sistemas mecânicos.

No que tange a análise dos resultados serão utilizados conceitos da termodinâmica, e de captação de energia solar para avaliação dos resultados obtidos, e para as demais considerações que deverão ser feitas.

Os parâmetros de projetos encontrados serão comparados com projetos similares referenciados, de forma a validar o sistema e propor ajustes para trabalhos futuros, a fim de se chegar em um projeto com a maior eficiência e menor custo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em oito capítulos de forma a facilitar a estruturação e o entendimento do conteúdo. O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica do histórico da energia bem como de como se encontram hoje a matriz energética brasileira e mundial.

O terceiro capítulo também é uma revisão bibliográfica que explora os conceitos relacionados ao desenvolvimento das energias renováveis no mundo, e dos seus principais expoentes que ganham mercado cada vez mais.

O quarto capítulo é uma revisão bibliográfica sobre a energia solar térmica onde são estabelecidos os conceitos necessários para o entendimento dessa vertente energética bem como são mostrados os principais métodos de obtenção de energia a partir do calor gerado pela radiação solar.

O capítulo cinco é referente ao foco do trabalho que é a concepção de um projeto de tecnologia Fresnel, onde se tem o detalhamento desta tecnologia bem como suas principais características.

O capítulo seis será referente ao projeto conceitual, onde será abordado todas as nuances do projeto. Já o capítulo sete trata do projeto de detalhamento, onde todas as decisões de projeto serão tomadas. O capítulo oito trata dos resultados obtidos teoricamente e na prática, bem como expõe as conclusões obtidas.

2 ENERGIA

A história mostra que o homem desde seus primórdios, utiliza a inteligência visando criar mecanismos que reduzam o esforço e aumentem o conforto. Ao longo de milhares de anos essas necessidades foram aumentando, forçando o homem a inventar novos meios para satisfazer seus gozos, ao longo dessa história, um fato foi marcante, a criação da máquina a vapor, um símbolo da revolução industrial, onde determinou definitivamente o uso e a importância da energia para o futuro desenvolvimento mundial. (CPFL, 2015) (EDP, 2015). É possível perceber que o mundo pós revolução industrial se transformou de maneira rápida, onde foi perceptível várias mudanças, destacando-se a intensa busca por novas fontes de energia a fim de se encontrar uma fonte segura, duradoura e economicamente viável. (Burattini, 2008).

2.1 PREAMBULO HISTÓRICO BRASILEIRO

A história energética brasileira se torna relevante a partir de 1981, época em que a constituição declarava que o uso da terra e de todos os recursos presentes no solo eram de posse do dono da terra, e esse poderia utilizar os recursos ali presentes de maneira livre. (Tolmasquim, Oliveira, & Campos, 2002).

No início do século XX o setor energético brasileiro, devido as leis estabelecidas, era restrito a empresas municipais e algumas poucas empresas estrangeiras. (Leite, 1997). Porém a crise de 1929, que afetou principalmente o setor agrário brasileiro, forçou o governo a efetivar diversas mudanças junto ao setor energético, devido a necessidade do país criar um ambiente favorável ao desenvolvimento industrial e isso passava pelo desenvolvimento do setor energético. (Gomes, 1986).

Dada as circunstâncias em 1934 o governo decretou que a utilização dos recursos hídricos de todo território brasileiro seriam de propriedade da União, e a mesma teria o poder de conceder concessões de uso de até 50 anos. (Rosim, 2008).

Após diversas políticas de incentivo à industrialização, no ano de 1957, houve um marco na história energética brasileira com a criação de Furnas, visando suprir a demanda de energia da região sudeste, mais industrializada e povoada do país. Com isso o setor industrial tomou fôlego para continuar a se desenvolver e conseqüentemente o setor energético teve que evoluir junto, possibilitando a criação de várias companhias elétricas e investimentos no setor. (Rosim, 2008).

Outro marco nesse período de mudanças foi a assinatura do tratado binacional de Itaipu em 1973, em que Brasil e Paraguai se juntaram no intuito de criar a Usina de Itaipu, que entrou em operação em meados de 1984, contribuindo significativamente para a expansão da oferta de energia. (Rosim, 2008). Também nos anos 80 houve a construção de várias outras hidrelétricas, bem como o começo da diversificação da produção de energia com a criação de Angra 1, primeira usina nuclear brasileira, e a criação de várias termoelétricas espalhadas pelo país.

Porém todo esse crescimento energético não foi suficiente para acompanhar o crescimento da demanda do país, o que culminou em 2001, marco negativo na história brasileira, onde o Brasil enfrentou alguns meses de racionamento de energia, que ficou conhecido como “apagão”. Do ponto de vista do governo o apagão foi causado por um longo período de estiagem naquele ano, porém para especialistas da área, a crise se deu devido à falta de investimentos na área energética, bem como a dependência da hidroeletricidade e por fim uma má gerência dos recursos. (Tolmasquim M. , 2000).

A crise de 2001 despertou um estado de alerta, fazendo com que o governo a partir daquele revés passasse a investir na diversificação da matriz energética, com o objetivo de se ter disponível várias opções de geração de energia, visando criar um cenário onde o país não seria mais dependente das chuvas.

O último fato marcante na história do setor energético brasileiro aconteceu em 2014, em que no mês de outubro ocorreu o primeiro leilão de energia solar no Brasil, que ficou marcado por ofertas agressivas, resultando na contratação de 890 MW de capacidade despachável (capacidade total de 1.048 MW) a um preço médio de 215 R\$/MWh, preço esse considerado baixo para a energia solar, segundo a empresa de análise Bloomberg New Energy Finance¹. (Ambiente e Energia , 2015).

2.2 MATRIZ ENERGETICA

Desde da década de 70 com um aumento acentuado da demanda de energia, fez-se notar uma tendência de diversificação da matriz energética brasileira visando suprir as necessidades evidenciadas pelo crescimento econômico. Em 1970 tinha-se como principais fontes energéticas o petróleo e a lenha que juntos correspondiam a 78% do consumo energético do país. Porém ao longo do tempo a hidroeletricidade se firmou como fonte energética, além de que outras tecnologias também ganharam forma e representatividade, o que se faz notar ao avaliarmos a diferença entre a oferta energética de 1970 e 2000, como mostra a figura 1. (Tolmasquim, Guereiro, & Gorini, 2007)

¹ BNEF é a empresa líder e provedora independente de dados, notícias e análise para profissionais dos setores de energia renovável, mercado de carbono, tecnologias inteligentes de energia, água, energia elétrica, energia nuclear e captura e armazenamento de carbono.

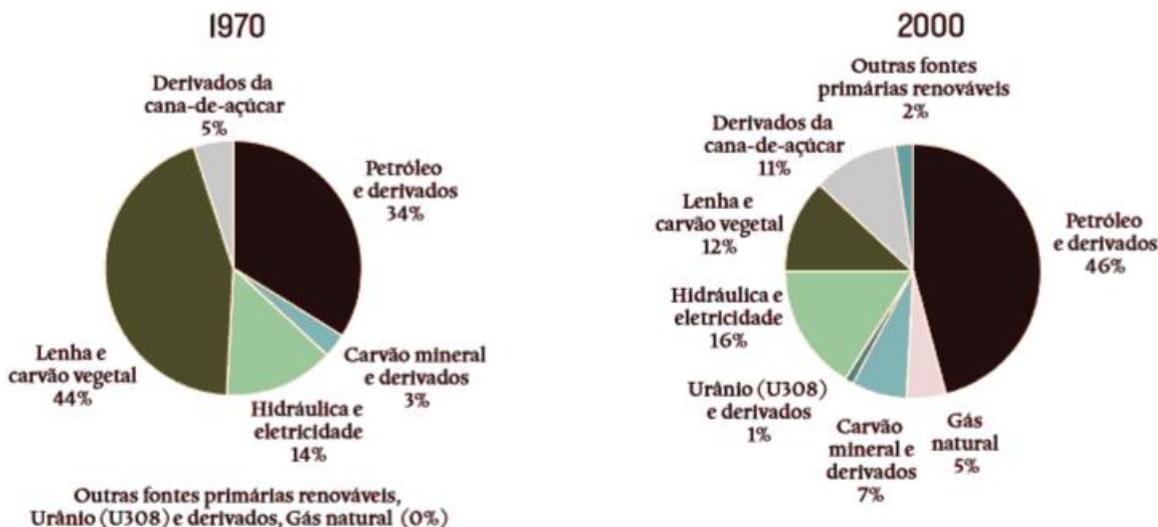


Figura 1 - Evolução da estrutura da oferta de energia, Brasil 1970 – 2000. (EPE)

Após a crise de 2001, intensificou-se a busca pela diversificação energética, em 2003 um projeto de lei foi aprovado, obrigando o incentivo a diversificação da base energética. Dada a viabilidade de incentivos em energias renováveis começou-se a observar mudanças na matriz energética, onde cada vez mais o petróleo diminuía seu domínio. Em 2009 tinha-se uma matriz energética bem diferente, quando comparada a matriz energética de 2000, como pode-se ver na figura 2. (Araújo & Goes, 2009)

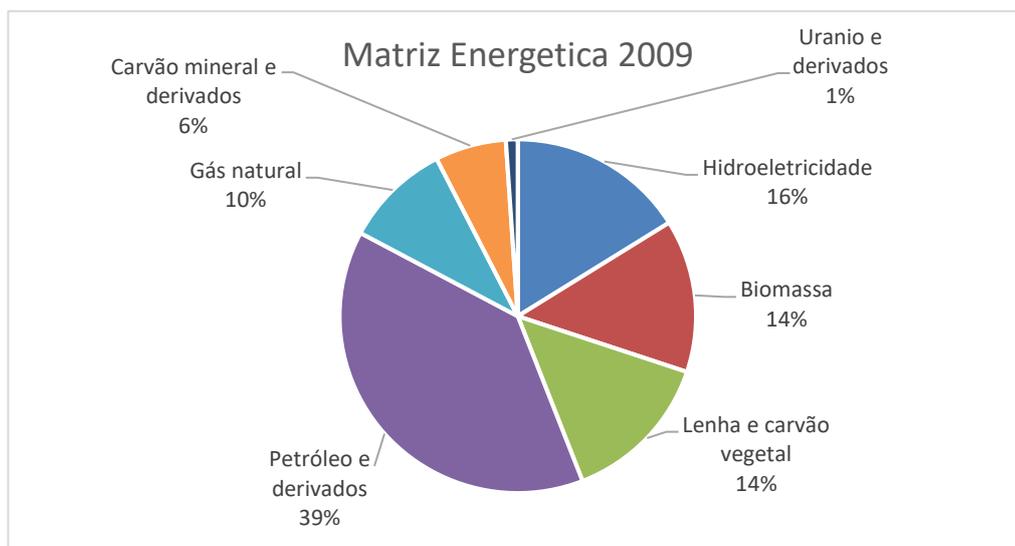


Figura 2 - Matriz energética brasileira 2009. (Araújo & Goes, 2009)

A partir de 2011 as concessionárias, permissionárias e autorizadas do Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SIN)² passaram a ter o dever de contratar anualmente, através de leilões, energias renováveis, com o propósito de ampliação da capacidade mínima de geração de energia elétrica. As

² Sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários.

energias a serem contratadas são: eólica (200 MW), biomassa (200 MW) e 200 MW de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's). (Araújo & Goes, 2009).

Após as medidas adotadas em 2011, a matriz energética começou a tomar nova forma, o que é perceptivo no Balanço Energético Nacional³, realizado em 2014, em que uma nova estrutura da matriz energética brasileira foi percebida, vide figura 3, pois as energias renováveis não hídricas começaram a ganhar espaço, mesmo com a “estagnação” da participação das renováveis (Empresa de Pesquisa Energetica - EPE, 2014).

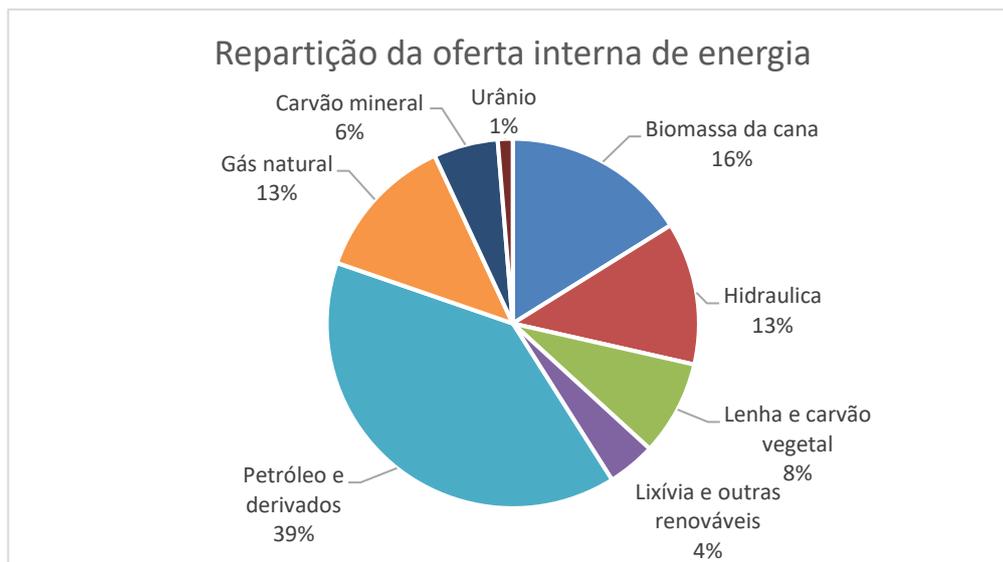


Figura 3 - Matriz energética brasileira 2013/2014. (EPE)

Na figura 3, quando comparada a figura 2, percebe-se uma queda na produção hídrica, isso devido ao grande período de estiagem que o país enfrentou no ano de 2013, assim sendo, proporcionalmente outras fontes cresceram em produção. Essas variações ficam evidenciadas na tabela 1 e na figura 4 que mostram as variações de oferta das fontes energéticas entre 2012 e 2013.

Tabela 1 - Oferta interna de energia 2012-2013 em Mtep.(EPE)

FONTES (Mtep)					
RENOVAVEIS	2012	2013	NÃO RENOVAVEIS	2012	2013
		121,5		119,8	
Energia hidráulica	37,1	39,2	Petróleo	116,5	111,4
Biomassa da cana	47,6	43,6	Gás Natural	37,8	32,6
Lenha e carvão vegetal	24,6	25,7	Carvão mineral	16,5	15,3
Outras renováveis	12,3	11,4	Urânio	3,9	4,3

³ O relatório consolidado que documenta e divulga, anualmente, extensa pesquisa e a contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil, contemplando as atividades de extração de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, a importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia.

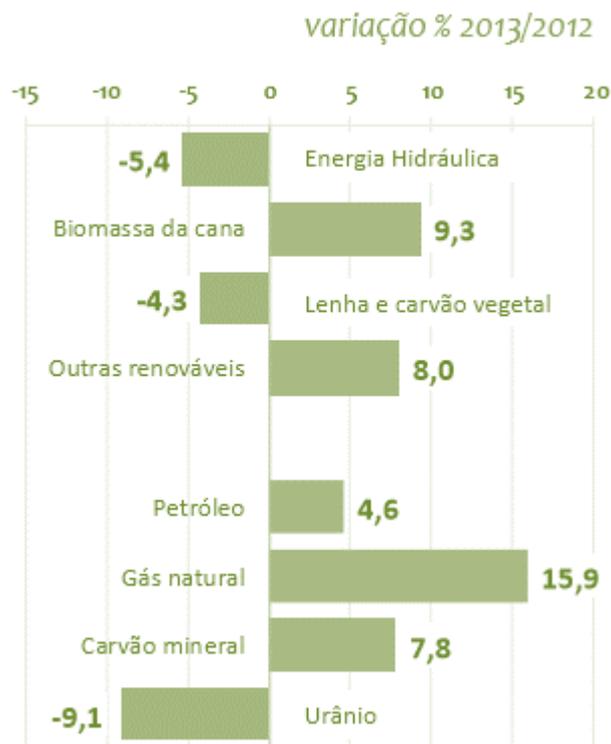


Figura 4 - Variação percentual da oferta energética entre 2012 e 2013. (EPE)

Nesse contexto projeta-se para 2030 um cenário em que o petróleo continuará a perder “força” diante de novas fontes, além de que a hidroeletricidade também perderá espaço, pois prevê-se a saturação de usinas nas regiões de importância bem como tem-se perspectivas de cenários cada vez mais críticos nos níveis pluviométricos do país, assim sendo tem-se a previsão apresentada na figura 5. (Tolmasquim, Guereiro, & Gorini, 2007)

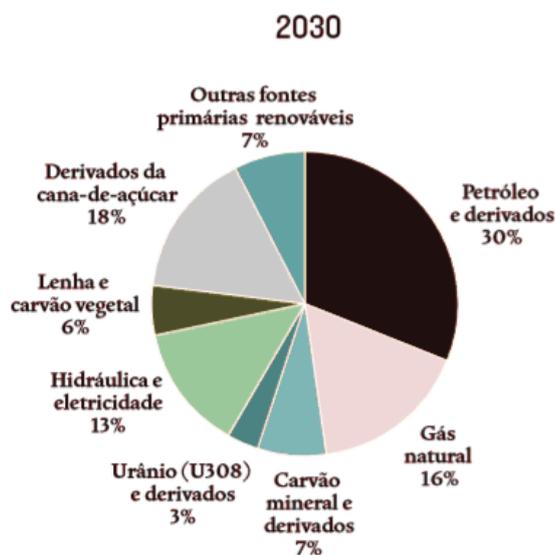


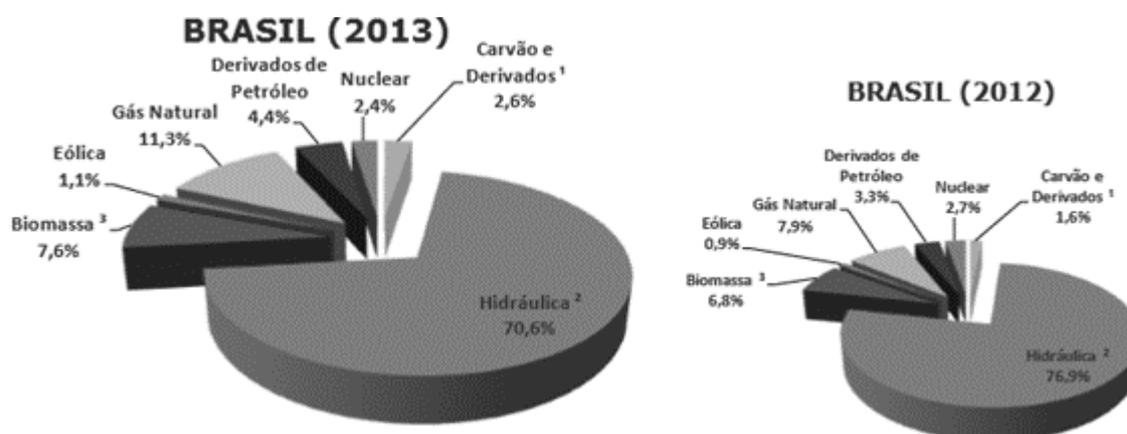
Figura 5 - Previsão da oferta energética em 2030. (EPE)

A figura 5 mostra uma perspectiva pessimista quanto a diversificação intensa da matriz energética brasileira, porém os fatos recentes indicam que as mudanças, principalmente no que envolve fontes

renováveis, serão mais rápidas do que esperado devido principalmente as constantes dificuldades quanto a oferta de energia, bem como os preços cada vez maiores cobrados ao consumidor.

2.2.1 Matriz elétrica brasileira

Quando damos enfoque a matriz elétrica brasileira temos um panorama totalmente favorável a energias renováveis, pois a hidroeletricidade tem uma participação de aproximadamente 70% na matriz elétrica, porém esse domínio da produção elétrica por parte das hidrelétricas tornou o país dependente dos níveis pluviométricos, dependência que nos últimos anos têm causado diversos problemas, dentre eles, o aumento da tarifa. No gráfico comparativo das matrizes elétricas de 2012 e 2013, fica evidenciado a queda da geração hidráulica, como mostrado na figura 6.



Geração Hidraulica² em 2013: **430,9 TWh**
 Geração total em 2013: **609,9 TWh**

Geração Hidraulica² em 2012: **455,6 TWh**
 Geração total em 2012: **592,8 TWh**

Figura 6 - Comparativo entre a matriz elétrica 2012 e 2013 1 Gás de coqueira; 2 Inclui importação; 3 Inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações. (EPE)

Entretanto tem-se que, justamente o decréscimo da oferta hídrica foi o que impulsionou o crescimento de outras fontes, principalmente a energia eólica e o gás natural. Os incrementos substanciais dessas fontes foram essenciais para o aumento da geração total de 2012, para o ano de 2013. (Empresa de Pesquisa Energetica - EPE, 2014)

Nos anos de 2013 e 2014 com o aumento do consumo energético e a diminuição da produção hídrica, o *déficit* energético foi suprido pela expansão da geração térmica, especialmente das usinas movidas a carvão mineral e gás natural, porem outras fontes começaram a se expandir também. (Empresa de Pesquisa Energetica - EPE, 2014).

A figura 7 deixa evidenciado o aumento da potência instalada das principais fontes energéticas, principalmente do gás natural, energia nuclear e eólica, mostrando as novas tendências energéticas que devem ditar a produção de energia nos próximos anos. (Araújo & Goes, 2009)

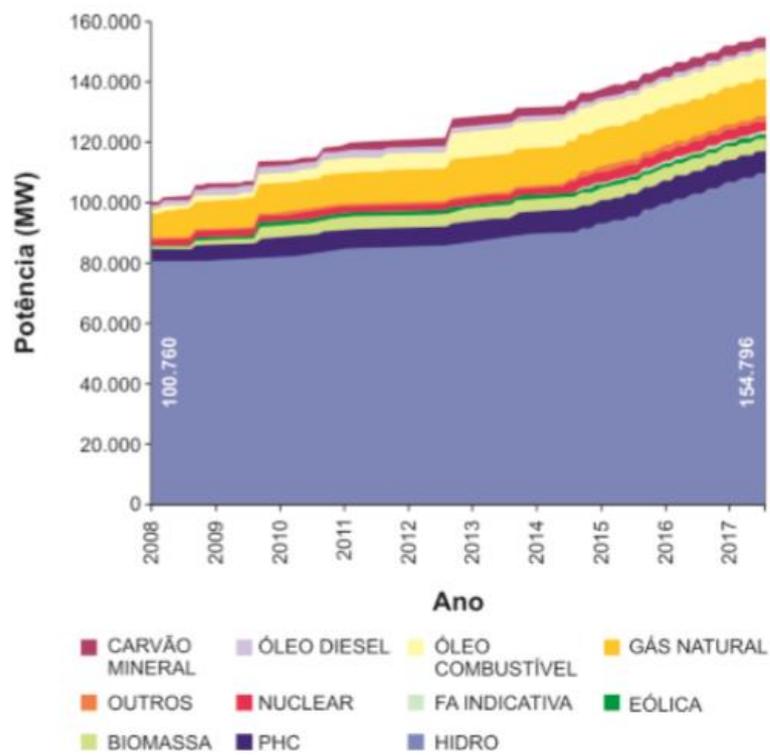


Figura 7 - Evolução da potência instalada por fonte. (EPE)

3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Os primeiros capítulos analisaram o âmbito energético brasileiro, bem como a situação da matriz energética e sua dependência à alguns tipos de energia, chegando-se a conclusão central, a necessidade de diversificação da matriz energética através de fontes renováveis, que complementem a geração hídrica. Porém é de valia ressaltar que apesar de cada vez mais a energia hídrica se tornar sazonal, a exploração dos recursos hídricos, deve manter-se como primeira opção na busca pela expansão da oferta nacional, como já vem sendo feito com a construção de grandes usinas hidrelétricas na região Norte, e também com a construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's). (Castro, Dantas, Leite, Brandão, & Timponi, 2010).

Com o destaque das fontes renováveis, mesmo essas não sendo um consenso como as melhores alternativas à mitigação do problema das relações climáticas, elas são alternativas locais e complementares, que em longo prazo serão importantes na matriz elétrica brasileira pois ajudarão suprir o crescimento da demanda do país, bem como reduzirão o custo das tarifas se acompanhadas de políticas fiscais mais igualitárias. (Araújo & Goes, 2009).

Porém, mesmo com a corroboração legislativa desde 2003 com o Projeto de Lei nº 630, as energias alternativas ainda estão em pequenos nichos, onde estão voltadas para atender necessidades locais, e atividades econômicas específicas, evidenciando assim a necessidade de mais investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, de forma a buscar evoluções tecnológicas, que permitam o crescimento do “setor”, que ainda é vulnerável à mudanças climáticas. (Araújo & Goes, 2009)

É importante ressaltar que nos últimos 5 anos o Governo Federal vem se mobilizando em busca de promover a regulamentação, o maior financiamento e a comercialização das energias alternativas, sendo essas intervenções que vem alavancando o crescimento nacional no âmbito de energias renováveis. (Araújo & Goes, 2009).

Este capítulo tem como objetivo uma breve explicação de alguns conceitos básicos relacionados à energias renováveis. Serão abordados alguns parâmetros importantes ao desenvolvimento das energias renováveis no país, bem como serão analisadas as fontes mais importantes, que se destacam no Brasil, como fontes mais propícias às nossas condições naturais.

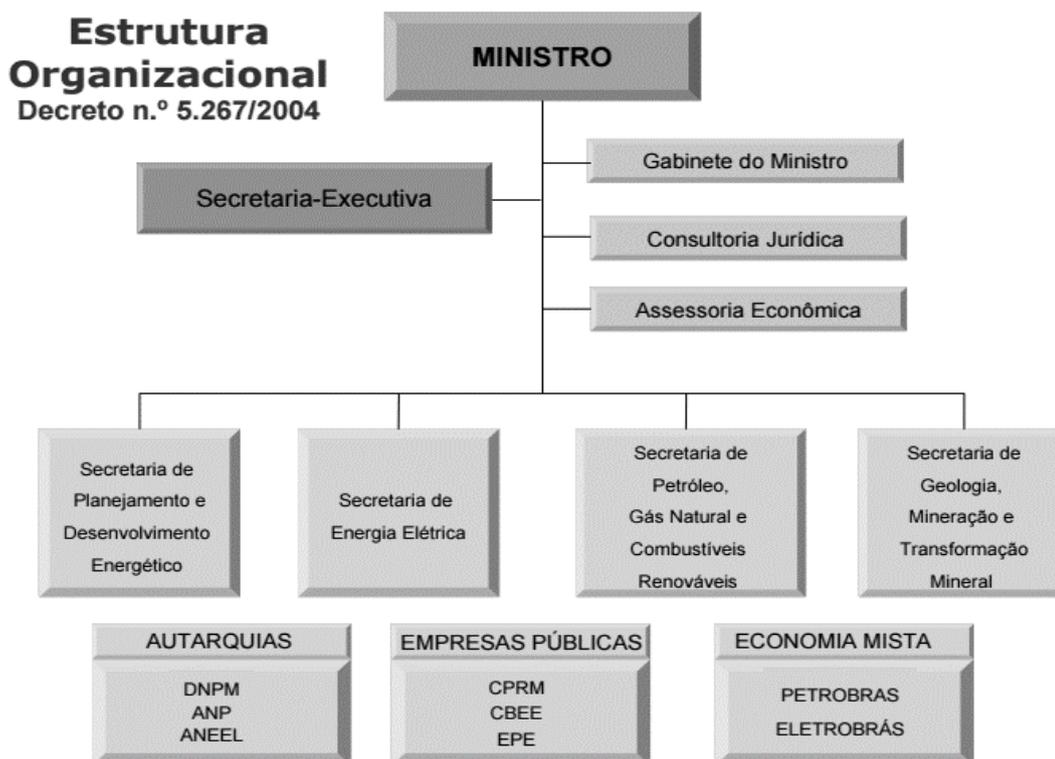
3.1 O INICIO DOS ESTUDOS

Os estudos sobre energias renováveis/alternativas se iniciaram no Brasil a partir da década de 70 com o programa do Governo Federal denominado Proálcool, que se baseou em diversos incentivos monetários, a partir do governo, para que os combustíveis derivados do petróleo fossem substituídos pelo álcool, advindo da cana-de-açúcar. Esse foi o começo das pesquisas em biocombustíveis, dando início aos estudos de fontes renováveis e alternativas de energia.

Porém foi só em 2001, pós crise energética, que se intensificou a busca por fontes alternativas de energia, onde diversos programas de incentivo ao desenvolvimento energético foram criados visando o desenvolvimento e a diversificação energética.

3.1.1 Estruturação

A estruturação do setor energético brasileiro é todo feito pelo Ministério de Minas e Energia, como mostra o organograma 1, que elabora toda a regulamentação do setor bem como promove programas de incentivo a diversificação energética e ao desenvolvimento do setor.



Organograma 1 - Estrutura organizacional MME.

É de competência da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético os estudos sobre energias renováveis, bem como a concessão de licenças para novos empreendimentos energéticos. A partir dos estudos realizados o ministério em conjunto com outras secretarias realiza leilões energéticos que buscam contratar diversos projetos de geração de energia, tendo em vista grandes investimentos no setor de geração de energia. O último leilão realizado, no segundo semestre de 2015, contratou um total de 20 projetos de energia eólica e 33 projetos de energia solar fotovoltaica, representando investimentos totais de cerca de R\$ 6,8 bilhões no país nos próximos três anos. (EPE - Empresa de Pesquisa Energetica, 2015)

Para Mauricio Tolmasquim, esses diversos leilões que vem sendo realizados, tornam o Brasil cada vez mais atraente para novos investidores em energias renováveis, principalmente no âmbito de energia solar, pois cada vez mais o Brasil se apresenta com preços competitivos em relação ao mercado internacional. (EPE - Empresa de Pesquisa Energetica, 2015).

3.1.2 Incentivos

Os incentivos às energias alternativas renováveis, conhecidos como EARs se destacam por atuarem em cinco frentes, de forma a alcançar diversos meios que possibilitem a expansão das energias renováveis. Essas atuações das EARs são calcadas em um tripé compostos por marcos regulatórios claros e estáveis, por programas de apoio do BNDS⁴ e pelo plano de apoio da Eletrobrás.

A primeira frente de atuação é o PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, que visa a implantação de diversos empreendimentos no seguimento de energias renováveis. Implantado em 2002, o programa conta hoje com 119 empreendimentos, diversificado entre produção eólica, PChs e térmicas a biomassa, que somados possuem uma capacidade instalada de 2649,87 MW.

A implantação do PROINFA foi fundamental para o início da diversificação da matriz energética nacional, além de gerar por volta de 150 mil empregos diretos e indiretos, proporcionando grande avanço industrial e internalização da tecnologia de ponta. O programa também viabiliza a redução de emissões de gases efeito estufa, que se contabilizadas já estão na casa de 2,5 milhões de toneladas de CO₂eq/ano a menos na atmosfera. (Porto, 2005)

A segunda frente de atuação foi a permissão dada as concessionárias, permissionárias e autorizadas a contratar geração distribuída, observando-se os limites de contratação e do repasse integral. (Porto, 2005)

O terceiro meio de incentivo é a permissão para que consumidores ou grupos de consumidores, cuja carga seja maior ou igual a 500kW, possam fazer a contratação direta em qualquer nível de tensão, podendo o fornecimento ser complementado por empreendimentos de geração associados, mas limitando a 49% da energia média que produzirem. (Porto, 2005)

A quarta frente de atuação é a sub-rogação da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC)⁵ para empreendimentos localizados nos Sistemas Isolados. Já a quinta forma de incentivo é o desconto nas tarifas de uso do sistema de transmissão e distribuição, sendo o percentual de redução de 50% incidindo da produção ao consumo da energia comercializada.

⁴ Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social é uma empresa pública federal, cujo principal objetivo é financiar de longo prazo a realização de investimentos em todos os segmentos da economia, de âmbito social, regional e ambiental.

⁵ Encargo do setor elétrico brasileiro, cobrado nas "tarifas de distribuição" e nas "tarifas de uso" dos sistemas elétricos de distribuição e transmissão, que é pago por todas as empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica e pelas concessionárias de transmissão de energia elétrica, para cobrir os custos anuais da geração termelétrica eventualmente produzida no país

3.1.3 Barreiras ao desenvolvimento

As energias renováveis enfrentam diversas barreiras, sejam elas econômicas, tecnológicas ou até mesmo por falta de recursos humanos, por causa desses fatores a difusão das fontes renováveis de energia fica tão comprometida.

O alto custo inicial, principalmente por conta dos equipamentos (Porto, 2005), alinhado com o fator de risco que existe ainda em volta das energias renováveis, faz com que grandes investidores fiquem inibidos em investir capital em fontes renováveis. Com falta de condições ideais para desenvolvimento do mercado, a escala de produção fica comprometida bem como os custos de capital não diminuem, como seria o ideal. (Walter, 2003)

Outro fator dificultador é falta de capacitação e de formação de recursos humanos, bem como, a pouca conscientização da sociedade. (Porto, 2005). Essa dificuldade fica evidenciada quando temos que um dos nichos de mercado são comunidades isoladas e no meio rural, constituído majoritariamente por pessoas que tem restrições a informações técnicas e dificuldade de entender, manusear e manter sistemas “complexos” de energia. Mas essa dificuldade não está restrita ao meio rural, pois em um âmbito geral o país não possui, em quantidade suficiente, mão de obra qualificada à interagir com as tecnologias alternativas renováveis. (Walter, 2003).

Existem dificuldades também quanto à adequação do sistema e da logística da rede (Porto, 2005), pois a logística precária impede o crescimento das energias renováveis (Agencia Brasil, 2015), visto que existem diversos empreendimentos que estão prontos, exemplo são 48 parques eólicos localizados na região nordeste, que estão concluídos porem não podem operar devido à falta de ligação com a rede. (Uol notícias - Ciencia e Saúde, 2013).

3.2 TIPOS DE ENERGIAS RENOVAVEIS

São vários os tipos existentes de energias renováveis, e conseqüentemente algumas se destacam mais, e são mais adaptáveis as condições brasileiras. Nos próximos tópicos serão destacadas as principais energias renováveis, que se destacam no cenário brasileiro, onde as principais características, vantagens e desvantagens dessas energias renováveis serão comentadas.

3.2.1 Hídrica

A energia hídrica consiste na obtenção de energia elétrica a partir do potencial hidráulico do fluxo natural da água. São construídas barragens e usinas no curso do rio a fim de se aproveitar essa energia da água, pois a água entra com muita força e velocidade pelas tubulações da usina hidrelétrica, realizando a movimentação das turbinas. As turbinas por sua vez, conectadas a geradores, que atuam transformando a energia mecânica em energia elétrica. (Brookfield Renewable Energy Partners, s.d.)

A produção de energia de uma usina hidrelétrica é proporcional ao produto do volume de água que passa pela turbina e pela altura líquida da queda, que é a diferença entre a cota do reservatório e o nível do canal de fuga, dependente do volume de fluente e das perdas hidráulicas. A Energia produzida também é dependente da potência do gerador. (Kelman, Kelman, & Pereira).

As usinas hidrelétricas, como a usina de Itaipu, figura 8, são responsáveis por 65,2% da produção de energia elétrica, segundo o Balanço Energético Nacional 2015 (EPE - Empresa de Pesquisa Energetica, 2015). Essa predominância da energia hídrica no Brasil se vale do fato do país possuir enormes reservas hídricas, abrangendo todo o território.



Figura 8 - Usina Hidrelétrica de Itaipu. (EBC, 2014)

A eficiência energética das usinas hidrelétricas é de aproximadamente de 95%, o que em termos de produção elétrica é considerado alto, além de que o combustível de produção tem preço nulo, sendo assim, os altos custos de implantação e manutenção são minimizados (Francisco, 2015). Esses fatores proporcionam confiabilidade na produção elétrica nacional (ELETROBRAS), mas em contrapartida a esta estabilidade tem-se a dependência ao ciclo de chuvas, pois as hidrelétricas precisam manter seus reservatórios cheios para a plena produção, o que acaba por gerar certa instabilidade.

Além da dependência das chuvas, as hidrelétricas mesmo sendo fontes renováveis de energia, possuem problemas relacionados à sua implantação, como impactos ambientais causados pela inundação de grandes áreas, devido às barragens. (Francisco, 2015) As inundações, que normalmente não são adequadamente avaliadas, causam destruição de imensas áreas cultiváveis, e de vegetação natural, bem como prejuízos a fauna local e à população local que tem que ser removida e realocada. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006)

Entretanto mesmo com os problemas citados, o Brasil não para de investir em novas usinas hidrelétricas, exemplo é a construção de Belo Monte mostrada na figura 9, pois é e continuará sendo a principal fonte de energia elétrica do país por um longo tempo. Além disso, hoje vem crescendo a implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH), que servem ao abastecimento de pequenas regiões, e aproveitam rios que possuem baixas vazões.



Figura 9 - Obras da Usina de Belo Monte. (Belo Monte, 2015)

3.2.2 Eólica

Nos últimos anos a fonte renovável que tem ganhado destaque no cenário brasileiro é a energia eólica, matriz renovável que vem recebendo grandes investimentos por conta do PROINFA. Junto com esses investimentos tem-se que a indústria nacional vem passando por uma capacitação tecnológica, bem como os custos da eletricidade eólica vem diminuindo, isso associado ao potencial eólico brasileiro, dão indícios que a médio prazo, a produção eólica poderá ocupar lugar de destaque na matriz energética brasileira, atuando como fonte descentralizada e complementar de energia acoplada a rede, um exemplo claro dos investimentos em energia eólica é mostrado na figura 10, que mostra o parque eólico de Parnaíba. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006).



Figura 10 - Parque eólico em Parnaíba-PI. (Jornal da Parnaíba, 2015)

O Brasil, por possuir um enorme território, consequentemente apresenta várias regiões que favorecem a produção eólica, tanto de energia quanto para outras aplicações, como o bombeamento de água. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

Porém para o melhor aproveitamento do recurso natural em questão, é necessário um estudo a respeito do comportamento do vento, principalmente quanto a sua velocidade e direção, pois a produção eólica ocorre a partir do contato do ar com as pás do cata vento, gerando forças de sustentação e arrasto, forças que são transmitidas ao rotor do aerogerador. A energia produzida por um aerogerador é em função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás e da velocidade do vento, como demonstrado na equação 1 (Ministerio de Minas e Energia, 2007):

$$P = \frac{1}{2} * A * t * \rho * v^3 \quad [1]$$

A equação 1 evidencia que a potência é diretamente proporcional ao cubo da velocidade, daí a necessidade do estudo do comportamento do vento. No Brasil os estudos relacionados ao comportamento do vento têm sido coletados e apresentados pelo Atlas Eólico Brasileiro, que é publicado desde 1988, as figuras 11 e 12 mostram estudos acerca do potencial eólico brasileiro.

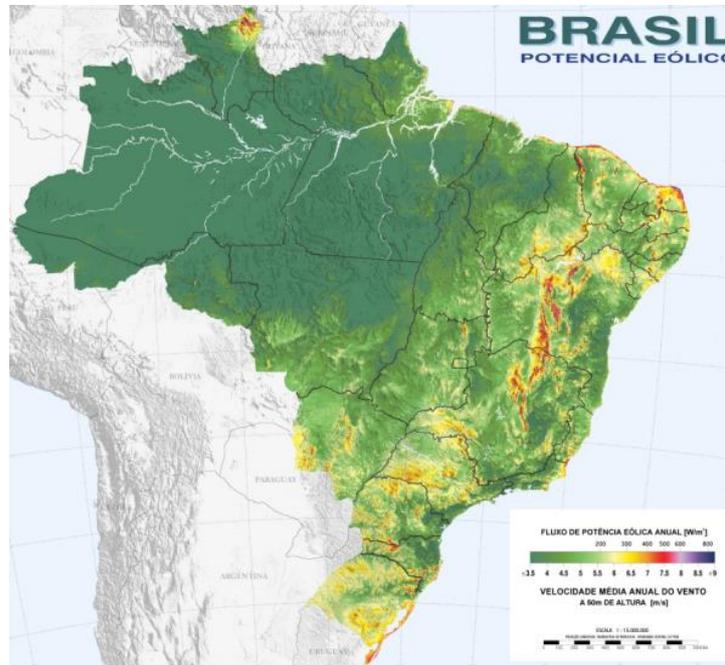


Figura 11 - Fluxo de potência eólica anual. (Amarante, Brower, Zack, & Sá, 2001)

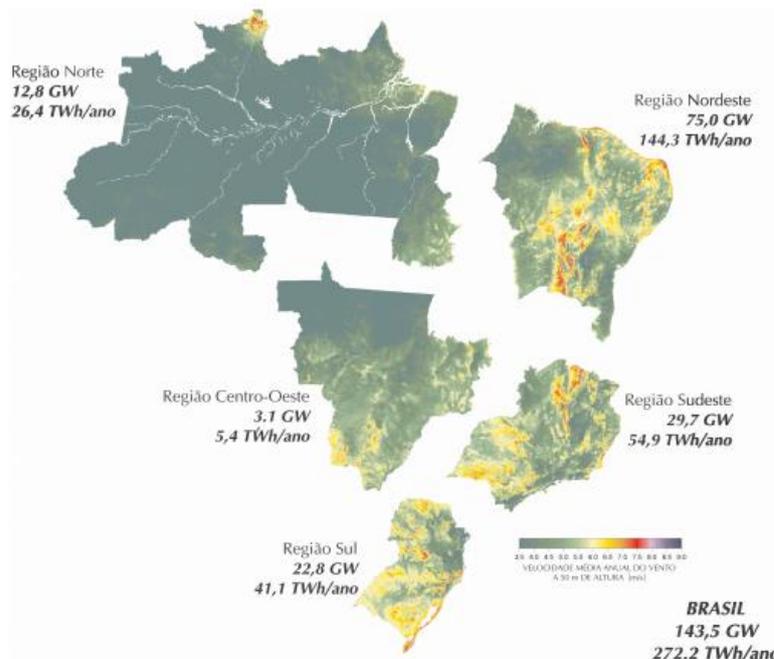


Figura 12 - - Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s. (Amarante, Brower, Zack, & Sá, 2001)

É possível perceber que as regiões favoráveis a energia eólica se localizam principalmente no litoral nordeste do país, e é nessa região que se concentra a produção eólica nacional. Todavia essa regionalização da energia eólica dificulta a transmissão pela rede, já que a região que mais consome energia no país é a região sudeste.

Mesmo a energia eólica sendo uma fonte limpa e que apresenta um grande potencial de aproveitamento, principalmente na região nordeste, ela enfrenta alguns problemas como o alto custo de equipamentos, a falta de recursos humanos especializados e também problemas causados pelo seu funcionamento, pois populações que vivem próximas a pártios eólicos reclamam dos efeitos visuais para a paisagem e a perturbação da vida silvestre. (Porto, 2005)

3.2.3 Energia solar

A energia solar irradiada na Terra é capaz suprir 10.000 vezes o consumo de energia do mundo. Para se ter uma ideia da capacidade solar, somente a luz do sol é capaz de gerar em média 1.700 kWh de energia elétrica por ano para cada metro quadrado de área. (Ministerio de Minas e Energia, 2007). O Brasil por estar localizado em uma região intertropical possui grande potencial para o aproveitamento da energia solar durante todo o ano. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006).

Porém o aproveitamento deste potencial solar, depende de estudos complexos a respeito da radiação direta e indireta do local de interesse, sendo necessário a medição da insolação e radiação. O que determina a disponibilidade da radiação é a latitude isso devido ao movimento da terra em torno do Sol, mostrado na figura 13, que transita em um plano inclinado de aproximadamente de 23,5° com relação ao plano do Equador. (Ministerio de Minas e Energia, 2007).

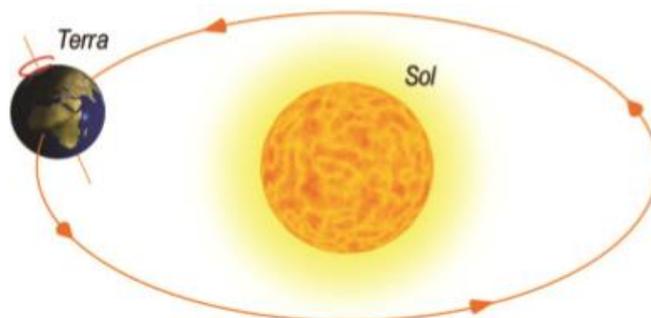


Figura 13 - Movimentos da Terra. (Nautilus, 2015)

Essa inclinação relativa da Terra faz com que haja uma variação da elevação do Sol em relação a mesma hora, ao longo dos dias, determinando as estações do ano. Como o território brasileiro se encontra em uma faixa de proximidade a linha do equador, tem-se que a variação da duração dos dias não é grande, favorecendo a irradiação solar, que é possível ser vista na figura 14. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

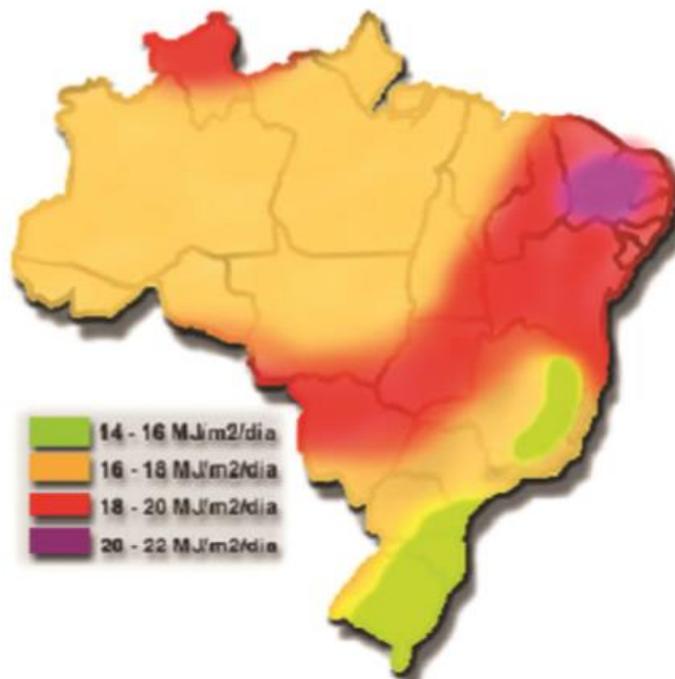


Figura 14 - Variação da radiação solar no Brasil. (Ministerio de Minas e Energia, 2007).

O estudo de maior relevância no país sobre as potencialidades solares é intitulado como Atlas Solar, que reúne mais de 40 anos de estudo sobre o tema, onde são analisadas a intensidade de radiação em todo o território nacional, bem como a variação dela ao longo dos anos. O estudo culminou em resultados que mostram que a radiação solar no país varia de 8 a 22 MJ/m² durante o dia, e os meses de maio e julho são os que apresentam as menores variações, quando a variância fica entre 8 e 18 MJ/m², a Tabela 2 apresenta os dados mais detalhados acerca do assunto. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

Tabela 2 - Dados da radiação solar. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

Localidade	Latitude	Radiação mínima (MJ/m ²)	Radiação máxima (MJ/m ²)	Média anual (MJ/m ²)	Radiação max/ Radiação min.
Dangola (Sudão)	19°10'	19,1 (Dez)	27,7 (Mai)	23,8	1,4
Dagget (EUA)	34°52'	7,8 (Dez)	31,3 (Jun)	20,9	4,0
Belém - PA	1°27'	14,2 (Fev)	19,9 (Set)	17,5	1,4
Floriano - PI	6°46'	17,0 (Jun)	22,5 (Out)	19,7	1,3
Petrolina - PE	9°23'	16,2 (Jun)	22,7 (Out)	19,7	1,4
B.J. Lapa - BA	13°15'	15,9 (Jun)	21,1 (Out)	19,7	1,3
Cuiabá - MT	15°33'	14,7 (Jun)	20,2 (Out)	18,0	1,4
B. Horizonte - MG	19°56'	13,8 (Jun)	18,6 (Out)	16,4	1,3
Curitiba - PR	25°26'	9,7 (Jun)	19,4 (Jan)	14,2	2,0
P. Alegre - RS	30°01'	8,3 (Jun)	22,1 (Dez)	15,0	2,7

A região nordeste é a que apresenta maiores valores de radiação solar, com média anual comparada aos locais mais irradiados do mundo, porem todas as regiões brasileiras se mostram propícias ao aproveitamento da energia solar. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

A energia solar além de poder ser inserida em todo o território nacional, traz benefícios a longo prazo ao país, pois pode vir a atender boa parte das necessidades de eletricidade e energia

(Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015), bem como a implantação da energia solar pode desenvolver regiões remotas onde custo da eletrificação por meio da rede convencional é muito alto em relação ao retorno financeiro do investimento. Outro fato em relação à energia solar é que o seu desenvolvimento regularia a oferta, principalmente em períodos de estiagem, consequentemente reduzindo a dependência do mercado às hidrelétricas e às termelétricas, e diminuindo as emissões de gases poluentes. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006)

Uma das vantagens da energia solar é o fato de existir diversas maneiras de se aproveitar seu potencial, como o fluxograma da figura 15 deixa evidenciado, desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até grandes centrais que utilizam energia solar concentrada, ou a sistemas de produção de hidrogênio para utilização em células de combustível para a produção de trabalho com emissão zero de CO₂. Porém mesmo com essas inúmeras opções a participação da energia solar, na matriz energética brasileira, é irrisória, de forma a se destacar apenas a utilização da energia solar térmica para o aquecimento de água, que vem despertando certo interesse no mercado nacional. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006)

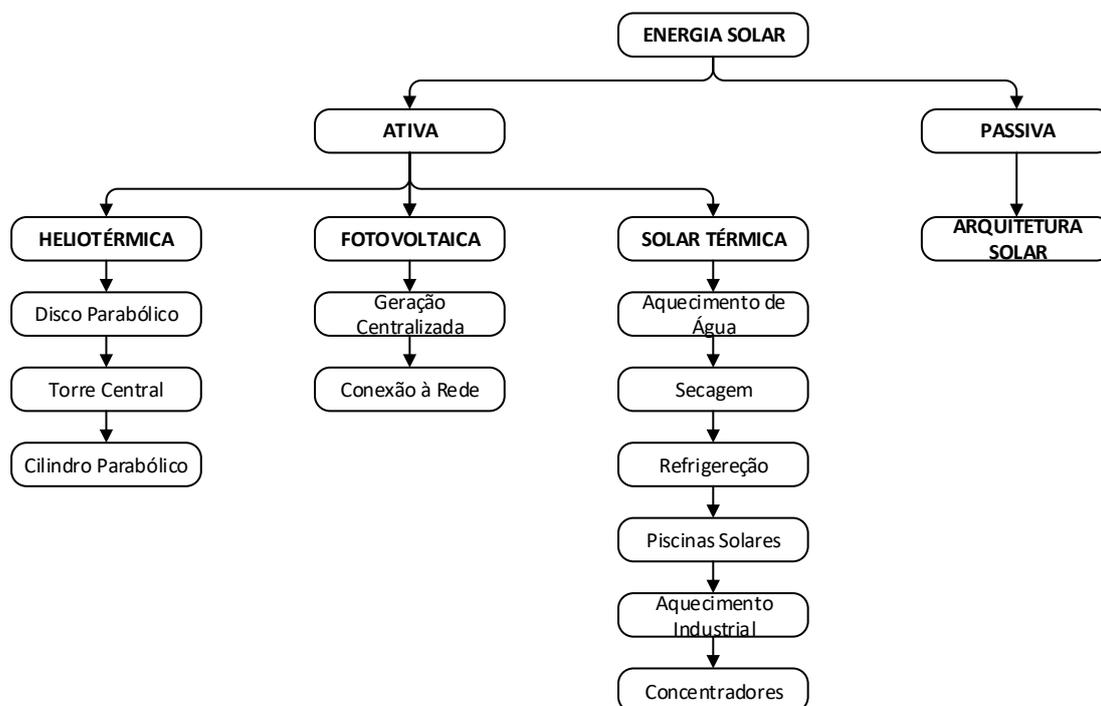


Figura 15 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar. (Ministerio de Minas e Energia, 2007)

3.2.3.1 Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica, é obtida através da conversão direta da luz solar em eletricidade, onde a célula fotovoltaica, dispositivo fabricado de material semicondutor, mostrado na figura 16, é o principal componente dessa conversão. (Pinho & Galdino, 2014).



Figura 16 - Sistema Fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos ao longo dos últimos anos vêm ganhando mercado, impulsionado principalmente pelo aumento da tarifa elétrica, o que fez com que diversos consumidores instalassem em suas casas painéis solares visando produzir parte da energia que consomem. Outro fator de destaque é que a energia solar fotovoltaica vem se tornando mais competitiva no que tange áreas que não são interligadas às redes de serviços públicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

Mesmo com o avanço da tecnologia fotovoltaica, os custos de capital inicial ainda são altos, e o tempo de retorno do investimento é maior do que 10 anos, porém, em razão da sua modularidade, tem-se a perspectiva que com o avanço de pesquisas, da inovação e da experimentação, espera-se que os custos com energia fotovoltaica diminuam consideravelmente nos próximos anos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

Na questão ambiental a energia fotovoltaica é menos agressiva quando comparada a outras energias renováveis, tais como a hidroeletricidade, por não possuir diversas etapas do processo de geração de energia relacionadas ao transporte e à produção. Porém, a energia fotovoltaica não está livre de causar impactos ambientais, que estão relacionados a fabricação, que utiliza muitas das vezes elementos tóxicos, e a eliminação dos painéis ao final da vida útil, pois ao serem descartados de forma incorreta podem vir a causar contaminação ambiental. (Ministerio de Minas e Energia, 2007).

3.2.3.2 Solar Heliotérmica

As plantas Heliotérmicas produzem energia da mesma forma que uma planta termelétrica, porém a diferença consiste na fonte de energia, que na heliotérmica é obtida através da concentração solar, que é convertida em calor de alta temperatura ou gás, e esse é transmitido a turbina. Basicamente para o funcionamento de uma planta são necessários um concentrador, um receptor, algum meio de transporte ou de armazenamento do calor e um conversor de potência.

Dentre as diversas tecnologias existentes para aproveitamento da energia solar térmica, três vem se destacando no cenário mundial, que são a de torre central, exemplificada com a figura 17, a do cilindro parabólico e do disco parabólico, onde cada uma apresenta suas minuciosidades porém são todas muito eficientes.



Figura 17 - Usina Heliotérmica tipo torre central.

Para a implantação das plantas heliotérmicas, normalmente se necessita de grandes áreas, com características específicas do solo, que propiciem a instalação dos equipamentos. Outra peculiaridade das plantas heliotérmicas é a de que deve se evitar áreas de alta densidade populacional e áreas de importância ecológica, pois as plantas heliotérmicas, por serem de grandes dimensões podem vir a causar impactos visuais indesejáveis.

Além dos impactos visuais as plantas heliotérmicas que utilizam como fluido de transporte diferente do ar podem, caso ocorra vazamento, causar grandes impactos ambientais, como contaminação do solo e do lençol freático. Os sistemas de torre centrais além dos impactos já falados podem originar um excesso de luminosidade no local, sendo prejudicial à vista, bem como esse tipo de tecnologia pode afetar os pássaros que transitam no local, pois esses ao atravessarem o campo focal da torre podem sofrer queimaduras graves.

Mesmo com essas nuances negativas, a tecnologia heliotérmica é relativamente nova e vem se mostrando promissora devido principalmente grande disponibilidade de irradiação solar, e aos reduzidos impactos ambientais associados.

3.2.4 Energia Nuclear

A energia nuclear é considerada uma fonte limpa por não produzir nenhum gás nocivo ao meio ambiente, além de que é uma fonte alternativa que pode suprir o déficit de energia previsto nos próximos anos. Com essa perspectiva e o Brasil possuindo a sexta maior reserva de urânio do mundo, houve a retomada da construção da usina nuclear de Angra III, figura 19, com capacidade de 1.300 MW, completando o ciclo nuclear que foi iniciado em 1985 com a construção de Angra I, figura 18.

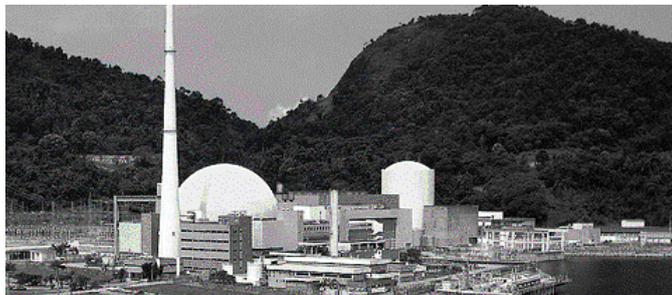


Figura 18 - Angra I em primeiro plano, e ao fundo Angra II.

No entanto a energia nuclear não tem obtido uma boa receptividade pela sociedade civil em razão de questões sobre os riscos associados com a radiação e de como os rejeitos radioativos seriam armazenados de forma a isentar a população a riscos de contaminação.

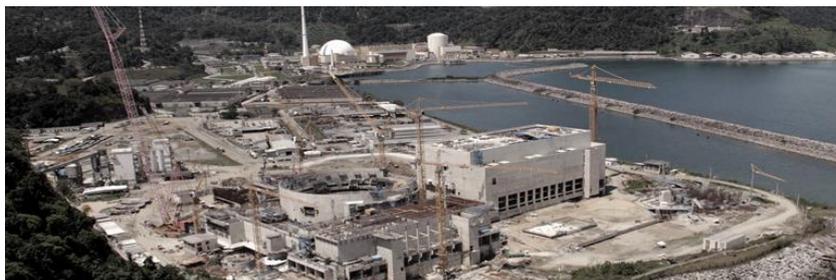


Figura 19 - Construção da Usina de Angra III.

4 ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA

O princípio de funcionamento de qualquer planta solar térmica é o mesmo, a radiação solar é captada e utilizada para aquecer um fluido de trabalho. Nesse contexto se destacam os sistemas solares ativos, que se utilizam de coletores para captar a energia solar, aquecendo o fluido de trabalho que circula no interior do coletor, e por meio de um permutador transfere sua energia a um destino final.

Os sistemas solares térmicos têm como principal característica o impacto ambiental praticamente nulo. Outro ponto importante é o fato da energia solar estar disponível em quase todo o território mundial, concedendo assim, um enorme potencial.

Outra vantagem do sistema solar térmico é o fato do custo ser previsível, de forma que o montante principal está atrelado ao investimento inicial, não sendo afetado por variações ou flutuações do mercado do custo de combustíveis.

Nesse contexto, é importante avaliar todas as nuances da energia solar térmica bem como suas tecnologias e aplicações, nos próximos tópicos serão discutidos todos os assuntos relevantes ao tema.

4.1 RADIAÇÃO SOLAR

Entende-se como radiação solar a energia emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. Essa energia se divide em duas formas, a energia visível, apresentando frequências mais altas, a segunda é em frequências baixas próximas ao infravermelho. (Base de Donnés Solaire Sol, 2015)

O sol pode ser comparado a um enorme reator de fusão nuclear, que apresenta um diâmetro de 1,39 milhões de quilômetros, e irradia continuamente uma potência de $3,8 \times 10^{23}$ kW dos quais a Terra intercepta cerca de $1,7 \times 10^{23}$ kW. Dessa radiação recebida pela Terra, 30% é refletida ao espaço, 47% é absorvido pela atmosfera, mares e terra para manter a temperatura ambiente, e o restante dessa radiação é usada para manter a convecção atmosférica e o ciclo hidrológico, vide figura 20.

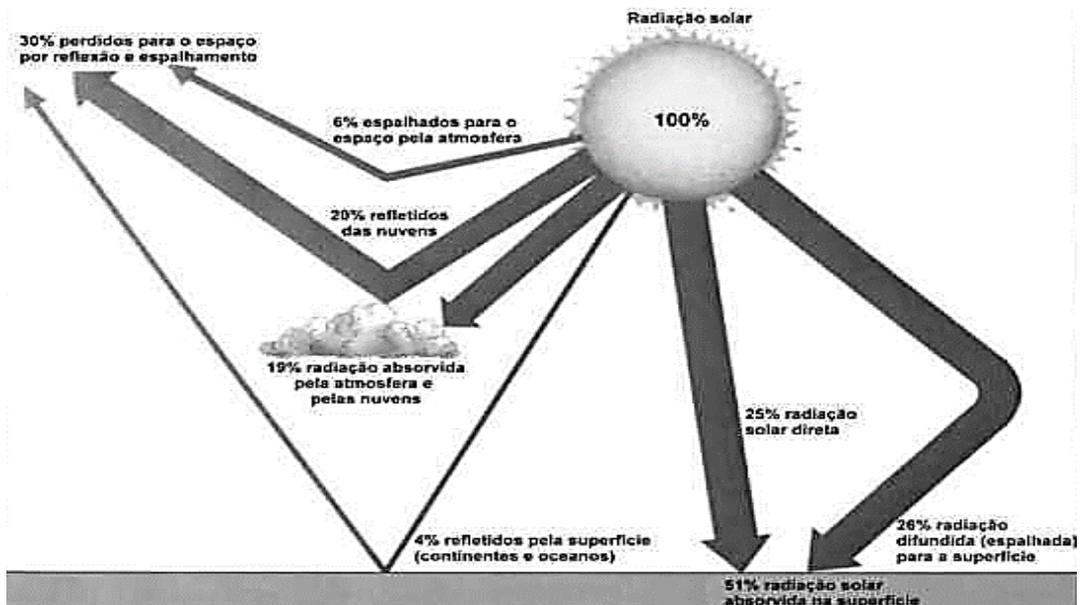


Figura 20 - Distribuição percentual da radiação solar incidente. (Departamento de Física UFPR, 2015)

4.1.1 O espectro solar

A energia radiante se apresenta em diversas formas reunidas no espectro eletromagnético, que é o intervalo completo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética. A energia radiante também denominada de energia luminosa é composta por partículas chamadas de fótons que viajam em um movimento ondulatório na velocidade da luz, onde cada partícula dessa apresenta um comprimento de onda λ , e uma quantidade de energia E , relacionadas entre si pela constante de Planck.

No espectro da radiação solar podem ser distinguidas com facilidade as regiões do visível, do infravermelho e ultravioleta, a máxima intensidade do espectro solar está bem no centro do espectro visível, se estendendo de 0,38 a 0,74 μm .

No caminho até a superfície terrestre, a radiação solar sofre uma atenuação ao passar pela atmosfera devido a processos de absorção, causados pela camada de ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono, e de dispersão, fenômeno que também recebe o nome de scattering onde a interação entre as partículas em suspensão “desvia” a radiação.

Com as várias mudanças de direções que a radiação solar sofre, tem-se que a radiação se divide em frações. A primeira fração é a radiação solar difusa (G_d) que chega a superfície terrestre sem trajetória definida. A segunda fração é a radiação solar direta, que chega a superfície com uma trajetória bem definida, apresentando uma característica vetorial, costuma ser beneficiada em dias ensolarados e sem nuvens. Em dias nublados a radiação solar direta (G_b) é quase nula. A última fração é a radiação refletida (G_r) que chega a superfície terrestre após ser refletida por alguma superfície determinada.

A soma das três frações de radiação forma a radiação global (G) como mostrado na equação abaixo:

$$G = Gb(H) + Gd + Gr \quad [2]$$

Portanto tem-se que em dias ensolarados, sem nuvens, predominará a radiação direta, já em dias nublados predominará a radiação difusa, enquanto a radiação refletida depende do ambiente. Essa informação sobre as frações de radiação se torna importante pois a escolha dos coletores solares térmicos é feita de acordo com a maior fração de incidência.

4.2 BASE DE DADOS

Para melhor aproveitamento da energia solar é necessário a realização de estudos no intuito de se obter todas as características de irradiação local, tanto qualitativamente quanto quantitativamente, a fim de se instalar os equipamentos mais propícios ao melhor aproveitamento da energia solar.

As bases de dados sobre o assunto vêm se tornando mais abrangentes e com um conteúdo denso, assim, facilitando os estudos locais sobre a irradiação incidente. Hoje já existem inúmeros sites e softwares que constituem uma base de dados muito útil para verificar, ao menos em primeira instância, a adequação de um local para uma instalação solar térmica.

No Brasil, o material mais completo se encontra no Atlas Brasileiro de Energia Solar, projeto desenvolvido dentro do escopo do projeto das nações unidas SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment). O Atlas faz uma análise completa das condições solares do país, bem como uma análise das energias solares que têm ganhado destaque no cenário nacional. A figura 21 mostra um dos estudos realizados no Atlas de energia solar

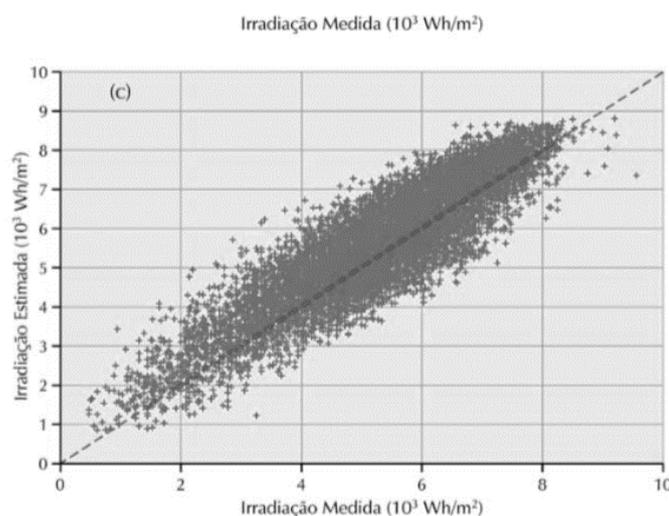


Figura 21 – Estudo de irradiação média da região Centro Oeste realizado no Atlas Brasileiro de Energia Solar. (Pereira, Martins, Abreu, & Ruther, 2006)

4.3 BALANÇO ENERGÉTICO DE UM COLETOR SOLAR TÉRMICO

Nesse tópico serão descritos os mecanismos pelos quais é possível aproveitar a energia solar térmica por meio de coletores solares térmicos. Serão discutidos os parâmetros de transferência de calor, bem como as características mais importantes dos coletores.

4.3.1 Funcionamento térmico de um coletor solar térmico

O funcionamento de um coletor solar térmico é determinado principalmente pelo rendimento global, η , que é a relação entre a potência térmica útil $P_{\text{útil}}$, e a potência procedente do Sol, P_{solar} .

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{solar}}} \quad [3]$$

A potência solar é a relação entre a área útil do coletor, A_c , e da irradiação solar, E_c , onde tem-se a seguinte igualdade:

$$P_{\text{solar}} = A_c E_c \quad [4]$$

Em estado estacionário tem-se que a potência térmica útil, é dada pela diferença entre a potência absorvida pelo coletor, $P_{\text{absorvida}}$, e a potência que o coletor perde para o ambiente, P_{perdida} .

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{absorvida}} - P_{\text{perdida}} \quad [5]$$

Mas tem-se que a potência solar não é completamente absorvida pelo coletor solar, devido a diversas perdas, relacionadas a geometria, ótica do coletor, e as propriedades dos materiais utilizados nos coletores. O rendimento ótico, $\eta_{\text{opt.}}$, funciona como um fator de correção quando multiplicado a potência solar, gerando a potência absorvida.

$$P_{\text{absorvida}} = \eta_{\text{otico}} * P_{\text{solar}} \quad [6]$$

Além das perdas já citadas existem perdas térmicas, que estão relacionadas entre a diferença da temperatura ambiente (T_{∞}) e a temperatura do coletor (T_A), quanto maior a diferença entre essas temperaturas maior é a perda térmica. As perdas do coletor também estão ligadas proporcionalmente à área de intercambio desta energia, isso é, a área absorvente A_A . Esse conjunto de fatores geram uma proporcionalidade denominada coeficiente global de perdas do receptor, U_L , que considera todas as perdas de energia entre o coletor e o ambiente.

$$P_{\text{perdida}} = U_L * A_A * (T_A - T_{\infty}) \quad [7]$$

O sistema de perda de energia é bem exemplificado na figura 22.

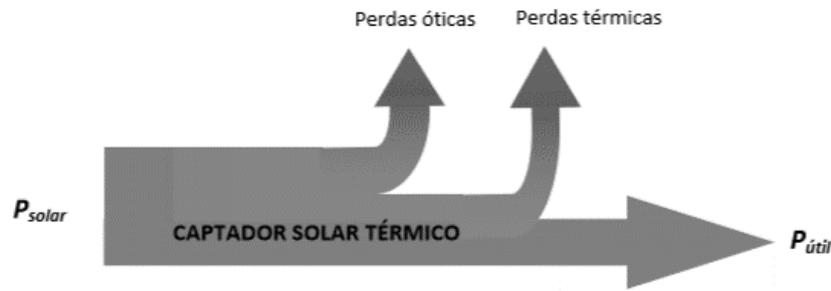


Figura 22 - Balanço energético em um coletor solar térmico. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

A razão de concentração, C , é a relação entre a área líquida do coletor que intercepta a radiação solar, A_c , e a área do receptor, A_A , (área de perdas de energia ao ambiente exterior). Tem-se então que a potência útil é determinada a partir da seguinte equação:

$$P_{util} = (\eta_{opt} * A_c * E_c) - (U_L * A_A(T_A - T_{\infty})) \quad [8]$$

Já o rendimento de um coletor solar térmico é dado por:

$$\eta = \frac{P_{util}}{A_c * E_c} = \eta_{opt} - \left(\frac{U_L}{C}\right) * \frac{T_A - T_{\infty}}{E_c} \quad [9]$$

Outro detalhe dos coletores é de que a atenuação da radiação solar é determinada pelo rendimento ótico, e tem sua origem por diversos motivos, tais como o fato de que nos coletores de concentração, os espelhos não são refletores perfeitos, de modo a considerar o valor de sua refletividade especular no método de cálculo, ou o fato de que erros de posicionamento do receptor com relação ao foco do coletor, geram erros que são valorados pelo fator de interceptação. A sujeira acumulada em um coletor também afeta seu rendimento ótico, influenciando no seu rendimento global. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

Portanto tem-se que quão maior é o rendimento ótico de um coletor maior será seu rendimento global, assim vale dar ênfase em medidas e estudos que visam melhorar o rendimento ótico dos coletores. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

4.3.2 Mecanismos de transporte de energia

O transporte de energia, também denominado transporte de calor, se caracteriza pelo movimento da energia térmica de locais de maiores temperaturas para locais com menores temperaturas. Existem três mecanismos de transporte de calor que são a condução, a convecção e a radiação, cada um com suas características próprias, mas que atuam na maioria dos casos, paralelamente. (Çengel & Ghajar, 2012)

Nas seguintes seções explica-se brevemente cada um desses mecanismos, exaltando suas principais características e conceitos que se unem ao tema de energia solar térmica.

4.3.2.1 Condução

A condução térmica é um mecanismo de transferência de energia no qual as partículas mais energéticas de uma substância transferem energia para as partículas menos energéticas que estão adjacentes, como consequência da interação entre elas. A condução ocorre nos três estados físicos, sólido, líquido e gasoso, porém nos meios líquidos e gasosos a condução ocorre devido as colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Já nos sólidos a condução deve-se a vibração das moléculas em rede, bem como da energia transportada por elétrons livres. (Çengel & Ghajar, 2012).

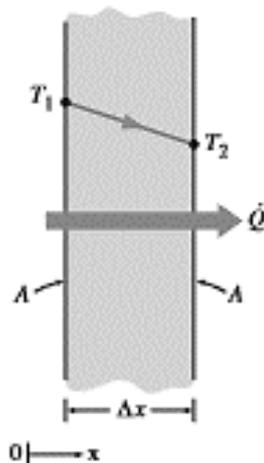


Figura 23 - Condução de calor através de uma parede plana. (Çengel & Ghajar, 2012)

Tem-se que na condução o fluxo de energia transmitido por unidade de área atravessada, é proporcional à diferença ao gradiente de temperatura através da um fator conhecido como condutividade térmica, e inversamente proporcional à espessura da camada (Lei de Fourier). (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

$$\dot{Q}_{cond} = -k * A * \frac{dT}{dx} \quad [10]$$

4.3.2.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de energia que acontece entre uma superfície sólida e um fluido em movimento, combinando-se o efeito de condução e de movimento de um fluido. A intensidade da condução de calor está atrelada à velocidade do fluido, assim quanto maior a velocidade do fluido maior será a transferência de calor. (Çengel & Ghajar, 2012)

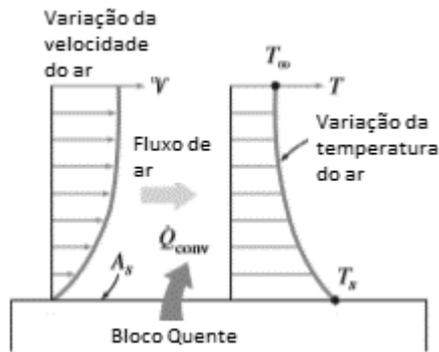


Figura 24 - Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção. (Çengel & Ghajar, 2012)

Tem-se que a convecção pode acontecer de duas formas, a primeira é a convecção forçada, onde o fluido é forçado a fluir devido a causas externas, como um ventilador ou uma bomba. Já a segunda forma de convecção é a convecção natural, em que o fluido tem seu movimento originado por diferenças de densidades decorrentes de um gradiente de temperatura no fluido. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

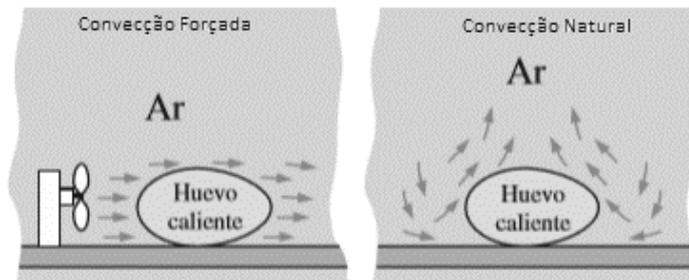


Figura 25 - Resfriamento de um ovo quente por convecção forçada e natural. (Çengel & Ghajar, 2012)

A convecção é estudada a partir da lei de Newton de resfriamento, onde tem-se que o fluxo de energia é considerado proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície sólida e o fluido por meio do coeficiente de transferência, h , que é um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como à geometria do sistema, às propriedades físicas e ao perfil de velocidades do fluido. (Çengel & Ghajar, 2012).

$$Q_{conv} = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad [11]$$

4.3.2.3 Radiação

A radiação é definida como a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (fótons) devido as mudanças nas configurações eletrônicas de átomos e moléculas. Um fato que difere bem a radiação das outras formas de transferência de calor é de que não é necessário de um meio interveniente para que ocorra a transferência. A radiação também é a mais rápida em sua atuação, acontecendo na velocidade da luz bem como o fato de que a radiação não sofre atenuação pelo vácuo, explicando assim a forma como a energia do Sol chegue a Terra. (Çengel & Ghajar, 2012).

Sabe-se que todos os sólidos, líquidos e gases, estando acima da temperatura de zero absoluto, emitem radiação, sendo a radiação um fenômeno volumétrico. (Çengel & Ghajar, 2012)

Tem-se que para estudar radiação térmica faz-se necessário recorrer ao conceito de corpo negro e às leis que governam seu comportamento. O corpo negro é um corpo ideal de forma a absorver toda a radiação incidente e emitir a máxima energia possível. Porém as superfícies reais não se comportam como um corpo negro, já que não absorvem toda a radiação que recebem e nem emitem a máxima energia possível. (Çengel & Ghajar, 2012)

Essas atenuações proporcionam que os corpos reais sejam caracterizados por fatores conhecidos como absorptância, α , e emitância, ϵ , que atuam como fator de correção em relação aos corpos negros. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

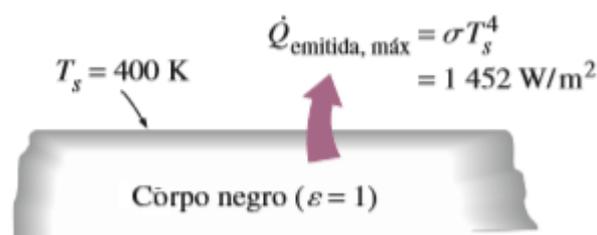


Figura 26 - Radiação emitida por um corpo negro. (Çengel & Ghajar, 2012)

A transferência de calor por radiação entre duas superfícies é dada pela seguinte equação.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{cir}^4) \quad [12]$$

4.4 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS: COLETOR PLANO AOS DISCOS DE CONCENTRAÇÃO

A energia solar permite a produção de energia térmica em diversas faixas de temperatura, característica essa que é determinante para as plantas solares, que são caracterizadas por sua temperatura de operação. A figura 27 exemplifica bem a relação entre as faixas de temperatura e o sistema solar térmico mais adequado.

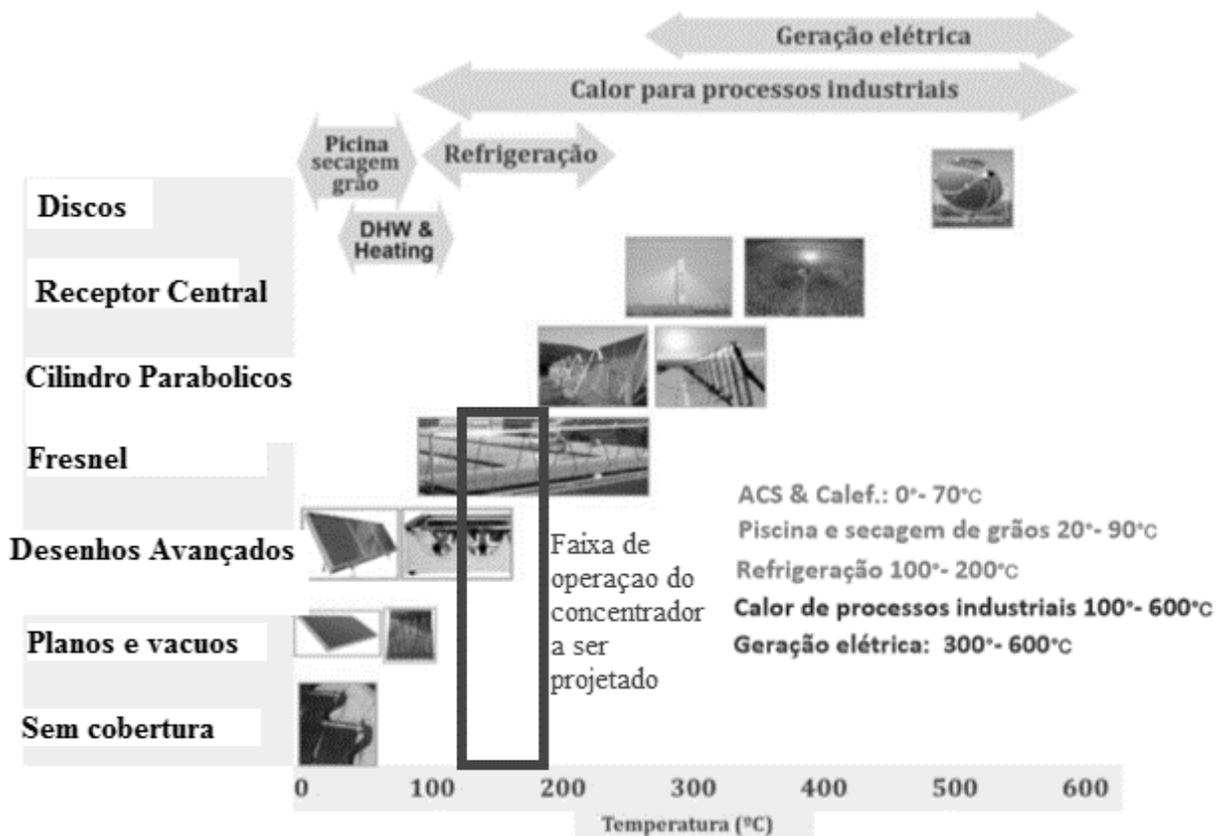


Figura 27 - Temperaturas proporcionais por diferentes sistemas solares térmicos. (Observatorio de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

4.4.1 Coletores de baixa temperatura

Para aplicações que necessitam de temperaturas inferiores a 125 °C trabalha-se com coletores sem acompanhamento e com uma pequena ou nenhuma concentração. Para esse tipo de aplicação existem uma gama imensa de variedades de modelos, que se diferenciam pelo fluido de trabalho que utilizam, e pelo número e eficácia de barreiras térmicas que incorporam para evitar perdas térmicas. (ONUDI, 2015).

Um exemplo de coletor que opera a baixa temperatura é o coletor sem cobertura, comumente utilizado para climatizar piscinas, onde elevam a temperatura da água. Os coletores sem coberturas são normalmente fabricados de material polimérico em forma de tubos que apresentam grande durabilidade e grande capacidade de absorção da radiação solar. (ONUDI, 2015).

Como já mencionado, o que diferencia um coletor solar de baixa temperatura é o fluido que nele circula. O fluido em questão pode ser líquido, na maioria das vezes água, ou algum tipo de líquido anticongelante. Outro fluido de trabalho são os gases, muitas das vezes, o ar, que implica uma geometria mais complexa dos canais de circulação do fluido de forma a evitar perdas de carga e de calor ao meio. (Observatorio de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).



Figura 28 - Esquemas gerais de coletores solar térmicos com cobertura. (Calefaccion solar, s.d.)

Existem também coletores que apresentam cobertura, como os da figura anterior, porém esses coletores apresentam perdas de energia concentradas devido principalmente à condução e a convecção que atuam utilizando-se do ar que fica entre a placa coletora e sua cobertura. Nesse escopo utiliza-se de bolsas de vácuo afim de reduzir as perdas causadas pela convecção e condução com ar, entre a cobertura de vidro e o absorvente. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

4.4.2 Coletores de média e alta temperatura

Para coletores de média e alta temperatura são necessários especificamente de concentradores devido à baixa densidade energética da radiação solar. Quanto maior o grau de concentração maior será as temperaturas alcançadas pelo coletor, podendo alcançar temperaturas próximas de 2000 °C. (ONUUDI, 2015).

As mais comuns formas de concentração da radiação solar se dão pela utilização de superfícies refletoras (espelho), que através da reflexão concentra a radiação solar direta em um receptor. A outra forma comum de concentração é através da utilização de lentes Fresnel ou lentes convexas que concentram a radiação solar através da refração. (ONUUDI, 2015).

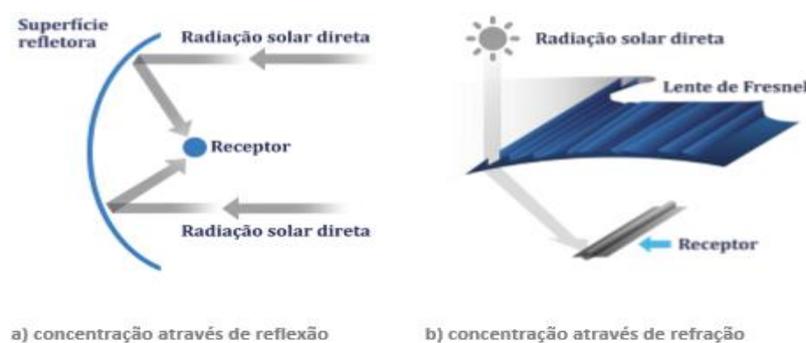


Figura 29 - Métodos mais adotados na concentração da radiação solar direta. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONUUDI, 2015)

Os coletores mais comuns são os que usam espelhos para a concentração da radiação solar, isso acontece, pois, as temperaturas alcançadas são maiores do que em outros métodos de concentração e também devido ao menor preço deste tipo de coletor.

Os sistemas solares com concentração aproveitam somente a radiação solar direta, levando em conta a trajetória da radiação do sol que é definida pela posição do Sol com relação a Terra, é indicado, para uma melhor eficiência, a utilização de sistemas que permitam que os coletores atuem de forma ativa, desenvolvendo um movimento que permita acompanhar o Sol ao longo do dia. (ONU, 2015).

Os coletores solares também podem ser classificados quanto ao seu foco ou ao lugar em que se transforma a radiação solar concentrada em energia térmica. A classificação acontece entre coletores de foco pontual, que são os discos parabólicos e os sistemas de receptor central, e os coletores de foco linear, que são exemplificados por coletores cilíndrico-parabólicos e concentradores lineares Fresnel.

Atualmente quatro tecnologias se destacam no âmbito energético, de forma que serão descritas brevemente a seguir:

- Discos parabólicos, figura 30: São coletores que consistem em um concentrador de superfície especular que enfoca os raios do sol e os reflete em um receptor instalado acima do disco em seu ponto focal. (Almeida, 2013). Esse tipo de coletor pode atuar de forma isolada ou em sistemas de múltiplos coletores. O fluido de trabalho em um disco parabólico pode atingir uma temperatura próxima de 1500 °C e produzir uma potência de 50 kW de eletricidade ou 150 kW de potência térmica. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONU, 2015).

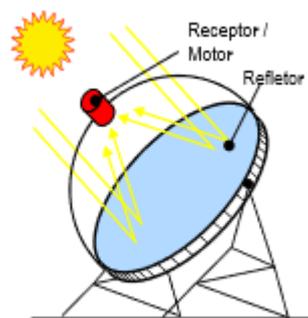


Figura 30 - Disco Parabólico. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONU, 2015)

- Sistemas de receptor central(CSP), figura 31: Essa tecnologia utiliza espelhos de grandes dimensões, podendo chegar até a 125 m², denominados de helióstatos, que a partir de um sistema de controle refletem a radiação solar direta sobre um receptor central, situado no alto de uma torre. (Observatorio de Energias Renováveis para a America Latina e o Caribe - ONU, 2015). O sistema entrega calor ao fluido de trabalho, podendo este chegar acima dos 1000 °C, por sua vez o fluido é utilizado para alimentar algum processo industrial que

necessite de altas temperaturas, ou para produzir vapor a fim de se alimentar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. (Almeida, 2013)

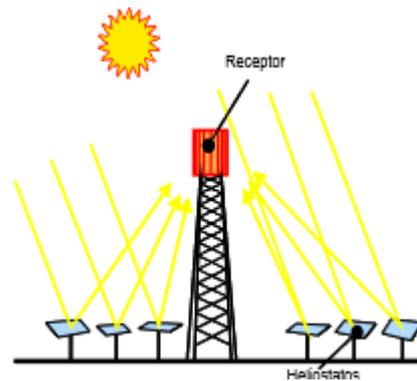


Figura 31 - Sistemas de receptor central. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

- Coletores cilíndrico parabólicos, figura 32: Coletores que reorientam a radiação solar através de uma superfície espelhada, de seção transversal parabólica até um receptor. Normalmente os receptores nesse são tubos que circulam o fluido de trabalho a ser aquecido, esses tubos chegam a ter uma superfície 25 vezes menor que a área de captação. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

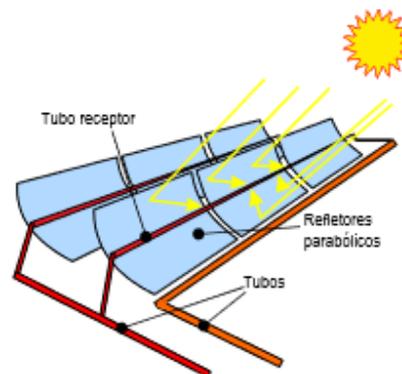


Figura 32 - Coletores cilíndrico parabólicos. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

- Concentradores lineares tipo Fresnel, figura 33: Nessa tecnologia utiliza-se espelhos longos e retangulares, dispostos paralelamente, que tem como foco um tubo receptor que está fixado sobre os espelhos. (Almeida, 2013). Considera-se os concentradores do tipo Fresnel coletores híbridos que apresentam características de sistemas de CSP, devido a vários espelhos concentrarem a radiação em uma superfície, e de coletores cilíndrico parabólicos, por possuírem receptor longitudinal. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

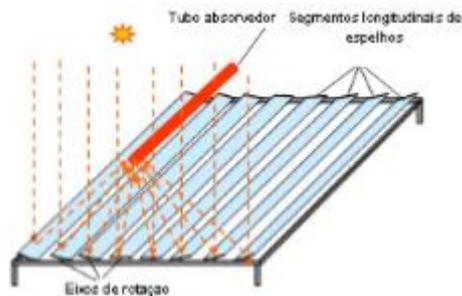


Figura 33 - Concentradores lineares tipo Fresnel. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

4.5 TECNOLOGIA DE FOCO LINEAR

A tecnologia de foco linear se baseia na reorientação da radiação solar direta, através de um sistema de concentração por espelhos, para um receptor linear situado na linha focal do sistema. O fluido de trabalho, que circula dentro desse receptor linear é aquecido e assim ocorre a transformação da radiação solar em energia térmica. (ONUUDI, 2015). As duas vertentes mais importantes dessa tecnologia são os coletores cilíndrico parabólicos e os coletores do tipo Fresnel. (Almeida, 2013)

4.5.1 Componentes de coletores cilíndricos parabólicos

Os coletores cilíndrico-parabólicos (CCP), representado na figura 34, utilizam refletores de seção transversal parabólica e possuem um foco linear que se localiza o receptor.

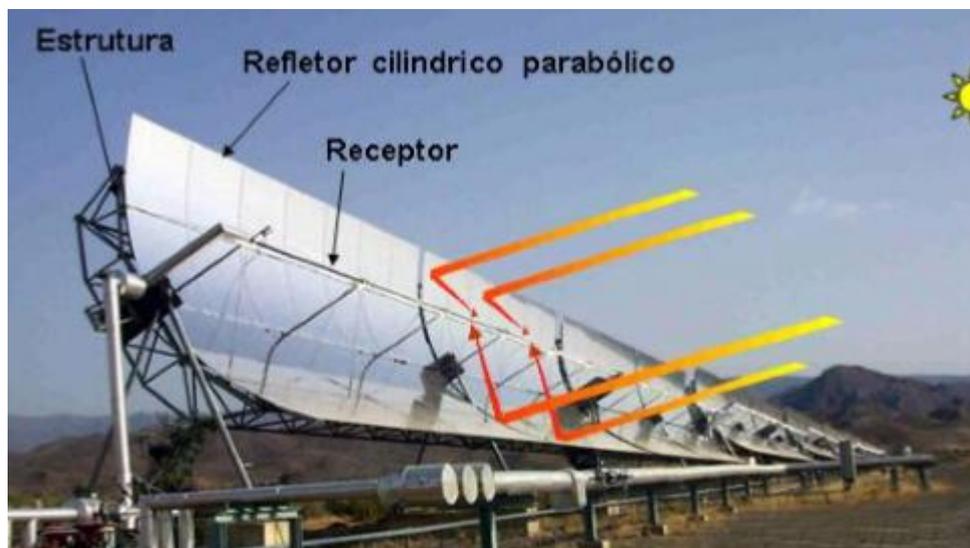


Figura 34 - Princípio de funcionamento e componentes de um CCP. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUUDI, 2015)

Nos CCP os concentradores de radiação, são construídos através de espelhos de vidro de aproximadamente 3,5mm de espessura, compostos em seu lado posterior por uma capa refletora de prata, e curvados de forma a adquirirem um formato de parábola. (ONUUDI, 2015).

Os receptores, elementos fundamentais dos CCP, modelo esquemático na figura 35, são compostos por dois tubos, um interior, de material metálico, onde circula o fluido de trabalho, e um tubo exterior

de cristal, que funciona como uma cobertura. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

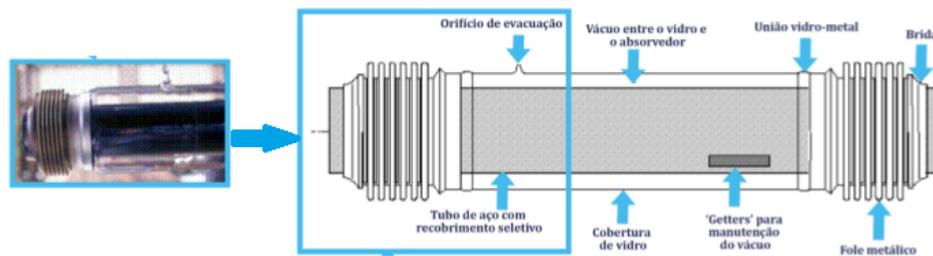


Figura 35 - Modelo de receptor de uma CCP. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

Os tubos metálicos são utilizados por terem uma alta absorvidade e uma baixa emissividade, o que proporciona um ótimo rendimento térmico. Já os tubos de cristal, são utilizados com dois propósitos, o primeiro é de proteger o tubo metálico das variações meteorológicas, e o segundo é o de reduzir as perdas térmicas por convecção no tubo absorvedor. (Almeida, 2013).

Quanto ao fluido de trabalho dos coletores solares cilíndrico parabólicos, leva-se em conta a temperatura de operação. Para situações em que a temperatura de trabalho não ultrapasse 175 °C costuma-se utilizar água desmineralizada, já que a pressão de trabalho não é elevada. Já para situações em que as temperaturas chegam aos 400 °C, a utilização de óleo sintético é a mais indicada, pois é um fluido que possui propriedades adequadas a essa temperatura de trabalho, e por causa desse fator não favorece o aumento da pressão interna do tubo. (ONUDI, 2015).

Outro detalhe dos CCP é que para acompanhar a movimentação solar durante o dia, os coletores normalmente possuem um sistema de acompanhamento, ilustrado na figura 36 que vai mudando a posição do coletor, conforme muda a posição aparente do Sol no céu. Esse acompanhamento pode ser em um ou dois eixos, dependendo do tipo de coletor. Toda essa movimentação é realizada por uma unidade motriz, acoplada a estrutura metálica que sustenta os coletores, que pode ser de natureza mecânica, indicada para coletores pequenos e médios ou de acionamento hidráulica, indicada para coletores de grande porte (~6m de largura de abertura).

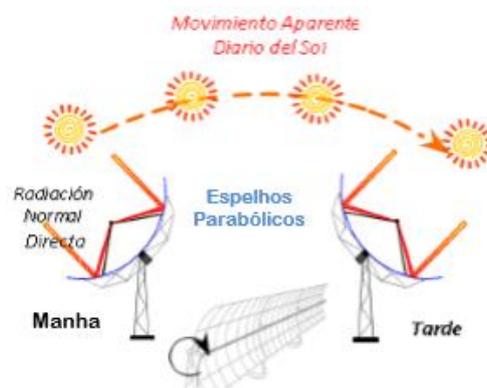


Figura 36 - Rotação do coletor sobre seu eixo. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

4.5.2 Concentradores lineares tipo Fresnel

Os concentradores lineares do tipo Fresnel, possuem característica híbrida, de forma a unir propriedades de um coletor cilíndrico parabólico e dos sistemas de receptor central. Os coletores do tipo Fresnel foram criados a fim de se obter uma tecnologia solar térmica com um baixo custo e boa finalidade. (Almeida, 2013).

Em termos de grau de concentração e de temperaturas alcançadas os coletores tipo Fresnel são muito similares aos coletores cilindro parabólicos, porém no que tange rendimento, os concentradores lineares Fresnel apresentam um rendimento inferior ao CCP isso devido ao menor aproveitamento da radiação solar direta. Porém esse menor rendimento é compensado pelo baixo custo dos concentradores lineares tipo Fresnel. (Observatorio de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe - ONUDI, 2015).

O baixo custo dessa tecnologia é devido a utilização de espelhos e estruturas mais leves e econômicas bem como de um melhor aproveitamento do terreno em que são instalados, de forma a aproveitar cerca de 70% do terreno.

O fluido característico dessa aplicação é a água, pois assim cria-se diretamente o vapor, além de que a água é um fluido com propriedades conhecidas, de forma a economizar gastos quanto a estudos e problemas quanto ao seu estado de trabalho.

4.5.3 Aplicações

O coletor de foco linear tem como principal aplicação a produção de vapor, que pode vir a ser utilizado para duas finalidades diferentes. A primeira finalidade é voltada a processos industriais, em que a utilização do vapor a uma temperatura da gama de 200°C se faz necessária, como em indústrias alimentícias para a esterilização de equipamentos (Silva). A segunda finalidade é a produção de energia, onde o vapor alimenta uma turbina, nesse tipo de aplicação o vapor pode atingir temperaturas de 400°C e pressões de até 100bar. (ONUDI, 2015).

Em uma planta solar o vapor pode vir a ser produzido de duas formas (Ajona, 1997):

- Procedimento indireto, no qual o fluido de trabalho é aquecido, porém só é transformado em vapor, em uma etapa posterior por um dispositivo adicional. Esse é o processo aplicado comercialmente em que se evidenciam duas opções, a evaporação súbita, ou com caldeira com permutador, como mostra o esquema da figura 37.

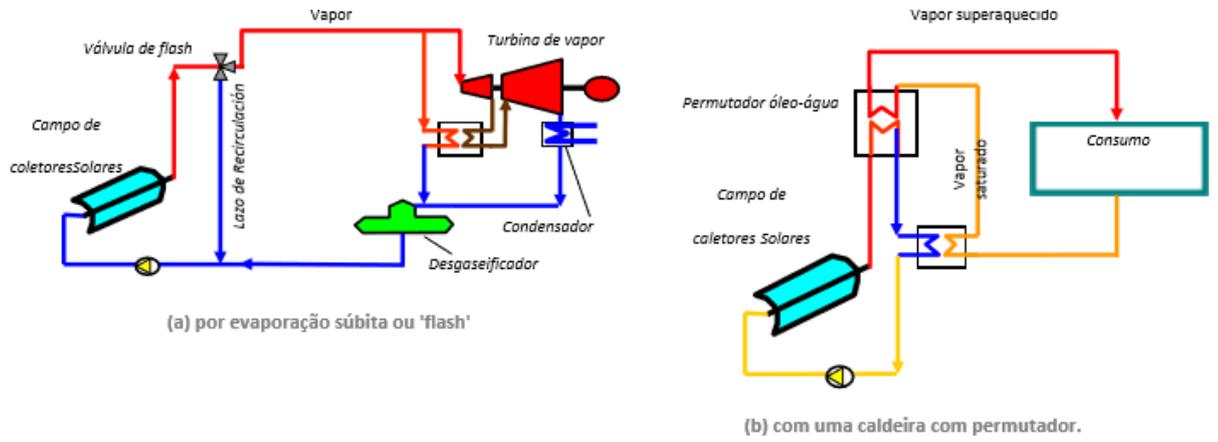


Figura 37 - Geração de vapor com coletores solares cilíndrico parabólicos. (Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

- Procedimento direto, onde o vapor é produzido diretamente nos coletores.

4.5.4 Plantas de coletores de foco linear

Plantas de coletores solares são compostas por diversos subsistemas além dos coletores, que ajudam no processo de obtenção da energia elétrica. As plantas de coletores de foco linear, antes de serem implantadas requerem um estudo local de terreno, solo, irradiação solar, proximidade a rios e etc., de forma a se escolher minuciosamente o local ideal a se instalar. (ONUUDI, 2015).

Um campo de coletores cilíndrico parabólicos ou Fresnel é estruturado de forma que aconteça uma associação tanto em série quanto em paralelo dos coletores, assim criando uma espécie de rede, visando maximizar a eficiência energética da planta. (ONUUDI, 2015).

O número de fileiras em paralelo conectadas depende proporcionalmente da potência térmica nominal do campo solar, quanto maior o campo solar maior será o número de fileiras, vide figura 38 que mostra um campo solar real. Já a quantidade de coletores ligados em série, dentro de cada fila, é proporcional ao aumento de temperatura que se deseja que o fluido de trabalho experimente, quanto maior o gradiente de temperatura necessário, maior será o número de coletores ligados em série. (ONUUDI, 2015).



Figura 38 - Esquema e foto aérea de um campo típico de coletores cilíndrico parabólicos. (Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe - ONUUDI, 2015)

4.5.4.1 Anteprojeto do campo solar

Entende-se como anteprojeto todos os estudos realizados a fim de se conhecer, caracterizar e avaliar se o terreno escolhido para implantação de uma planta solar está propício e adequado aos requisitos de projeto.

Dentro dos estudos realizados, é gerada uma modelização do anteprojeto que permite averiguar, por simulações computacionais, o comportamento térmico daquela área ao longo de um ano, permitindo assim, se necessário, otimizar o projeto de forma a maximizar a produção.

É na fase de anteprojeto também que se define a quantidade de coletores, e a forma a qual eles serão dispostos, no campo solar térmico. É necessário que sejam geradas condições de contorno bem definidas a serem inseridas na modelização, para que esta, pós análise, possa gerar dados confiáveis a respeito de qual configuração será ideal à instalação do campo solar.

4.6 TECNOLOGIA FOCO PONTUAL

Para aplicações que necessitam de temperaturas acima de 400°C, torna-se necessário um grande fluxo energético incidente sobre o receptor bem como perdas energéticas reduzidas, para tais requisitos a tecnologia que melhor atende as demandas citadas é a de foco pontual.

A tecnologia de foco pontual é que mais ganha mercado nos dias de hoje, mesmo ainda possuindo um alto custo, sua eficiência vem atraindo muitos investidores, fazendo com que a tecnologia progrida rapidamente e de maneira sólida.

4.6.1 Sistemas de receptor central

Os sistemas de receptor central, possuem quatro componentes principais, campo solar, receptor, sistema de aproveitamento da energia térmica e o sistema de armazenamento, que serão analisados subsequentemente, exceto os sistemas de armazenamento, pois são considerados itens opcionais nas plantas solares.

4.6.1.1 O campo solar

O campo solar é composto por inúmeros dispositivos denominados heliostatos, que são as unidades que direcionam a radiação solar para um único ponto receptor, que fica no alto da torre. (ONUUDI, 2015).

Os heliostatos, mostrados na figura 39, possuem uma unidade refletora compostas por espelhos de 2,5mm de espessura, e uma área que varia de 70 a 150m². Os espelhos apresentam uma leve curvatura, que beneficia na “captura” da radiação solar. (ONUUDI, 2015).



Figura 39 - Heliostato típico. (PSA, 2015)

Normalmente os heliostatos são instalados em volta da torre receptora, porem existem configurações em que os heliostatos são instalados ao norte da torre, se estão localizados no hemisfério norte, ou ao sul da torre se estão localizados no hemisfério sul. Além do posicionamento espacial específico, os heliostatos ainda contam com um sistema de movimentação em dois eixos, mostrado na figura 40, que realiza o acompanhamento do movimento do sol. As movimentações são controladas por mecanismos de acionamento, que estão interligados por toda planta solar, coordenando toda a movimentação.



Figura 40 - Mecanismo de acionamento (SENER). (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI, 2015)

4.6.1.2 O receptor

O receptor, ilustrado na figura 41, é o lugar em que a radiação solar refletida é concentrada, e é transformada em energia térmica, que é utilizada nos processos posteriores. O processo de transformação da radiação solar em energia térmica resulta altas temperaturas e elevados níveis de fluxo incidente, de modo que as perdas sejam mínimas. (ONUDI, 2015).

Os receptores podem ser classificados quanto a presença de absorvedores, quanto ao fluido de trabalho e quanto a sua configuração de trabalho, porem a mais utilizada é quanto ao fluido de

trabalho. Nessa classificação existem três configurações, os receptores a água, que não são muito aceitos pelo mercado, devido a sua baixa faixa de temperatura de trabalho, os receptores que trabalham com sais fundidos e os que trabalham com ar, esses dois últimos são os que estão em destaque no mercado. (ONUUDI, 2015).

Os receptores que utilizam sais fundidos, operam em temperaturas entre 225°C e 275°C, sendo os mais utilizados hoje em dia, por terem uma tecnologia já estabelecida. Porém os sistemas abastecidos com sais fundidos estão em constante risco, pois o sal deve ser mantido sempre aquecido, mantendo o estado fluido, pois caso haja uma solidificação, toda a tubulação é inutilizada. (ONUUDI, 2015).

Os receptores a ar, ou receptores volumétricos de ar, possuem uma configuração peculiar, onde é utilizado um material poroso em sua construção, que permita a passagem do ar. Nesse escopo de trabalho atinge-se temperaturas de até 1300°C e um fluxo de radiação solar que varia de 300 a 500kW/m².

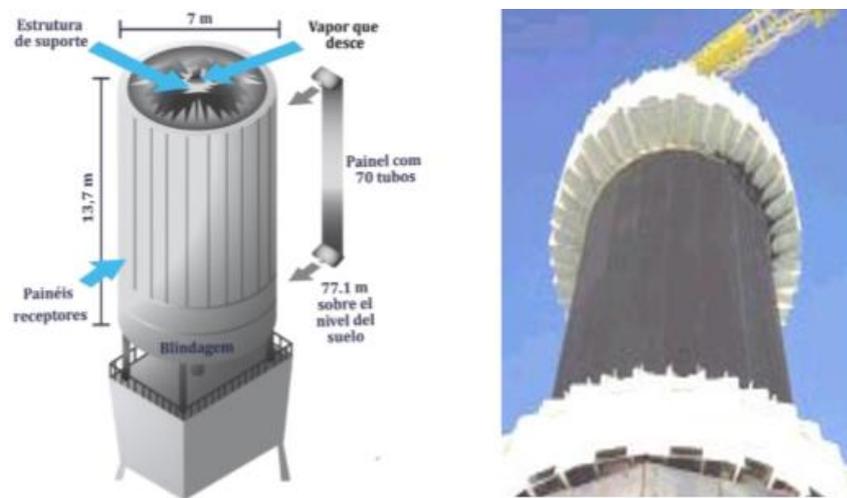


Figura 41 - A esquerda um esquema de um receptor e a direita uma foto externa de um receptor. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUUDI, 2015)

4.6.1.3 O sistema de aproveitamento de energia térmica

O sistema de aproveitamento é o responsável por receber a energia térmica e dar uma finalidade a essa energia. O interesse comercial sobre os sistemas de torre central é a produção de eletricidade, onde para essa conversão é utilizado um ciclo de potência.

O ciclo a ser utilizado é determinado pela temperatura do fluido de trabalho, se esta temperatura é menor que 400°C utiliza-se um ciclo Rankine, já se o fluido apresenta temperaturas superiores a 400°C é possível a utilização de um ciclo Brayton. (ONUUDI, 2015).

4.6.2 Sistemas de discos parabólicos

O sistema de disco parabólico consiste em um concentrador esférico com curvatura parabólica, que concentra e reflete a radiação solar direta sobre um ponto focal. A superfície côncava do

concentrador pode ser construída por espelhos delgados ou polímeros metalizados que utilizam a fibra de vidro como estrutura.

No ponto focal de concentração da radiação solar, há um receptor, que normalmente é um motor do tipo Stirling, que tem a incumbência de transformar o fluido de trabalho (combustível) aquecido pela radiação solar, em energia mecânica que posteriormente é transformada em eletricidade. A configuração disco parabólico motor Stirling possuem uma eficiência máxima de 30% na conversão de radiação solar em energia elétrica, nas unidades de 7 a 25 kW. (ONUUDI, 2015).

A curvatura parabólica e baixa relação distancia focal diâmetro, permite que os concentradores solares alcancem temperaturas na de 700°C, permitindo que os motores Stirling operem com eficiência de até 40%. A boa eficiência do sistema também é garantida pelo sistema de acompanhamento solar, que normalmente trabalha em dois eixos, fazendo com que os discos parabólicos acompanhem o movimento do sol durante o dia. (ONUUDI, 2015).



Figura 42 - A esquerda um coletor parabólico convencional e a direita o esquema de um motor Stirling. (Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUUDI, 2015)

5 MODELOS E METODOS PARA UM CONCENTRADOR LINEAR TIPO FRESNEL

O capítulo 5 faz referência a todos os parâmetros que deverão ser dimensionados para o desenvolvimento e construção de um concentrador solar linear tipo Fresnel. Os subtópicos seguintes discutirão cada um desses parâmetros, mostrando todos os fatores que deverão ser levados em conta no projeto.

5.1 DIMENSIONAMENTO DO CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL

Visando a máxima eficiência do sistema se torna necessário calcular todos os parâmetros do projeto que maximizam o desempenho do sistema linear Fresnel, como a posição e geometria dos espelhos, bem como a altura do receptor. (Almeida, 2013).

Para a obtenção de um máximo desempenho é necessário minimizar as perdas, principalmente aquelas relacionadas à precisão ótica, causadas principalmente devido a sobreposição provocada pelos espelhos, que estão dispostos paralelamente em filas. (Almeida, 2013)

5.1.1 Distância entre espelhos

A definição do espaçamento entre os espelhos é de suma importância para todo o sistema Fresnel, pois se mau definida pode gerar uma grande perda de eficiência. (Almeida, 2013).

Uma maior distância entre os espelhos garante a ausência de sombreamento entre espelhos porem consequentemente faz com que ocorra maior dispersão da radiação refletida à altura do receptor. Entretanto um menor afastamento entre os espelhos garantiria uma maior precisão dos raios refletidos, só que consequentemente faria com que houvesse sombreamento nos espelhos adjacentes uns aos outros. (Almeida, 2013)

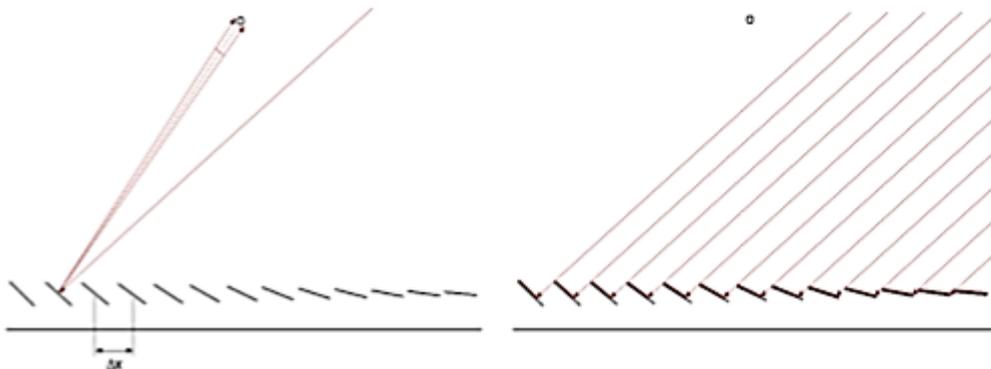


Figura 43 - Espaçamento de espelhos (X): Erro de precisão Vs. Sombreamento dos espelhos. (Almeida, 2013)

Portanto tem-se a necessidade de buscar um equilíbrio entre o sombreamento e a precisão focal, e assim encontrar a distância exata entre os espelhos.

5.1.2 Altura do receptor

Outro fator que define a precisão do sistema Fresnel é a relação da altura do receptor e a oclusão entre os espelhos. O receptor quando em uma altura elevada, ocorrerá um aumento do erro da concentração focal. Já se o receptor estiver a uma altura baixa resultará no bloqueio dos raios solares que são refletidos pelos espelhos mais afastados do receptor. (Almeida, 2013).

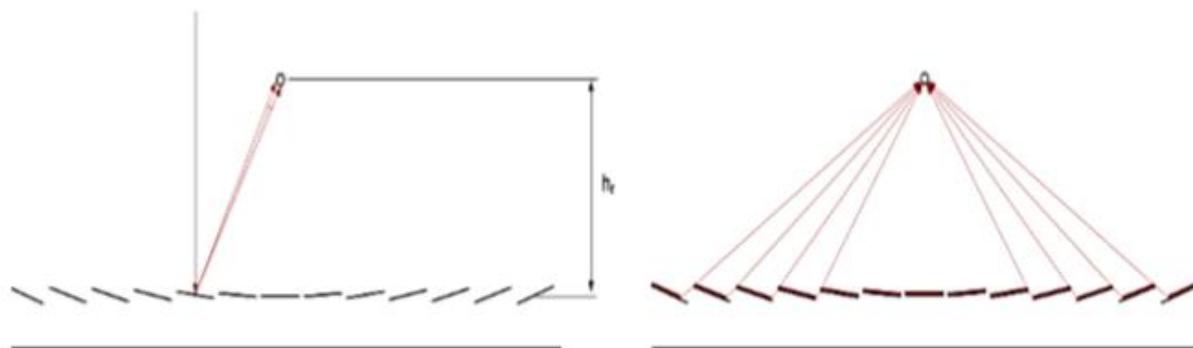


Figura 44 - Altura do receptor (h_r): Erro de precisão Vs. Obstrução dos espelhos. (Almeida, 2013)

A questão fundamental é encontrar uma forma de parametrizar a distância ótima entre espelhos e a altura ótima do receptor, de forma a maximizar o desempenho ótico do sistema, sendo assim um estudo produzido por Singh et al. (Singh, Sarviya, & Bhagoria, 2009) estabeleceu relações que permitem encontrar os melhores posicionamentos de receptor e espelhos.

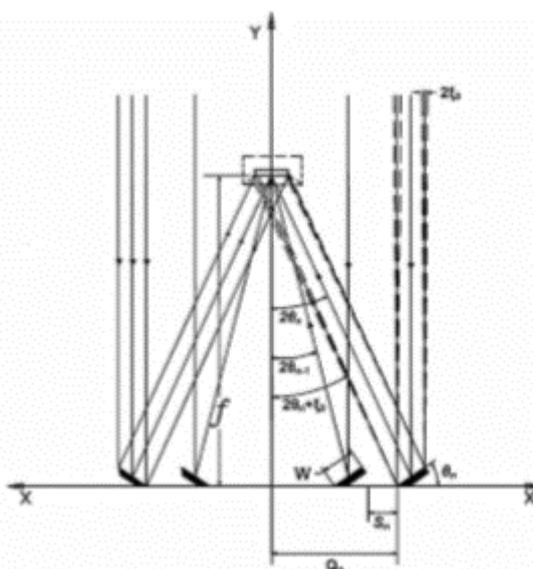


Figura 45 - Corte transversal de um sistema refletor Fresnel linear com um absorvedor de cavidade trapezoidal. (Singh, Sarviya, & Bhagoria, 2009)

Para início dos cálculos adota-se quatro premissas iniciais:

1. O concentrador está orientado para seguir o movimento aparente do Sol de Leste para Oeste.
2. Os espelhos possuem um elevado índice de reflexão.

3. A radiação solar incidente é normal à superfície terrestre.
4. Todos os espelhos são planos e tem largura e comprimento iguais.

Com as premissas estabelecidas é determinada uma distância de espaçamento (S) de modo a evitar sombreamento entre os espelhos adjacentes. A segunda parte é estabelecer a caracterização de cada espelho (n) quanto a sua localização (Qn), inclinação (θ_n) e espaçamento (Sn), como é ilustrado na figura anterior. Os parâmetros são estabelecidos pelas seguintes expressões.

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\left\{ Q_n + \left(\frac{W}{2} \right) * \cos \theta_{n-1} \right\}}{\left\{ f - \left(\frac{W}{2} \right) * \sen \theta_{n-1} \right\}} \right] \quad [13]$$

$$S_n = W * \sen \theta_{n-1} * \tan(2\theta_n + \xi_0) \quad [14]$$

$$Q_n = Q_{n-1} + W * \cos \theta_{n-1} + S_n \quad [15]$$

Com as seguintes condições iniciais do cálculo iterativo sendo:

- I. $\theta_0=0$
- II. $S_1=0$
- III. $Q_0=-W/2$
- IV. $Q_1=W/2$

e $n= 1, 2, 3, \dots, m$. onde m é o número total de espelhos colocados em cada metade do concentrador. Assim pode-se encontrar os valores buscados.

5.1.3 Rácio de concentração

Com a necessidade de se obter temperaturas elevadas, a concentração solar torna-se um parâmetro incontornável. Entende-se como concentração a razão entre a área de captura (refletora) A_c , projetada na direção da luz incidente na área do receptor A_R . (Almeida, 2013)

$$\text{Concentração} \equiv RC_{\text{Geométrico}} = \frac{A_c}{A_R} \quad [16]$$

O cálculo do rácio de concentração (RC) leva em conta o ângulo de incidência dos vários espelhos, assim sendo é necessário calcular alguns fatores antes do cálculo de RC:

$$CI_n = W * \cos \left(\frac{\theta_n}{U_n + N_n + I_n} \right) \quad [17]$$

$$U_n = \frac{[(f - W * \sen \theta) \sec 2\theta * \sen \xi_0]}{[\cos(2\theta_n - \xi_0)]} \quad [18]$$

$$D_n = [W * \cos \theta_n * \sec 2\theta] \quad [19]$$

$$I_n = \frac{[f * \sec 2\theta * \sen \xi]}{[\cos(2\theta_0 + \xi_0)]} \quad [20]$$

O rácio de concentração do concentrador Fresnel é obtido através da soma da contribuição individual de todos os espelhos e é calculado pela seguinte fórmula:

$$RC = 2 \sum_{n=1}^{n=m} CI_n \quad [21]$$

5.1.4 Propriedades óticas dos materiais

Quando nos deparamos com a situação de um corpo sendo irradiado, se destacam três características importantes nessa relação que são o índice de reflexão (ou refletância) ρ , a fração absorvida (ou absorvência) α , e a fração transmitida como a transmissividade, τ . Essas características variam de material para material e são de suma importância na hora da escolha do material a ser utilizado no coletor solar. (Çengel & Ghajar, 2012)

Tem-se que a radiação solar quando refletida é dividida em dois tipos, a reflexão direta onde o feixe refletido faz com a normal ao espelho um ângulo igual ao do feixe incidente, e a reflexão difusa onde a radiação refletida é distribuída uniformemente em todas as direções. No entanto os coletores solares apresentam uma peculiaridade que é a presença de superfícies seletivas, que atuam no intuito de gerar uma combinação de alta absorvência para a radiação solar com uma baixa emissividade para a radiação refletida. (Almeida, 2013)

Assim sendo, pode-se estimar a energia entregue ao receptor (E_f) para diferentes raios de concentração a partir da seguinte equação:

$$E_f = (A_c - A_{nc}) * I * \rho * \gamma * \tau * \alpha \quad [22]$$

Já a fração de radiação refletida que efetivamente atinge os tubos absorvedores é dada pela seguinte expressão.

$$S_r = (A_c - A_{nc}) * I * \rho * \gamma * \tau * \alpha * k \quad [23]$$

Onde k é o fator de reflexão da cavidade e tem o valor de 1,01.

O rendimento ótico do sistema linear Fresnel pode ser obtido da seguinte forma:

$$\eta_{optico} = \frac{S_r}{I} \quad [24]$$

O rendimento ótico é a razão entre a potência entregue ao coletor após duas reflexões, onde a primeira acontece nos espelhos e a segunda é a que ocorre nas paredes refletoras da cavidade trapezoidal. A equação do rendimento pode ser simplificada da forma que o rendimento é dado por:

$$\eta_{optico} = \rho * \gamma * \tau * \alpha * k \quad [25]$$

5.2 MODELAÇÃO TÉRMICA

Esta seção tem como objetivo analisar as melhores formas de se evitar perdas térmicas bem como mostrar soluções que possam contribuir para a melhor eficiência do coletor solar linear.

5.2.1 Balanço de energia

Nos coletores solares lineares, tem-se que a temperatura que é atingida no absorvedor (tubo) é advinda do balanço entre a radiação absorvida efetivamente e as perdas térmicas existentes, dessa forma para se maximizar a temperatura (energia útil no sistema) deve-se aumentar a quantidade de radiação absorvida na superfície absorvedora diminuindo o efeito das perdas térmicas. (Almeida, 2013).

A energia útil do sistema é conseqüentemente transferida ao fluido de trabalho, que no caso de um coletor linear circulara através do absorvedor, coletando essa energia ao longo do sistema.

5.2.2 Ganhos térmicos

A energia útil do sistema, como já mencionado, é determinada pela quantidade de radiação que é absorvida pelo absorvedor ao longo de sua superfície, sendo que a quantidade da absorção de energia dependerá da absorvidade (α) do material do absorvedor.

Uma forma de se obter um ganho térmico no processo é a utilização de refletores que permitam uma maior concentração da radiação, aumentando, conseqüentemente, a energia útil extraída do conjunto.

5.2.3 Perdas térmicas

As perdas térmicas nos coletores lineares podem acontecer de três formas distintas, por radiação, condução e convecção, porém existem maneiras de diminuir essas perdas com soluções simples, e com uma eficácia considerável de forma a melhorar o desempenho do sistema.

As perdas relativas á condução são determinadas pela equação [10], e se propagam através de fonões ou através dos elétrons nos materiais condutores elétricos. Uma das maneiras de minimizar as perdas referentes a condução é a implantação de isolamento térmico no conjunto, onde o isolamento deve ser resistente a umidade e suportar as temperaturas de trabalho. O isolamento pode ser feito de diversos materiais, como lã de vidro e jornal. (Almeida, 2013)

As perdas térmicas por convecção são calculadas a partir da equação [11], expressão relativa a um caso estacionário, perdas essas causadas por um ou mais fluidos que entram em contato com o absorvedor. Contudo, há meios de se minimizar as perdas por convecção, como a utilização de cobertura sobre o absorvedor, da forma que é inserido um tubo externo ao absorvedor, gerando um

vácuo entre os tubos, porém é de extrema importância para a eficiência do sistema que o material dessa cobertura possua uma elevada transmitância. (Almeida, 2013)

O último modo de perda térmica acontece por radiação, regida pela equação [12], que acontece por o corpo em questão apresentar uma temperatura acima do zero absoluto. É impossível evitar a perda por radiação porem existem maneiras de minimização tais como a diminuição da área da superfície absorvedora ou então a utilização de uma superfície de absorção seletiva. (Almeida, 2013)

5.2.4 Refletores secundários

A aplicação de refletores secundários ao sistema linear Fresnel é uma solução interessante visando uma maximização da eficiência do sistema, visto que os refletores secundários permitem um melhor aproveitamento da radiação refletida pelos refletores primários (espelhos). A utilização de refletores secundários permite a diminuição à área superficial dos absorvedores, e consequentemente a diminuição das perdas térmicas, proporcionais à área superficial.

Nesse âmbito destacam-se duas tecnologias. A primeira é conhecida como “caixa-forno”, conceito que utiliza um conjunto de pequenos tubos absorvedores em paralelo dentro de uma cavidade refletora trapezoidal, termicamente isolada. (Almeida, 2013)

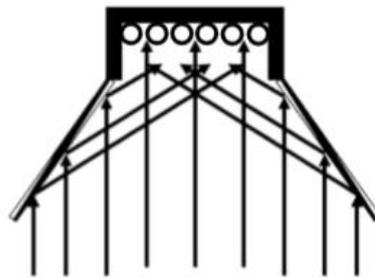


Figura 46 - Refletor secundário trapezoidal.

A segunda tecnologia, emprega um receptor concentrador parabólico composto, constituído por um refletor secundário que reflete a radiação para um absorvedor tubular.

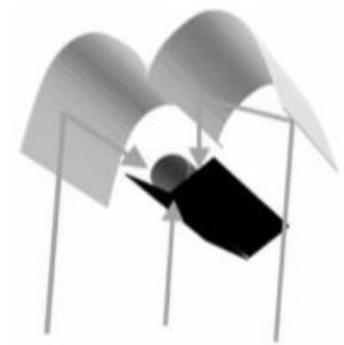


Figura 47 - Refletor secundário parabólico.

5.2.5 Superfície absorvedora seletiva

A utilização de uma superfície absorvedora seletiva, como já mencionado, aumenta a eficiência dos sistemas lineares, esse aumento de eficiência pode chegar em até 10% quando utilizada uma camada seletiva de níquel (Facão & Oliveira, 2011).

Muitos materiais podem ser utilizados para gerar uma superfície absorvedora seletiva, porem deve-se observar as propriedades físicas, visto que caso apresentem uma transmitância baixa ou uma condutividade térmica reduzida podem vir a interferir negativamente no rendimento do coletor.

5.2.6 Eficiência térmica

O rendimento de um receptor solar genérico pode ser calculado pela razão entre o aumento do volume do fluido de trabalho no interior do recipiente e a radiação disponível num período de tempo.

$$\eta = \frac{\dot{m} * c_p * (T_f - T_i)}{I_g * A_{col}} \quad [26]$$

A energia absorvida pelo ar é dada pela relação:

$$P_{abs} = \dot{m} * c_p * (T_f - T_i) \quad [27]$$

Onde tem-se que:

\dot{m} – massa do fluido de trabalho [kg/s]

c_p – Calor específico do fluido de trabalho [J/kg*°C]

T_i – Temperatura inicial do fluido [°C]

T_f – Temperatura final do fluido [°C]

I_g – Irradiação global no plano horizontal [W/m²]

A_{col} – Área do coletor [m²]

6 PROJETO CONCEITUAL

O presente projeto visa atender a demanda e a realidade do atual cenário energético brasileiro, onde cada vez mais busca-se novas fontes renováveis de energia, a fim de suprir futuramente a demanda elevada de energia, bem como atender a situações específicas de necessidade de produção alternativa de energia.

6.1 POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Essa etapa de projeto está voltada para a síntese, avaliação e comparação do sistema proposto no intuito que ele atenda as necessidades conceituais propostas, no início do trabalho, são elas o baixo custo, fácil manuseio, alta mobilidade e elevado rendimento. Para que esse estudo seja viável é necessário adotar hipóteses simplificadoras e aproximações grosseiras guiadas pela experiência adquirida, por meio de diversas bibliografias.

Após análise de opções que melhor atenderiam os objetivos propostos, elaborou-se algumas soluções que visavam atender o problema em questão de forma inovadora. Dentre elas, três sistemas foram selecionados. Vale ressaltar que independente da solução escolhida, o protótipo trabalhará com um compressor de 250 W. As suas informações estão no anexo.

6.1.1 Proposta 1: Concentrador linear Fresnel combinado com placas fotovoltaicas

Nesta proposta, o coletor linear Fresnel teria um receptor composto por placas fotovoltaicas onde todos os raios solares captados seriam refletidos nas mesmas, assim aumentando a eficiência do sistema misto. Os refletores seriam compostos por lentes do tipo fresnel. Esta é uma opção que atende as necessidades do projeto e também atenderia uma demanda do grupo de pesquisa LEA de pós-graduação da Universidade de Brasília⁶.

6.1.2 Proposta 2: Concentrador linear Fresnel com parte refletora coberta por papel alumínio

A segunda proposta, tem por base um concentrador linear Fresnel padrão, com comprimento de aproximadamente 1 metro e uma área reflexiva de aproximadamente de 2 m². Esta solução, teria a área reflexiva (chapas de alumínio) cobertas por papel alumínio.

⁶ LEA – Laboratório de Energia e Ambiente: atua em atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão em áreas que envolvam abordagem mecânica do Uso e Geração de Energia e Avaliação Técnica de Problemas Ambientais. Atualmente possui uma pesquisa envolvendo coletores solares Fresnel combinados com placas fotovoltaicas.

6.1.3 Proposta 3: Concentrador linear Fresnel com espelhos de 1 metro

A terceira proposta, tem por base um concentrador linear Fresnel padrão, também com comprimento de aproximadamente 1 metro e área reflexiva de aproximadamente de 2 m² como a segunda opção. A área reflexiva é composta por espelhos planos, sobrepostos às chapas de alumínio.

6.2 ESCOLHA DO SISTEMA

A proposta 1, é inovadora por misturar placas fotovoltaicas e sistema fresnel, e também atenderia uma demanda do LEA, porém é um projeto de alto custo, devido o preço das placas fotovoltaicas, e complexo devido a sua construção e funcionamento.

A proposta 2, também é inovadora por utilizar o papel alumínio como material reflexivo, e tem o menor custo entre as tres propostas, porém o fato de utilizar o papel alumínio trás consigo as dificuldades de manuseio, menor reflexividade e da fragilidade do mesmo.

A proposta 3, que utiliza espelhos planos como anteparo reflexivo é interessante, pois tem uma reflexividade relativamente próxima das lentes fresnel, e apresenta custo intemediario, quando comparado às outras duas propostas.

Diante as considerações das três propostas possíveis, criou-se uma matriz de decisão onde fatores multiplicativos são utilizados para diferenciar áreas de menor e maior importância. Os valores atribuídos na tabela 3 foram escolhidos de maneira subjetiva, baseados na experiência e na comparação entre os sistemas. Com os devidos cálculos realizados, atribuindo os respectivos pesos, chegou-se à escolha da proposta 2, que apresentou melhor nota.

Tabela 3 – Tomada de decisão

	Custo	Segurança	Desempenho	Confiabilidade	Rank
Peso	0,35	0,3	0,15	0,2	1
Proposta 1	5 1,75	8 2,4	6 0,9	7 1,4	6,45
Proposta 2	7 2,45	9 2,7	5 0,75	9 1,8	7,70
Proposta 3	6 2,10	8 2,4	7 1,05	6 1,2	6,75

Com a utilização da proposta 2, teve-se a minimização de problemas relativos a custos, pois trata de um coletor com a utilização de papel alumínio como material reflexivo. Porém durante à montagem percebeu-se a dificuldade do manuseio do papel alumínio, que quando sobreposto às chapas de alumínio, apresentavam uma superfície irregular, que acabaria por diminuir e tornar irregular a reflexão da radiação direta. Diante de tal problema, a escolha foi refeita, optando pela proposta 3, por ser a segunda no rank de tomada de decisão, e pela semelhança construtiva com a proposta 2.

6.3 PARÂMETROS DE PROJETO

Alguns parâmetros foram determinados no intuito de manter certas premissas do projeto, como o baixo custo, utilização de material reflexivo alternativo, baixo peso e facilidade de movimentação.

- Estrutura toda elaborada em tubos em aço SAE 1020.
- Utilização de espelhos planos, aplicado sobre as chapas de alumínio.
- Regulagem angular dos refletores manual, com auxílio de angulímetro.
- Projeto do receptor que seja capaz de operar com mais de um fluido, no caso, ar e água.
- Compressor de 250 W e vazão⁷ de 135 L/min.

Os demais parâmetros foram definidos com base em critérios de falha, fator de segurança, deflexão máxima, disponibilidade de peças no mercado e recomendações de projeto.

6.4 ESBOÇO DE PROJETO

6.4.1 Descrição geral de funcionamento

O movimento de angulação dos “espelhos” será feito de forma manual, onde mancais de deslizamento permitem a movimentação, que será limitada pelo barramento entre espelhos. O ajuste de angulação do “espelho”, feito manualmente, ao se girar o eixo em que o espelho é fixado, deve ser auxiliado de um angulímetro, para determinação do ângulo correto. A figura 48, mostra o concentrador montado.

6.4.2 Lista de peças

- Placas retangulares de alumínio 33cmx100cm
- Espelhos planos de 30cmx100cm
- Receptor
- Estrutura (base, mancais e eixos de rotação)

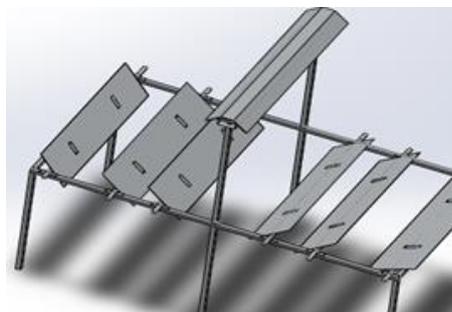


Figura 48 - Montagem do concentrador.

⁷ A vazão do compressor foi medida em empresa certificadora por meio de medidores de gás rotativo.

7 PROJETO DE DETALHAMENTO

O projeto de detalhamento trata da seleção dos materiais, determinação da geometria e montagem dos componentes que devem ser previamente analisados em relação a tensão máxima permitida para garantir a segurança. Outros fatores essenciais são a definição dos métodos de fabricação, montagem, inspeção, manutenção e custo. A apresentação dos desenhos do produto feita em escala também faz parte do projeto. O resultado dessa parte do projeto é a determinação de todas as especificações críticas de esforços, manufatura, inspeção, manutenção e segurança.

7.1 NORMAS E CÓDIGOS

O projeto de um coletor solar tem por base a norma NBR 15747 que explana sobre coletores térmicos e seus componentes, de forma a especificar os requisitos de durabilidade, confiabilidade, segurança e desempenho.

A norma prevê algumas precauções a favor da máxima segurança quanto a utilização de coletores solares, nesse intuito requer uma serie de inspeções bem como testes que validem a segurança do equipamento em questão.

7.2 FATOR DE SEGURANÇA

Todo projeto de equipamentos deve conter a definição do fator de segurança, que rege a seleção de equipamentos bem como cálculos de segurança. A necessidade do cálculo do fator de segurança se faz necessária para contabilizar incertezas de projeto que normalmente não são previsíveis, assim tornando os cálculos de dimensionamento mais seguros.

Para determinação do fator de segurança do projeto foi realizada uma análise dos seguintes fatores:

- Conhecimento dos carregamentos;
- Cálculo das tensões;
- Conhecimento das características dos materiais selecionados;
- Necessidade de restringir material, peso, custo e espaço;
- Gravidade das consequências da falha;
- Qualidade de mão de obra na fabricação;
- Condições de operação;
- Qualidade de inspeção/manutenção.

Com os fatores definidos é realizada uma análise de valoração dos respectivos, de forma que quanto menor a importância menor o valor atribuído, quanto maior a importância maior o valor atribuído. Esses valores variam de -4 até +4, valores menores inferem em fator de segurança menor, valores maiores em um fator de segurança maior. A valoração é realizada na tabela 4. (Collins, 2006)

Tabela 4 - Valoração dos fatores.

Fatores	Valor atribuído (NP _i)
Determinação do carregamento	1
Cálculo das tensões	-1
Precisão da resistência de falhas	4
Necessidade de restringir material	0
Gravidade das consequências de falha	-3
Qualidade da mão de obra na fabricação	0
Condição de operação	1
Qualidade de inspeção /manutenção	2

Para calcular-se o fator de segurança primeiramente deve-se somar os valores atribuídos a cada item da tabela, de forma que:

$$\sum_{i=1}^n NP_i = 1 - 1 + 4 + 0 - 3 + 0 + 1 + 2 = 4 \quad [28]$$

Com a somatória realizada podemos calcular o fator de segurança a partir da equação 29.

$$FS = 1 + \frac{(10 + \sum_{i=1}^n NP_i)^2}{100} \quad [29]$$
$$FS = 1 + \frac{(10 + 4)^2}{100} = 2,96$$

Com os cálculos realizados, o fator de segurança a ser utilizado no projeto é de FS = 2,96.

7.3 DETERMINAÇÃO DAS GEOMETRIAS

Nesta etapa serão detalhadas as geometrias de todos os componentes do projeto bem como os materiais utilizados e todas as demais considerações relevantes.

7.3.1 Condições climáticas e térmicas locais

Antes de qualquer consideração a respeito de geometrias devem ser consideradas as condições térmicas e climáticas da localidade onde o concentrador solar Fresnel linear será instalado. Uma primeira tomada de decisão foi feita a respeito da orientação do concentrador, que ficara orientado de forma leste-oeste, visando aproveitar da melhor forma possível os raios solares, visto que o concentrador não possuirá *tracker*.

Com a orientação definida, e com o auxílio do aplicativo “SUNSURVEYOR⁸” foi realizada uma aferição do ângulo de azimute nas localidades onde o concentrador será instalado, o valor encontrado foi de 129,21°, às 14:46, como mostrado na figura 49.



Figura 49 - Aplicativo para encontrar angulo azimutal local.

Com o ângulo de azimute definido, dado estatístico, foi utilizado o software RADIUSOL⁹ para a coleta de dados a respeito da irradiância e da irradiação média de Goiânia. No gráfico 1 podemos observar como varia a irradiância ao longo do ano em Goiânia, outros dados a respeito da irradiância e irradiação médias estão em anexo deste trabalho.

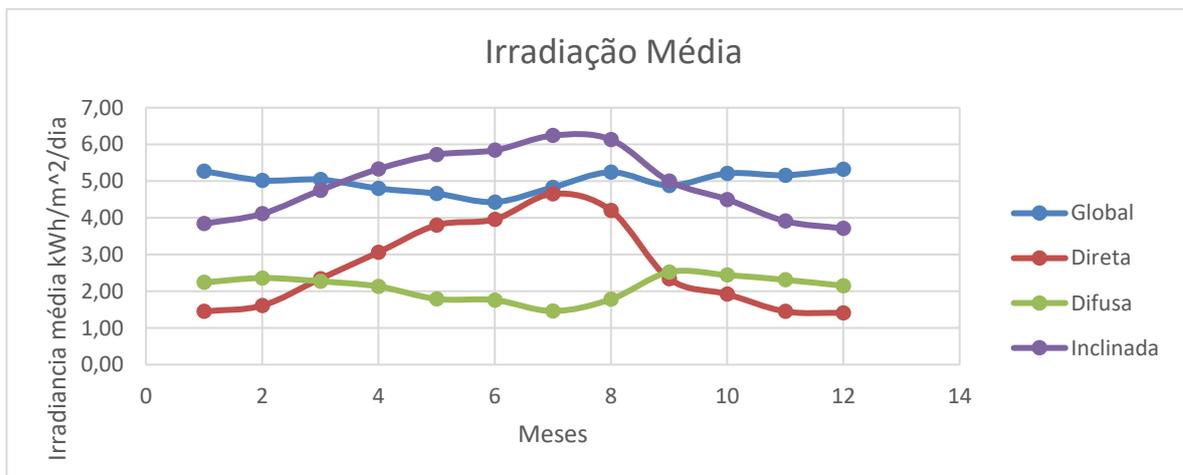


Gráfico 1 - Irradiação média (RADIUSOL)

⁸ Sun Surveyor, aplicativo prevê o posicionamento do Sol e da Lua (azimute, altitude, hora) com uma Bússola 3D, Mapa Interativo, Realidade Aumentada e os Relatórios Detalhados. Sun Surveyor é útil em locações para fotos e filmagens, arquitetura e posicionamento de coletores solares (térmicos e fotovoltaicos).

⁹ RADIUSOL, Software desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul que pretende auxiliar os interessados em utilizar a energia solar no Brasil a realizar cálculos de determinação da disponibilidade da radiação solar em planos de diferentes orientações.

Observando esses valores das características locais, os cálculos de geometrias tornaram-se mais completos e próximos a realidade local.

7.3.2 Espelhos

A primeira determinação a respeito da geometria do espelho foi relativa às medidas, foi arbitrado que cada espelho teria a dimensão de 30 x 100 cm, em chapas de alumínio, que posteriormente serão cobertas por espelhos planos. Essas medidas foram adotadas primeiro pela otimização de espaço, e também por considerar tais medidas fáceis para fabricação, figura 50.



Figura 50 - Anteparo em alumínio, nas dimensões especificadas, sem espelhos planos.

Com a determinação do tamanho do espelho foi possível criar a tabela 5, para determinar quantos espelhos seriam utilizados, bem como quantas fileiras, espaçamento entre espelhos, e angulação de cada fileira. Esta foi montada a partir das equações mencionadas no capítulo 5. Vale lembrar que a inclinação de cada espelho é obtida para que o raio solar incidente, perpendicular ao plano de abertura, atinja o ponto médio de cada espelho e posteriormente seja refletido para o ponto focal (receptor), após uma única reflexão. (Almeida, 2013)

As condições iniciais adotadas foram 300 mm de largura (W), 1000 mm de comprimento (L), e uma altura focal de 1000 mm (f). A figura 51 auxilia o melhor entendimento das medidas e a tabela 5 mostra a matriz de iteração.

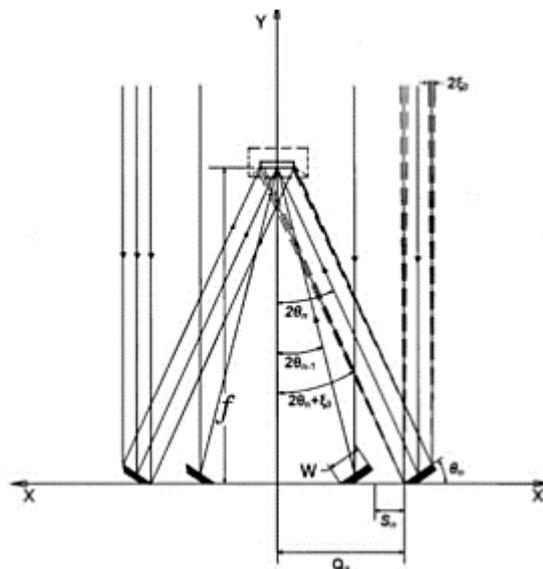


Figura 51 - Esquema de um concentrador Fresnel linear. (Almeida, 2013)

Tabela 5 - Resultados dos cálculos iterativos

Espelhos	Fila	$S_n(\text{mm})$	$Q_n(\text{mm})$	θ_n	$2\theta_n$	$2\theta_n + \xi$	$2\theta_n - \xi$
Uni	n	mm	mm	Rad	Rad	Rad	rad
2	1	150	150	0,15	0,29	0,30	0,29
4	2	28,04	474,86	0,28	0,57	0,57	0,56
6	3	88,00	850,88	0,40	0,80	0,81	0,80
8	4	182,39	1309,34	0,50	0,99	1,00	0,99
10	5	315,09	1888,13	0,57	1,14	1,14	1,14
12	6	493,97	2634,67	0,62	1,25	1,25	1,24
14	7	732,61	3610,62	0,67	1,33	1,34	1,33
16	8	1052,08	4898,67	0,70	1,39	1,40	1,39
18	9	1483,92	6612,82	0,72	1,44	1,44	1,43
20	10	2075,96	8914,60	0,74	1,47	1,48	1,47
22	11	2903,59	12040,61	0,75	1,50	1,50	1,49
24	12	4093,07	16353,51	0,76	1,52	1,52	1,51
26	13	5876,00	22447,34	0,77	1,53	1,54	1,53
28	14	8740,97	31404,62	0,77	1,54	1,55	1,54
30	15	14006,82	45626,56	0,78	1,55	1,56	1,55
32	16	28488,99	74329,75	0,78	1,56	1,56	1,55
34	17	30288,73	104831,87	0,78	1,56	1,57	1,56
36	18	24599,05	129643,96	0,78	1,56	1,57	1,56
38	19	26225,99	156082,81	0,78	1,57	1,57	1,56
40	20	21355,42	177650,97	0,78	1,57	1,57	1,56

Por uma questão de otimização espacial foi definido que teríamos 3 fileiras de cada lado do concentrador, como apresenta a linha demarcada na tabela 5. Assim tem-se que o painel contará no total com 6 fileiras, sendo 3 de cada lado, conseqüentemente 6 espelhos, onde cada fileira tem sua angulação, e espaçamento.

Vale ressaltar que a quantidade de espelhos é algo discutível em um concentrador solar Fresnel linear, onde um dos principais fatores é o propósito final do sistema. (Almeida, 2013)

7.3.2.1 Rácio (taxa) de concentração

Existe uma relação entre a quantidade de espelhos e a taxa de concentração dos raios solares, quanto maior o número de espelhos temos uma taxa de concentração menor, e conseqüentemente uma eficiência térmica melhor, pois com uma taxa de concentração elevada temos um aumento da temperatura global do sistema no ponto focal, o que aumenta a perda de calor para a parte envolvente do receptor, por irradiação térmica. O gráfico 2 mostra essa relação entre número de espelhos e taxa de concentração.

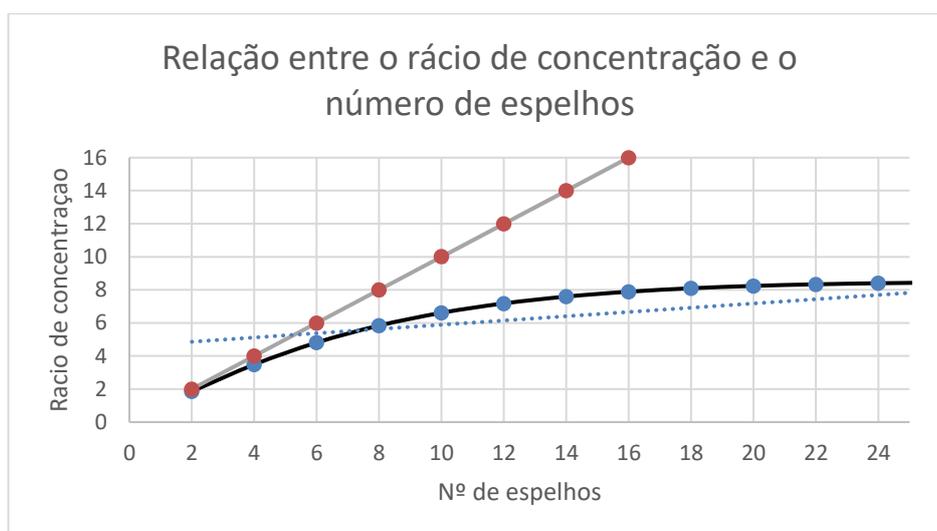


Gráfico 2 - Relação entre o rácio de concentração e o número de espelhos (largura do espelho, W = 300 mm, altura do receptor, f = 1000 mm).

Fica perceptível no gráfico que o rácio de concentração diminui com o aumento do número de espelhos, com essa simulação fica claro que o rácio de concentração começa a diminuir significativamente a partir de 4 espelhos.

A tabela 6 mostra as interações entre o rácio de concentração e as demais características do sistema.

Tabela 6 - Rácio de concentração.

Espelhos	CI	RC	Rcgeo	Ac	Anc	(*% de Ac)	Sr	Um	Dn	In	Θ
Uni				m2	m2	m2	kW				Rad
2	0,928	1,856	2	0,6	0,15	25%	0,269	4,841	309,889	5,076	0,146
4	0,814	3,483	4	1,2	0,12	10%	0,647	5,971	341,506	6,557	0,284
6	0,663	4,810	6	1,8	0,18	10%	0,970	8,489	398,001	9,712	0,402
8	0,514	5,838	8	2,4	0,3	13%	1,258	13,311	483,669	15,757	0,497
10	0,386	6,611	10	3	0,5	17%	1,497	22,120	604,767	26,932	0,570
12	0,284	7,180	12	3,6	0,83	23%	1,659	37,906	770,448	47,276	0,625
14	0,206	7,592	14	4,2	1,31	31%	1,731	65,948	993,849	84,082	0,666

16	0,148	7,888	16	4,8	2,01	42%	1,671	115,584	1293,578	150,661	0,696
18	0,104	8,096	18	5,4	2,99	55%	1,443	203,457	1696,000	271,712	0,719
20	0,072	8,239	20	6	4,36	73%	0,982	359,594	2238,977	494,226	0,736
22	0,049	8,337	22	6,6	6,27	95%	0,198	639,188	2978,331	910,847	0,748
24	0,032	8,400	24	7,2	8,98	125%	-1,066	1146,686	3999,880	1713,993	0,758
26	0,020	8,440	26	7,8	12,86	165%	-3,030	2089,221	5444,408	3336,097	0,766
28	0,012	8,463	28	8,4	18,63	222%	-6,126	3912,454	7568,610	6881,052	0,771
30	0,006	8,476	30	9	27,88	310%	-11,306	7745,994	10942,011	15913,861	0,776
32	0,002	8,481	32	9,6	46,73	487%	-22,235	18307,541	17750,421	52460,723	0,779
34	0,001	8,482	34	10,2	309,33	3033%	-179,130	43508,762	29793,153	260758,429	0,782
36	0,000	8,481	36	10,8	301,92	2796%	-174,333	133625,730	62402,540	-1097010,51	0,784
38	-0,001	8,480	38	11,4	312,47	2741%	-180,292	1008991,985	311541,203	-1720079,48	0,785
40	-0,001	8,479	40	12	329,08	2742%	-189,879	830379,747	262523,238	-1497351,48	0,785

7.3.3 Coletor

A definição da geometria do coletor foi realizada mediante ao comprimento dos espelhos, assim sendo definiu-se arbitrariamente uma geometria retangular de 100 x 50 mm, com um comprimento de 1100 mm, como mostra a figura 52.

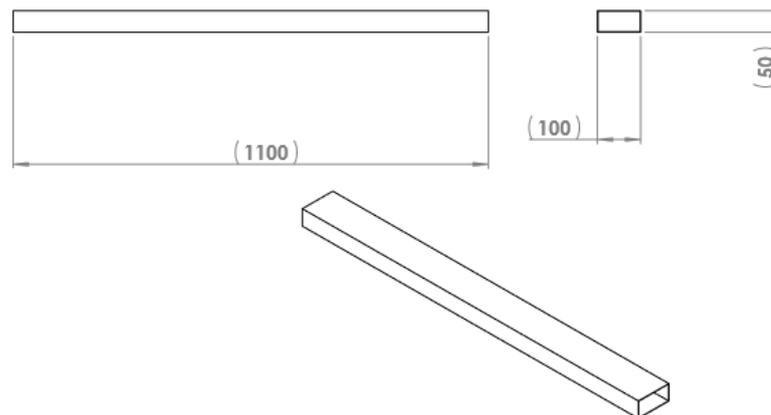


Figura 52 - Desenho técnico do receptor.

O coletor será de alumínio, e será pintado na cor preta, para aumentar a absorção de energia. Juntamente com o coletor será colocado um anteparo (receptor) afim de diminuir as perdas térmicas e também aumentar a captação dos raios refletidos.

7.3.3.1 Receptor

O receptor foi concebido a fim de cobrir todo comprimento do coletor, e com dois intuitos, o primeiro de diminuir a perda térmica do coletor e o segundo é de aumentar o aproveitamento dos raios refletidos. O receptor terá um formato trapezoidal, e será de alumínio com alta refletividade, e contará com jornal, para aumentar o isolamento.

A bibliografia diverge bastante quanto ao tamanho do receptor bem como quanto à espessura do isolamento que deve ser usado. A referência de que uma cavidade de profundidade de 45 mm, e isolamento de 35 mm de jornal, garante um bom compromisso entre isolamento térmico e sombreamento. (Fação & Oliveira, 2011). Seguindo a bibliografia foi utilizado uma cavidade de 45 mm e um isolamento de jornal de espessura de 40 mm, afim de garantir boas condições de trabalho.

A estrutura do receptor fica clara na figura 53, que mostra a geometria final do receptor a ser utilizado no concentrador em questão.

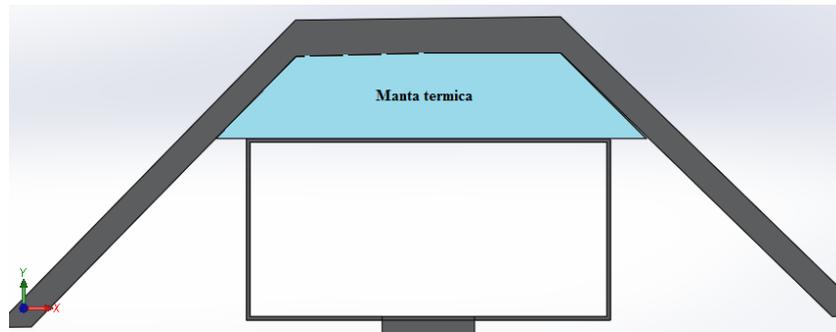


Figura 53 - Vista em corte do receptor, onde é possível ver o coletor e o isolamento.

7.3.4 Mancais

Os mancais foram projetados para atender duas funções, a primeira é a fixação das placas de alumínio ao eixo de rotação e a segunda função é a fixação do eixo de rotação à estrutura do concentrador.

Os mancais serão fabricados de material termoplástico, no intuito de um baixo custo, e de atenderem com boas características resistivas a altas temperaturas, até aproximadamente 120°C. A figura 54 mostra a geometria dos mancais, que ao total serão 24 unidades, a serem fabricados em uma empresa especializada em fabricação de peças.

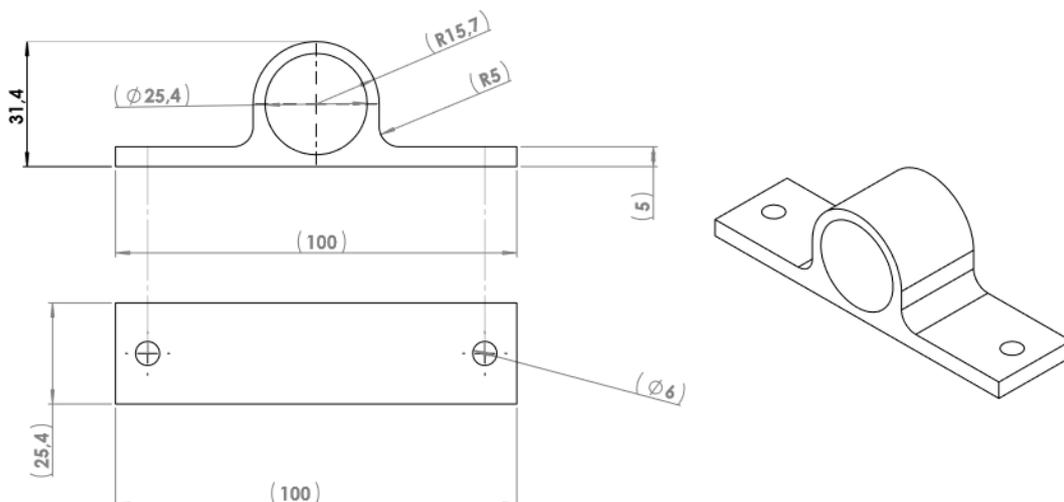


Figura 54 - Mancais, medidas em milímetros.

Os mancais que se encontrarão nas extremidades da estrutura, que ligam o eixo a estrutura, apresentam um furo passante em sua parte superior, onde um parafuso será colocado afim de aplicar pressão ao eixo, para estabiliza-lo em uma posição.

7.3.5 Eixo de rotação

Os eixos de rotação são confeccionados em tubos de aço em perfil cilíndrico, com 1 polegada (25,4 mm) de diâmetro, e com um comprimento de 1200 mm. Os tubos serão comprados prontos e será necessário apenas o corte no tamanho necessário. Será aplicada uma proteção emborrachada nas pontas dos eixos, para que o movimento manual de rotação seja facilitado. A apresentação da figura 55 representa os eixos de rotação.



Figura 55 - Eixos rotativos.

7.3.6 Estrutura

A estrutura do concentrador solar será toda feita por tubos de aço SAE 1020, de perfil quadrado de 1 polegada (25,4 milímetros). Os tubos serão cortados em diversos tamanhos e posteriormente soldados de forma a criar uma estrutura de mesa, onde estarão apoiados todos os outros sistemas. A estrutura é representada na figura 56.

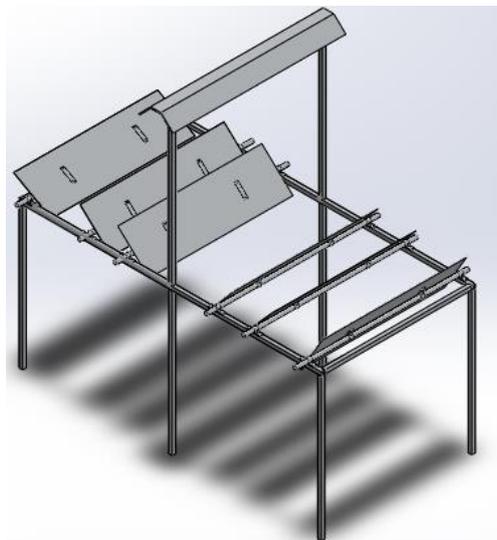


Figura 56 - Estrutura do concentrador solar.

7.3.6.1 Soldagem da estrutura da mesa

A escolha do cordão de solda foi feita buscando-se uma resistência mecânica adequada ao sistema. Definiu-se então um cordão de solda usual, de 5 mm de espessura, e realizou-se uma análise de capacidade de esforços.

Como explicado anteriormente a estrutura é formada por tubos de seção quadrada de 1 polegada, (25,4 mm), conforme a figura 55. A estrutura de aço SAE 1020 tem massa aproximada de 17,25 kg e está submetida a uma carga total de 122,625 N, o que confere uma carga de aproximadamente de 20,43 N por perna da estrutura.

Para observar o quanto cada cordão de solda de 5 mm é capaz de resistir, foi feita a análise da soldagem da seguinte forma:

$$F_{rd} = \frac{0,75 \cdot t_{ef} \cdot L \cdot f_w}{\gamma} \quad [30]$$

Onde:

F_{rd} – Força de tração ou compressão que a região de solda suporta;

t_{ef} – Menor espessura do metal de solda no entalhe (dimensão efetiva);

L – Comprimento do cordão de solda;

f_w – Resistência de ruptura da solda;

γ – Coeficiente de ponderação;

h – Altura e Largura do cordão;

Para o efeito de projeto, adotou-se $h = 5$ mm

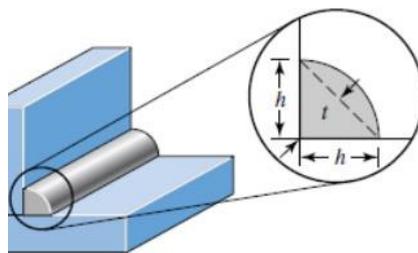


Figura 57 - Desenho esquemático do cordão de solda.

Com o valor adotado de h , tem-se que:

$$t = 0,707 \cdot h = 0,707 \cdot 0,5 = 0,3535 \text{ cm}$$

Os valores obtidos são:

- $t_{ef} = 0,3535 \text{ cm}$ (0,003535m);
- $L = 2,54 \text{ cm}$ (0,0254m).

- $\gamma = 1,65$ para soldagem de entalhes;
- $f_w = 70\text{ksi}$ (485MPa). Valor obtido para o eletrodo revertido E7018.

Com isso, em cada região de solda resistirá a uma força (F) de:

$$F = \frac{0,75 \cdot (0,003535m) \cdot (0,0254m) \cdot (485MPa)}{1,65} = 19,79 \text{ KN}$$

Sendo assim, o cordão de solda é capaz de resistir a forças muito maiores do que as solicitadas nessa aplicação, conferindo à estrutura da mesa uma elevada rigidez e uma grande durabilidade.

7.4 AJUSTE E TOLERÂNCIA

No processo de fabricação de qualquer projeto deve existir uma preocupação quanto a produção das peças, tendo em vista que muitas peças possuem acoplamento e necessitam de precisão na sua fabricação para que o encaixe entre componentes ocorra da melhor forma possível.

No projeto do concentrador solar Fresnel teve-se a preocupação de estabelecer tolerâncias lineares para as peças que seriam, em seu processo de confecção, cortadas e soldadas e também tolerâncias para os mancais.

Para as peças que seriam cortadas e posteriormente soldadas foi adotada a tolerância de classe C, como mostrado na parte demarcada na tabela 7.

Tabela 7 - Tolerâncias lineares.

Gama de tamanhos nominais / em mm											
Classe de tolerância	2 a 30	> 30 até 120	> 120 até 400	> 400 até 1000	> 1000 até 2000	> 2000 até 4000	> 4000 até 8000	> 8000 até 12000	> 12000 até 16000	> 16000 até 20000	> 20000
Tolerâncias t em mm											
A	± 1	± 1	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9
B		± 2	± 2	± 3	± 4	± 6	± 8	± 10	± 12	± 14	± 16
C		± 3	± 4	± 6	± 8	± 11	± 14	± 18	± 21	± 24	± 27
D		± 4	± 7	± 9	± 12	± 16	± 21	± 27	± 32	± 36	± 40

No caso dos mancais - eixo foi adotada a tolerância H11c11, que é um ajuste correção folgado para tolerância ampla ou margens em membros externos. A tabela 8 mostra os resultados para os mancais e os eixos rotativos.

Tabela 8 - Tolerância mancal - eixo rotativo.

FURO MANCAL		EIXO	
Ø12.0 H11		Ø12.0 c11	
Dimensão mínima:	25,4 mm	Dimensão mínima:	25,195 mm
Dimensão máxima:	25,510 mm	Dimensão máxima:	25,305 mm
Afastamento superior:	0,110 mm	Afastamento superior:	-0,095 mm

Afastamento inferior:	0,000 mm	Afastamento inferior:	-0,205 mm
Afastamento médio:	0,055 mm	Afastamento médio:	-0,150 mm

7.5 MONTAGEM

7.5.1 Fabricação

Os componentes do concentrador solar Fresnel serão fabricados a partir de alguns processos simples de manufatura. Os tubos e os eixos rotativos serão cortados com auxílio da serra de fita para um corte preciso. Já as placas de alumínio (espelhos) serão cortadas com o auxílio de guilhotinas, para um corte retilíneo e uniforme. Os mancais serão usinados em CNC, em material termoplástico, para uma precisão elevada das dimensões. O coletor e o receptor serão de chapas de alumínio que serão dobradas a partir de dobradeiras hidráulicas.

7.5.2 Sequência de montagem

A montagem do concentrador solar Fresnel se dará na seguinte ordem:

1. Soldagem da estrutura do concentrador;
2. Instalação dos mancais nos eixos de rotação;
3. Instalação dos mancais das extremidades, na estrutura da mesa por meios de parafusos M6;
4. Instalação das placas de alumínio nos mancais centrais dos eixos rotativos;
5. Colagem do receptor no coletor por meio de fitas térmicas;
6. Instalação do conjunto coletor-receptor à estrutura, por meio de solda.
7. Colagem dos espelhos planos nas placas de alumínio, por meio de fita duplaface.

A figura 58 mostra a vista explodida do concentrador solar Fresnel.

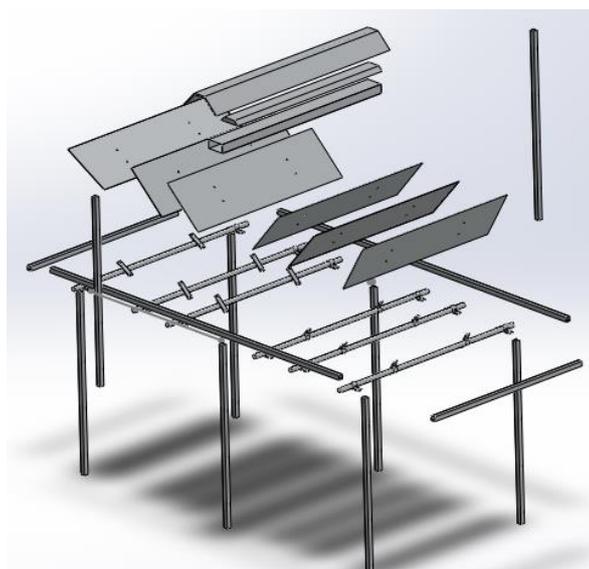


Figura 58 - Vista explodida do concentrador.

7.6 SIMULAÇÃO

7.6.1 Utilização de programas comerciais

Durante a confecção do projeto foram utilizados dois programas, o SolidWorks 2013, Abaqus 6.10, Radiasol 2 e o System Advisor Model. O Programa SolidWorks foi utilizado para confecção do desenho e da geometria do concentrador a ser projetado, já o programa Abaqus foi utilizado para se fazer a análise por elementos finitos dos elementos mecânicos que sofrem esforços. O Radiasol foi utilizado para obter os dados locais de irradiância e irradiação média. O software System Advisor Model foi utilizado afim de avaliar virtualmente o concentrador solar, caso esse fosse utilizado em larga escala.

7.6.1.1 SolidWorks – Desenhos

O programa solidworks possui mecanismos criativos, intuitivos e práticos que facilitam a experiência do usuário no desenvolvimento e modelagem de geometrias a fim de se obter um modelo 3D o mais realista possível, de maximizar a interatividade entre projetista e projeto. O desenho final do concentrador é mostrado na figura 59.



Figura 59 - Desenho de conjunto.

7.6.1.2 Abaqus – Análise por elementos finitos

A maioria dos problemas e questões discutidas na engenharia são modelados por equações diferenciais ordinárias e equações diferenciais parciais, EDOs e EDPs respectivamente. Entretanto, nem todos os problemas nem sempre apresentam soluções analíticas conhecidas, assim sendo, muitas das vezes é necessário utilizar soluções numéricas, que se aproximam da solução analítica. O método de elementos finitos (MEF) tem como base a utilização de diversos métodos numéricos para solucionar problemas que são descritos por EDOs e EDPs e limitados por condições de contorno. Porém os resultados obtidos devem ser analisados de forma a serem validados, pois a utilização de simplificações pode gerar erros indesejáveis. (Rade, 2006)

O MEF foi criado no intuito de resolver problemas de estruturas aeroespaciais, porém o método foi muito difundido e no final da década de 60 já estava sendo utilizado nas mais diversas áreas de engenharia. Com o advento de novas tecnologias computacionais o MEF vem sendo utilizado de forma satisfatória na resolução de problemas complexos e diversos. Presentemente existem inúmeros programas comerciais que resolvem problemas físicos utilizando o MEF, como ABAQUS, NASTRAN, COSMOS, ANSYS, entre outros. (Rade, 2006)

As soluções analíticas são divididas em duas partes, sendo uma delas homogênea e a outra particular. Tem-se que as soluções homogêneas estão ligadas às propriedades físicas do sistema bem como ao comportamento natural. Já as soluções particulares estão ligadas aos parâmetros de distúrbio do sistema, como forças externas e diferenças de temperatura. Os parâmetros determinantes ao comportamento do sistema formam, por exemplo, a matriz de rigidez, já os parâmetros de distúrbios geram a matriz de carregamento. (Rade, 2006)

Existem duas formulações possíveis para resolver EDOs e EDPs, sendo elas a “formula forte” e a “formula fraca”, onde a primeira consiste na resolução direta das equações que governam o problema físico, já a formula fraca utiliza a formulação integral e aproximações para a solução do mesmo problema.

O mecanismo do MEF atua no intuito de dividir o problema em diversas partes (elementos) com geometrias mais simples, tais como triângulos, quadrados e cubos, assim permitindo uma análise mais simples de um problema complexo. Esses elementos que particionam o problema são delimitados pelos seus vértices, que definem um tamanho, daí a nomeação de elementos finitos, esses nós são também o ponto de ligação entre os elementos, esse conjunto de elementos unidos formam a malha que envolve o problema. (Rade, 2006).

A malha que “envolve” o problema está ligada diretamente com a qualidade dos resultados, quanto mais refinada a malha, isto é, quanto mais elementos melhor é o resultado, onde a solução converge para a solução analítica, pois menores são os elementos, porém isso requer um maior processamento computacional. Outros dois fatores influenciam a precisão dos resultados, o tipo de elemento e o número de nós que constituem o elemento finito. O número de nós de cada elemento define se a aproximação do deslocamento nodal será linear ou quadrática. A figura 60, mostra exemplos de elementos finitos lineares e quadráticos.

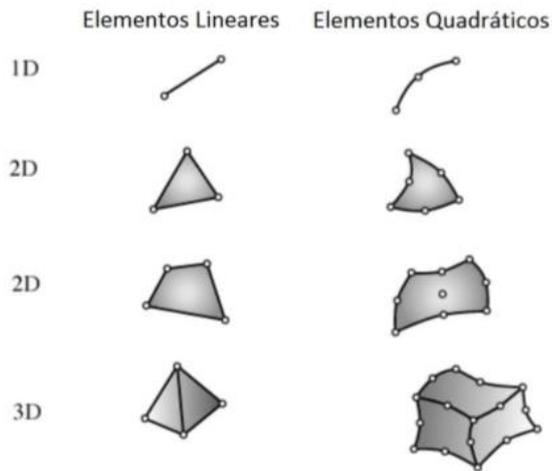


Figura 60 - Tipos de elementos finitos.

Em problemas estruturais, busca-se encontrar as tensões, deslocamentos e deformações de um corpo que é submetido a certos forçamentos externos e deslocamentos, e dentro desse escopo são realizadas análises estáticas dinâmicas e modais.

Mesmo o MEF sendo um ótimo método de se analisar diversos tipos de problemas tem-se que ter em mente que trata-se de um método aproximado, sujeito a erros principalmente devido as simplificações feitas durante o estudo. Assim sendo é de suma importância conhecer as possíveis fontes de erros bem como conhecer bem o problema em questão, para assim se obter uma boa interpretação e validação dos resultados obtidos.

O programa Abaqus permite que uma geometria seja criada ou importada de outros programas para que esta seja simulada pelo método de elementos finitos. Com este programa podemos simular os carregamentos desejados e obter como saídas, deslocamentos, deformações e tensões equivalentes de von Misses. Em uma análise de todo sistema, constatou-se que o único elemento que sofrerá um carregamento de valor considerável são os mancais, sendo assim foi realizada algumas simulações, para os esforços a eles submetidos. As figuras 61 mostra os resultados das simulações, com carregamentos estáticos considerados. Os resultados das análises elásticas são mostrados na tabela 9.

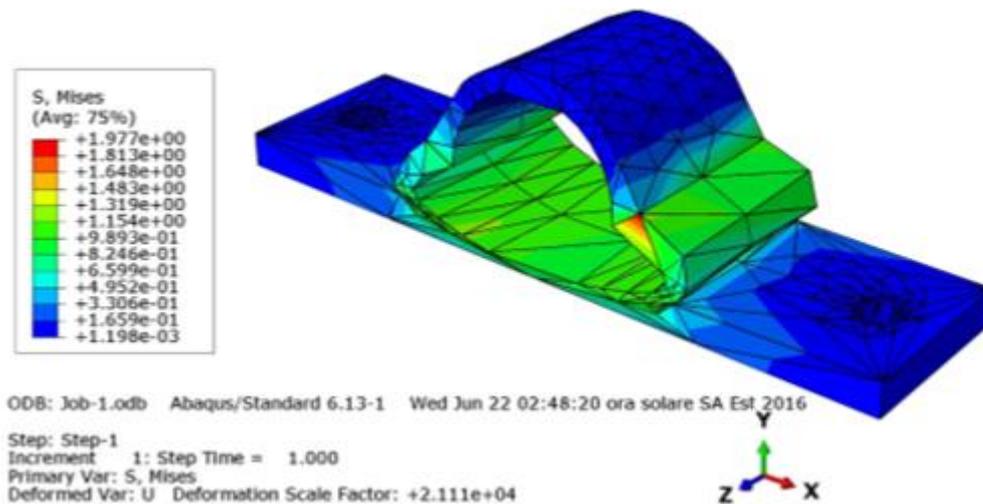


Figura 61 - Simulação de carregamentos estáticos, com malha refinada.

Tabela 9 - Análise de resultados da simulação.

Tamanho do elemento	Número de elementos	Pressão aplicada
		Tensão equivalente máxima de von Mises [MPa]
80	686	2,157
60	1263	1,337
50	1320	1,768
40	1460	1,754
30	1696	1,850
25	1973	1,932
24	2044	1,977

Vale ressaltar que o material termoplástico utilizado nos mancais apresenta uma resistência de 25 MPa, portanto a peça não falhará pelo critério de Von Misses.

7.6.1.3 Radasol – Aquisição de dados

O Radasol foi utilizado afim de adquirir dados detalhados sobre as características de radiação solar local, essas informações foram utilizadas no tópico 7.3.1 e também são apresentadas em anexo. Essas informações foram de suma importância na realização do projeto.

7.6.1.4 System Advisor Model – Análise do concentrador

O system advisor model é um excelente programa de avaliação de concentradores solares, porém sua aplicação é voltada para sistemas de grande porte, que possuam um sistema de tracker e também um ciclo de energia bem definido. Sendo assim o software foi utilizado para avaliarmos, com objetivo

exclusivamente didático, o comportamento do concentrador solar Fresnel a ser projetado, se sua área de reflexão fosse 250 vezes maior e seu comprimento fosse 40 vezes maior. Os resultados obtidos foram apresentados na tabela 10 e na figura 63.

Tabela 10 - Resultados para 1 ano de utilização.

Variable	Mean	Min	Max	Sum	St Dev	Avg Daily Min	Avg Daily Max
Hourly Data:Resource Month (h)	6,53	1,00	12,00	57.168,00	3,45	65,26	6,53
Hourly Data:Resource Beam normal irradiance (W/m2)	198,31	0,00	94,60	1.737.181,00	273,03	0,00	691,99
Hourly Data:Field thermal power loss (MWt)	16,35	0,29	42,72	143.238,99	16,34	0,53	39,25
Hourly Data:Field steam temperature at header inlet (C)	150,82	40,00	279,34	1.321.177,35	102,27	40,00	265,06
Hourly Data:Field steam temperature at collector outlet (C)	220,42	7,81	530,21	1.930.868,01	205,17	18,01	488,44
Hourly Data:Field steam temperature at header outlet (C)	213,06	4,66	525,20	1.866.395,60	201,52	16,21	481,72
Hourly Data:Cycle electrical power output (net) (MWe)	19,81	-4,83	117,36	173.559,19	37,98	-1,65	93,93
Hourly Data:Cycle electrical power output (gross) (MWe)	21,68	0,00	122,38	189.905,28	39,68	0,00	98,79
Hourly Data:Power generated by system (MW)	19,02	-4,63	112,66	166,61	36,46	-1,58	90,17

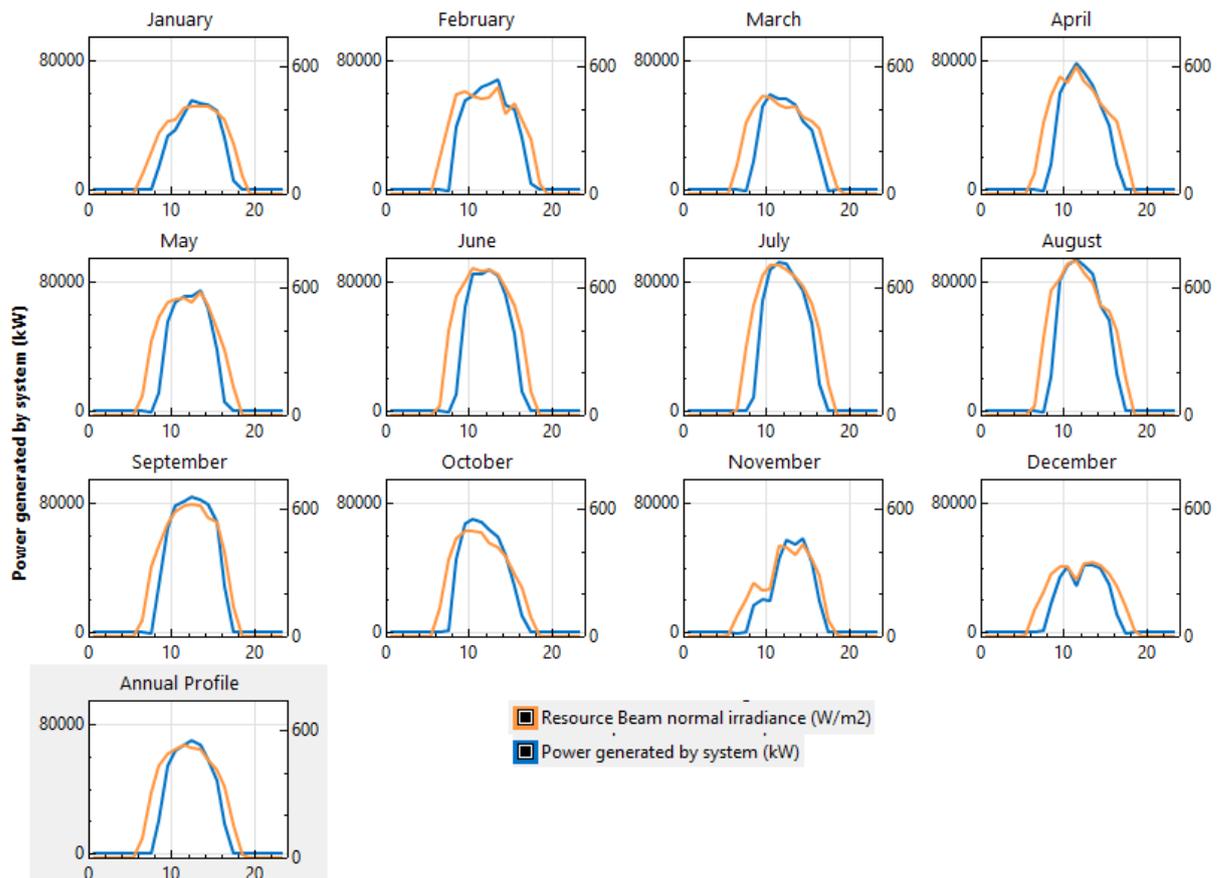


Figura 61 - Resultados de avaliação no software SAM.

7.7 INSPEÇÃO

O processo de inspeção é um estado de “pré-manutenção”, e tem como objetivo verificar as condições do concentrador solar antes do uso do equipamento para garantir operabilidade e segurança ao processo.

A inspeção é um modo de verificar o funcionamento de diferentes conjuntos de um equipamento e de identificar qualquer anomalia antes que ela possa se tornar um problema ou vir a provocar um acidente. Além de toda a manutenção prevista, a eficiência do equipamento depende também de uma boa inspeção. Seguir as recomendações do fabricante é de extrema relevância no manuseio os componentes do concentrador solar, para isso é necessário à criação de um plano de inspeção e um manual de operação do equipamento tendo em vista a segurança do operador.

Normalmente os critérios e os aspectos de inspeção costumam ser normatizados, para o caso de concentradores solares, não existem muitas normas que tratam do assunto no Brasil, o texto mais abrangente sobre o tema é a portaria nº352 do INMETRO, de julho de 2012.

Para concentradores solares a inspeção deve ser feita sempre antes do funcionamento. A inspeção ocorre de forma visual visando avaliar no sistema se não há nem um comprometimento do sistema que dificulte ou impeça o funcionamento do concentrador, bem como se não há erros de configuração que

possam a vir causar acidentes. Com essas premissas foi criada uma rotina de inspeção para o concentrador solar linear Fresnel.

Rotina de inspeção:

- ANTES DO FUNCIONAMENTO
 - Verificar se todas as fileiras encontram-se na angulação correta;
 - Verificar a integridade do papel alumínio que recobre as placas de alumínio;
 - Verificar se a estrutura encontra-se fixa;
 - Verificar se não há sujidades na área de reflexão (sobre o papel alumínio);
 - Verificar se a entrada e a saída do coletor não se encontram obstruídas.
- MENSAL
 - Verificar a integridade do papel alumínio;
 - Verificar a integridade dos mancais e dos parafusos;
 - Verificar a integridade dos eixos de rotação;
 - Verificar a integridade das soldas.

Caso haja qualquer anormalidade ou alteração no sistema, deve-se imediatamente realizar a manutenção do concentrador solar, para que não ocorra acidentes durante o funcionamento.

7.8 MANUTENÇÃO

Segundo norma a manutenção é entendida como todas as operações preventivas e corretivas, consideradas necessárias para o funcionamento correto e seguro da instalação e de seus componentes. Um concentrador térmico tem uma vida útil entre 20 e 30 anos, essa longa vida está relacionada principalmente com a constante manutenção do sistema.

O serviço de manutenção do concentrado solar deve se ater as seguintes atividades (Castiajo, 2012):

- Inspeção;
 - Inexistência de corrosão;
 - Que o sistema está corretamente isolado;
- Limpeza
- Medidas proativas;
 - Aperto de parafusos;
- Medidas corretivas
 - Colocação correta do concentrador;
- Medidas de substituição;
- Condições de utilização.

Caso haja qualquer anormalidade no funcionamento do concentrador deve-se realizar imediatamente o serviço de manutenção, para que os problemas sejam resolvidos evitando maiores riscos.

7.8.1 Plano de manutenção

O plano de manutenção visa a permanência do concentrador em bom funcionamento. Essa etapa é de suma importância, pois a necessidade de verificações periódicas no concentrador Fresnel tem o intuito de prevenção quanto ao desgaste e mal funcionamento. Essa prevenção será feita mediante um estudo específico para cada parte do sistema, bem como a estabilidade e bom funcionamento do conjunto. Nesse sentido, o plano visa amplificação da disponibilidade de uso para operação, assim como um padrão de manutenção e de cuidados para o funcionamento seguro do concentrador.

A manutenção dos componentes do concentrador será de acordo com a frequência de utilização da máquina e a necessidade estabelecida pelo operador. Essas operações são primordiais para o bom funcionamento do conjunto de atividades e na rotina de utilização da máquina mediante os diferentes componentes mecânicos. Logo, a determinação do modelo de manutenção (corretiva, preventiva e preditiva) que será estabelecido como o melhor para utilização na área de trabalho.

Com o objetivo de eliminar as paradas não programadas e imperfeições no processo, o plano de manutenção terá o conceito de preventivo, sendo que a carga horária em atividade do concentrador foi estimada em 8 horas diárias. Com isso, a manutenção preventiva será efetuada em intervalos diferentes dependendo do componente a ser verificado. Assim, o cronograma de atividades de manutenção do concentrador pode ser verificado na tabela 11:

Tabela 11 - Plano de Manutenção.

PLANO DE MANUTENÇÃO	
Itens a serem verificados	Periodicidade/ Frequência
Itens de limpeza	
Limpeza das placas de alumínio e dos espelhos planos	Antes do uso do concentrador
Limpeza dos mancais	Mensal
Limpeza do receptor	Mensal
Limpeza do coletor (retificar corrosões)	Mensal
Itens de Lubrificação (apenas se houver excesso de atrito)	
Lubrificação dos mancais	Semestral
Itens a serem trocados	
Papel alumínio das placas de alumínio	Semanal
Itens de manutenção (se houver alguma anormalidade)	
Eixos rotativos	Semestral
Mancais	Semestral
Coletor	Semestral
Receptor	Semestral
Itens de ajuste	
Parafusos	Mensal
Porcas	Mensal

7.9 SEGURANÇA

A segurança do equipamento, tem como objetivo estabelecer as condições básicas de proteção passiva e ativa para o operador do concentrador bem como as pessoas próximas à atividade (Castiajo, 2012). Fez-se um levantamento de riscos durante a operação do concentrador Fresnel, e constatou-se a existência de algumas possibilidades de acidentes. Estas possibilidades são listadas a seguir:

- Queimaduras: ocasionadas caso haja uma aproximação/contato com as partes quentes do sistema, painéis refletores e coletor (corpo, entrada e saída)
- Cortes: ocasionados pelo contato sem proteção (luvas) com as placas de alumínio, que estão recobertas por espelhos planos, porém são cortantes devido a pequena espessura.

Assim sendo são previstos cuidados básicos que previnam contra acidentes:

- Operar o concentrador sempre com a utilização de luvas, figura 64, que protejam contra cortes e contra altas temperaturas (até 150°C);
- Manter no mínimo uma distância de 1 metro do coletor, e da sua área de descarga (saída).

Com essas medidas a chance que ocorra algum acidente durante a operação do concentrador é quase nula, porém não se pode descartar o imprevisto, então o cuidado durante a operação tem de ser constante.

7.10 CUSTOS DE PROJETO

Após a conclusão do projeto, com todas as escolhas quanto a equipamentos tomadas chegou-se a um valor de projeto, que já inclui os valores de instalação de todos os equipamentos.

O projeto levou em conta uma relação custo benefício que priorizou a eficiência e qualidade, afim de se obter um produto final de ótimo desempenho e máxima segurança. Sendo assim todos os equipamentos a serem utilizados foram escolhidos criteriosamente de forma a atender todas as exigências do projeto. A tabela 12 descreve os valores a serem gastos em cada área de projeto, e a figura 65 completa essa divisão.

Tabela 12 - Custos de projeto.

Ord.	Descrição	Qntd.	Unid.	Custo unit.	Custo Total
1	Estrutura				
1.1	Eixo rotativo (Tubo perfil circular - aço 1020 - ϕ 25,4 mm com parede de 1mm)	12	m	R\$ 5,00	R\$ 60,00
1.2	Mancais de rolamento	24	und.	R\$ 15,00	R\$ 360,00
1.3	Estrutura (Tubo perfil quadrado - aço 1020 - 25,4mm com parede de 1mm)	14	m	R\$ 5,00	R\$ 70,00
2	Parte reflexiva				
2.1	Perfil de alumínio (com 1 mm de espessura)	2	m ²	R\$ 30,00	R\$ 60,00
2.2	Espelhos planos (30cmx100cm)	6	und	R\$ 110,00	R\$ 660,00
3	Parte receptora				
3.1	Coletor de alumínio (perfil retangular 100 mm x	1	und.	R\$ 50,00	R\$ 50,00

	50 mm com 1 m de comprimento				
3.2	Manta térmica de lã de pet (ou jornal processado)	1	und.	R\$ 11,19	R\$ 11,19
3.3	Receptor de alumínio (perfil trapezoidal)	1	und.	R\$ 35,00	R\$ 35,00
4	Periféricos				
4.1	Parafusos M6	48	und.	R\$ 0,75	R\$ 36,00
4.2	Porcas M12	48	und.	R\$ 0,40	R\$ 19,20
5	Manufaturas				
5.1	Soldas			R\$ 10,00	R\$ 100,00
5.2	Cortes			R\$ 5,00	R\$ 50,00
5.3	Dobramento			R\$ 20,00	R\$ 20,00
5.4	CNC			R\$ 300,00	R\$ 300,00
CUSTO TOTAL				R\$	1.795,39

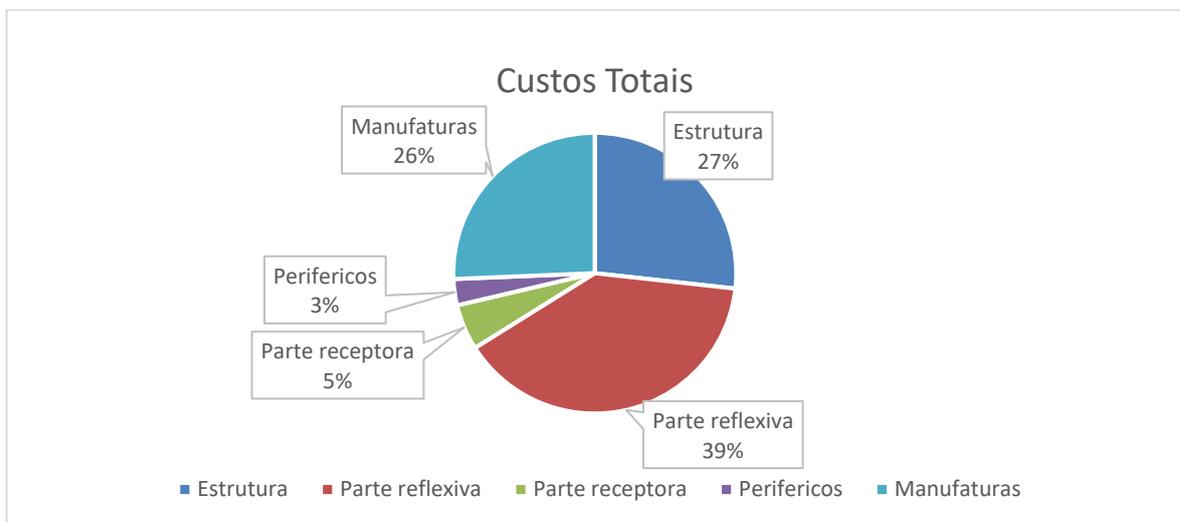


Figura 62 - Custos Totais.

Portanto, nota-se que o maior custo neste projeto do concentrador solar é a parte reflexiva, com 39% do orçamento. Porém é importante de ressaltar que esse não foi o gasto real, pois a parte manufatura, devido a parcerias e convênios, não teve custo algum, sendo assim o gasto real foi de 665,39 reais, dividido como mostra na figura 66.

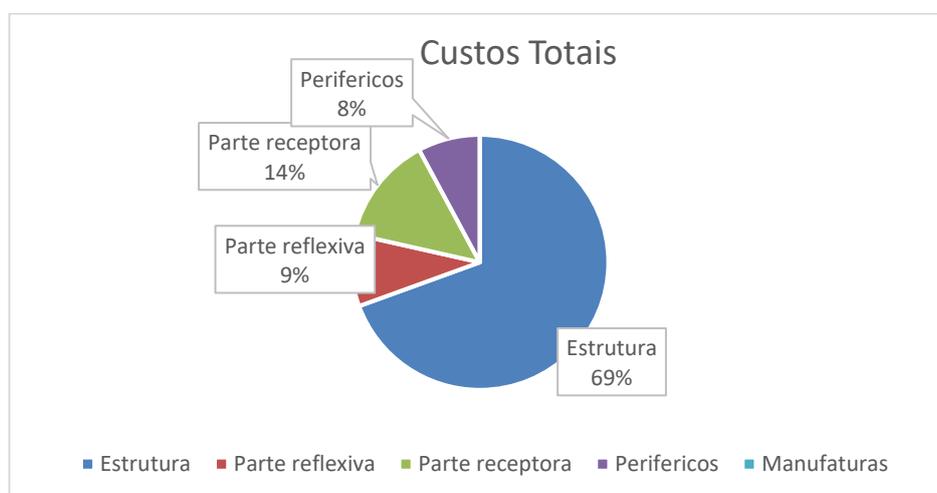


Figura 63 - Custos reais.

8 RESULTADOS

O principal objetivo desse trabalho foi o projeto e construção de um concentrador solar Fresnel linear, para aquisição dos dados de seu comportamento quando o fluido de trabalho for o ar.

Os resultados foram analisados de forma a validar o protótipo e elucidar medidas que venham melhorar os resultados.

Nas seções seguintes tem-se uma breve explanação do que foi obtido com os resultados do trabalho, bem como as limitações e indicações para trabalhos futuros.

8.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Com o protótipo orientado na posição leste-oeste, e os espelhos nas inclinações corretas:

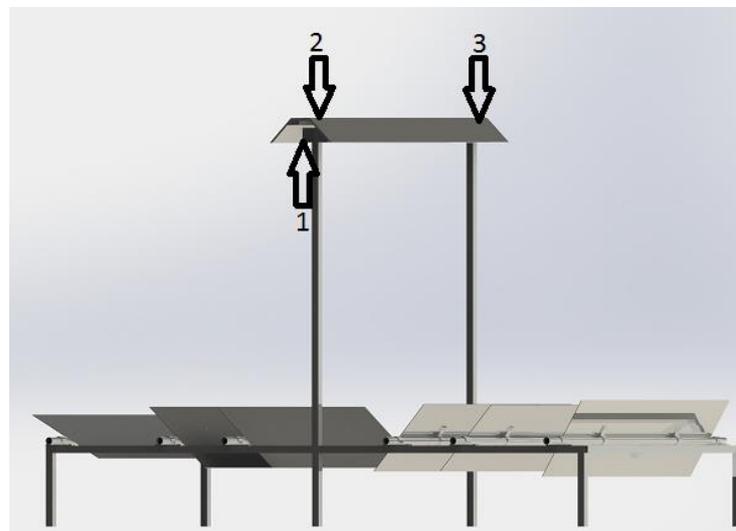


Figura 64 - Posições de inserção dos equipamentos.

1. Acople a saída de ar do compressor na entrada de ar do coletor na posição 1;
2. Acople a termoresistência na entrada de ar na posição 2;
3. Acople a segunda termoresistência na saída de ar do protótipo, posição 3;
4. Conecte as termoresistências à multímetros, que farão as medições;
5. Em um local plano, junto ao protótipo, coloque o piranômetro;
6. Conecte o piranômetro em um multímetro que fará as medições;
7. Ligue o compressor.

8.2 PROCEDIMENTOS

Com a montagem concluída, tem-se início a coleta de dados, que deve seguir os procedimentos listados:

1. Anote cada dado inicial, tais como: Condições climáticas, hora de início dos testes, vazão do compressor, temperatura ambiente;
2. Com auxílio de um cronometro, realize medições contínuas dos valores obtidos através dos multímetros, advindos do piranômetro e das termoresistências;
3. Anote o horário das medições e os dados coletados;
4. Faça uma média horária dos dados obtidos.

É indicado que as medições sejam contínuas e durem no mínimo 5 horas, no caso dos testes realizados as medições foram realizadas em dias distintos, e tiveram duração das 09:00 da manhã até as 16:00 horas.

8.3 CALCULOS SOLARES

De encontro as características dos concentradores solares, é sabido que em situações extremas só a componente direta da irradiação solar é convertida no plano de concentração (Almeida, 2013), de posse dessa informação, em anexo encontram-se os valores anuais de todas as componentes de irradiação solar.

Durante os testes do protótipo construído foram feitas medições em tempo real da irradiação global, com auxílio de um piranômetro, figura 65.



Figura 65 - Piranômetro utilizado nos testes.

No gráfico 3 é possível ver as medições feitas a partir do piranômetro e os dados obtidos a partir do RADIASOL, esses que são baseados em médias de dados de vários anos de coleta, portanto tem-se que levar em conta que os dados do RADIASOL podem contar com resultados coletados em dias favoráveis, céu claro, poucas nuvens, grande irradiação.

Em anexo encontra-se a tabela com os dados coletados, bem como o gráfico de calibração do piranômetro, utilizado na conversão dos dados coletados.

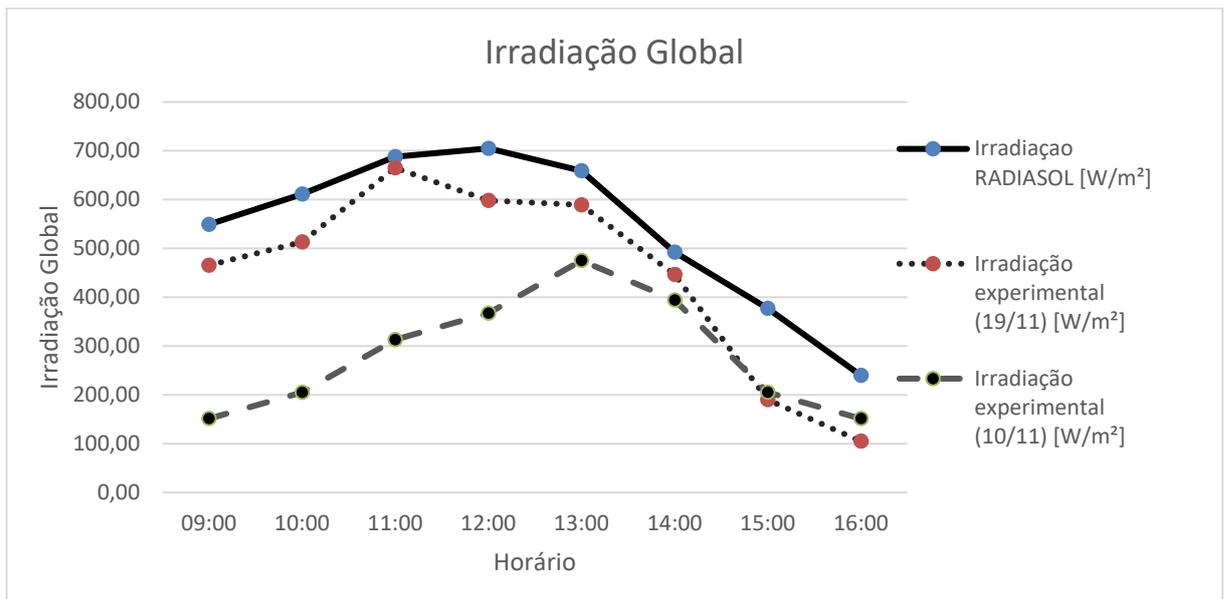


Gráfico 3 - Irradiação Global.

É importante ressaltar que nos dias que foram realizadas as medidas, havia muitas nuvens no céu, o que interfere fortemente nos valores da irradiação global, que caíram drasticamente. Na parte de aquisição de dados, é previsível que houve limitações devido falta de equipamentos mais atualizados, pois seria de suma importância contar com câmeras termográficas ou piranômetros mais modernos.

8.4 DIMENSIONAMENTO (MEDIÇÕES)

O concentrador trabalhará com temperaturas inferiores a 120°C, um dos motivos dessas previsões é o fato de não se trabalhar com um sistema de circulação que permita pressões elevadas, e por os testes serem realizados em uma época do ano que a radiação direta não é tão intensa.

Um problema inerente a qualquer concentrador solar são as condições meteorológicas, pois vários fatores atrapalharam as medições, como chuvas, tempo muito nublado, grandes períodos de sombreamento, fato decorrente dos testes terem acontecido no mês de novembro.

Nas medições de temperatura foram utilizados dois termoresistores TP100, onde um foi alocado na entrada do ar, e outro na saída, figura 66. Apesar das leituras dos termoresistores serem realizadas com multímetro digital, a última casa decimal variava constantemente, o que pode ter ocasionado erros nos cálculos posteriormente realizados.

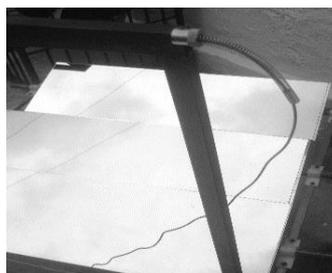


Figura 66 - Termoresistor instalado no concentrador.

8.5 CONCENTRADOR SOLAR

O concentrador solar Fresnel linear tem uma área de reflexão de 1,8 m² para um rácio de concentração geométrico de 6 e um rácio de concentração efetivo de 4,8 (considerando sombras e obstruções)

8.5.1 Temperaturas

Como já mencionado anteriormente as temperaturas foram obtidas a partir de dois termoresistores colocados na entrada e na saída do protótipo, por onde passa o fluido de trabalho. Os valores em Ohms coletados, foram devidamente transformados em temperatura, utilizando a tabela de conversão do fabricante que se encontra em anexo.

A temperatura máxima teórica do protótipo calculada durante o trabalho, a partir das equações de transferência de calor, considerando algumas relativizações, é de aproximadamente 160 °C, já a temperatura máxima obtida durante os testes foi de aproximadamente 92,5 °C. Os gráficos a seguir fazem um combinado entre temperatura e potência, e temperatura e irradiação. Os dados utilizados de temperatura são relativos ao dia que foi detectada a maior temperatura, considerando a vazão de 135 L/min dada pelo compressor. Os gráficos 4 e 5 mostram a relação entre temperatura e potência e a relação entre temperatura e irradiação global, mediante aos horários.

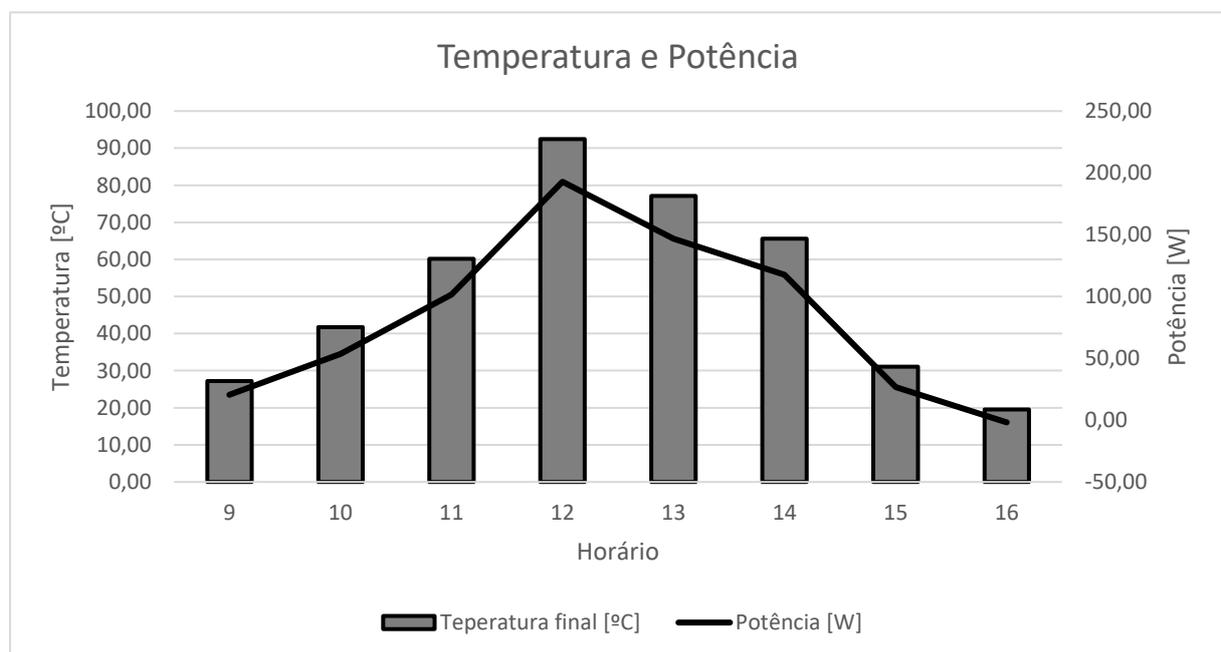


Gráfico 4 - Relação temperatura e potência.

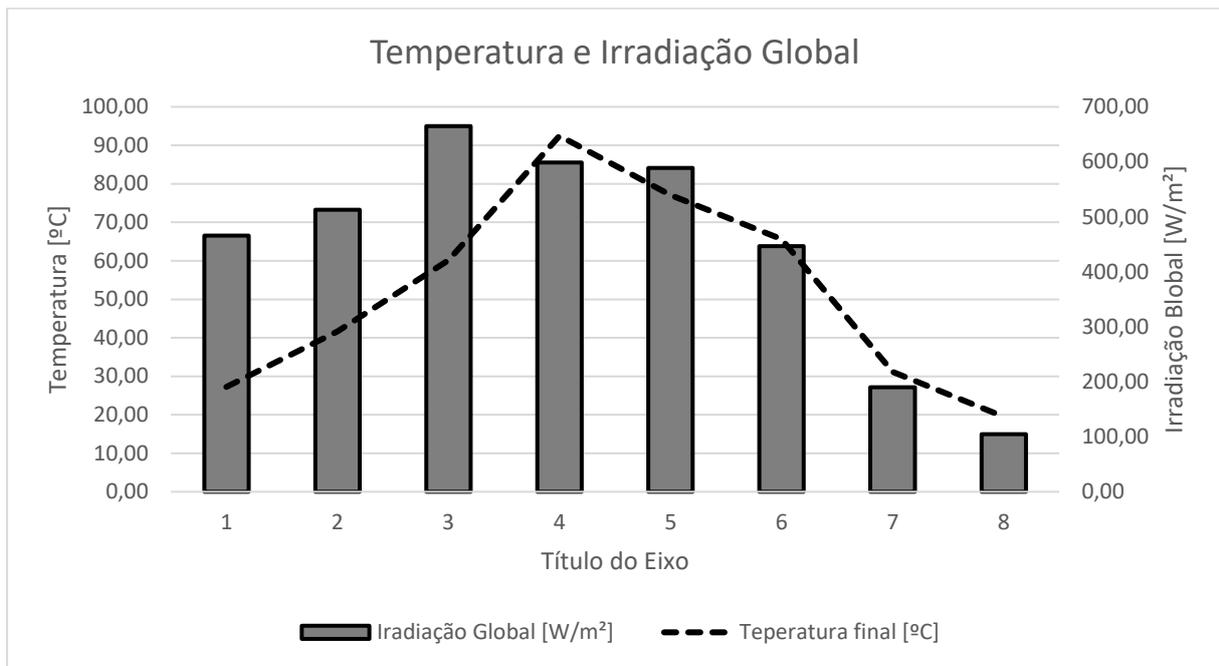


Gráfico 5 - Relação temperatura e irradiação global.

8.5.2 Potências e Rendimentos

Usando os equacionamentos descritos anteriormente, foram calculados os parâmetros que diagnosticam a eficiência de um concentrador, como é mostrado na tabela 13:

Tabela 13 - Potências teóricas.

Funcionamento térmico - Teórico			
Propriedade	Equação	Valor	Unidade
Rendimento global (η)	Eq. 3	0,52	
Potência Solar (P_{solar})	Eq. 4	1269,00	W
Potência Absorvida (P_{abs})	Eq. 6	705,25	W
Potência perdida ($P_{perdida}$)	Eq. 7	45,17	W
Potência útil (P_{util})	Eq. 5	660,08	W

Com os valores teóricos calculados podemos comparar com os valores experimentais. O que mais chamou atenção foi a disparidade entre o rendimento teórico de 52% e o rendimento experimental, calculado com a equação 26, que retornou o valor de aproximadamente **17%**, a tabela 14 mostra a variação do rendimento durante o horário de teste. O que remete que, interferências tais como, condições climáticas desfavoráveis, que diminuem a incidência da radiação direta, isolamento térmico ineficiente, entre outros tiveram grande impacto sobre rendimento global do sistema. O gráfico 6 apresenta a variação da eficiência do sistema em relação à irradiação global e ao longo do tempo.

Tabela 14 - Rendimento do protótipo relativo ao horário de teste.

Horário	Irradiação [W/m ²]	Temperatura de entrada [°C]	Teperatura final [°C]	Rendimento %
9	465,61	20,23	27,24	2,45
10	513,09	23,42	41,71	5,79
11	665,02	25,40	60,16	8,49
12	598,55	26,50	92,48	17,90
13	589,06	26,90	77,12	13,84
14	446,62	25,40	65,63	14,62
15	190,23	22,00	31,11	7,78
16	104,77	20,12	19,51	-0,94

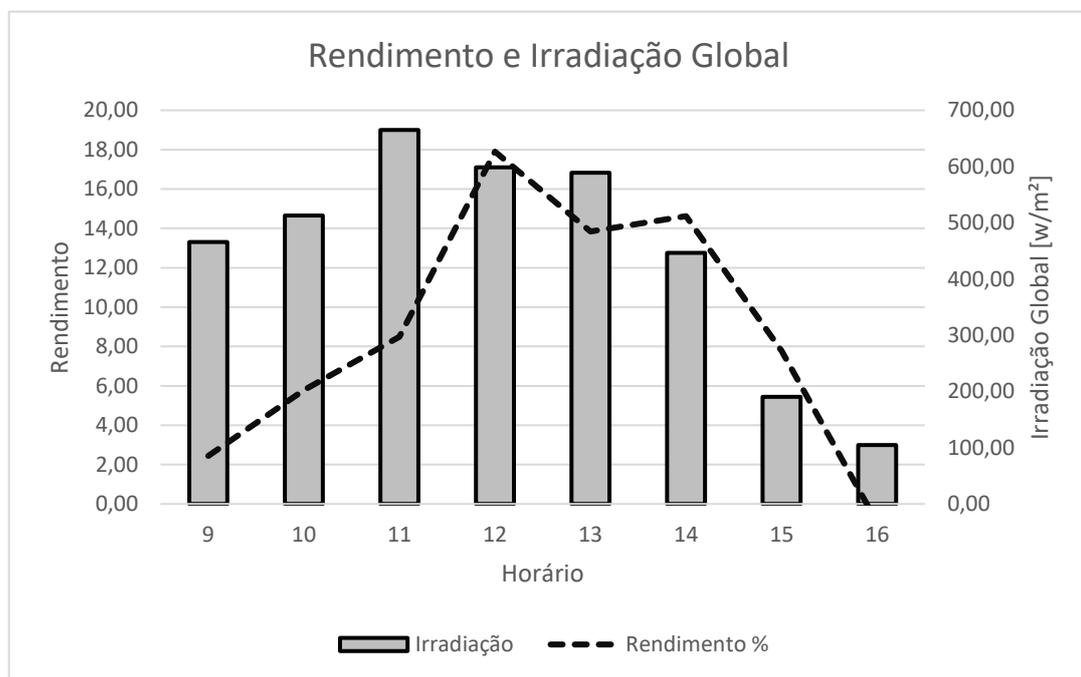


Gráfico 6 - Rendimento e Irradiação Global.

9 Conclusões

A tecnologia heliotérmica ainda está crescendo em âmbito nacional e é de suma importância estudos, como o que foi realizado nesse trabalho, no intuito de incentivar e fortalecer os estudos que abordam o assunto.

O trabalho consistiu em três partes distintas. A primeira parte foi a de projeto, onde foram utilizadas metodologias pré-estabelecidas no intuito de se chegar em um protótipo que fosse capaz de atender as necessidades de projeto, e gerar resultados, para que esses fossem analisados e gerassem uma visão geral do funcionamento e eficiência do protótipo

A segunda parte consistiu na construção do protótipo, onde o principal objetivo foi manter a qualidade do projeto tendo como meta gastos reduzidos, e facilidades construtivas. A construção, que durou aproximadamente 3 meses, se deu toda de forma manual, observando as normas construtivas de protótipos da ABNT, bem como as normas de segurança. Vale ressaltar que a etapa de construção cumpriu todas as metas estabelecidas, gerando um custo total de aproximadamente R\$ 1.800,00.

Por último, a parte de testes, onde resultados foram encontrados e análises feitas a partir dos dados coletados. As análises consistiram em utilizar um compressor de ar, para forçar a entrada de ar no coletor, e a partir de termoresistências controlar as variações de temperatura do fluido de trabalho. Paralelamente ao controle de temperatura, foi realizado aferições, por meio de um piranômetro, da quantidade de irradiação global que chegava ao coletor. Com os valores coletados, foi possível determinar o rendimento do protótipo analisado.

De acordo com as análises, o rendimento máximo apresentado pelo protótipo foi de 17%, sendo esse dado obtido no dia 19/11/2016, por volta do meio-dia, horário de Brasília. Esse dado se analisado separadamente pode ser considerado baixo, porém, pode-se explicar a baixa eficiência a partir das condições climáticas nos dias dos testes, dias muito nublados com grandes períodos de sobreamento, que propiciam uma baixíssima quantidade de irradiação direta, que é irradiação mais importante para os painéis do tipo Fresnel.

Outro motivo que pode ter causado o rendimento máximo de 17% é o isolamento térmico, que pode não ter funcionado corretamente, pois por ser um isolamento feito por jornal sua eficiência não foi quantizada, sendo impossível de precisar a sua eficiência. Erros relativos às medições também podem ter influenciado a resultados ruins.

O trabalho se fez suficiente no âmbito de projeto e construção de um protótipo de coletor solar do tipo fresnel de foco linear, mesmo com as dificuldades operacionais e rendimento baixo, o protótipo cumpriu com seu objetivo de experimentação. Porém, a partir dos resultados, pode-se observar pontos críticos no protótipo, que podem ser otimizados e corrigidos no intuito de melhorar os resultados encontrados. Como possíveis otimizações e trabalhos futuros seguem algumas recomendações:

- Desenvolvimento de tracker para o concentrador solar Fresnel linear, de forma à acoplar todos os eixos rotativos.
- Utilizar matérias com maior grau de isolamento térmico a fim de evitar perdas para o ambiente.
- Aumentar as dimensões do concentrador, no intuito de poder trabalhar com valores energéticos maiores, e conseqüentemente observar as conseqüências da alternância de dimensões.
- Estudar a possibilidade de utilização de diversos fluidos, que possuam melhores propriedades térmicas.
- Aumentar a pressão de trabalho.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (22 de Setembro de 2015). Fonte: Ambiente e Energia :
<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2014/11/primeiro-leilao-de-energia-solar-brasil-reliza-contratacao-preco-recorde/24752>
- (05 de Novembro de 2015). Fonte: Nautilus: www.nautilus.fis.uc.pt.
- Agencia Brasil. (07 de Setembro de 2015). *Crescimento da eólica depende das linhas de transmissão, diz especialista*. Fonte: EBC - Agência Brasil:
<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-09/crescimento-da-eolica-depende-das-linhas-de-transmissao-diz-especialistas>
- Ajona, J. I. (Maio de 1997). *Tecnología de Captadores Cilindro Parabólicos para Producción de Electricidad: la Experiencia Californiana traída al Mediterráneo*. Madrid, Espanha: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT.
- Almeida, G. S. (Março de 2013). *Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector . Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável .* Lisboa, Portugal.
- Amarante, O. A., Brower, M., Zack, J., & Sá, A. L. (2001). *Atlas do Potencial eólico brasileiro*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Araújo, M., & Goes, T. (2009). *Energias alternativas fortalecem a matriz energética. Política Agrícola, 67-74.*
- Base de Donnés Solaire Sol. (02 de Novembro de 2015). *HIGH RESOLUTION SOLAR SPECTRUM*. Fonte: Bass2000: http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php
- Belo Monte. (2015). *Blog Belo Monte - Imagens*. Fonte: Blog Belo Monte:
<http://blogbelomonte.com.br/category/imagens/>
- Brookfield Renewable Energy Partners. (s.d.). *Sobre Hidrelétricas e Energia Eólica*. Fonte: Brookfield Renewable:
https://www.brookfieldrenewable.com/port_content/portfolio/sobre_hidreletricas_e_energia_e%C3%B3lica-30491.html
- Burattini, M. P. (2008). *Energia, uma abordagem multidisciplinar*. São Paulo: Livraria da Física.

- Calefaccion solar.* (s.d.). Fonte: *Calefaccion solar*:
<http://www.calefaccionsolar.com/calefaccionsolar.html>
- Castiajo, S. S. (Julho de 2012). *Metodologia de manutenção de edifícios - Sistemas solares térmicos*. Porto, Portugal.
- Castro, N. J., Dantas, G. d., Leite, A. L., Brandão, R., & Timponi, R. R. (Maio de 2010). *Considerações sobre as Perspectivas da Matriz Elétrica Brasileira. TDSE - Textos de Discussão do Setor Elétrico Nº 19*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2012). *Transferencia de Calor e Massa - Uma abordagem prática*. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.
- CPFL. (25 de Setembro de 2015). *História da Energia Elétrica*. Fonte: Site da CPFL ENERGIA: <http://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/eficiencia-energetica/uso-consciente/historia-da-energia/Paginas/default.aspx>
- Departamento de Física UFPR. (22 de Outubro de 2015). *RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE*. Fonte: Física UFPR: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>
- EBC. (05 de Maio de 2014). *Usina de Itaipu completa 30 anos de operação*. Fonte: EBC: <http://www.ebc.com.br/noticias/brasil/2014/05/usina-de-itaipu-completa-30-anos-de-operacao>
- EDP. (25 de Agosto de 2015). *História da Energia*. Fonte: Site da EDP: <http://www.edp.com.br/pesquisadores-estudantes/energia/historia-da-energia/Paginas/default.aspx>
- ELETOBRAS. (s.d.). *Vantagens das hidrelétricas. NA trilha da energia*.
- Empresa de Pesquisa Energetica - EPE. (2014). *Balanço Energetico Nacional 2014 - Relatório Sintese/ ano base 2013*. Rio de Janeiro.
- EPE. (s.d.).
- EPE - Empresa de Pesquisa Energetica. (2015 de Novembro de 2015). *2º Leilão de Energia de Reserva viabiliza investimento de R\$ 6,8 bi*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energetica. (2015). *Balanço Energetico Nacional 2015*. Rio de Janeiro.
- Facão, J., & Oliveira, A. C. (2011). "Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Renewable Energy*.

- Facão, J., & Oliveira, A. C. (2011). Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Renewable Energy*.
- Francisco, W. d. (05 de Novembro de 2015). *Energia hidrelétrica*. Fonte: Brasil Escola: <http://www.brasilecola.com/geografia/energia-hidreletrica.htm>
- Gomes, F. A. (1986). *Historia & Energia - A Eletrificação no Brasil*. Eletropaulo. São Paulo.
- Jornal da Parnaíba. (23 de Outubro de 2015). *Parques eólicos produzirão metade do consumo de energia do Piauí*. Fonte: Cotidiano de Parnaíba: <http://cotidianodeparnaiba.blogspot.com.br/2014/11/parques-eolicos-produzirao-metade-do.html>
- Kelman, J., Kelman, R., & Pereira, M. V. (s.d.). *Energia firme de sistemas hidrelétricos e usos múltiplos dos recursos hídricos*.
- Leite, A. D. (1997). *A Energia do Brasil*. São Paulo: Nova Fronteira.
- Ministerio de Minas e Energia. (2007). *Geração de Energia Eletrica a partir de Outras Fontes. Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Gráfica da Eletrobras.
- Observatorio de Energias Renovaveis para a America Latina e o Caribe - ONUDI. (2015). *Energia e mudança climatica. Programa de Capacitação em Energias Renovaveis*.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., & Ruther, R. (2006). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São Jose dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (Março de 2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Porto, L. (24 de Novembro de 2005). *A Energia Alternativa Renovavel no Brasil. Ministerio de Minas e Energia - RENOVE*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- PSA. (22 de Setembro de 2015). *SISTEMAS DE TORRE CON RECEPTOR CENTRAL*. Fonte: PSA - Ciemat: <https://www.psa.es/webesp/instalaciones/receptor.php>
- Rade, D. A. (2006). *Metodo dos Elementos Finitos. Apostila da disciplina Método dos elementos finitos aplicados a Engenharia mecanica, Universidade Federal de Uberlandia*.

- Rosim, S. O. (2008). Geração de energia elétrica - Um enfoque histórico e institucional das questões comerciais no Brasil. *Programa interinstituições de Pós-Graduação em Energia*. São Paulo : Universidade de Brasília.
- Silva, Z. E. (s.d.). Uso da Energia Solar na Indústria.
- Singh, P. L., Sarviya, R. M., & Bhagoria, J. L. (2009). Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. *Applied Energy Reviews*.
- Tolmasquim, M. (Jan./Junho de 2000). As origens da crise energética brasileira. *Ambiente & Sociedade*, pp. 6-7.
- Tolmasquim, M. T., Guereiro, A., & Gorini, R. (Novembro de 2007). Matriz Energética Brasileira. *Novos Estudos*, pp. 47-69.
- Tolmasquim, M. T., Oliveira, R. G., & Campos, A. F. (2002). As Empresas do Setor Elétrico Brasileiro. Rio de Janeiro: Cenergia.
- Uol notícias - Ciência e Saúde. (20 de Dezembro de 2013). *Falta de linhas de transmissão atrasa operação de 34% dos parques eólicos*. Fonte: Uol notícias: <http://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/redacao/2013/12/20/falta-de-linhas-de-transmissao-atrasa-operacao-de-34-dos-parques-eolicos.htm>
- Walter, A. (2003). Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas. *Encontro de Energia no Meio Rural*. Campinas, São Paulo, Brasil.

11 ANEXOS

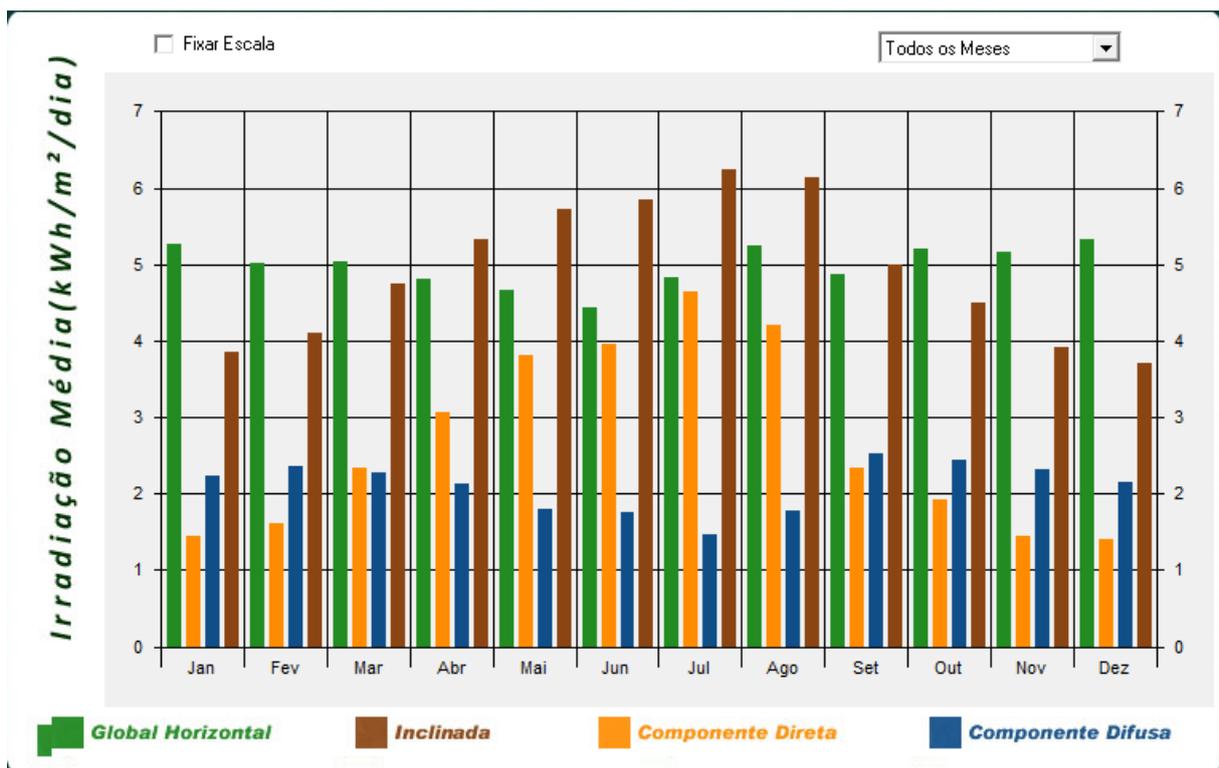
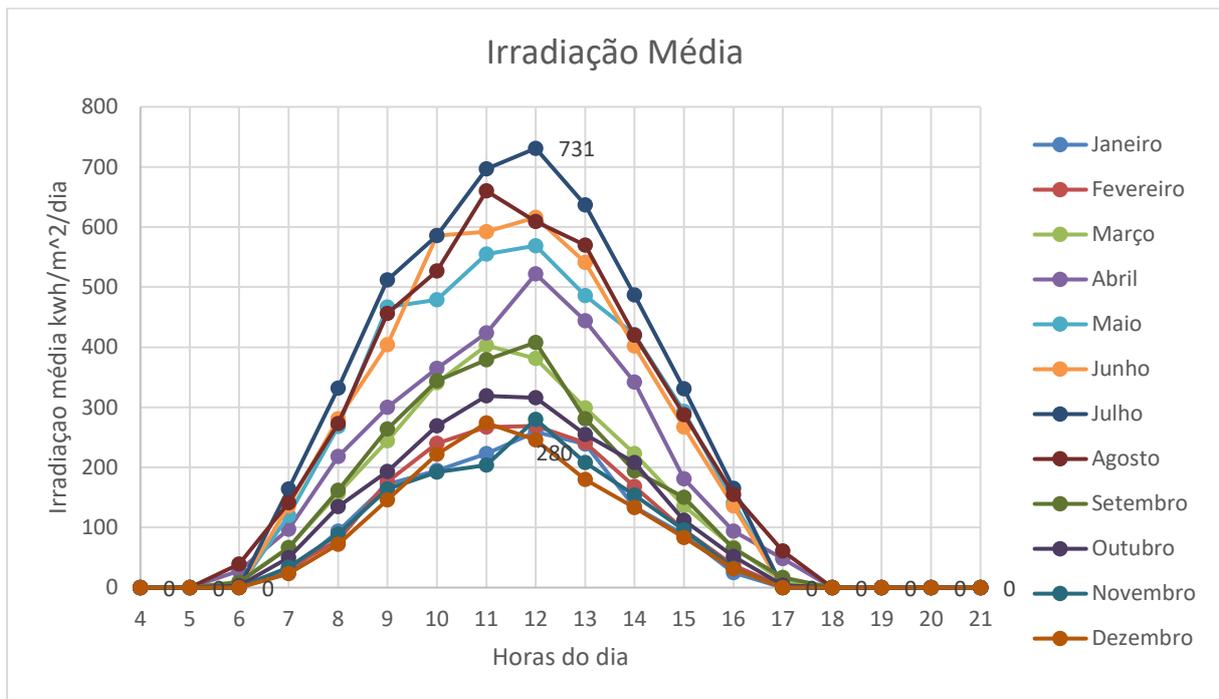
11.1 IRRADIÂNCIA MÉDIA

Irradiancia Média (W/m ²)						Irradiancia Média (W/m ²)					
Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada	Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada
1	4	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0
1	5	8	0	0	0	3	5	0	0	0	0
1	6	103	0	52	55	3	6	66	10	45	56
1	7	225	24	112	143	3	7	211	67	121	194
1	8	388	94	147	252	3	8	374	157	178	346
1	9	573	172	231	419	3	9	522	244	232	491
1	10	631	195	276	490	3	10	661	341	265	625
1	11	676	223	296	538	3	11	712	403	251	674
1	12	730	259	289	569	3	12	725	381	296	697
1	13	678	239	248	506	3	13	612	299	266	583
1	14	497	134	223	371	3	14	506	223	238	475
1	15	406	88	188	287	3	15	373	136	202	348
1	16	235	25	122	153	3	16	220	67	130	203
1	17	108	0	58	61	3	17	63	11	43	56
1	18	10	0	0	0	3	18	0	0	0	0
1	19	0	0	0	0	3	19	0	0	0	0
1	20	0	0	0	0	3	20	0	0	0	0
1	21	0	0	0	0	3	21	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0
2	5	1	0	0	0	4	5	0	0	0	0
2	6	80	2	44	47	4	6	38	28	31	59
2	7	225	32	135	174	4	7	190	97	118	220
2	8	369	79	217	307	4	8	352	218	164	392
2	9	523	176	244	434	4	9	484	300	213	527
2	10	640	240	280	538	4	10	599	365	276	658
2	11	694	267	316	603	4	11	663	424	282	725
2	12	675	269	285	573	4	12	749	522	271	815
2	13	629	241	272	531	4	13	652	444	246	709
2	14	519	168	246	429	4	14	512	342	202	559
2	15	352	96	171	277	4	15	329	181	176	367
2	16	211	37	107	149	4	16	188	94	119	219
2	17	95	2	46	50	4	17	44	48	30	79
2	18	3	0	0	0	4	18	0	0	0	0
2	19	0	0	0	0	4	19	0	0	0	0
2	20	0	0	0	0	4	20	0	0	0	0
2	21	0	0	0	0	4	21	0	0	0	0

Irradiancia Média (W/m ²)					
Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada
5	4	0	0	0	0
5	5	0	0	0	0
5	6	22	1	1	2
5	7	154	120	98	222
5	8	340	268	161	439
5	9	514	467	154	635
5	10	605	479	234	729
5	11	685	555	244	819
5	12	682	569	228	817
5	13	596	486	213	716
5	14	507	421	192	627
5	15	357	293	161	464
5	16	170	141	103	248
5	17	27	3	1	3
5	18	0	0	0	0
5	19	0	0	0	0
5	20	0	0	0	0
5	21	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0
6	5	0	0	0	0
6	6	14	0	0	0
6	7	144	136	97	237
6	8	315	281	155	445
6	9	458	404	189	606
6	10	619	586	193	797
6	11	667	592	236	847
6	12	675	616	220	856
6	13	609	541	225	784
6	14	462	402	195	610
6	15	303	267	151	426
6	16	142	136	95	235
6	17	18	0	0	0
6	18	0	0	0	0
6	19	0	0	0	0
6	20	0	0	0	0
6	21	0	0	0	0

Irradiancia Média (W/m ²)					
Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada
7	4	0	0	0	0
7	5	0	0	0	0
7	6	18	0	0	0
7	7	159	164	89	258
7	8	338	332	128	470
7	9	521	512	150	676
7	10	628	586	185	789
7	11	733	697	189	908
7	12	742	731	167	920
7	13	666	637	182	838
7	14	512	487	164	665
7	15	332	331	123	463
7	16	157	165	87	256
7	17	23	0	0	0
7	18	0	0	0	0
7	19	0	0	0	0
7	20	0	0	0	0
7	21	0	0	0	0
8	4	0	0	0	0
8	5	0	0	0	0
8	6	34	39	16	55
8	7	190	141	101	247
8	8	365	273	154	437
8	9	563	456	180	652
8	10	681	527	229	776
8	11	792	660	209	892
8	12	758	609	226	857
8	13	711	570	221	812
8	14	543	420	192	627
8	15	366	288	140	438
8	16	199	155	101	261
8	17	40	61	14	75
8	18	0	0	0	0
8	19	0	0	0	0
8	20	0	0	0	0
8	21	0	0	0	0

Irradiancia Média (W/m ²)						Irradiancia Média (W/m ²)					
Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada	Mês	Hora	Global	Direta	Difusa	Inclinada
9	4	0	0	0	0	11	4	0	0	0	0
9	5	0	0	0	0	11	5	5	0	0	0
9	6	47	9	39	49	11	6	101	0	49	51
9	7	189	66	122	193	11	7	252	34	130	170
9	8	371	162	206	379	11	8	368	89	159	259
9	9	510	264	236	514	11	9	553	164	249	428
9	10	652	344	305	668	11	10	634	192	308	518
9	11	710	379	338	737	11	11	651	204	315	538
9	12	707	408	290	718	11	12	725	280	276	576
9	13	606	281	331	629	11	13	611	208	253	478
9	14	486	194	292	501	11	14	501	154	209	377
9	15	358	150	205	366	11	15	397	96	182	289
9	16	186	65	118	188	11	16	247	32	128	167
9	17	56	17	41	60	11	17	104	0	56	59
9	18	0	0	0	0	11	18	8	0	0	0
9	19	0	0	0	0	11	19	0	0	0	0
9	20	0	0	0	0	11	20	0	0	0	0
9	21	0	0	0	0	11	21	0	0	0	0
10	4	0	0	0	0	12	4	0	0	0	0
10	5	0	0	0	0	12	5	10	0	0	0
10	6	77	3	47	52	12	6	121	0	64	67
10	7	232	50	128	184	12	7	239	23	111	140
10	8	403	135	193	340	12	8	374	72	168	250
10	9	516	193	237	444	12	9	536	146	221	382
10	10	667	269	312	600	12	10	672	222	248	489
10	11	708	319	295	634	12	11	747	274	255	550
10	12	712	316	298	635	12	12	693	246	243	508
10	13	637	255	298	571	12	13	613	180	264	462
10	14	556	208	263	487	12	14	507	133	219	367
10	15	373	112	191	314	12	15	418	83	192	286
10	16	236	52	127	185	12	16	272	31	118	156
10	17	88	4	51	57	12	17	107	0	52	55
10	18	0	0	0	0	12	18	13	0	0	0
10	19	0	0	0	0	12	19	0	0	0	0
10	20	0	0	0	0	12	20	0	0	0	0
10	21	0	0	0	0	12	21	0	0	0	0



11.2 COMPRESSOR

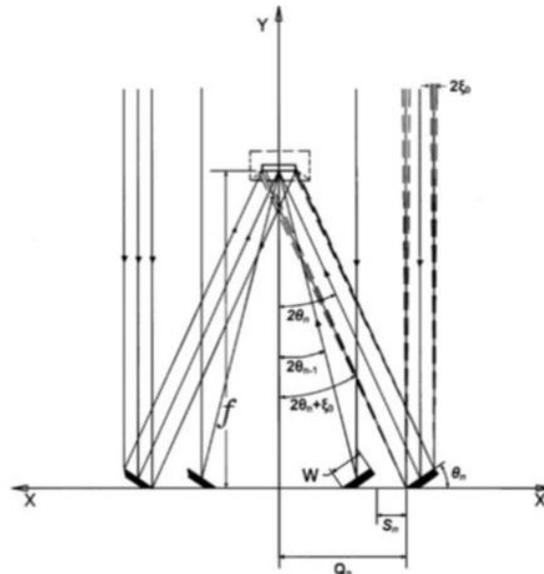
Compressor									
1/3	250	220	1	50	2	1450	3,7	53	135
HP	W	V	PH	HZ	A	RPM	BAR	PSI	L/min

11.3 DIMENSIONAMENTO

A inclinação de cada espelho é obtida a fim de que o raio solar incidente, perpendicular ao plano de abertura, atinja o centroide do espelho e seja posteriormente refletido ao ponto(plano) focal, com uma única reflexão.

Condições iniciais: $W = 300 \text{ mm}$, $L = 1000 \text{ mm}$, $f = 1000 \text{ mm}$

- Variáveis
- W Largura do espelho
 - L Comprimento do espelho
 - F Ponto focal
 - f Altura do receptor
 - Q_n Distância entre a fila e o centro
 - S_n Espaço entre filas de espelho
 - θ_n Ângulo de inclinação da fila n
 - ξ_0 Meio ângulo de subtensão solar
 - n Índice da fileira de espelhos
 - RC Rácio de concentração



Espelhos	Fila	$S_n(\text{mm})$	$Q_n(\text{mm})$	θ_n	$2\theta_n$	$2\theta_n + \xi$	$2\theta_n - \xi$
Uni	n	mm	mm	°(graus)	°(graus)	°(graus)	°(graus)
2	1	150	150	0,15	0,29	0,30	0,29
4	2	0,00	474,86	0,28	0,57	0,57	0,56
6	3	88,00	850,88	0,40	0,80	0,81	0,80
8	4	182,39	1309,34	0,50	0,99	1,00	0,99
10	5	315,09	1888,13	0,57	1,14	1,14	1,14
12	6	493,97	2634,67	0,62	1,25	1,25	1,24
14	7	732,61	3610,62	0,67	1,33	1,34	1,33
16	8	1052,08	4898,67	0,70	1,39	1,40	1,39
18	9	1483,92	6612,82	0,72	1,44	1,44	1,43
20	10	2075,96	8914,60	0,74	1,47	1,48	1,47
22	11	2903,59	12040,61	0,75	1,50	1,50	1,49
24	12	4093,07	16353,51	0,76	1,52	1,52	1,51
26	13	5876,00	22447,34	0,77	1,53	1,54	1,53
28	14	8740,97	31404,62	0,77	1,54	1,55	1,54
30	15	14006,82	45626,56	0,78	1,55	1,56	1,55
32	16	28488,99	74329,75	0,78	1,56	1,56	1,55
34	17	54420,04	128963,18	0,78	1,56	1,57	1,56
36	18	94170,11	223346,33	0,78	1,56	1,57	1,56
38	19	#####	420084,75	0,78	1,57	1,57	1,56
40	20	#####	976025,10	0,78	1,57	1,57	1,56

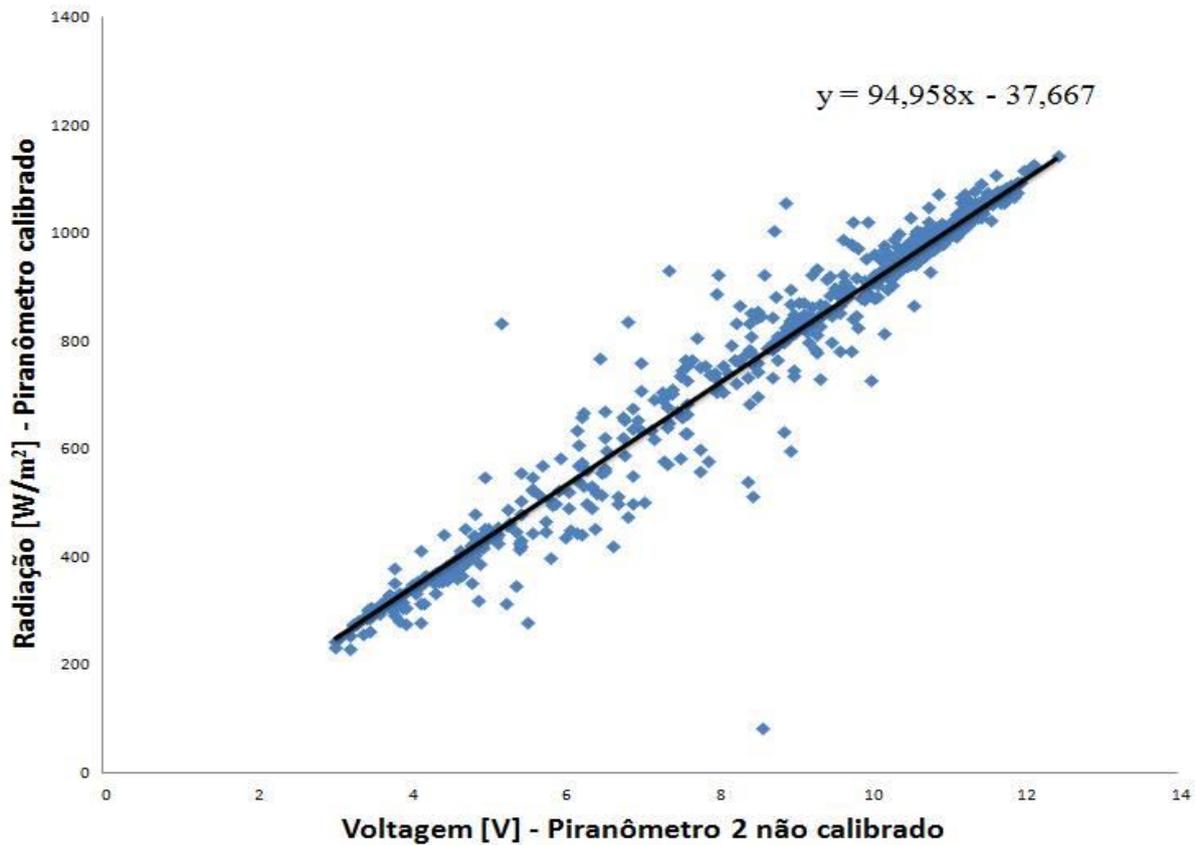
11.3.1 Rácio de concentração

A área iluminada do receptor A considerada para o cálculos do rácio de concentração geométrico é igual a área de um espelho, 0,3 m².

O valor da potência entregue ao coletor, Sr, é calculada com base na componente direta da irradiância.

Espelhos	Cl	RC	Rcgeo	Ac	Anc	(*% de Ac)	Sr	Um	Dn	In	θ
Uni				m2	m2	m2	kW				
2	0,9281258	1,8562517	2	0,6	0,15	25%	0,269476243	4,8409779	309,8893	5,0756171	0,1457284
4	0,8135162	3,483284	4	1,2	0,12	10%	0,646742984	5,9711854	341,50582	6,5571954	0,2836447
6	0,663303	4,80989	6	1,8	0,18	10%	0,970114476	8,4890099	398,00147	9,7116968	0,4021359
8	0,5142837	5,8384573	8	2,4	0,3	13%	1,2575558	13,311085	483,66894	15,757017	0,4970893
10	0,3863061	6,6110695	10	3	0,5	17%	1,4970902	22,120085	604,76685	26,932075	0,5699755
12	0,2843945	7,1798586	12	3,6	0,83	23%	1,6587760	37,906475	770,44816	47,275663	0,6247284
14	0,2062943	7,5924473	14	4,2	1,31	31%	1,7306363	65,948466	993,84921	84,082079	0,6655352
16	0,1476049	7,8876571	16	4,8	2,01	42%	1,6707527	115,58436	1293,5779	150,66078	0,6959289
18	0,1040052	8,0956676	18	5,4	2,99	55%	1,4431950	203,45746	1695,9999	271,712	0,7186277
20	0,0719152	8,239498	20	6	4,36	73%	0,9820912	359,59379	2238,9769	494,22611	0,7356463
22	0,0485431	8,3365843	22	6,6	6,27	95%	0,1976159	639,18751	2978,3306	910,84666	0,7484612
24	0,0317513	8,4000869	24	7,2	8,98	125%	-1,0659283	1146,6861	3999,88	1713,9932	0,7581549
26	0,0198998	8,4398865	26	7,8	12,8 6	165%	-3,0301106	2089,2215	5444,4076	3336,097	0,7655281
28	0,0117157	8,4633179	28	8,4	18,6 3	222%	-6,1260933	3912,4543	7568,6096	6881,0519	0,7711845
30	0,0061904	8,4756987	30	9	27,8 8	310%	-11,3060255	7745,9936	10942,011	15913,861	0,7756097
32	0,0024108	8,4805203	32	9,6	46,7 3	487%	-22,2347842	18307,541	17750,421	52460,723	0,7793868
34	0,0006373	8,4817949	34	10,2	309, 33	3033%	-179,1298414	43508,762	29793,153	260758,43	0,7818254
36	0,0002358	8,4813232	36	10,8	301, 92	2796%	-174,3331643	133625,73	62402,54	-1097010,5	0,7836956
38	0,0005311	8,4802609	38	11,4	312, 47	2741%	-180,2915834	1008992	311541,2	-1720079,5	0,7850576
40	0,0005247	8,4792115	40	12	329, 08	2742%	-189,8789493	830379,75	262523,24	-1497351,5	0,784994

11.4 GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO PIRANÔMETRO



11.5 TABELA DE CONVERSÃO TERMORESISTOR

TABELA DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA PARA BULBO DE RESISTÊNCIA (PT 100)

°C ITS-90	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C ITS-90
RESISTÊNCIA EM Ohms												
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	103.90	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	107.79	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	111.67	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	115.54	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	119.40	40
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	123.24	50
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	127.08	60
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	130.90	70
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	134.71	80
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	138.51	90
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	142.29	100
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	146.07	110
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	149.83	120
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	153.58	130
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	157.33	140
150	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68	161.05	150
160	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40	164.77	160
170	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11	168.48	170
180	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80	172.17	180
190	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49	175.86	190

11.6 IRRADIAÇÃO

Irradiação Global			
Horario	Irradiação RADIASOL [W/m ²]	Irradiação experimental (19/11) [W/m ²]	Irradiação experimental (10/11) [W/m ²]
09:00	549,00	465,61	151,25
10:00	611,00	513,09	205,23
11:00	688,00	665,02	313,18
12:00	705,00	598,55	367,16
13:00	659,00	589,06	475,11
14:00	492,00	446,62	394,14
15:00	377,00	190,23	205,23
16:00	240,00	104,77	151,25

11.7 TEMPERATURAS

Temperaturas				
Horário	Irradiação global [W/m ²]	Temperatura de entrada [°C]	Teperatura final [°C]	Potência [W]
9	465,61	20,23	27,24	20,50
10	513,09	23,42	41,71	53,46
11	665,02	25,40	60,16	101,59
12	598,55	26,50	92,48	192,84
13	589,06	26,90	77,12	146,79
14	446,62	25,40	65,63	117,57
15	190,23	22,00	31,11	26,63
16	104,77	20,12	19,51	-1,78

11.8 PROPRIEDADES MEDIDAS DURANTE O MELHOR TESTE

Propriedades medidas						
Horário	Irradiação [W/m ²]	Temperatura de entrada [°C]	Teperatura final [°C]	Potência [W]	Rendimento Real	Rendimento %
9	465,61	20,23	27,24	20,50	0,02	2,45
10	513,09	23,42	41,71	53,46	0,06	5,79
11	665,02	25,40	60,16	101,59	0,08	8,49
12	598,55	26,50	92,48	192,84	0,18	17,90
13	589,06	26,90	77,12	146,79	0,14	13,84
14	446,62	25,40	65,63	117,57	0,15	14,62
15	190,23	22,00	31,11	26,63	0,08	7,78
16	104,77	20,12	19,51	-1,78	-0,01	-0,94