UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

Rafael Burd Teixeira da Silva

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA CONCENTRAÇÃO SOLAR

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Alexandre Matelli

Guaratinguetá 2011

Silva, Rafael Burd Teixeira da
S586g Geração de energia elétrica a partir da concentração solar / Rafael Burd Teixeira da Silva. - Guaratinguetá: [s.n.], 2011
45 f.: il.
Bibliografia: f. 45

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânical – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Energia solar I. Título

CDU 620.91

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

GERAÇÃO DE ENERGIA ELETRICA A PARTIR DA CONCENTRAÇÃO SOLAR
RAFAEL BURD TEIXEIRA DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. CARLOS DANIEL EBINUMA
UNESP-FEG

Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Oscar e Cláudia, meus familiares e amigos que sempre me apoiaram e em especial aos meus avós Alberto e Lygia que sempre me incentivaram a nunca parar de estudar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, fonte da vida. Agradeço pela vida, saúde, inteligência e sabedoria que me foram dadas.

Agradeço aos meus pais Oscar e Claudia, meus avós Alberto, Lygia e Maria Luiza, meus tias e tios Silvia, Renata, David, Osvaldo e Walter e meus primos Victor, Ana Paula e Luiza por todo apoio, ajuda e confiança que recebi durante minha graduação.

Ao meu orientador José Alexandre Matelli pelo conhecimento passado e a dedicação para tornar este trabalho realidade. Aos meus colegas de trabalho pelas idéias, envolvimento e apoio, em especial ao Paulo e Ananda.

Gostaria de deixar um especial agradecimento a todos os amigos que fiz em Guaratinguetá, colegas de faculdade, professores e a todos os moradores da república Toa-Toa, com quem dividi bons e maus momentos nos tornando uma família. Levarei a amizade de todos para o resto de minha vida.

Por fim gostaria de agradecer a Dona Ana, minha mãe de Guará sempre dedicada e preocupada comigo, apesar do trabalho que lhe dei durante cinco anos. Nunca a esquecerei.

EPÍGRAFE

"O soldado que não acredita na vitória não é capaz de lutar por ela."

Rafael Burd T. da Silva

SILVA, Rafael B. T. **Geração de energia elétrica a partir da concentração solar.** Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A atual necessidade mundial por fontes de energia limpas e renováveis, alinhada com o forte crescimento econômico brasileiro e a busca pela diversificação da matriz de geração de energia elétrica, muito dependente de hidrelétricas e combustíveis fósseis, incentiva a implementação de tecnologias que supram esse crescimento de forma diversificada, limpa e renovável. O sol é fonte de energia considerada inesgotável e pode suprir a demanda por energia por meio das plantas termossolares de geração de eletricidade. Diversas tecnologias estão sendo estudadas e desenvolvidas no mundo, podendo ser aplicadas para gerar energia elétrica a partir da concentração dos raios solares, embora no Brasil seu uso ainda não seja encontrado comercialmente. Como o Brasil apresenta excelentes condições naturais de irradiação solar, é fundamental desenvolver tais tecnologias para explorar este potencial. Este trabalho traz um panorama da geração termossolar no Brasil, mostrando as diferentes tecnologias existentes e uma simulação termodinâmica da tecnologia de maior desenvolvimento, considerando uma planta hibrida com geração complementar por biomassa, visando a geração de 1 MW no Nordeste brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: energia solar; geração de energia; concentração solar.

SILVA, Rafael B. T. **Energy generation by solar concentration.** Monograph (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The current world's need for clean and renewable energy sources aligned with the strong Brazilian growth looking to diversify its electric power generation sources, highly dependent on hydropower and petroleum encourages the implementation of technologies that reach this growth with diversity and cleaning. The sun energy source is considered inexhaustible and can meet the demand for energy through thermo solar plants to generate electricity. Several technologies are being studied and developed in the world and they can be used to generate electricity from the solar concentration, but in Brazil its use is still not found commercially. It is therefore essential to understand these technologies and develop knowledge about them so they can be implemented in Brazil.
This work brings an overview of the thermo solar generation in Brazil, showing the different technologies and a thermodynamic simulation of one of such technologies considering a hybrid plant with complementary generation biomass, aiming at the generation of 1 MW in the Brazilian Northeast.

KEYWORDS: solar energy; renewable; energy generation; solar concentration.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

1.1 Geração de energia no Brasil 10

1.2 Panorama da energia solar no Brasil 17

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA 20

2.1 Ciclo de Rankine 20

2.1.3 Aplicação do ciclo de Rankine na tecnologia termossolar 22

2.2 Torre solar 22

2.3 Coletor Fresnel 24

2.4 Coletor parabólico 24

2.5 Refletor parabólico 26

2.6 Projetos 28

3 METODOLOGIA 30

3.1 Determinação da tecnologia 30

3.2 Escolha da localidade 31

3.3 Ciclo e equacionamento termodinâmico 35

3.3.1 Turbina a vapor 36

3.3.2 Coletor parabólico 38

3.3.3 Caldeira de biomassa 39

3.3.4 Bombas 39

3.3.5 Condensador 40

3.4 Simulação termodinâmica 40

3.4.1 Estimativa inicial 40

3.4.2 Calculo mensal 40

4 RESULTADOS 42

5 CONCLUSÃO 44

6 BIBLIOGRAFIA 45

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de graduação tem como objetivo apresentar uma visão sobre as possibilidades de utilizar a energia da irradiação solar associada a queima de biomassa como fonte de geração de energia elétrica associada de maneira limpa e renovável, incluindo a simulação termodinâmica de uma planta termossolar para geração de 1 MW no Nordeste do Brasil.

1.1 Geração de energia no Brasil

Para melhor entender os motivos de a energia solar ter sido escolhida como tema deste Trabalho Graduação, é importante entender as previsões e expectativas para a geração de energia elétrica no Brasil para os próximos anos. Por isso, neste tópico é abordado o Plano de Decenal de Expansão de Energia 2020, feito pela Empresa de Pesquisa Energética.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é uma empresa criada pelo governo federal e responde ao Ministério de Minas e Energia. A EPE foi criada com a finalidade de fornecer serviços de pesquisa que suportam o planejamento do setor energético brasileiro. Ela é responsável por estudos de energia de forma geral, incluído eletricidade, petróleo, gás natural, carvão mineral e fontes energéticas renováveis, além de eficiência energética, transmissão e distribuição de energia.

Anualmente, a EPE divulga o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), um relatório que consolida as pesquisas, estudos e projeções feitos pela EPE para os próximos dez anos. Este relatório auxilia o MME a planejar a contratação de linhas de transmissão e distribuição, geradores de energia, bem como analisar qual o crescimento previsto para cada fonte geradora e a expectativa do desenvolvimento da demanda por energia elétrica em cada setor de consumo, tais como: industrial, residencial, comercial, transportes, etc.

Levando em consideração que o crescimento da demanda por energia elétrica de um país está diretamente relacionado com o seu crescimento econômico, é fundamental avaliar as projeções de expansão da economia para planejar o desenvolvimento da geração de eletricidade. Segundo o PDE 2020, a expectativa de crescimento da

economia mundial para os próximos anos apresentara padrões diferentes para países desenvolvidos e emergentes, sendo que os emergentes apresentarão um maior crescimento.

No caso brasileiro, as expectativas da retomada do crescimento da taxa de investimentos e o aumento de crédito, entre outros fatores, têm suportado as previsões de que para os próximos anos haverá um forte crescimento. Além dos setores ligados à movimentação dos países emergentes, o aumento do mercado interno – derivado da melhoria do mercado de trabalho e do crédito – e os dois grandes eventos esportivos, copa do mundo e olimpíadas, acabam incentivando os investimentos em infra-estrutura e no setor habitacional nos próximos anos. A Tabela 1.1 mostra o histórico de investimento total e público, o crescimento do PIB e as projeções para os próximos anos.

Tabela 1.1: Investimento e PIB (taxas médias no período)

Indicadores Econômicos	Histórico		Projeção		
	2000-2004	2005-2009	2010	2011-2015	2016-2020
Investimento total (% PIB)[(1)]	17,1	17,5	18,9	21,0	22,0
Investimento público (% PIB)[(1)(2)]	3,0	3,3	3,4	3,5	3,9
PIB nacional (% a.a.)	3,0	3,6	7,2	5,0	5,0

(1) Taxas de investimento a preços correntes. (2) Inclui empresas estatais federais.
Fonte: PDE 2020 – www.epe.gov.br

A EPE faz uma projeção do consumo de energia elétrica, considerando de forma separada as diferentes classes de consumo (residencial, comercial, industrial, poderes públicos, iluminação pública e rural), indicadores típicos do mercado de energia elétrica e considerando também as projeções demográficas, macroeconômicas, setoriais, e de eficiência energética. A Tabela 1.2 apresenta a projeção do consumo de energia elétrica na rede brasileira por classe de consumo. Observa-se que no período entre 2010 e 2020 a taxa de crescimento média do consumo é de 4,6% a.a., atingindo um consumo de 659 TWh em 2020. É importante destacar que a tabela abaixo desconsidera a autoprodução de eletricidade.

Tabela 1.2: Projeção do consumo de energia elétrica por classe (GWh)

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2011	112.690	193.437	74.102	61.210	441.439
2015	135.682	229.870	93.495	70.723	529.769
2020	166.888	283.707	123.788	84.709	659.092
Período	**Variação (%a.a.)***				
2010-2015	4,8	4,6	6,2	3,7	4,8
2015-2020	4,2	4,3	5,8	3,7	4,5
2010-2020	4,5	4,4	6,0	3,7	4,6

(*) Variações médias nos períodos indicados a partir de 2010 e 2015.
Fonte: EPE

A Figura 1.1 é resultado da Tabela 1.2 e mostra o crescimento do consumo de energia elétrica por classe no período compreendido entre 2010 e 2020.

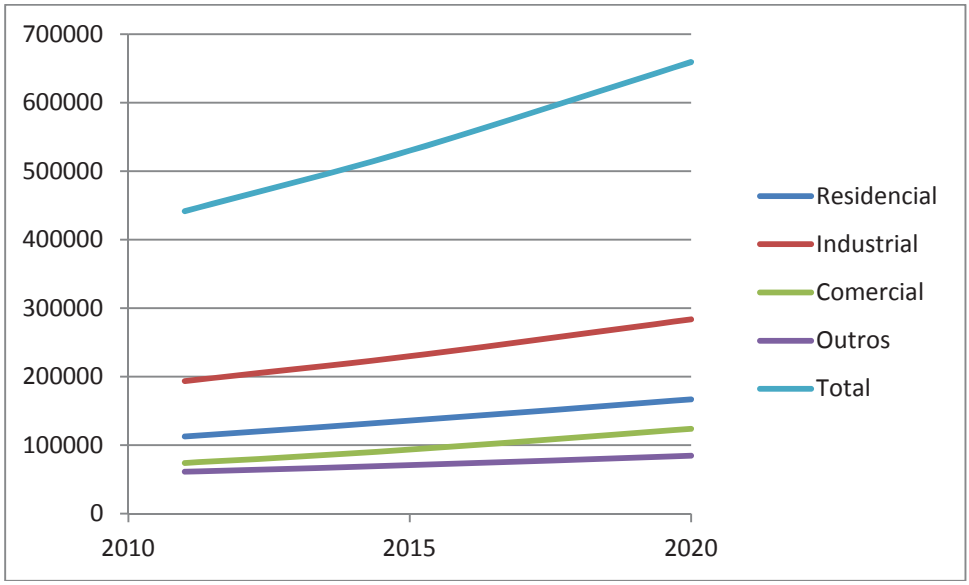

Figura 1.1: Crescimento do consumo de energia elétrica em GWh por ano.
Fonte: EPE (adaptado)

Com o estudo da variação do consumo de energia elétrica feito, há base para planejar os projetos de geração de eletricidade que deverão ser implementados a fim de suprir a demanda. Este planejamento determina a realização de leilões de energia, nos quais o governo contrata a energia gerada pelos empreendimentos que se cadastram nas licitações.

> De acordo com dados do Banco de Informações de Geração – BIG/ANEEL, a capacidade instalada total do sistema elétrico brasileiro em 31/12/2009 era de cerca de 112.500 MW. Este total engloba as unidades geradoras do

> Sistema Interligado Nacional – SIN e também aquelas instaladas nos sistemas isolados, bem como a autoprodução (geração de energia elétrica instalada no local do consumo).
>
> Para fins das simulações energéticas deste Plano somente foram considerados os empreendimentos de geração constantes do SIN, cuja capacidade instalada, incluindo a parcela de Itaipu importada do Paraguai, totalizava 103.598 MW em 31/12/2009. A distribuição desse total por tipo de usina do parque gerador existente é apresentada na Tabela 42.
>
> A expansão proposta neste Plano trata apenas do SIN, incorporando somente os sistemas isolados que serão interligados no horizonte deste estudo.
>
> As usinas existentes dos sistemas isolados em 31/12/2009 totalizavam 2.735 MW de capacidade instalada. A distribuição desta capacidade pelos estados é mostrada na Tabela 43. (Empresa de Pesquisa Energética, PDE 2020, 2011, p.58)

A Tabela 1.3 e a Tabela 1.4 a seguir correspondem respectivamente às tabelas 42 e 43 mencionadas na citação acima.

Tabela 1.3: Capacidade instalada em 31/12/2009 no SIN (MW)

Fonte	**MW**	**Participação (%)**
Hidráulica[(a)]	74.279	71,7
Térmica	13.302	12,8
Nuclear	2.007	1,9
Fontes Alternativas	7.645	7,4
Potência Instalada	97.233	93,9
Importação Contratada[(b)]	6.365	6,1
Potência Total com Importação	103.598	100

(a) Inclui a parte brasileira da UHE Itaipu (7.000 MW).
(b) Importação da UHE Itaipu não consumida pelo sistema elétrico Paraguaio.
Fonte: ONS.

Tabela 1.4: Capacidade instalada em 31/12/2009 nos sistemas isolados (MW)

UF	Hidráulica	Térmica	Total Instalado	Importação	Total Disponível
AC	0,0	31,8	31,8		31,8
AP	78,0	210,5	288,5		288,5
AM	250,0	1618,6	1868,6		1868,6
PA	0,0	143,3	143,3		143,3
RO	96,0	78,6	174,6		174,6
RR	4,8	113,3	118,1	73,2(a)	19,3
MT	16,2	15,6	31,8		31,8
PE	0,0	5,0	5,0		5,0
TOTAL (MW)	445	2.216,70	2.661,70	73,2	2.734,90
TOTAL (%)	16%	81%	97%	3%	100%

(a) Importação estimada de energia proveniente da Venezuela.
Fonte: Relatório do Plano de Operação de 2010 / Eletrobrás.

Através dos dados até aqui apresentados, percebe-se que para os próximos dez anos a projeção da EPE é de crescimento econômico para o Brasil e, para fazer frente a tal crescimento, investimentos em geração de energia são necessários.

O Brasil é privilegiado com grande quantidade e diversidade de fontes de energia, porém atualmente quase 80% da matriz brasileira se concentram em uma única fonte, a hidráulica, como mostra a Figura 1.2. Por esse motivo o PDE aponta a necessidade de diversificar as fontes de geração de eletricidade.

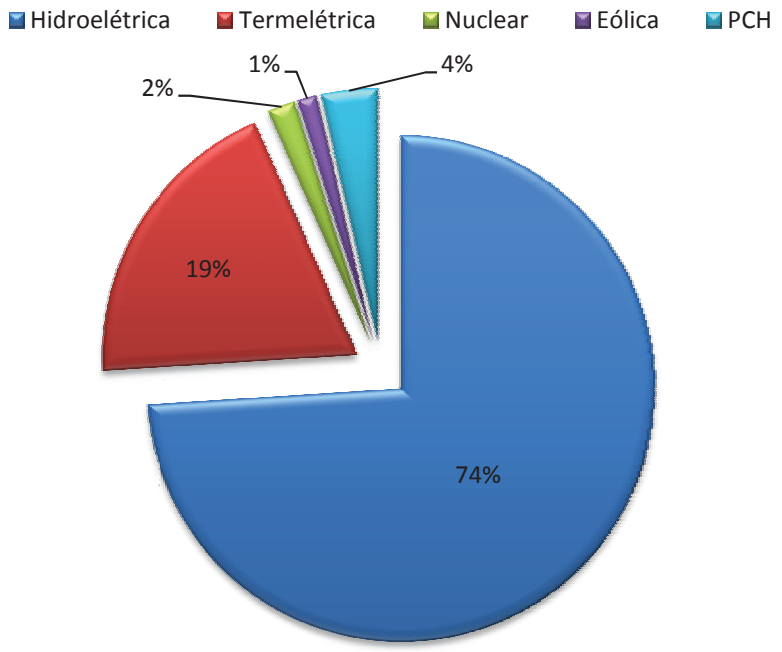

Figura 1.2: Atual capacidade instalada no Brasil (SIN + Sistemas Isolados)
*Desconsiderando a autoprodução de energia
Fonte: EPE

A necessidade de diversificar a matriz, alinhada com os problemas ambientais, diminuição de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o preço da energia, faz com que a participação de fontes alternativas de energia seja estimulada, dando foco para as fontes de caráter renovável.

Atualmente no Brasil, a classificação de “fonte alternativa de energia” inclui pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, eólica e solar. Enquanto as duas primeiras se encontram em um ponto de maturidade elevada, as duas últimas estão se estruturando aos poucos no Brasil. A Figura 1.3 revela a potência instalada contratada para os próximos anos e a Figura 1.4 o planejamento de contratação, ambos por fonte até 2020.

Figura 1.3: Expansão Contratada
Fonte: EPE (adaptado)

Figura 1.4: Expansão Planejada
Fonte: EPE (adaptado)

Das Figuras 1.3 e 1.4, pode-se concluir que o governo brasileiro vem dando grande atenção às fontes alternativas, pois para o próximo decênio já foram contratados mais de 7GW desta fonte, valor que fica abaixo apenas da fonte hidrelétrica. Essa contratação foi feita através de leilões que, no caso das fontes alternativas, ocorreram nos anos de 2009, 2010 e 2011. Observa-se também que, na expansão planejada para o decênio, apenas estão sendo consideradas as fontes alternativas e a fonte hidrelétrica, ou seja, essas são as fontes que receberão incentivos para se desenvolver no próximo decênio.

1.2 Panorama da energia solar no Brasil

A seguir é apresentada uma reportagem feita por Carolina Medeiros e publicada no dia 30/09/2011 no site www.canalenergia.com.br. Esta reportagem mostra um panorama da energia solar no Brasil e tem por objetivo mostrar as decisões que estão sendo tomadas tanto pelo governo quanto por empresas do setor, as necessidades de melhoria de tecnologia, redução de custo, operação de uma usina fotovoltaica e a tentativa de registro de uma planta termossolar para o leilão de energia A-3 que ocorreu em agosto de 2011.

> Apenas uma usina comercial instalada, várias iniciativas e muito burburinho. Esse é o cenário da energia solar no Brasil, que precisa ter seu preço reduzido - hoje ainda está em torno de R$ 500/MWh a R$ 600/MWh - para se tornar competitiva e ganhar terreno. A idéia é que a fonte siga os mesmos passos da energia eólica, que já foi um a das mais caras e atualmente é a segunda fonte mais barata do país, perdendo apenas para as hidrelétricas. Mas para isso, são necessários incentivos, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, iniciativas empresariais, atração de fabricantes para o país e, claro, um a regulamentação e um a política governamental que estimule a construção de plantas solares para fins comerciais. Esse cenário não vai se tornar realidade do dia para a noite, mas a expectativa é de que em pouco tempo a fonte seja atrativa aos olhos do governo e, principalmente, do consumidor.
>
> (...)Segundo Máximo Pompermayer, superintendente de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética da Aneel, além de chamada pública, a agência também está com uma proposta em audiência pública que concede desconto de até 80% nas tarifas de uso do sistema de distribuição e de transmissão para usinas solares fotovoltaicas ou termossolar, com até 30 MW de potência, nos primeiros dez anos de operação. Depois desse prazo, o desconto cai para 50%, se igualando com o das demais fontes incentivadas, como PCHs, biomassa e eólicas.
>
> A Empresa de Pesquisa Energética também está se movimentando e, segundo Maurício Tolmasquim, está sendo realizado um estudo para elaborar um a proposta de com o seria a introdução da energia solar no país. (...)"A geração solar tende a crescer no Brasil, a começar pelas descentralizadas", disse. Segundo Tolmasquim, a geração descentralizada ainda deve demorar a se estabelecer na matriz, pois não é competitiva com as outras fontes. (...)

Do lado do empreendedor, a MPX já viabilizou a primeira usina solar do país, a MPX Tauá, localizada em município de mesmo nome no Ceará. A usina tem 1 MW instalado e caminha para o segundo megawatt, que será feito em parceria com a GE e deverá estar concluído no segundo trimestre de 2012. A planta, que ainda não teve sua energia comercializada, está vendendo para o grid ao Preço de Liquidação de Diferenças. O gerente de projeto da MPX Energia, Fernando Moura, contou que tem bons clientes interessados em comprar a energia da usina, mas por enquanto, a venda da energia ainda está em fase de negociação.

A Braxenergy tentou cadastrar nos últimos leilões A-3 e de Reserva, que aconteceram em agosto passado, um a usina termossolar, que gera energia de dia a partir do sol e, a noite, a partir da biomassa proveniente de resíduo sólido industrial. A usina, localizada no município de Coremas, na Paraíba, tem potencial de 60 MW, mas a idéia era vender apenas 18 MW no leilão para estruturar o financiamento do projeto. De acordo com Hélcio Camarinha, CEO da Braxenergy, a usina chegou a ser cadastrada na Empresa de Pesquisa Energética, mas não foi habilitada. "Nós estávamos bastante confortáveis com o preço-teto de R$ 139/MWh", afirmou o executivo ao ser questionado sobre a viabilidade do projeto com preços nessa faixa. A empresa tem em carteira 2 GW de projetos de CSP, localizados no semi-árido nordestino, local que, segundo Camarinha, tem potencial para 18 GW de energia solar concentrada. O executivo destaca que um a das vantagens da energia solar é que ela tem fácil conexão com a rede. "Normalmente se tem um a área grande com a mesma radiação e a vantagem é que muitas vezes pode-se deslocar o empreendimento até uns 50 quilômetros e buscar um ponto de conexão ótimo para ele", destacou. Pompermayer, da Aneel, também acredita que a conexão não é um problema. "O problema é que se trata de um a fonte intermitente que depende da incidência do sol e, com o a noite não tem geração, inserir essa energia, com essas características, com essas especificidades no grid, exige todo um trabalho de confiabilidade, de qualidade da energia, que traz, sem dúvidas, um a complexidade para o sistema", avaliou o superintendente.

Atentos a essa movimentação ao redor da energia solar, os estados também estão criando incentivos para atrair projetos e até fabricantes para o país. Rafael Valverde, secretário executivo da Câmara de Energia da Bahia, afirma que grande parte da área do estado que tem potencial eólico também tem intenso potencial solar. "Algumas empresas já tem pensado em fazer projetos híbridos, consorciando as duas tecnologias", contou.

Atualmente, o estado está tentando construir um procedimento para licenciamento ambiental para plantas solares e para ver qual a melhor maneira de avaliar esse novo potencial. "Existe hoje um grupo que está fazendo consultas, verificando normas em outros estados, em outros países, para ver o que está sendo utilizados com o método de avaliação, quais são os impactos identificados, os estudos exigidos, para que se possa construir um procedimento que atenda tanto as necessidades do órgão ambiental, de quantificar e determinar a magnitude desses impactos e estabelecer as metas de compensação, com o também das em presas, para que elas tenham a segurança de que os estudos apresentados estão de acordo com os requisitos ambientais do estado", declarou. (...)

"Existe a possibilidade sim, mas não tem nada certo. Vai depender muito de com o vai se com portar o mercado, porque ainda não tem um a regulamentação", disse Rezende, da GE. Segundo ele, dependendo de com o for essa regulamentação e de com o for a inserção da fonte nos leilões de geração, a GE vai levar a diante o estudo para implantar a algum a fábrica no país. (...)

Manfred Wiegand, sócio da Pricewaterhouse Coopers Alemanha, com partilha da visão de Umbria de que a tendência é de queda nos preços da energia solar(...). “Mas os preços ainda são altos, especialmente se comparar com outras fontes”, ponderou Wiegand. Ele contou que o Brasil tem locais onde a radiação solar é intensa em grande parte do ano, o que propicia o uso do CSP, assim com o ocorre na Espanha.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A tecnologia CSP (sigla em inglês para concentradores de energia solar) é uma das mais modernas e limpas fontes para geração de energia elétrica que se encontram na atualidade. Existem quatro tecnologias no mercado, sendo que todas baseiam seu funcionamento na convergência de raios solares para o ponto focal através de superfícies refletoras devidamente posicionadas. Tais tecnologias são as torres solares (*solar towers*), os coletores Fresnel (*Fresnel collectors*), os coletores parabólicos (*parabolic trough*) e os refletores parabólicos (*parabolic dish*). É importante destacar que pode haver pequenas divergências de nomenclatura para uma mesma tecnologia entre fabricantes, institutos de pesquisa e etc.

Das tecnologias mencionadas, todas, com exceção do refletor parabólico, utilizam a concentração dos raios solares para aquecer um fluído térmico. Em um gerador de vapor, o fluido térmico troca calor com água para gerar vapor a alta temperatura e pressão. Por fim o vapor gerado é expandido em uma turbina, que tem seu eixo acoplado a um gerador de energia elétrica. O ciclo térmico que o vapor percorre possui um grande amadurecimento tecnológico e é conhecido como ciclo de Rankine. Já no caso do refletor parabólico, a concentração dos raios solares serve como a fonte quente de um motor Stirling acoplado a um gerador de energia elétrica. Uma revisão mais detalhada das tecnologias é apresentada a seguir.

2.1 Ciclo de Rankine

Para melhor entendimento das tecnologias abordadas neste trabalho, é importante rever os principais conceitos do ciclo de Rankine.

O ciclo de Rankine é um ciclo de potência composto de quatro processos termodinâmicos, pelos quais a água flui em regime permanente por quatro equipamentos: bomba, caldeira, turbina e condensador. A Figura 2.1 mostra um esquema básico do ciclo de Rankine.

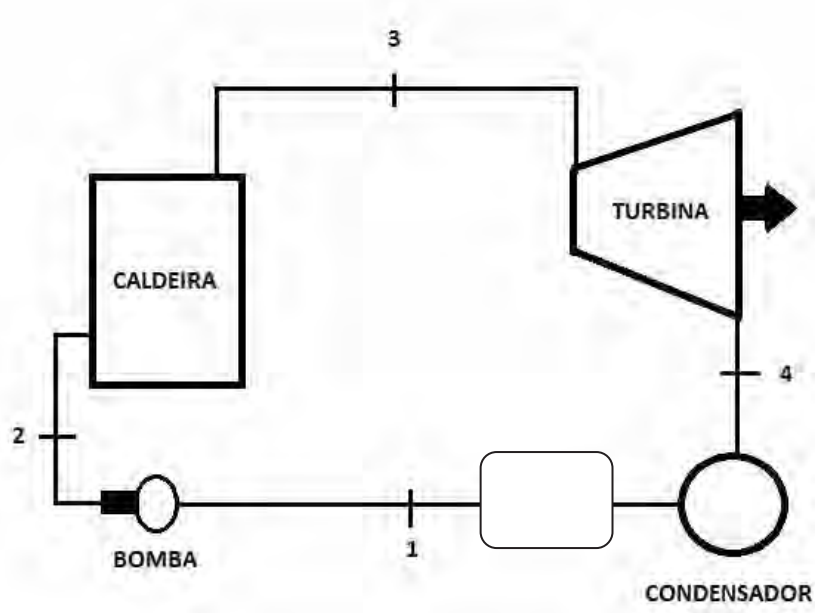

Figura 2.1: ciclo de Rankine

No processo de bombeamento 1-2, a água é bombeada a partir de um desaerador de baixa pressão até a caldeira, que se encontra em alta pressão. Na caldeira, o processo de transferência de calor 2-3 vaporiza e superaquece a água à pressão constante. O calor transferido é proveniente da queima de combustíveis fósseis na maioria das vezes, mas existem opções como o carvão vegetal, carvão mineral, biomassa, lixo, entre outras.

O vapor vivo segue então para a turbina a vapor onde é expandido (3-4). Como resultado desta expansão o rotor da turbina gira, transformando a energia liberada na expansão do vapor em trabalho de eixo. A geração de energia elétrica se da através de um gerador elétrico acoplado no eixo da turbina. Ao sair da turbina, o vapor passa por um condensador, onde o fluido de trabalho é condensado ao rejeitar calor para o ambiente a pressão constante (4-1), responsável pela troca de calor entre fluido e o ambiente, que condensa o vapor a pressão constante (4-1). A partir de então, o condensado é novamente bombeado para caldeira e o ciclo se reinicia. A geração de energia elétrica se da por meio de um gerador elétrico, que acoplado no eixo da turbina a vapor, transforma o trabalho de eixo em energia elétrica.

O ciclo de Rankine já possui um nível tecnológico bem avançado, tendo sido implementadas algumas variações sobre a base dos quatro processos termodinâmicos anteriormente descritos. Tais variações são descritas a seguir.

2.1.3 Aplicação do ciclo de Rankine na tecnologia termossolar

Enquanto que no ciclo de Rankine é comum o uso de combustíveis fosseis, biomassa, carvão etc. como fonte de energia, a tecnologia termossolar usa a concentração dos raios solares como fonte energética. Diz-se que a energia térmica proveniente da concentração dos raios solares, com exceção do refletor parabólico, faz o papel da caldeira nos esquemas apresentados anteriormente.

2.2 Torre solar

A tecnologia do sistema de geração por torre solar consiste, de forma simplificada, em uma grande torre circundada por dispositivos chamados heliostatos – basicamente espelhos planos – que se movimentam de acordo com o movimento do sol durante o dia, de forma que os raios incidentes em sua superfície sejam direcionados para um único ponto focal no topo da torre. A concentração dos raios solares na torre faz com que o fluido térmico ou HTF, que circula internamente, seja aquecido a altas temperaturas. O HTF é então utilizado no aquecimento de água até que se atinja a condição de vapor e a partir de então gere energia elétrica através dos processos do ciclo de Rankine já apresentado. A Figura 2.4 apresenta um modelo de heliostat utilizado nas plantas termossolares.

Figura 2.4: Heliostat
Fonte: http://www.wikimedia.org

No caso da torre solar, dois diferentes tipos de HTF são utilizados: vapor d'água e sal fundido (um composto de nitrato de sódio e nitrato de potássio), sendo que o uso do sal viabiliza a termo-acumulação. Esta consiste no armazenamento do sal fundido (ou seja, de calor latente de fusão) em tanques. A termoacumulação permite que energia elétrica seja gerada em dias nublados ou mesmo a noite, o que aumenta o fator de capacidade da planta consideravelmente e praticamente elimina o uso de combustível alternativo como *backup* na geração. Na Figura 2.5 pode-se observar esquematicamente como funciona a tecnologia termossolar de torre solar com sal fundido como HTF e termo-acumulação.

Figura 2.5: esquema da torre solar (adaptado)
Fonte: DANIELLE SARAIVA DE LIMA (2010)

Os raios solares são direcionados ao topo da torre (receptor) e aquecem o sal bombeado a partir do tanque frio (290ºC) a temperaturas acima dos 500ºC. O HTF é então bombeado para o tanque quente onde é armazenado e usado conforme necessário para gerar vapor através da troca de calor feita em uma caldeira. A partir de então o vapor gerado percorre um ciclo de Rankine convencional, conforme descrito anteriormente.

A torre solar tem grandes vantagens que devem ser destacadas, sendo que uma das mais significativas é a capacidade de armazenar uma grande quantidade de calor, fazendo com que a energia possa ser gerada e despachada a noite ou em dias nublados. Segundo o site www.concentratingsolarpower.com, uma torre com potência nominal de

100MW necessita de uma área com pouco mais que 4.000m² para armazenar até 12 horas de energia suficiente para abastecer 50.000 casas.

2.3 Coletor Fresnel

O coletor Fresnel utiliza fileiras de espelhos planos ou levemente curvados em série que, alinhados e segmentados, refletem a radiação solar em um receptor fixo. Este receptor nada mais é do que uma tubulação que transporta água. Sendo assim a geração de vapor ocorre diretamente no receptor (tubulação), onde o calor proveniente da concentração solar aquece a água até o estado de vapor. A Figura 2.6 mostra coletores Fresnel.

Figura 2.6: Coletores Fresnel
Fonte: Siemens

A principal vantagem do sistema termossolar de coletores Fresnel está na simplicidade de sua construção, quando comparada com as outras tecnologias. O uso da água diretamente como fluido de trabalho elimina o uso de HTF e por consequência termo-acumulação. Por outro lado, apresentam um rendimento menor quando comparado com as outras tecnologias.

2.4 Coletor parabólico

Os coletores parabólicos consistem basicamente em fileiras de espelhos com formato parabólico em série, que, devidamente posicionados, direcionam os raios solares que neles incidem perpendicularmente para o foco do espelho. A superfície

refletora é tipicamente de uma base recoberta com prata ou alumínio polido. A Figura 2.6 mostra um modelo de coletor parabólico.

Figura 2.6: coletor parabólico
Fonte: Siemens

Na Figura 2.7, pode-se observar a existência de uma tubulação ao longo do coletor. Esta tubulação esta posicionada em um eixo coincidente ao foco dos coletores, ou seja, todos os raios incidentes de forma normal no coletor são direcionados e concentrados na tubulação. A energia dos raios solares é então absorvida em forma de calor pelo HTF que circula na tubulação. Para aproveitar ao máximo de energia ao longo do dia, os coletores se movimentam acompanhando o movimento do sol.

O HTF flui em ciclo fechado, percorrendo a tubulação dos coletores parabólicos e se acumulando em tanques de termo-acumulação. O calor do HTF acumulado é então utilizado para aquecer água do ciclo de Rankine.

A vantagem encontrada no sistema termossolar de coletores parabólicos está na possibilidade de facilmente flexibilizar o sistema, bastando anexar à geração de vapor a uma fonte de calor proveniente da queima de um combustível qualquer. Isso garante o funcionamento da geração de energia elétrica em dias de baixa irradiação ou mesmo durante a noite.

É importante destacar a possibilidade de instalação desta tecnologia CSP em proporções menores quando consideramos a utilização do ciclo de Rankine orgânico ao

invés do ciclo a vapor convencional. Fluidos orgânicos necessitam de uma menor temperatura para mudar de fase do que a água, viabilizando assim o uso de coletores parabólicos de menor escala.

2.5 Refletor parabólico

Diferentemente das tecnologias apresentadas até então, o refletor parabólico não utiliza a concentração dos raios solares no aquecimento direto de vapor ou do HTF. Esta tecnologia concentra toda a radiação solar incidente direcionando-a para um motor Stirling, que transforma o calor proveniente da concentração solar em energia mecânica, que, por sua vez, é convertida em energia elétrica.

O motor Stirling funciona com um ciclo termodinâmico composto de quatro fases e executado em dois tempos do pistão. Na Figura 2.7 pode-se observar o diagrama PxV (pressão versus volume) do ciclo de funcionamento do motor Stirling.

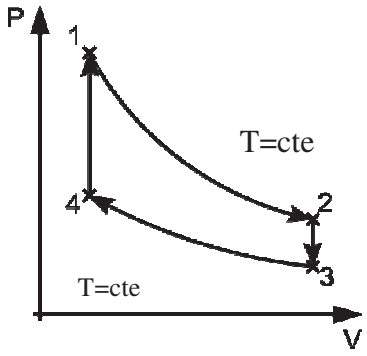

Figura 2.7: diagrama PxV do ciclo Stirling

O ciclo inicia com a expansão isotérmica 1-2 a temperatura, seguida por transferência de calor com volume constante 2-3 e finaliza com a compressão isotérmica 3-4.

O motor Stirling é composto por duas câmaras com diferentes temperaturas que aquecem e resfriam o fluido de trabalho de forma alternada, provocando assim expansão e compressão cíclicas. Essas expansões e compressões fazem com que pistões nas câmeras se movimentem de forma alternada, dando movimento a um eixo comum, que acoplado a um gerador, gera energia elétrica.

O papel do refletor parabólico neste ciclo é direcionar os raios solares, concentrando-os num determinado ponto do motor Stirling, onde o calor será a fonte de energia transferida para o fluido de trabalho. A Figura 2.8 mostra um modelo de refletor parabólico.

Figura 2.8: refletor parabólico.
Fonte: http://en.wikipedia.org

Quando opera a temperatura constante, o ciclo Stirling possui rendimento próximo a Carnot.

2.6 Projetos

A Tabela 2.1 mostra as plantas termossolares em operação no mundo, que totalizam mais de 1,25 GW.

Tabela 2.1: plantas termossolares implementadas (base 2009)

Capacidade (MW)	Nome	País	Localização
354	Solar Energy Generating Systems	EUA	Deserto de Mojave, California
150	Solnova	Espanha	Seville
100	Andasol solar power station	Espanha	Granada
100	Extresol Solar Power Station	Espanha	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)
75	Martin Next Generation Solar Energy Center	EUA	Florida
64	Nevada Solar One	EUA	Boulder City, Nevada
50	Ibersol Ciudad Real	Espanha	Puertollano, Ciudad Real
50	Alvarado I	Espanha	Badajoz
50	La Florida	Espanha	Alvarado (Badajoz)
50	Majadas de Tiétar	Espanha	Caceres
50	La Dehesa	Espanha	La Garrovilla (Badajoz)
50	Palma del Rio 2	Espanha	Cordoba
50	Manchasol-1	Espanha	Ciudad Real
20	PS20 solar power tower	Espanha	Seville
20	Beni Mathar Plant	Marrocos	Ain Bni Mathar
17	Yazd power station	Irã	Yazd
17	Gemasolar, former Solar Tres Power Tower	Espanha	Fuentes de Andalucia (Seville)
11	PS10 solar power tower	Espanha	Seville
5	Kimberlina Solar Thermal Energy Plant	EUA	Bakersfield, California
5	Sierra SunTower	EUA	Lancaster
5	Archimede solar power plant	Itália	próximo de Siracusa, Sicilia
2	Liddell Power Station Solar Steam Generator	Australia	New South Wales
1,5	Maricopa Solar	EUA	Peoria, Arizona
1,5	Jülich Solar Tower	Alemanha	Jülich
1,4	Puerto Errado 1	Espanha	Murcia
1	Saguaro Solar Power Station	EUA	Red Rock
2	Keahole Solar Power	EUA	Havaí
0,25	Shiraz solar power plant	Irã	Shiraz

Fonte: http://en.wikipedia.org (adaptado)

Na Tabela 2.2 mostra as plantas termossolares em fase de implementação no mundo, totalizando mais de 2,20 GW.

Tabela 2.2: plantas termossolares em implementação (base 2009)

Capacidade (MW)	Nome	País	Localização	Previsão de completação
370	Ivanpah Solar Power Facility	EUA	San Bernardino County, California	2013
280	Solana Generating Station	EUA	West of Gila Bend, AZ	2013
100	Andasol 3 + 4	Espanha	Granada	2011
100	Helioenergy 1+ 2	Espanha	Ecija	2011, 2012
100	Solaben 1+ 2	Espanha	Logrosan	2012
100	Valle 1+ 2	Espanha	Cadiz	2020
100	Termosol 1+2	Espanha	Navalvillar de Pela (Badajoz)	
100	Helios 1+2	Espanha	Ciudad Real	
50	Palma del Rio 1	Espanha	Cordoba	2011
50	Extresol 3	Espanha	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)	
50	Lebrija-1	Espanha	Lebrija	2011
50	Axtesol 2	Espanha	Badajoz	
50	Arenales PS	Espanha	Moron de la Frontera (Seville)	
50	Serrezuella Solar 2	Espanha	Talarrubias (Badajoz)	
50	El Reboso 2	Espanha	El Puebla del Rio (Seville)	2011
50	El Reboso 3	Espanha	El Puebla del Rio (Seville)	2012
50	Moron	Espanha	Moron de la Frontera (Sevilla)	
50	Olivenza 1	Espanha	Olivenza (Badajoz)	
50	Medellin	Espanha	Medellin (Badajoz)	
50	Valdetorres	Espanha	Valdetorres (Badajoz)	
50	Badajoz 2	Espanha	Talavera la Real (Badajoz)	
50	Santa Amalia	Espanha	Santa Amalia (Badajoz)	
50	Torrefresneda	Espanha	Torrefresneda (Badajoz)	
50	La Puebla 2	Espanha	La Puebla del Rio (Sevilla)	
50	Carporate	India	Phalodi(Rajasthan)	2013
30	Puerto Errado 2	Espanha	Murcia	
25	Termosolar Borges	Espanha	Borges Blanques (Lerida)	
20	Kuraymat Plant	Egito	Kuraymat	2011
25	Hassi R'mel power station	Algeria	Hassi R'mel	2011
1,4	THEMIS Solar Power Tower	França	Pyrénées-Orientales	
1	Renovalia	Espanha	Albacete	

Fonte: http://en.wikipedia.org (adaptado)

Das Tabelas 2.1 e 2.2 conclui-se que a maior parte das plantas termossolares se localiza na Espanha, sendo que estas são em maioria de 50MW ou até 100MW de potência instalada. O EUA vem em um segundo lugar distante da Espanha, porém deve-se destacar que possui a maior planta em operação, de 354MW, e mais duas de 280MW e 370MW em fase de implementação. Chama a atenção o fato do Brasil não possuir nenhum projeto solar, o que não condiz com a disponibilidade do recurso natural no país. Por conta de falta de incentivos à pesquisa e desenvolvimento de tecnologia, o Brasil deve apelar para a importação de equipamentos caso queira gerar eletricidade por meio do sol.

3 METODOLOGIA

O trabalho se desenvolveu em quatro etapas metodológicas, descritas a seguir.

3.1 Determinação da tecnologia

Baseado nas pesquisas bibliográficas feitas, no desenvolvimento e maturidade, a tecnologia com coletores parabólicos foi determinada como base para estudo deste trabalho. Segundo o fabricante Siemens, o comprimento de cada coletor é 12 metros. As demais dimensões de interesse são apresentadas na Figura 3.1.

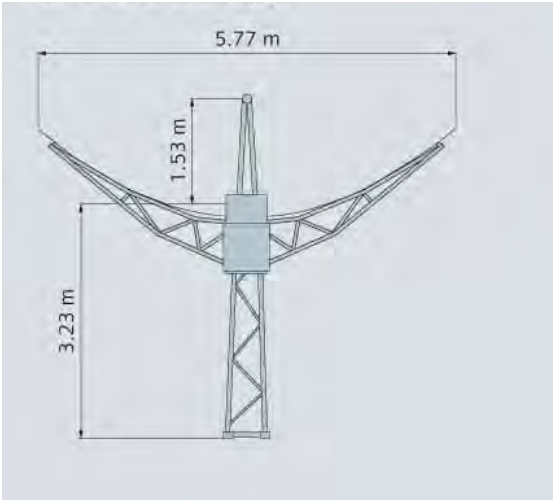

Figura 3.1: Coletor parabólico.
Fonte: Siemens

Com as dimensões do coletor é possível determinar sua área, multiplicando o comprimento pelo valor do comprimento da parábola que compõe o coletor. O comprimento da parábola é calculado pela Equação 1, sendo que a função parábola é dada pela Equação 2 resolvidaS em SWOKOWSKI (1926).

$$L_P = \int_0^{5,77} \sqrt{1 + [f'(x)]^2}\, dx \tag{1}$$

$$f(x) = \frac{x^2}{4.1,53} \tag{2}$$

Determinou-se que a planta será hibrida, considerando a geração termossolar como principal fonte de energia e biomassa sendo o complemento para dias de baixa

irradiação. A determinação da biomassa como fonte complementar da planta foi feita porque uma das propostas deste trabalho de graduação é estimar a geração de eletricidade por meio de uma fonte alternativa e renovável. A escolha de um combustível de origem fóssil descaracterizaria o conceito do trabalho. Determinou-se também que a termoacumulação se faz desnecessária, visto que a biomassa complementa a ausência de irradiação. Por isso a geração de vapor é feita diretamente nos coletores parabólicos.

3.2 Escolha da localidade

Existem alguns requisitos que devem ser analisados na escolha da localidade do projeto. Dentre eles estão alto índice de irradiação, fácil acesso a água, baixa umidade relativa do ar, visibilidade do céu e o albedo de superfície (relação entre a radiação dispersada e a total incidente). Levando em consideração esses fatores, limita-se a escolha da localidade ao Nordeste brasileiro, pois se sabe esta região atende a todos os requisitos com facilidade.

Foi feita então uma busca através de mapas encontrados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4), e na Figura 3.5, encontrada no site do projeto SWERA. Esses mapas se referem a alguns dos fatores de seleção da localidade.

Figura 3.2: Mapa da média anual de visibilidade.
Fonte: Atlas Brasileiro da Energia Solar

Figura 3.3: Mapa da média anual de albedo de superfície.
Fonte: Atlas Brasileiro da Energia Solar

Figura 3.4: Mapa da média anual de umidade relativa do ar.
Fonte: Atlas Brasileiro da Energia Solar

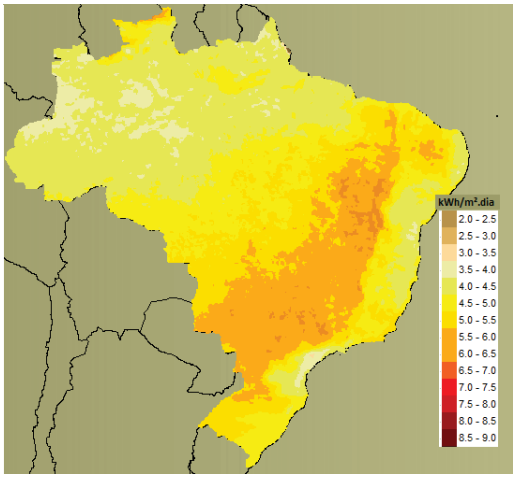

Figura 3.4: Mapa da média anual de irradiação.
Fonte: http://na.unep.net

Após a análise dos mapas, foi feita uma busca por reservas d'água através do software Google Earth e, a partir de então, foram propostas quatro localidades, mostradas nas Figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10. Observa-se que todas as pospostas se encontram perto de algum açude de água, atendendo o requisito de seleção.

Figura 3.6: Localidades propostas
Fonte: Google Earth

Figura 3.7: Proposta 1.
Fonte: Google Earth.

Figura 3.8: Proposta 2.
Fonte: Google Earth.

Figura 3.9: Proposta 3.
Fonte: Google Earth.

Figura 3.10: Proposta 4.
Fonte: Google Earth.

A escolha entre as quatro localidades propostas se deu após analise dos índices de radiação de cada uma, tendo como base o banco de dados de irradiação Sundata, encontrado em www.cresesb.cepel.br. Utilizando as coordenadas geográficas das propostas, obtêm-se valores de irradiação média diária por mês do ano de três pontos de medição mais próximos do ponto desejado. A Figura 3.10 mostra uma média dos valores buscados em kWh/m².dia, ponderando as distancias de cada ponto de medição para a localidade proposta por mês do ano.

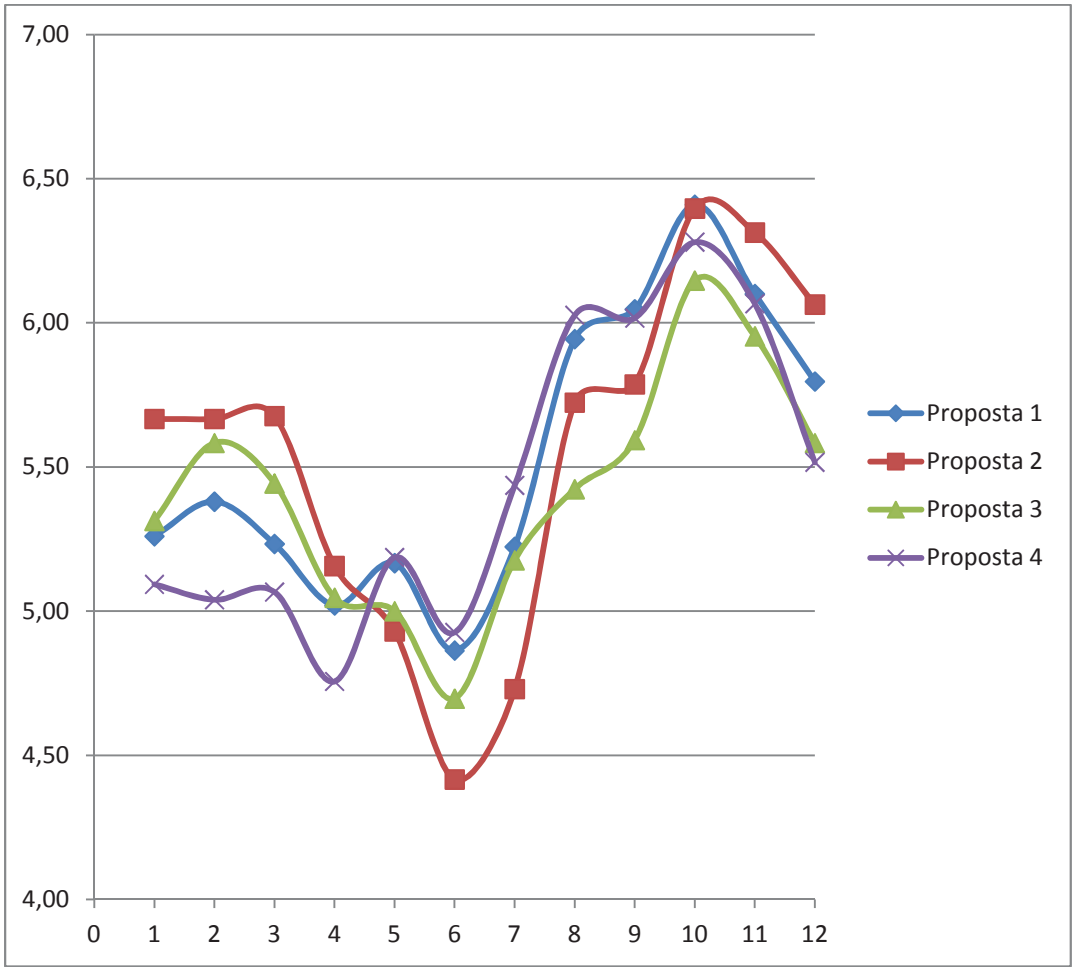

Figura 3.10: Irradiação diária média mensal

São levados em consideração três fatores para se determinar a localidade: maior pico de irradiação, menor vale de irradiação e variações menos acentuadas ao longo do ano. As propostas 1 e 2 possuem praticamente o mesmo valores de pico, sendo eles superiores as propostas 3 e 4, enquanto que as propostas 1 e 4 possuem os menores valores de vale. Define-se então a proposta 1 como a localidade a ser estudada, visto que apresenta variações menos acentuadas. A Tabela 3.1 mostra os valores de irradiação média por mês da localidade selecionada.

Tabela 3.1: Irradiação média mensal [kWh/m².dia]

Janeiro	5,28	Julho	5,31
Fevereiro	5,38	Agosto	5,99
Março	5,26	Setembro	5,97
Abril	5,02	Outubro	6,45
Maio	5,22	Novembro	6,15
Junho	4,88	Dezembro	5,87

Fonte: Sundata

Os valores da Tabela 3.1 estão em kWh/m².dia. Considerando a área do coletor calculada e 12 horas de irradiação por dia, calcula-se a irradiação média mensal por coletor em kW/coletor. Os resultados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Irradiação média mensal convertida [kW/coletor]

Janeiro	38,88	Julho	35,07
Fevereiro	35,53	Agosto	39,54
Março	34,73	Setembro	39,39
Abril	33,11	Outubro	42,55
Maio	34,48	Novembro	40,62
Junho	32,21	Dezembro	38,73

É importante destacar que os valores apresentados são médias diárias para cada mês do ano, sendo a base para o estudo estimativo proposto. Dados de medição e distribuição da irradiação mais detalhados são necessário para cálculos mais precisos, que fogem ao escopo deste trabalho.

3.3 Ciclo e equacionamento termodinâmico

O ciclo termodinâmico proposto é um ciclo de Rankine simples, com dois geradores de vapor - coletores parabólicos (principal) e a caldeira de biomassa (complementar) - e uma turbina de condensação. A Figura 3.10 mostra o esquema do ciclo Rankine proposto.

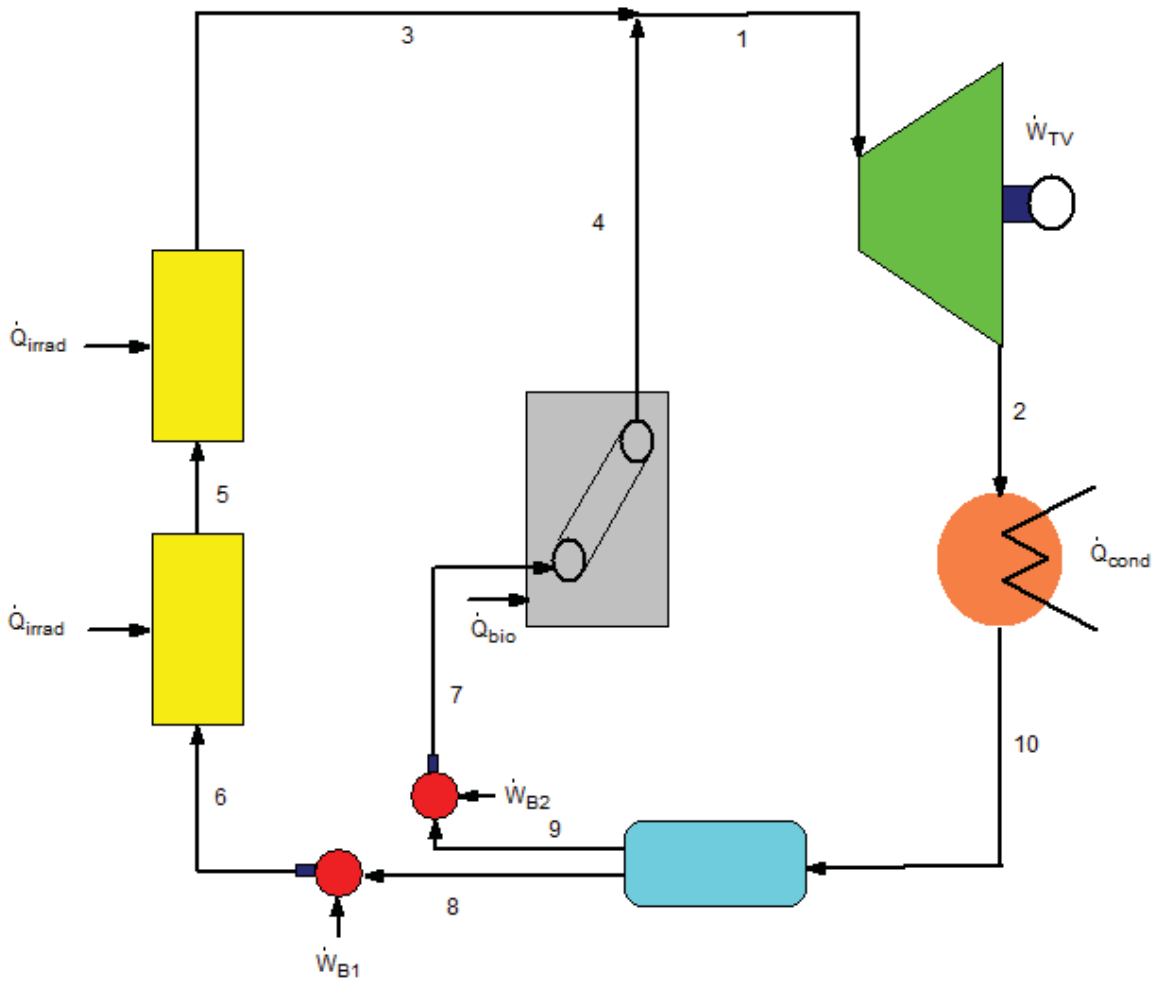

Figura 3.10: Ciclo termodinâmico proposto.

O gerador principal de vapor é dividido em dois blocos, evaporador e superaquecedor.

3.3.1 Turbina a vapor

A escolha inicial da turbina a vapor foi feita por meio do diagrama de Mollier da água, onde foram marcados os pontos de operação da turbina de acordo com a pesquisa bibliográfica. A Figura 3.11 mostra a linha de condição no diagrama, considerando um ponto de vapor vivo de 10MPa e 350ºC e a saída da turbina com 0,008MPa e titulo de 96%.

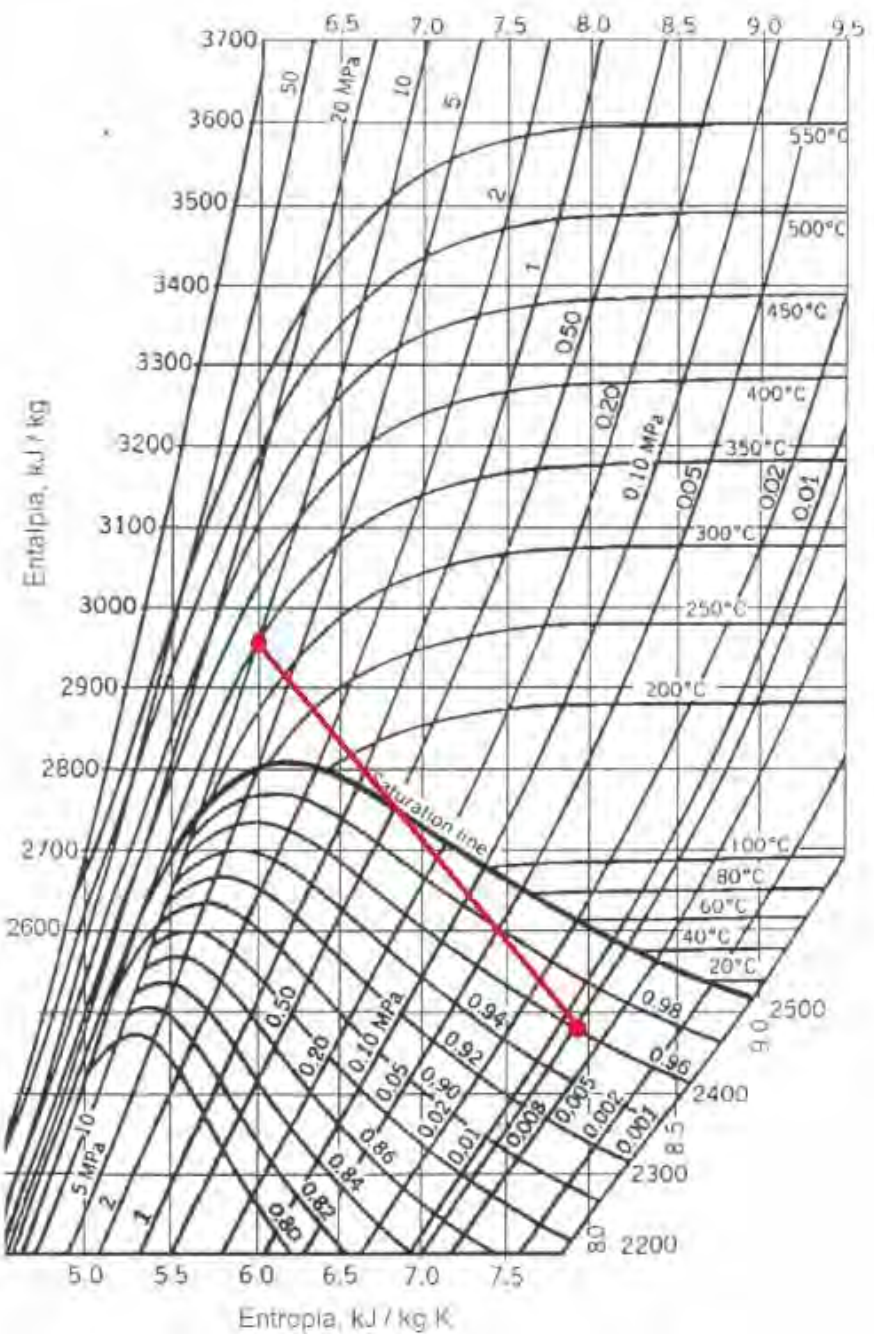

Figura 3.11: Linha de condição
Fonte: VAN WYLEN

Com os valores de entrada e saída da turbina a vapor e supondo a geração de 1MW na ponta do eixo da turbina, estima-se o valor da massa de vapor necessário no ciclo de Rankine através da equação 3.

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_1.(h_1 - h_2) \tag{3}$$

3.3.2 Coletor parabólico

Para atingir a potencia de eixo estipulada, é preciso um determinado número de espelhos. Esse número foi estimado através das Equações 4 e 5, referentes aos blocos evaporador e superaquecedor, respectivamente.

$$\eta_{esp}.N_{eva}.\dot{Q}_{irrad} = \dot{m}_3.(h_5 - h_6) \tag{4}$$

$$\eta_{esp}.N_{sup}.\dot{Q}_{irrad} = \dot{m}_3.(h_3 - h_5) \tag{5}$$

O rendimento do coletor parabólico foi baseado nos resultados do modelo numérico proposto por SALVADORETTI (1983). Em seu trabalho, o autor equacionou o rendimento de um coletor parabólico como sendo a fração de energia recebida no coletor e o calor útil na transferência de calor, como mostrado na equação 6. As perdas consideradas por SALVADORETTI (1983) incluem as perdas ópticas, térmicas (radiação, convecção e condução) e de carga

$$\eta_{esp} = \frac{\dot{Q}_{irrad} - Perdas}{\dot{Q}_{irrad}} \tag{6}$$

SALVADORETTI (1983) encontrou valores de rendimento para diversas situações, variando velocidade do vento, parâmetros termodinâmicos de entrada, posicionamento dos espelhos etc. e os resultados encontrados ficaram sempre em torno de 45%, com pequenos desvios. Assim, este valor é adotado como parâmetro de rendimento dos coletores parabólicos deste trabalho.

A partir do rendimento dos espelhos, do maior valor de $\dot{Q}_{irrad}$ fornecido pelo banco de dados Sundata, dos valores de entalpia dos pontos do ciclo em questão e considerando $\dot{m}_3$ igual a $\dot{m}_1$ (ou seja, todo vapor é gerado nos coletores parabólicos), pode-se determinar o número de coletores necessários em cada bloco. A decisão de utilizar o maior valor de $\dot{Q}_{irrad}$ acaba por dimensionar a planta para geração exclusivamente termossolar no mês do ano com maior irradiação, sendo a queima de biomassa durante o dia minimizada neste mês.

3.3.3 Caldeira de biomassa

A caldeira de biomassa complementa geração de vapor nos meses em que a irradiação não é suficiente para gerar todo vapor nos coletores. A massa de vapor complementar é calculada então para cada mês de acordo com a equação 7, onde o valor de pressão e temperatura na saída da caldeira de biomassa é o mesmo do ponto de vapor vivo (entrada da turbina a vapor).

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 - \dot{m}_3 \tag{7}$$

A partir da massa de vapor complementar, calcula-se a quantidade de calor necessária para gerar tal quantidade de vapor por meio da equação 8, onde o rendimento da caldeira é adotado como sendo 85%, de acordo com valores comumente encontrados.

$$\eta_{cald}.\dot{Q}_{bio} = \dot{m}_4.(h_4 - h_7) \tag{8}$$

É possível então determinar a quantidade de biomassa a ser queimada para gerar $\dot{Q}_{bio}$ resolvendo à equação 9, assumindo a queima da casca de coco, que, segundo o fabricante de caldeiras Aalborg Industries, possui poder calorífico inferior (PCI) igual a 16720 kJ/kg. A escolha da casca de coco se baseia na disponibilidade deste insumo na região, visto que o Ceará responde por aproximadamente 20% da produção de coco do Brasil.

$$\dot{Q}_{bio} = \dot{m}_{bio}.PCI \tag{9}$$

3.3.4 Bombas

O ciclo propõe a utilização de duas bombas de vazão variável, uma para o gerador principal de vapor e outra para o gerador complementar. A vazão nas bombas varia de acordo com o valor de irradiação solar, sendo que somadas resultam na massa de vapor para operação da turbina a vapor, conforme equação 7. A potência de cada bomba é calculada de acordo com as equações 10 e 11.

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m}_3.(h_6 - h_8) \tag{10}$$

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m}_4.(h_7 - h_9) \tag{11}$$

3.3.5 Condensador

A quantidade de calor trocada no condensador é calculada por meio da equação 12.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_1.(h_2 - h_{10}) \quad (12)$$

3.4 Simulação termodinâmica

A simulação termodinâmica foi feita no EES Professional, um software especifico para resolver equações de engenharia. A simulação é dividida em duas etapas:

- Estimativa inicial: estimativa da vazão de vapor e numero de coletores parabólicos no evaporador e superaquecedor;
- Cálculo mensal: cálculo da geração de vapor nos coletores e na caldeira complementar para valores de irradiação de cada mês do ano.

3.4.1 Estimativa inicial

Conforme discutido anteriormente, o dimensionamento da turbina a vapor é feito considerando 1MW de potência de eixo, vapor vivo com 10MPa e 350ºC , saída da turbina a 0,008MPa e titulo de 96%. Com esses dados, obtém-se a massa de vapor necessária para operar a turbina, resolvendo a Equação 3.

O número de espelhos é determinado resolvendo as Equações 4 e 5, considerando o maior valor encontrado de irradiação da Tabela 3.1, sendo que, para este valor, toda massa de vapor é gerada nos coletores.

A vazão mássica calculada para operação da turbina é de 2,261kg/s. O maior valor de irradiação é de 42,55kW/coletor, encontrado no mês de outubro, o que resulta em 300 coletores no bloco evaporador e 24 no bloco superaquecedor.

3.4.2 Calculo mensal

A segunda simulação é feita a partir da anterior, fixando os valores de massa de vapor vivo e o numero de coletores. É então calculado o valor de massa de vapor que os

coletores conseguem gerar, a massa complementar de vapor, massa de casca de coco a ser queimada, potência nas bombas e calor trocado no condensador. Os valores são estimados para cada mês do ano, de acordo com os valores de irradiação da Tabela 3.2.

4 RESULTADOS

A primeira simulação feita no EES resulta na estimativa inicial do número de coletores necessários no evaporador e no superaquecedor. Baseado no mês de outubro, de maior irradiação, encontra-se que o evaporador deve ter trezentos coletores enquanto o superaquecedor deve ter vinte e quatro coletores parabólicos.

Com os resultados da primeira simulação é possível fazer o cálculo mensal da geração de vapor nos coletores e na caldeira de biomassa. Da segunda simulação feita no EES, obtêm-se os valores de vazão mássica nos coletores parabólicos e caldeira de biomassa e a massa de casca de coco a ser queimada para gerar tal vazão. Obtêm-se também a potência de cada bomba do ciclo de Rankine, a potência liquida gerada e o calor trocado no condensador. A Tabela 4.1 apresenta esses valores para cada mês do ano.

Tabela 4.1: Resultados da simulação

Mês	$\dot{Q}_{irrad}$ [kW/coletor]	$\dot{m}_3$ [kg/s]	$\dot{m}_4$ [kg/s]	$\dot{m}_1$ [kg/s]	$\dot{m}_{bio}$ [kg/s]	$\dot{W}_{B1}$ [kW]	$\dot{W}_{B2}$ [kW]	$\dot{W}_{TV}$ [kW]	$\dot{W}_{liq}$ $[kW]$	$\dot{Q}_{cond}$ $[kW]$
1	34,88	1,852	0,409	2,261	0,079	16,2	3,6	1000	980,2	5228
2	35,53	1,887	0,374	2,261	0,072	16,5	3,3	1000	980,2	5228
3	34,73	1,844	0,417	2,261	0,081	16,1	3,6	1000	980,2	5228
4	33,11	1,758	0,503	2,261	0,097	15,4	4,4	1000	980,2	5228
5	34,48	1,831	0,430	2,261	0,083	16,0	3,8	1000	980,2	5228
6	32,21	1,71	0,551	2,261	0,106	15,0	4,8	1000	980,2	5228
7	35,07	1,862	0,399	2,261	0,077	16,3	3,5	1000	980,2	5228
8	39,54	2,099	0,162	2,261	0,031	18,4	1,4	1000	980,2	5228
9	39,39	2,092	0,170	2,261	0,033	18,3	1,5	1000	980,2	5228
10	42,55	2,261	0,000	2,261	0,000	19,8	0,0	1000	980,2	5228
11	40,62	2,157	0,104	2,261	0,020	18,9	0,9	1000	980,2	5228
12	38,73	2,056	0,205	2,261	0,040	18,0	1,8	1000	980,2	5228

O mês de outubro (10) apresenta toda geração de vapor feita nos coletores parabólicos, conforme esperado, já que o dimensionamento dos espelhos é feito com base no mês de maior irradiação. Observa-se no mês seis a menor quantidade de vapor gerada por meio dos coletores e, portanto, a maior quantidade de vapor gerado na caldeira de biomassa. Neste mês, cerca de 25% do vapor necessário para o funcionamento da turbina a vapor é proveniente da caldeira a biomassa.

A potência líquida é resultado da potencia de eixo da turbina a vapor descontado o consumo nas duas bombas, cerca de 2% da potência líquida. Conforme discutido

anteriormente, são consideradas 12 horas de geração por dia. Operando 365 dias por ano, a planta gera 4,3 GWh/ano.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou as diferentes tecnologias para geração de energia elétrica por meio da concentração solar, em consonância com o planejamento da EPE a respeito da contratação de energia elétrica proveniente de fontes alternativas e renováveis. O Brasil possui grandes índices de irradiação solar, que tornam possível o emprego de usinas termossolares, sendo que plantas híbridas tornam a geração flexível e supera períodos de ausência do sol. A escolha da biomassa como fonte secundária de geração mantêm o caráter renovável da planta. Foi realizada também uma simulação termodinâmica de uma planta termossolar hibrida baseada na tecnologia de coletores parabólicos e queima de biomassa, visando a geração de 1 MW no Nordeste brasileiro. Como esperado, os resultados apresentados pela simulação comprovam a viabilidade técnica dessa tecnologia no Brasil.

6 BIBLIOGRAFIA

BECKMAN, Willian *et al*; **Solar Heating Design.** United States**:** 1976**.**

DIENSTMANN, Gustavo; **Energia Solar uma Comparação de Tecnologias.** Porto Alegre: UFRGS, 2009.

Empresa de Pesquisa Energética; **Plano Decenal de Energia 2020.** Brasília: 2010.

GIAMPIETRO, Ulisses; **Viabilidade Econômica da Energia Solar nas Áreas Rurais do Nordeste Brasileiro.** 2004.

GUADAGNINI, Marco Antonio; Fontes **Alternativas de Energia – Uma Visão Geral**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2005.

LIMA, Danielle Kely Saraiva, **Estudo de Viabilidade de uma Usina Solar Térmica Associada a Queima de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Sobral, Ceará.** Fortaleza: UECE, 2010.

LODI, Cristiane; **Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Energia Solar Térmica Concentrada.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

MADEIRA, Rafael Alves; **Custos Relacionados à Energia Termo Solar de Receptor Central.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

ODEH, S. D.; MORRISON, G. L.; BEHNIA, M.; **Modelling of Parabolic Trought Direct Steam Generation Solar Collectors.** Sidney: 1998.

SILVA, Jonas Cordeiro da; HOFFMANN, Ronaldo. **O Uso do Ciclo Stirling no Aproveitamento de Fontes Térmicas.** Santa Maria: UFSM.

SALVADORETTI, José Luiz; **Modelo Matemático para Analise de Desempenho de Coletores Solares Cilindro-Parabólicos.** Porto Alegre: UFRGS, 1983.

SOWKOWSKI, Earl W. **Calculo com Geometria Analítica.** 1926

www.wikipedia.com.br

www.aalborg-industries.com.br

www.canalenergia.com.br