

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Mecânica



**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UMA PLANTA SOLAR DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM QUEIMA DE BIOMASSA
COMBINADA**

Bruno Oliveira Amorim (5176698)

São Paulo
Novembro de 2010

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Mecânica

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UMA PLANTA SOLAR DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM QUEIMA DE BIOMASSA
COMBINADA**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção de um
título de Graduação em Engenharia

Bruno Oliveira Amorim

Orientador: José Roberto Simões Moreira

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
Novembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Amorim, Bruno Oliveira

Projeto de uma planta solar de produção de energia elétrica

/

B.O. Amorim. -- São Paulo, 2010.

42 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Energia solar 2. Energia elétrica 3. Co-Geração de energia elétrica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

Agradecimentos

Ao professor José Roberto Simões Moreira que se dispôs a me orientar neste projeto.

Ao Professor Alberto Hernandez Neto por sua dedicação à orientação de todos os alunos que estão desenvolvendo seus trabalhos de formatura.

À POLI-USP pela formação dispensada ao longo dos últimos anos.

Resumo

Este Projeto de Formatura, apresentado ao final do curso de graduação em engenharia mecânica, tem como objetivo a análise técnico econômica de uma planta de produção de energia elétrica à partir da energia solar no Brasil. Em um primeiro momento, foram analisadas as regiões mais propícias para desenvolvimento de tais plantas no Brasil. Baseando-se basicamente nos índices de irradiação solar, sua intensidade e principalmente sua sazonalidade. Em seguida, foi analisado o projeto da planta solar propriamente dita, à semelhança das plantas que vem sendo construídas acopladas a usinas sucro-alcooleiras no Brasil e também de diversas plantas deste gênero que vem sendo desenvolvidas nos Estados Unidos e na Europa, entre outros.

Ao final, são estimados os custos associados à operação da planta e também o custo de sua implementação, levando a uma conclusão sobre sua viabilidade econômica.

Abstract

The project's main idea is the feasibility study of a Solar Power Plant in Brazil. First of all, we'll choose a region in Brazil where we have the highest solar irradiation, based on public data, in order to determine the regions where such a plant would be the most suitable. After that, the plant will be designed, following the standards of existing similar plants, as the ones we can find in the US and in Europe.

At the end, we estimate the costs for procuring, engineering and construction of the above mentioned plant, leading to a conclusion on the financial feasibility.

Sumário

Resumo.....	6
Abstract	7
1 – Introdução.....	9
2 – Pesquisa bibliográfica.....	10
3 – Análise da planta	26
4 – Conclusão	38
5 – Referências	40
6 – Anexo 1 – Cronograma físico.....	41

1 – Introdução

1.1 - Motivação

I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don't have to wait until oil and coal run out before we tackle that. - Thomas Edison, em conversa com Henry Ford e Harvey Firestone, 1931.

O Brasil já demonstrou a sua intenção de aprimorar o uso de energias renováveis e diversificar as fontes de geração de energia. O compromisso reduz o risco de um novo déficit hidrológico, que geralmente leva à crise e ao racionamento, como aconteceu nos verões de 2001 e 2002.

Muitos ainda vêem a geração de energia por fontes renováveis como uma iniciativa isolada, incapaz de atender à grande demanda de um grande país. A utilização de energias alternativas não pressupõe o abandono imediato dos recursos tradicionais, mas sua capacidade não deve ser subestimada.

A Alemanha, por exemplo, provou como o uso das fontes renováveis pode ser útil ao Estado, à população e ao meio-ambiente. O país é responsável por cerca de um terço de toda a energia eólica instalada no mundo, representando metade da potência gerada em toda a Europa. O investimento em tecnologia também permitiu a eles se destacarem na utilização de combustíveis de origem vegetal (biomassa).

Existem duas formas de utilizar a energia solar: ativa e passiva. O método ativo se baseia em transformar os raios solares em outras formas de energia (térmica ou elétrica) enquanto o passivo é utilizado para o aquecimento de edifícios ou prédios, através de concepções e estratégias construtivas

Praticamente inesgotável, a energia solar pode ser usada para a produção de eletricidade através de painéis solares e células fotovoltaicas. No Brasil, a quantidade de sol abundante durante quase todo o ano estimula o uso deste recurso.

Os painéis fotovoltaicos são uma das mais promissoras fontes de energia renovável. A principal vantagem é a quase total ausência de poluição. No entanto, a grande limitação dos dispositivos fotovoltaicos é seu baixo rendimento. Outro inconveniente são os custos de produção dos painéis, elevados devido à pouca disponibilidade de materiais semicondutores.

Assim sendo, este projeto tem por finalidade o desenvolvimento do projeto de uma planta solar no Brasil e a análise de sua viabilidade econômica.

1.2 - Método

Em um primeiro momento estudaremos os níveis de irradiação solar nas diversas regiões do Brasil para decidirmos a localização da planta a ser projetada. Em seguida serão estudadas as diversas tecnologias existentes para a conversão de energia solar em energia elétrica.

A segunda etapa consiste na escolha da tecnologia que mais se adapta à região escolhida e na análise técnico-econômica da planta baseada em tal tecnologia. O cronograma físico do projeto encontra-se no *Anexo 1*.

2 – Pesquisa bibliográfica

2.1 – Análise da irradiação solar no Brasil

O objetivo da análise da irradiação solar no Brasil é a identificação das regiões mais propícias para a implantação de uma planta solar de produção de energia elétrica. Em um primeiro momento, este será o principal critério para a determinação deste local. Mais adiante, levaremos em conta fatores técnicos e econômicos em consideração.

O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) realizou diversos estudos relacionados à irradiação solar no Brasil. O artigo intitulado “Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA” (Martins, 2009) foi utilizado como base para a maior parte das considerações abaixo.

A Figura 1 apresenta os mapas da média mensal da irradiação solar global para os doze meses de 2000. Como era esperado, pode-se observar que o Brasil, devido a sua localização predominantemente tropical, possui uma grande disponibilidade de recursos de energia solar em todo o seu território. Os maiores valores de fluxo de radiação são observados na região central do país durante o verão. É interessante notar que durante o verão, os valores de irradiação solar global observados na região sul do país são superiores aos valores obtidos para a região norte. Esse fato ocorre em consequência do deslocamento da zona de convergência intertropical que acarreta a maior frequência de nebulosidade e alta pluviosidade observada na região amazônica durante esta estação do ano.

Vale observar que durante a estação seca, as estimativas de irradiação solar apresentam incertezas maiores em função da ocorrência de queimadas na região central e norte do país que lançam grande quantidade de aerossóis na atmosfera capazes de absorver a radiação solar. Trabalhos realizados indicam desvios que montam da ordem de 11% entre valores calculados e medidos sobre essas regiões, em comparação com os desvios bem menores, da ordem de 6% sobre as regiões onde não ocorrem queimadas.

A Figura 2 mostra a média anual das componentes da irradiação solar (global, direta, difusa) e a irradiação solar no plano inclinado (em ângulo igual à latitude) para o território brasileiro. A informação contida no mapa de irradiação no plano inclinado (Figura 2D) é de grande utilidade no aproveitamento da energia solar em projetos de geração fotovoltaica uma vez que mostra a quantidade de energia incidente no plano de maior irradiação solar direta considerando a posição geográfica do local. Pode-se observar que os maiores valores de irradiação direta e no plano inclinado ocorrem aproximadamente nas mesmas regiões do país: região compreendida pelo estado do Tocantins, oeste da Bahia e sul dos estados de Maranhão e Piauí durante o período de verão e na região central e sudeste do país durante a estação seca (agosto a outubro). A Figura 2(D) apresenta de forma clara o grande potencial para o aproveitamento da energia solar no Brasil. A média do território brasileiro ($5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$) é praticamente igual ao valor máximo de irradiação observado no continente europeu ($5,5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$), onde ocorre um grande investimento tanto governamental como de iniciativa privada nesta fonte de energia renovável.

Estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de avaliar a variabilidade interanual do fluxo de radiação solar na superfície. Esse é um aspecto importante para a avaliação dos riscos associados a investimentos para a aplicação desta fonte de energia.

Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3137-3145.

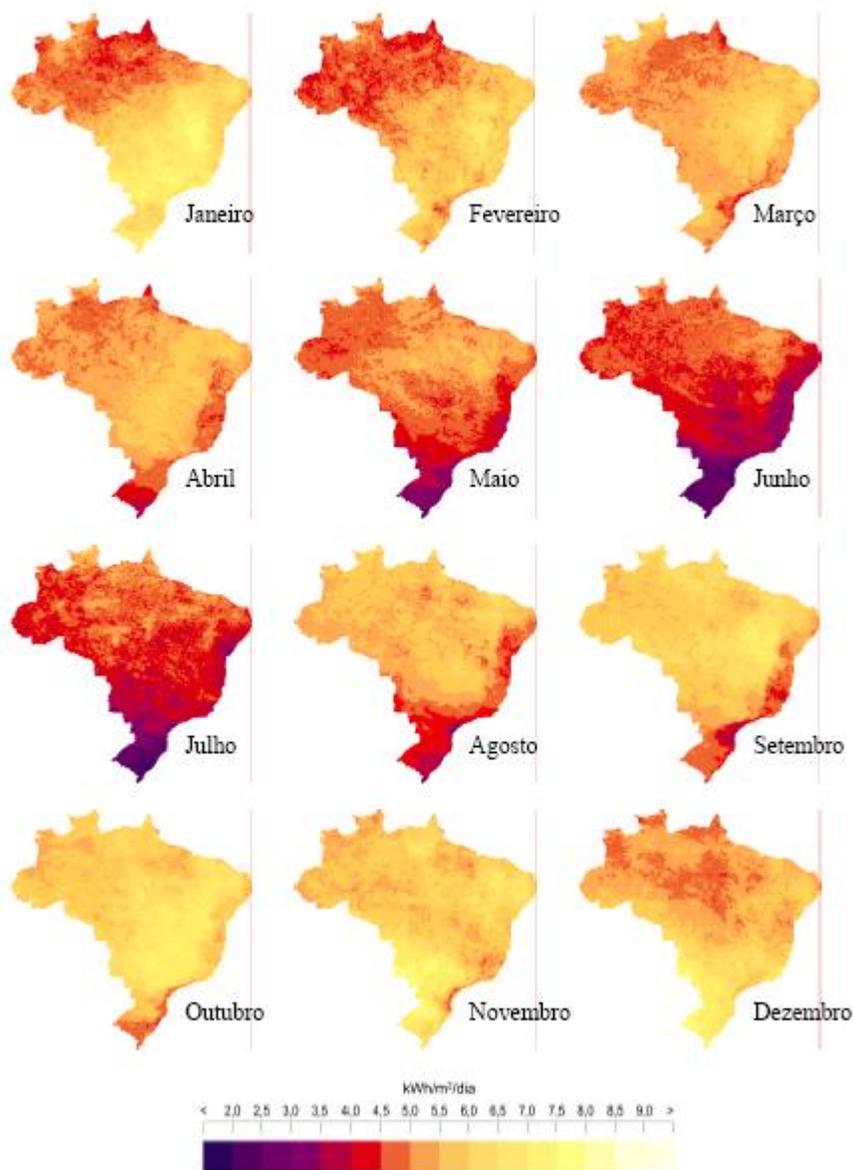
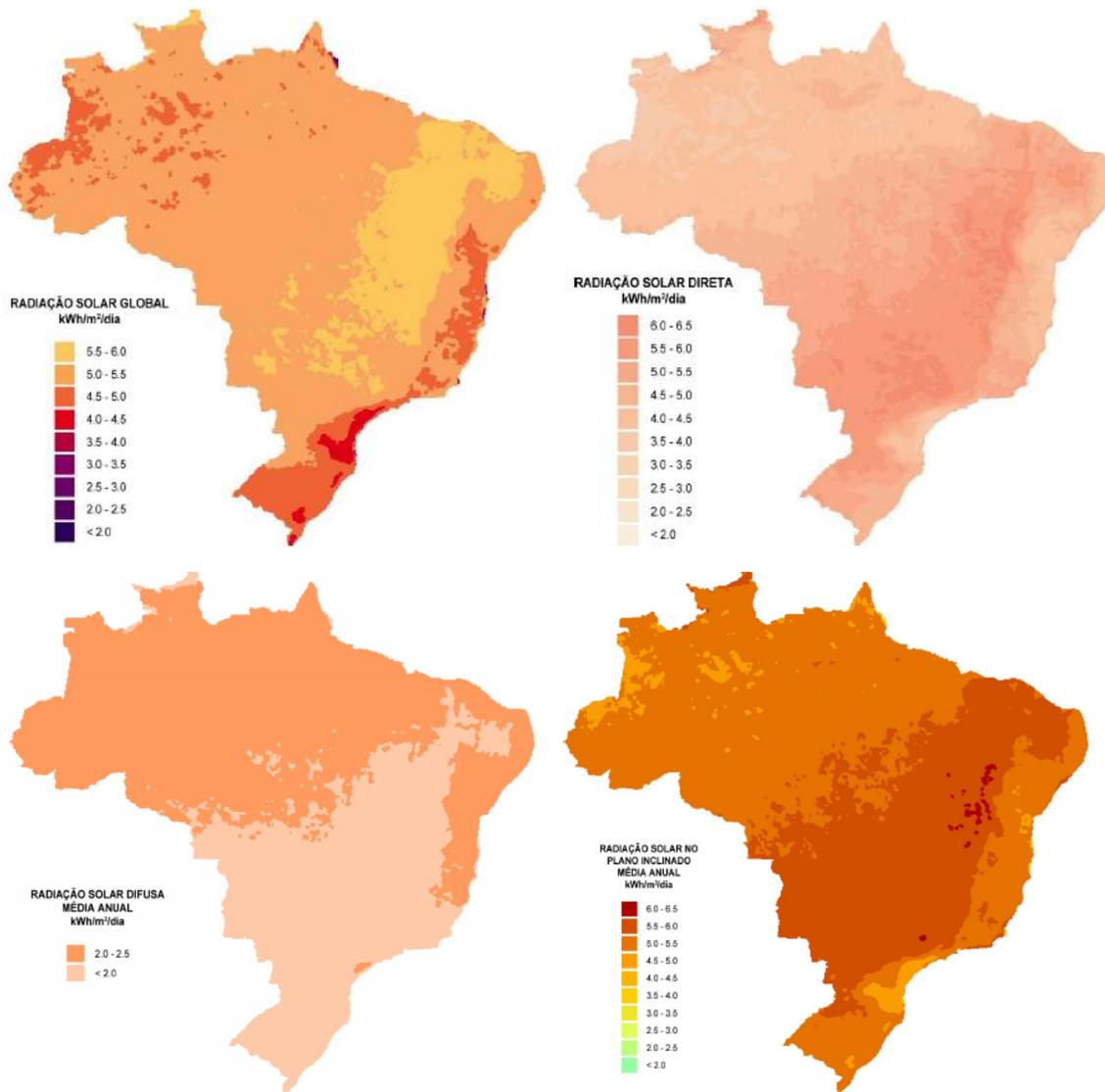


Figura 1. Irradiação Solar no Brasil por mês (Martins, 2009)



Mapas de irradiação solar média anual para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000: (A) irradiação global, (B) irradiação direta, (C) irradiação difusa e (D) irradiação global em plano inclinado em ângulo igual a latitude local.

Figura 2. Diferentes tipos de irradiação solar no Brasil (Martins, 2009)

2.2 – Tecnologias existentes

Nesta seção, serão apresentadas as tecnologias existentes para a produção de energia elétrica à partir da energia solar.

O maior desafio dos pesquisadores da área é aumentar o rendimento do conjunto e diminuir os custos, para que o custo final da energia produzida seja compatível com os custos praticados habitualmente para a energia produzida em hidrelétricas e termoelétricas.

Em geral, os painéis solares têm eficiência de até 20%. Uma pesquisa feita por um pesquisador da USP resultou no desenvolvimento de uma tecnologia através da qual se obtém até 80% de eficiência. (Para cada 100 fótons que chegam ao sistema, 80 elétrons são liberados). No Instituto de Química (IQ) da USP, Sérgio Hiroshi Toma construiu aglomerados de moléculas, átomo por átomo, demonstrando uma das principais técnicas da nanotecnologia, que é a chamada fabricação "de baixo para cima", em que as estruturas são fabricadas usando átomos ou moléculas individuais.

As técnicas mais comuns usadas para converter energia solar em eletricidade são a fotovoltaica e a termo-solar, que inclui o sistema parabólico, atualmente a opção mais econômica para grandes plantas solares. Ao contrário da tecnologia fotovoltaica, projetos termo-solares costumam ter grande escala e se localizam em áreas remotas. Apesar de a aplicação típica dos painéis fotovoltaicos serem soluções residenciais e industriais de pequeno porte, nós estudaremos também a viabilidade desta tecnologia.

2.2.1 – Painéis solares fotovoltaicos

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica. Neste ano a utilização de fotocélulas foi de papel decisivo para os programas espaciais. Com este impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde aprimorou-se o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso.

Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais mas que fosse intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

Um dos fatores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W para o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, o custo médio de US\$ 8,00/W.

Módulo ou painel fotovoltaico

Montado a partir de conjunto de células "wafer" de silício, texturizadas, laminadas e tratadas com materiais específicos que aumentam sua absorção e vida útil. Geram tensões e correntes que são condicionadas às ligações em paralelo ou em série, das células. A parte frontal dos módulos contém resina ou vidro temperado de alta transparência com resistência a tempestade, neve, granizo, salinidade, umidade e poeira.

Os painéis costumeiramente são fornecidos emoldurados em perfil de alumínio e contém terminais de conexão. A energia proveniente do painel é em corrente contínua (DC)

Associação

Devido à baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo.

Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

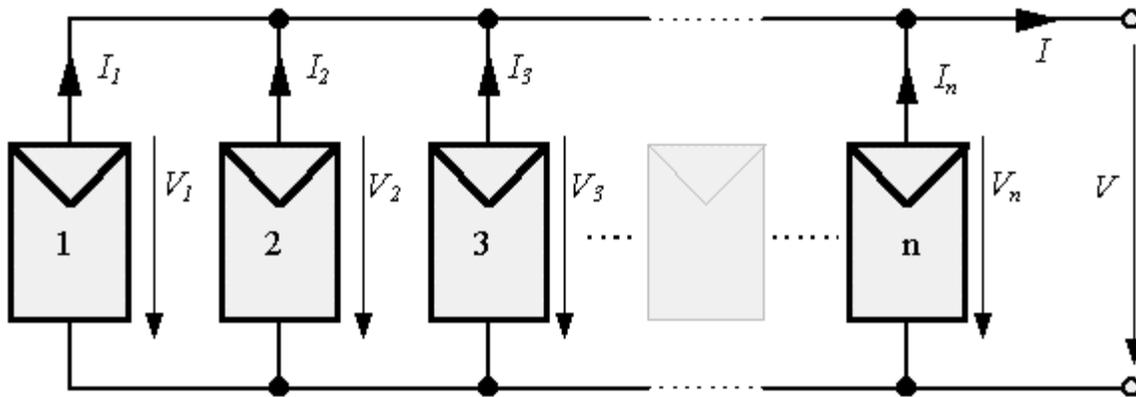


Figura 3. Arranjo das células em paralelo

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série, como indicado na figura 4. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula.

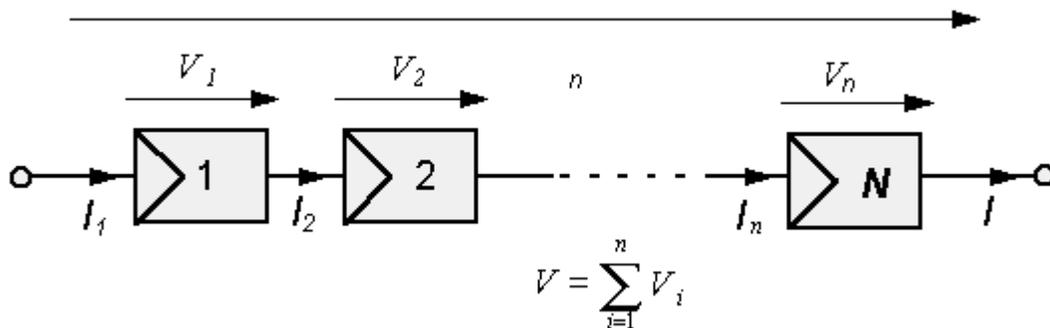


Figura 4. Arranjo das células em série

Principais grandezas envolvidas

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- DDP de Circuito Aberto (V_{oc})
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
- Potência Máxima (P_m)
- DDP de Potência Máxima (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de 1000W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).

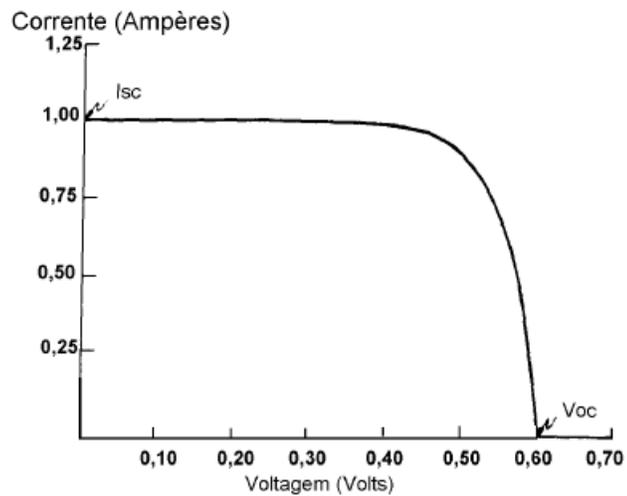


Figura 5. Curva característica $I \times V$ mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc}

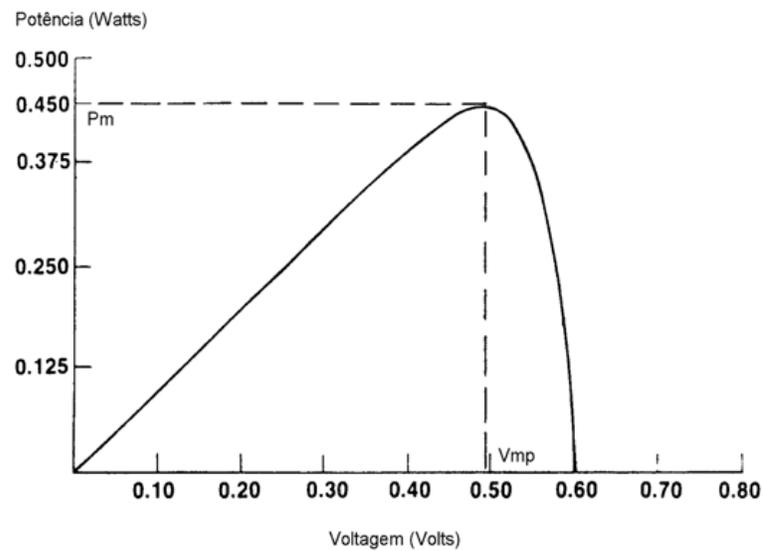


Figura 6. Curva típica de potência versus tensão

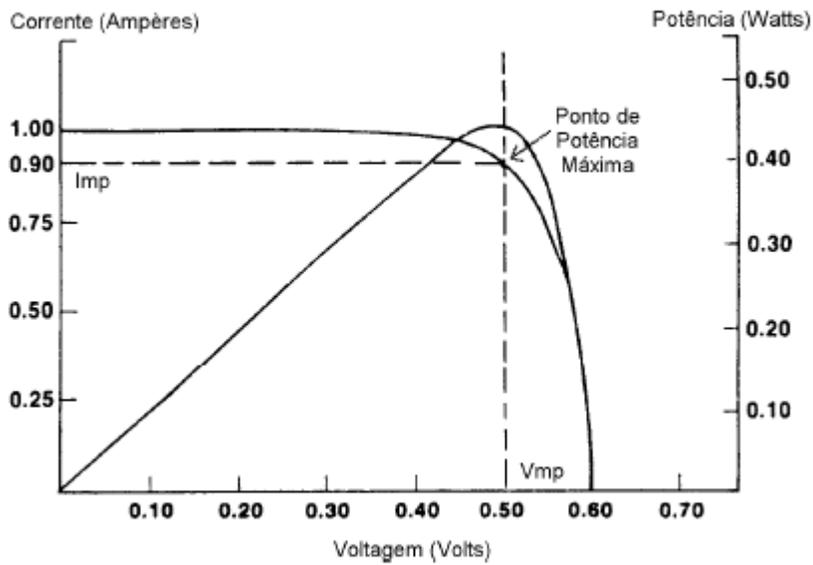


Figura 7. Parâmetros de potência máxima

Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel são a *Intensidade Luminosa* e a *Temperatura das Células*. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia.

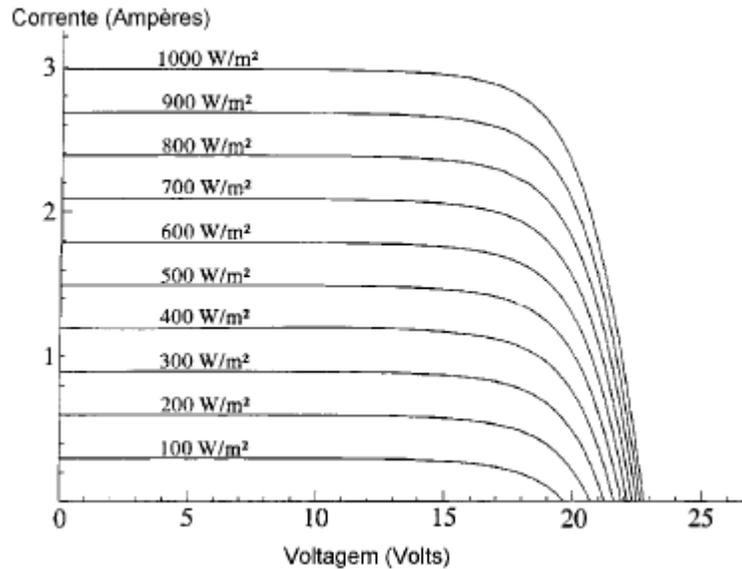


Figura 8. Efeito causado pela variação de intensidade luminosa

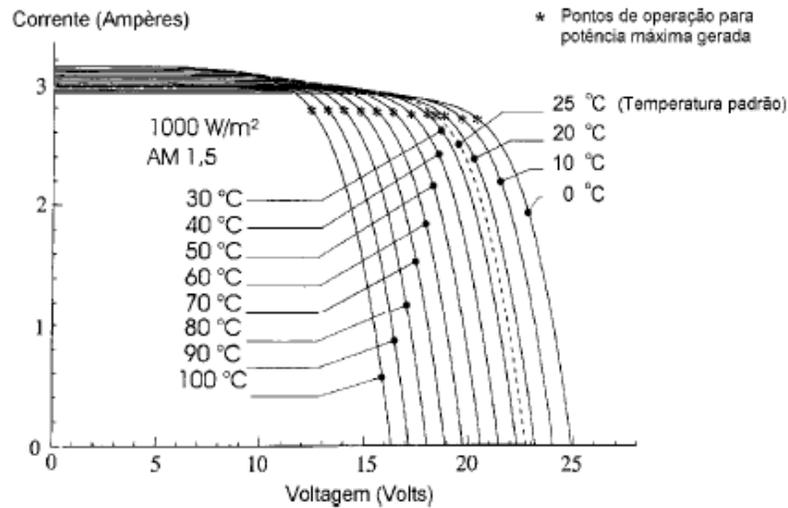


Figura 9. Efeito causado pela temperatura na célula

Sistemas Interligados à Rede

Estes sistemas utilizam grande número de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia já que toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual esta conectada em geral. Todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida dirigido diretamente à rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

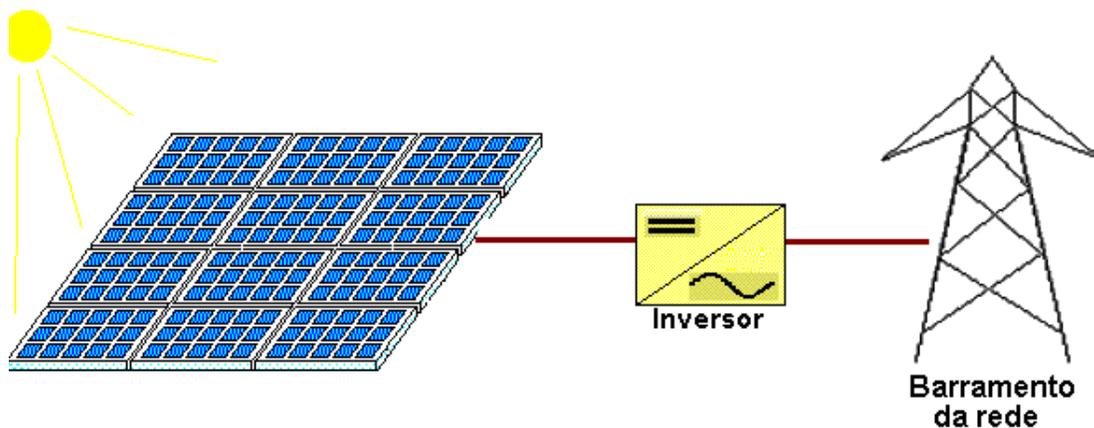


Figura 10. Sistema conectado à rede

2.2.2 – Tecnologias de termo conversão

Utilizam o efeito da termo conversão para obtenção de calor e acionamento de uma máquina térmica, geralmente um motor de ciclo Stirling, Rankine ou Brayton. O motor é utilizado para acionar um gerador elétrico convencional. Existem várias combinações usuais entre termo conversão e motor utilizadas, com resultados variados. Por uma questão de eficiência, os sistemas de termo conversão utilizam, em sua grande maioria, coletores com concentradores. São as seguintes configurações as mais utilizadas:

Formas de captação da energia solar

- Campo de heliostatos e receptor tipo torre
- Concentrador cilindro-parabólico
- Concentrador disco-parabólico

Um heliostato é um dispositivo que segue o curso do sol, tipicamente usado para orientar durante todo o dia os raios solares na direção de um ponto ou de uma superfície, através da movimentação de um conjunto de espelhos. Neste caso, os heliostatos estão dirigidos na direção da torre onde se gera o vapor que alimenta o ciclo termodinâmico escolhido.



Figura 11 – Heliostato e torre

Como o nome indica, o sistema cilindro-parabólico utiliza uma série de refletores cilíndricos em forma de parábola. A parábola concentra a luz sobre um tubo receptor situado ao

longo da linha focal do refletor. As temperaturas podem chegar facilmente a 500°C e permitem assim a produção de vapor.

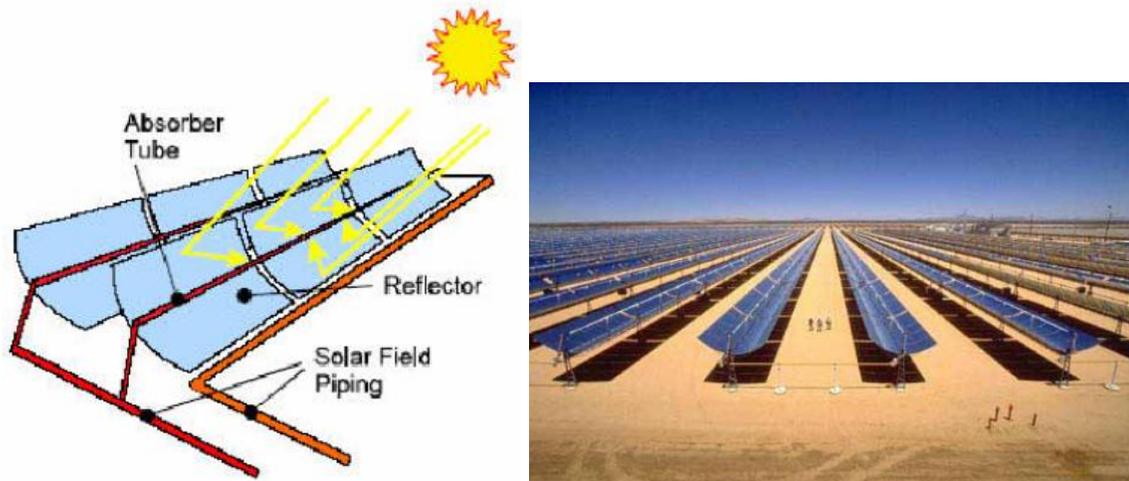


Figura 12 – Sistema cilindro-parabólico

O concentrador disco-parabólico concentra os raios solares em um ponto, o receptor, que atinge temperaturas de até 750°C.

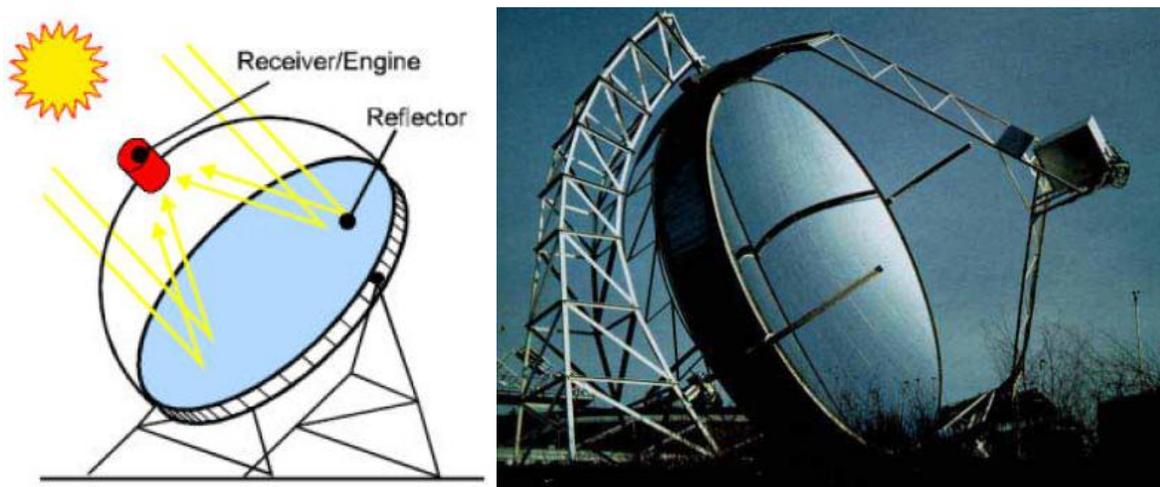


Figura 13 – Concentrador disco-parabólico

Para todas as tecnologias já existe um conhecimento bastante adiantado e a literatura aponta vantagens e limitações que se alternam em função de fatores como a potência da planta. Os custos ainda são superiores aos sistemas convencionais. Sistemas sem concentradores, utilizando

coletores planos também foram utilizados para pequenas unidades na década de setenta, mas apresentavam baixo rendimento com tamanho e custo excessivos.

Uma configuração bastante diferenciada é a das piscinas solares de gradiente salino. Estas piscinas reproduzem o fenômeno de inversão térmica observada em alguns lagos, onde, de modo adverso ao habitual, a temperatura das camadas inferiores se apresentam com temperatura mais elevadas que as camadas superiores. Essa ocorrência se dá em leitos com profundidades entre 1 e 2 m, onde exista uma disposição diferenciada do gradiente salino - partindo de uma baixa concentração, na superfície, até quase a saturação, junto ao fundo - devido a proporcionalidade entre a concentração de sal e a densidade, esse arranjo inibe o movimento de convecção e todo o calor produzido no fundo fica aprisionado na camada inferior, chegando a atingir valores de temperatura próximos a 100° C.

A obtenção de eletricidade é possível através da conversão termoelétrica indireta. Essa montagem apresenta rendimentos globais baixos, são indicados valores em torno de 1%, mas, oferece a vantagem de funcionar em regime contínuo dispensando sistemas adicionais de armazenamento. Nelas a massa de água armazena naturalmente o calor produzido nos períodos de radiação permitindo o funcionamento regular nos intervalos sem sol.

Ciclos termodinâmicos

O ciclo termodinâmico mais utilizado é o de Rankine, com pequenas variações para cada caso. Utiliza-se em geral a energia solar para produzir vapor, às vezes com a presença de um queimador em paralelo/série com o campo solar, uma turbina a vapor, um condensador e uma bomba. Os detalhes deste tipo de sistema serão apresentados no projeto da planta solar.

The Solel Solar Field

Application to Power Plant

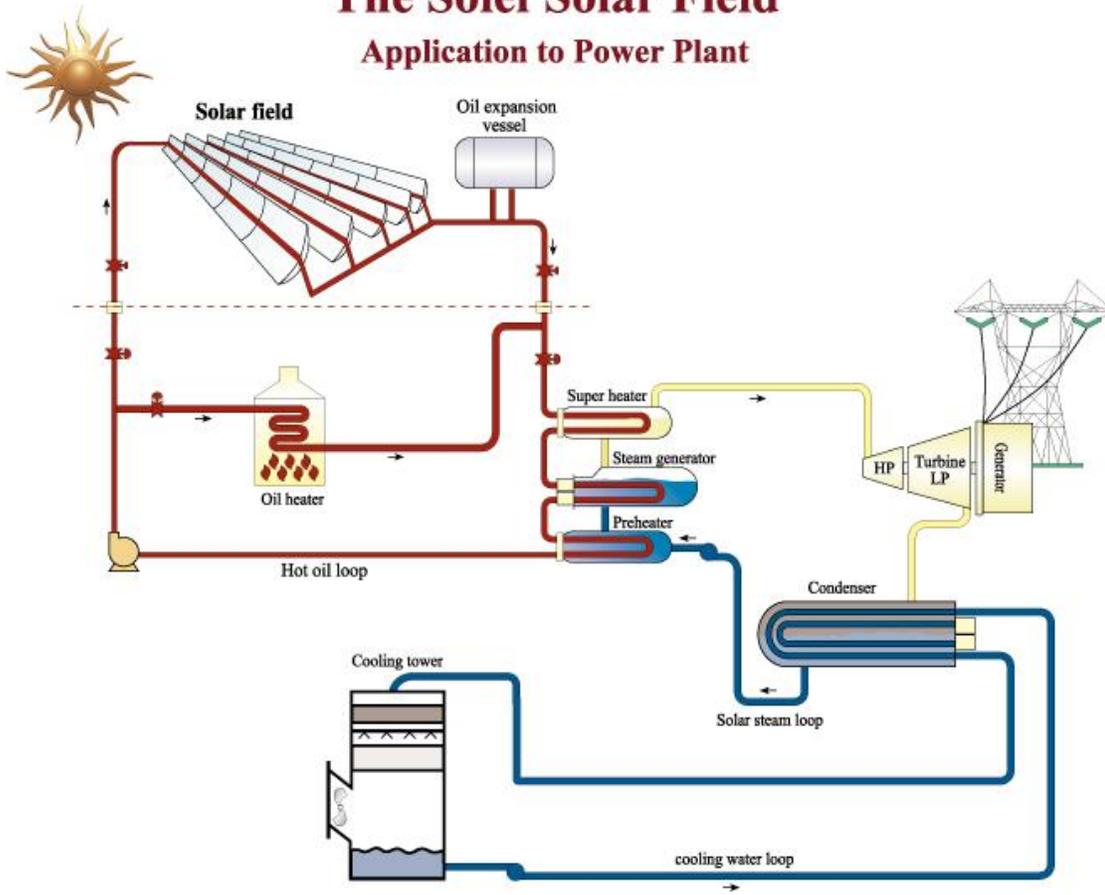


Figura 14 – Produção de energia elétrica: ciclo termodinâmico (Ex. Cilindro-parabólico)

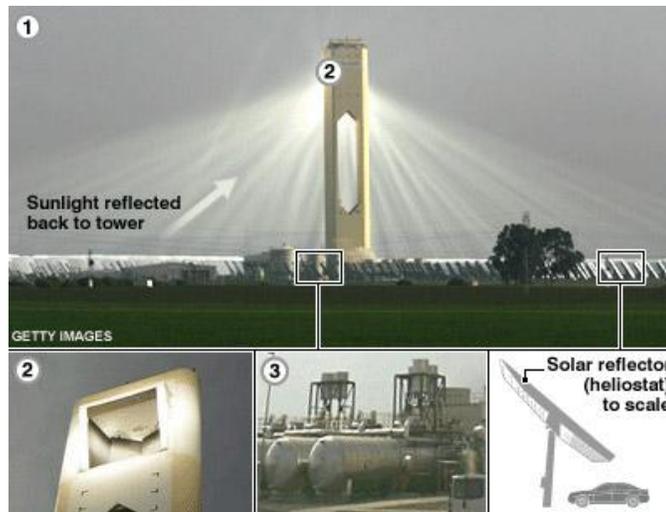


Figura 15 – Heliostatos e torre

2.2.3 – Seleção da tecnologia a ser adotada

A planta a ser projetada será acoplada a uma usina de tal forma que uma queima de biomassa (bagaço de cana) auxilie no processo de vaporização da água.

A tabela abaixo apresenta um resumo comparativo entre as tecnologias mais comuns para a produção de energia elétrica a partir da energia solar, assim como informações relevantes sobre as demais tecnologias para produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Tabela 1 – Comparativo das tecnologias existentes. Fonte: (CEPEL, 2009)

TECNOLOGIA		POTENCIAL (GW)	TAMANHO TÍPICO (KW)	APLICAÇÃO	MATURIDADE DA TECNOLOGIA	VIABILIDADE TÉCNICA	CUSTO INVESTIMENTO (US\$/KW)	CUSTO O&M (US\$/MWh)	CUSTO COMBUSTÍVEL (US\$/MWh)	CUSTO GERAÇÃO (US\$/MWh)	EFICIÊNCIA
SOLAR FOTOVOLTAICA		-	0,05 A 10	- INTERMITENTE - GRID E OFF-GRID	DEMONSTRADA (GRID)	MÉDIA (GRID)	4.000 a 9.000	4 a 20	0.	250 a 500	10 a 18
					COMERCIAL (OFF-GRID)	ALTA (OFF-GRID)					
HELIOTÉRMICA	TORRE CENTRAL	-	30.000 A 200.000	- BASE - GRID	PRÉ COMERCIAL	ALTA	5000 a 8500	4 a 23	0.	220 a 310	15 a 30
	CILINDROS	-	50.000	- BASE - GRID	COMERCIAL	ALTA	.1700 a 5.500	4 a 23	0.	80 a 150	15 a 30
	DISCOS	-	20 a 50	- BASE -GRID E OFF-GRID	DEMONSTRADA	MÉDIA	10000 a 22000	15 a 23	0.	200 a 500	15 a 30
EÓLICA		30	300 a 2000	-INTERMITENTE -GRID E OFF-GRID	COMERCIAL	ALTA	1500 a 2000	4 a 12	0.	110 a 150	25 a 45
BIOMASSA		27,7	10 a 50.000	-BASE -GRID E OFF-GRID	COMERCIAL	ALTA	500 a 2.500	6 a 12	20 a 100	38 a 78	25 a 35
PCH's			50 A 1.000	-VARIÁVEL -GRIDE OFF-GRID	COMERCIAL	ALTA	1.000 a 3.000	6 a 15	0.	35 a 102	60 a 85

Dentre as tecnologias que se utilizam da energia solar, observamos claramente que as células fotovoltaicas são aplicadas em geral em pequenos empreendimentos. Entre as tecnologias de termo conversão, os espelhos cilindro-parabólicos são os que apresentam menor custo, mas são limitados a plantas de até 50MW em geral. Já a torre central apresenta um custo um pouco superior, mas pode ser empregada em empreendimentos de até 200MW.

Como a tecnologia que utiliza espelhos parabólicos se mostrou ser a mais eficiente para sistemas de médio porte, nosso objetivo é o de estudar uma planta solar baseada nesta tecnologia, integrada com uma usina sucro-alcooleira. O objetivo aqui será de projetar uma planta de 50MW, considerado o limite economicamente viável para esta tecnologia segundo a CEPEL.

Como indicado na tabela acima, o custo de implementação de uma planta de cilindros-parabólicos é de aproximadamente 3.600 US\$/KW, já para uma planta eólica este valor seria de aproximadamente 1.750 US\$/KW, enquanto para uma planta baseada somente em biomassa custaria 1.500 US\$/KW. Estes valores nos indicam a principal razão pela qual a energia eólica é atualmente muito mais empregada do que a energia solar, sendo parte importante das matrizes energéticas de diversos países Europeus, principalmente da Alemanha. Entretanto, as tecnologias

baseadas na energia solar estão sendo cada vez mais empregadas, o que tende a baratear sua implementação ao longo do tempo. O gráfico abaixo mostra a perspectiva para a evolução dos custos de operação de plantas baseadas nas tecnologias heliotérmicas.

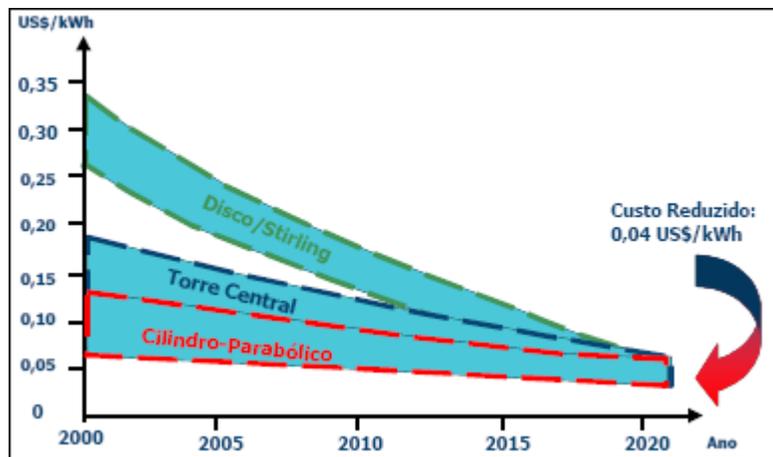


Gráfico 1 – Evolução dos custos das tecnologias solares (Cavalcanti & Brito, 1999)

3 – Análise da planta

3.1 – Aspectos gerais

Este projeto consiste na análise de uma planta com espelhos cilindro-parabólicos, devido à sua eficiência e conseqüente custo reduzido em relação às demais tecnologias. A planta deverá ser capaz de gerar 50MW, o máximo valor para o qual a tecnologia selecionada apresenta viabilidade econômica conforme mencionado anteriormente.

Em geral as plantas solares são acopladas a sistemas de queima suplementar, para os períodos noturnos ou mesmo quando houver muitas nuvens sobre a planta, a fim de manter a geração de energia aproximadamente constante. Para manter a linha de utilização de insumos renováveis, acoplaremos a planta a uma usina que fornecerá bagaço de cana-de-açúcar.

Uma planta de 50MW no Brasil seria suficiente para abastecer aproximadamente 100.000 habitantes, levando-se em consideração que a capacidade instalada neste país é de aproximadamente 100.000MW (ANEEL, 2010), que abastecem uma população de aproximadamente 190.000.000 de habitantes, o que leva a uma necessidade média de 0,5kW por habitante. Este cálculo não leva em consideração o possível consumo de energia pela própria usina sucro-alcooleira.

A principal escolha a se fazer se refere ao fato de o sistema solar propriamente dito (espelhos cilíndricos e tubos) estar diretamente conectado ao ciclo de Rankine, se utilizando do mesmo fluido de trabalho, ou conectado ao mesmo através de um trocador de calor. Neste caso optamos pelo sistema com trocador de calor já que assim poderemos utilizar um óleo e não água nos coletores, levando a pressões de trabalho mais baixas mesmo a altas temperaturas. Isso simplifica a estrutura do trocador de calor, que age também de certa forma como um acumulador.

Assim, obtemos a configuração abaixo para a planta solar:

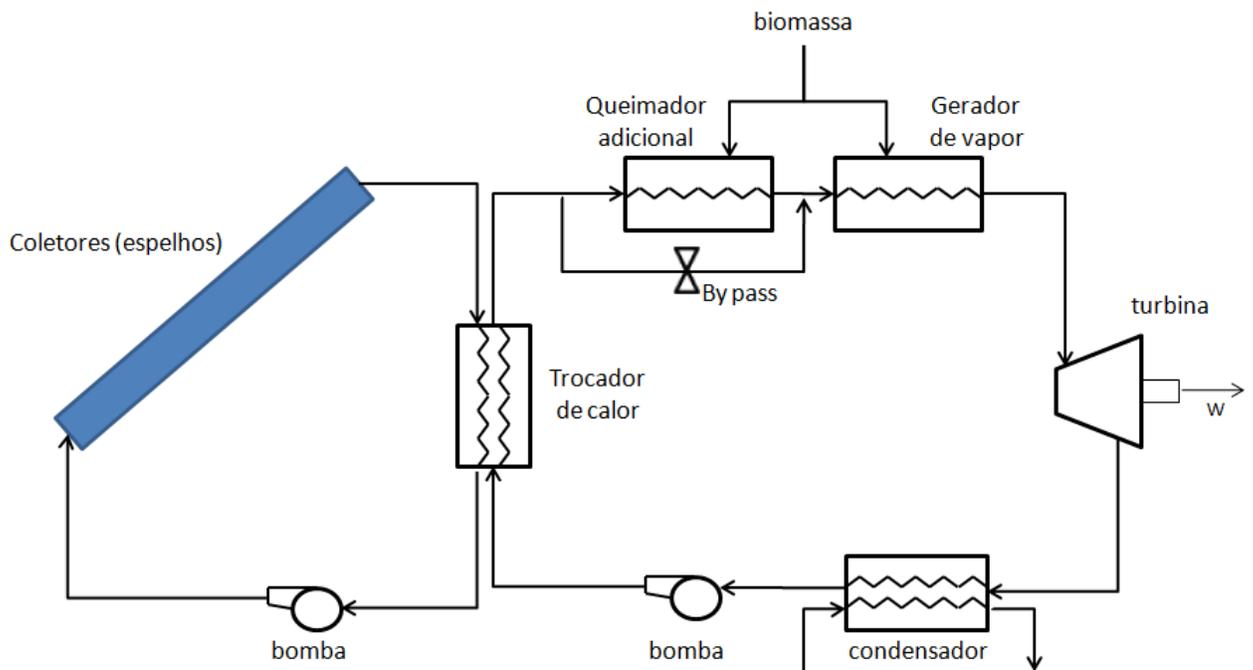


Figura 16 – Esboço da planta solar

Para analisar a relevância da energia solar na planta acima utilizamos o seguinte raciocínio: o circuito bomba – coletores – trocador de calor – bomba tem como objetivo levar a água da temperatura ambiente até a temperatura de saturação, que é de 295oC a 8MPa, o que corresponde a uma variação de aproximadamente 1.100kJ/kg. Já o gerador de vapor seria responsável pela vaporização da água, consumindo aproximadamente 1.440kJ/kg (Van WILEN, 2003). Assim, a variação de entalpia total no processo seria de aproximadamente 2.540kJ/kg, sendo que 44% deste valor seria fornecido pela energia solar.

O rendimento do ciclo Rankine neste caso é de aproximadamente 30% (Feng & Kurita, 2009). Considerando a eficiência dos coletores e do queimador de bagaço em torno de 90% cada e assumindo 95% de eficiência no trocador de calor, chegamos a um rendimento global para o sistema solar de 90,3% e para o sistema de biomassa de 90%. Assim, o rendimento global se situa em torno de $90\% * 30\% = 27\%$.

3.2 – Coletores solares de alta eficiência

O coletor selecionado é composto pelos dutos por onde o fluido de trabalho escoará e pelos espelhos parabólicos que concentrarão a energia solar sobre estes dutos. A este sistema será

acoplado um sistema seguidor que permitirá ao espelho “seguir” o sol na medida em que o mesmo se desloca em relação à terra a fim de se obter o melhor ângulo de incidência possível.

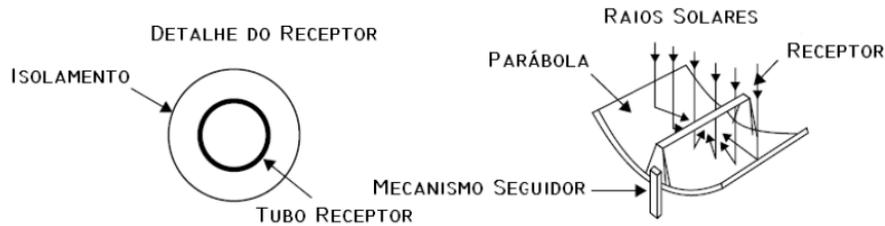


Figura 17 – Coletores (Feng & Kurita, 2009)

Os tubos serão pretos a fim de maximizar a absorção e terão um isolamento térmico com o meio afim de se evitar perdas. Um tubo exterior, de vidro, possibilitará a criação de uma câmara em vácuo entre o duto e o ambiente.

Para selecionar o fluido de trabalho, utilizam-se os seguintes critérios: pressão de trabalho, vazões, toxicidade e viabilidade econômica. Além disso, está se buscando a minimização da vazão porque valores menores implicam menores equipamentos e, portanto, maior viabilidade econômica. A toxicidade se trata em analisar algum tipo de risco sobre o ser humano ou meio ambiente.

O cálculo da dimensão dos coletores depende do fluido de trabalho e de diversos outros fatores. Seu cálculo detalhado foge do escopo deste projeto. Entretanto, sabemos que para uma planta de 200W, puramente solar, um coletor de 1m seria suficiente (Feng & Kurita, 2009). Considerando que a energia solar equivale a 44% dos 50MW da planta em questão, estima-se o comprimento dos coletores em 110m, considerando rendimentos semelhantes. Os 110m parecem razoáveis levando-se em consideração o porte da planta.

3.3 – Gerador de vapor

O gerador de vapor receberá água na temperatura de saturação e gerará o vapor a ser utilizado na turbina. Sua fonte de energia será a biomassa, mais precisamente o bagaço de cana-de-açúcar, advindo da usina à qual a planta será acoplada. Um queimador adicional será utilizado no caso de o sistema solar não conseguir aquecer a água até a temperatura de saturação. Seu acionamento será feito através de controladores que irão monitorar a temperatura na saída do trocador de calor. O queimador adicional, que também será alimentado com biomassa será mais utilizado quando

da presença de nuvens por longos períodos ou mesmo no período da noite quando não há irradiação solar relevante.

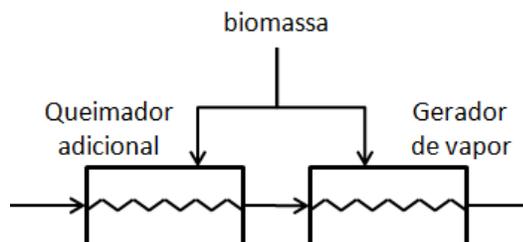


Figura 18 – Gerador de vapor

3.4 – Estudo de viabilidade da utilização de bagaço de cana-de-açúcar no sistema proposto

Durante a execução deste projeto percebeu-se que não seria evidente garantir o fornecimento de biomassa para o sistema dado a natureza orgânica da mesma. O bagaço da cana se deteriora com o passar do tempo e dado a sazonalidade de seu cultivo tem-se que encontrar meios de armazená-la por alguns meses. Neste tópico vamos levantar os principais pontos referentes ao armazenamento e transporte da biomassa a fim de estudar a viabilidade de sua utilização como insumo principal da planta solar. Para tal, nos baseamos no trabalho desenvolvido no artigo de **Pellegrini, (2002)**.

Apresentamos abaixo os principais pontos a serem considerados quanto à utilização e armazenamento da cana-de-açúcar na planta solar. Uma alternativa para não haver necessidade de armazenamento seria a utilização da planta somente nos períodos de safra, ficando a mesma desativada ou produzindo menos energia na entre safra. O gráfico abaixo compara de forma qualitativa o índice pluviométrico na região NE e a produção de cana de açúcar na região segundo a época do ano.

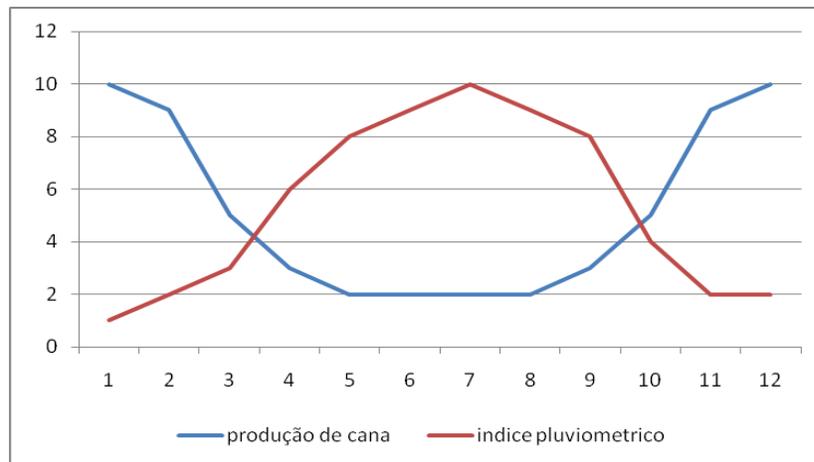


Gráfico 2. Sazonalidade da região NE

Assim, uma possibilidade para a região NE do Brasil seria ter plantas que utilizariam biomassa nos meses em que há pouca chuva, o que limita o funcionamento das hidrelétricas. Este tema teria que ser aprofundado para que se verifique esta alternativa, o que não está no escopo deste trabalho

3.4.1 – Contexto

O bagaço de cana tem sido historicamente usado como combustível nas usinas, pelo menos desde o início deste século, quando passou a substituir a lenha nas caldeiras. Com os avanços tecnológicos do setor sucroalcooleiro, o bagaço passou a ser mais valorizado como fonte de energia, respondendo pelas necessidades energéticas da própria usina, passando depois, a ser comercializado para outras usinas ou indústrias.

A utilização do bagaço como combustível para fins energéticos passa pelo equacionamento dos seus maiores problemas:

- Baixa densidade energética
- Umidade
- Armazenamento difícil
- Transporte caro
- Decomposição ao longo do tempo.

Desta forma, em virtude do caráter sazonal da indústria sucroalcooleira, o fornecimento de bagaço excedente para fins industriais não pode ser realizado de forma direta contínua, havendo a necessidade da formação de estoques reguladores, a fim de suprir a sua carência no período da entressafra.

3.4.2 – Secagem e armazenamento

Um fator muito importante quando se armazena o bagaço é reduzir seu teor de umidade, que normalmente é de 50%, o que pode ser conseguido através de duas vias principais:

- utilização de uma fonte de energia disponível nas destilarias e usinas,
- enfardamento com secagem, que está intimamente relacionado com a compactação do material.

O enfardamento é a prática mais difundida quando se objetiva facilitar o transporte e/ou reduzir a área das instalações para estocagem do bagaço. Para tanto, existem dois processos de enfardamento: o normal e o com secagem.

A densidade do fardo varia de 400 a 600 kg/m³. Embora o teor de umidade permaneça alto, pode sofrer uma redução durante o período de estocagem através da secagem natural com o ar ambiente. O empilhamento dos fardos pode ser realizado em forma cúbica ou piramidal, com espaçamento suficiente para permitir a passagem de empilhadeiras e a ventilação entre os mesmos, sendo que muitas enfardadeiras fazem um furo através do fardo, visando aumentar a velocidade de secagem. A Figura 23 a seguir, apresenta as várias opções de pilhas de bagaço, em estocagem.

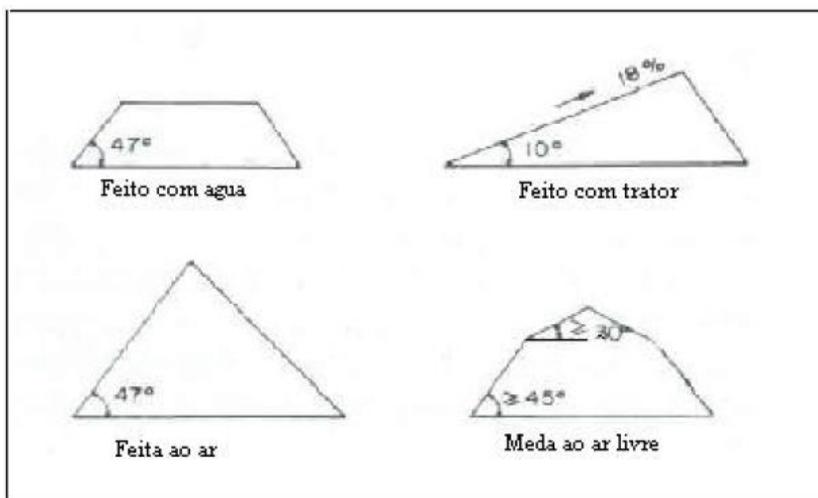


Figura 20. Formas de armazenagem. Fonte: (Pellegrini, 2002)

O princípio em que se baseia esta técnica é o da construção de uma grande pilha de bagaço, onde a deterioração da camada externa protege as camadas internas. As perdas totais estão em torno de 15%. Neste sistema é possível uma mecanização completa do manuseio do bagaço, tornando o custo operacional bastante baixo.

No processo que utiliza secagem, o fardo é submetido a um período no qual o uso controlado e racional da fermentação natural e a aeração permitem reduzir o teor de umidade de 50 para 20% em apenas 20 dias. A densidade do fardo permanece em torno de 375 kg/m³. Os fardos podem ser estocados ao ar livre, sendo simplesmente inalteradas e sem deterioração, por longos períodos de estocagem.

Entre os possíveis sistemas de secagem do bagaço de cana, pode-se relacionar as seguintes alternativas:

- secadores que utilizam os gases de exaustão de caldeiras como meio de aquecimento;
- secadores munidos de gerador autônomo de energia (geralmente, queima de resíduos da biomassa);
- sistema misto, utilizando gases a baixa temperatura (130 – 150°C) que recebem uma complementação por parte de uma fonte autônoma de energia, propiciando a elevação da temperatura dos mesmos.

As técnicas de armazenamento variam em função da utilização a ser dada ao bagaço, ou seja:

- In natura - quando a usina ou a indústria utiliza o bagaço durante o período sazonal e, portanto, não requer procedimentos de estocagem. Além disso, a indústria que utiliza o bagaço in natura deve localizar-se o mais próximo possível da usina ou destilaria para facilitar o transporte, e dessa forma, minimizar os gastos. No Estado de São Paulo, as indústrias que se utilizam deste tipo de bagaço são as pertencentes aos setores cítricos e de óleos vegetais dentre outras, em substituição ao óleo combustível em suas caldeiras;
- Com secagem - quando a usina tem excedente de bagaço e o utiliza fora do período sazonal, ou vende esse bagaço para outras indústrias que o utilizam em seus processos, como: as de papel e celulose, alimentícias e de bebidas.

Outras técnicas também empregadas para aumentar a eficiência na utilização do bagaço são a peletização e a briquetagem.

3.4.3 – Área requerida para o armazenamento do bagaço da cana

O bagaço da cana será responsável pelo fornecimento de 56% da energia consumida na planta, sendo que o restante será oriundo da energia solar. Assim, estimando que o período de entressafra seja de 4 meses, é preciso armazenar o suficiente para este período. Utilizando valores médios do poder calorífico do bagaço e a energia projetada para 4 meses de operação foi possível determinar o volume de bagaço a ser armazenado, de aproximadamente 40.598 m³. Simplificando a estrutura de armazenamento, para uma altura máxima de 5m, seria necessário aproximadamente 1 hectare para o armazenamento, o que parece razoável se comparado com os 1.450 hectares de plantação de cana na usina, como estimado abaixo.

Por fim, foi estimada a área plantada de cana necessária para gerar o bagaço suficiente para alimentar a planta. Considerando a relação 280 (kg bagaço)/(tonelada de cana), assumindo

que seria necessário estocar no máximo 4 meses de geração de energia sob a forma de bagaço (consequência da sazonalidade), conclui-se que seria necessário ter uma plantação de 72.497 ton. Considerando que cada m² de plantação produz em média 50 toneladas/hectare (5Kg/m²), a área plantada seria de aproximadamente 1.450 hectares.

3.5 – Estudo de viabilidade econômica

Nesta sessão analisaremos aspectos econômicos da planta proposta por dois pontos de vista. Primeiramente comentaremos os valores normativos propostos pela ANEEL. Em seguida, apresentaremos um breve estudo com o objetivo de determinar por qual preço a energia produzida na planta deveria ser vendida para que se recupere o investimento feito na planta.

Dentro do ambiente de mercado do setor elétrico brasileiro, passaram a existir os consumidores cativos e os consumidores livres. Estes últimos negociam livremente os seus contratos junto às geradoras de energia elétrica. Entretanto, no caso de consumidores cativos, o agente regulador deve assegurar que não haja abuso de poder de mercado por parte da distribuidora, oferecendo condições contratuais extremamente vantajosas para os consumidores livres e compensando a diferença de receita com o aumento do montante de repasse aos cativos. Desta forma, foi criado o Valor Normativo – VN, como o custo de referência para a comparação com o preço de compra da energia e para o repasse a ser realizado às tarifas de fornecimento de energia elétrica. Cabe ressaltar que os preços de compra de energia até 5% maiores que os respectivos VN's serão integralmente repassados para as tarifas do consumidor final.

O processo regulatório para o estabelecimento destes limites iniciou-se com a publicação da Resolução ANEEL nº 266/98, na qual foi estabelecida a metodologia de cálculo do repasse. Após o processo de audiência pública, a ANEEL divulgou a Resolução nº 233/99, que definia os valores normativos discriminados por fonte de geração (competitiva, termoeétrica a carvão nacional, PCH, termoeétrica a biomassa, eólica e solar fotovoltaica) esperando-se, desta forma, incentivar a diversificação da matriz energética nacional. Entretanto, segundo muitos pesquisadores, os VN's apresentados para as fontes renováveis alternativas eram baixos, inclusive para o nível tecnológico e para a escala de produção dos fabricantes das tecnologias de conversão em vários países europeus, tornando-os ainda pouco atrativos

Em fevereiro de 2001 a ANEEL emitiu uma nova resolução, a Resolução ANEEL nº 22/01, apresentando a revisão dos valores de repasse e o aumento de todos os VN's. Esta revisão já estava prevista em legislação na ocorrência de mudanças estruturais relevantes na cadeia de produção de eletricidade e nas diretrizes do Governo Federal. A tabela abaixo mostra os VN's adotados em cada uma das resoluções comentadas.

Tabela 2. Valores Normativos (Cavaliero & Silva, 2002)

Fontes	Resolução 233/99		Resolução 022/01	
	R\$/MWh	US\$/MWh*	R\$/MWh	US\$/MWh
Competitiva	57,20	29,01	72,35	36,85
Termoelétrica à carvão nacional	61,80	31,34	74,86	38,13
Pequena central hidroelétrica	71,30	36,16	79,29	40,39
Termoelétrica à biomassa	80,80	40,97	89,86	45,77
Eólica	100,90	51,17	112,21	57,15
Solar fotovoltaica	237,50	120,44	264,12	134,53

Podemos constatar que o valor de referência para energia solar é mais do que o triplo aplicado para pequenas centrais hidrelétricas, o que reflete o elevado custo da energia solar. Entretanto, este valor parece ser ainda insuficiente (Cavaliero & Silva, 2002) vis-à-vis dos elevados custos envolvidos na implementação desta tecnologia.

Há um segundo problema que é de grande relevância, pois estipulou-se VN's para cada fonte que na realidade não são os mesmos para todos os submercados, já que existe uma disponibilidade de fontes energéticas e um custo associado a cada uma que varia de região para região. Um exemplo disto é a geração de energia elétrica nos sistemas isolados da Região Norte, onde se encontram as tarifas mais elevadas do país.

A Tabela3 abaixo resume o estudo de viabilidade econômica da planta solar. O objetivo desta análise é de estimar o preço pelo qual a energia produzida deveria ser vendida no mercado secundário a fim de que o projeto se pague em 10 anos, ou seja, que todo investimento feito na planta seja recuperado em 10 anos.

Para tal, foram utilizados os custos médios operacionais e de investimento apresentados pela CEPEL. Observamos que em 2010, considerado ano 1 da análise, temos basicamente o gasto de

investimento. Nos anos seguintes temos custos operacionais e receitas advindas da produção de energia na planta.

Assim conclui-se que seria necessário vender a energia a R\$358,00 / MWh para que o investimento seja recuperado em 10 anos. Este valor relativamente alto já era esperado já que é sabido o elevado custo da co-geração com energia solar. Apesar de o preço ser muito elevado, há outros fatores que devem ser levados em consideração, como por exemplo:

- Eventuais subsídios oferecidos pelo governo;
- Escassez de oferta de energia na região adjacente à usina;
- Baixíssimo impacto ao meio ambiente, o que pode gerar um bem comercial intangível para os usineiros.

Finalmente, considerando que a planta atenderia às necessidades de uma população de aproximadamente 100.000 habitantes no caso de a usina não consumir a energia produzida, o valor do investimento por habitante seria de aproximadamente R\$3.060,00/hab, o que parece razoável levando-se em conta que com esta planta seria possível atingir populações que não são atendidas pela rede pública (cuja matriz é dominada pela energia hidrelétrica, escassa nas regiões mais secas do país).

Na tabela abaixo, a linha correspondente a “A+B” resume para cada ano os gastos com a planta, seja para sua implementação, seja para sua operação diária. Já a linha correspondente a “C” diz respeito à receita para cada ano com a venda de energia. Finalmente, a linha “D” é o resultado líquido apurado em cada ano, ou seja, é o resultado de “C-(A+B)”. Concluímos assim que para recuperar os R\$306 milhões investidos em 2010 em 10 anos, seria necessário cobrar uma tarifa de R\$358,00 / MWh, de tal forma a se obter a receita presente na linha “C”.

Tabela 3. Análise econômica

Capacidade instalada	50	MW
Custo O&M	23	R\$/MWh
Custo geração	196	R\$/MWh
Investimento inicial	6.120	mil R\$/MW

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
capacidade instalada	MW	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
horas de produção	mil h	0,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
produção	mil MWh	0	219									
Custo O&M	R\$ milhão	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Custo geração	R\$ milhão	0,0	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8
A Custo operacional	R\$ milhão	0,0	47,8									
B Investimento inicial	R\$ milhão	306,0	0,0									
A+B Custo + Investimento	R\$ milhão	306,0	47,8									
C Receita da venda de energia	R\$ milhão	0,0	78,4									
D Saldo final no período		-306,0	30,6									
Saldo acumulado em 10 anos	R\$ milhão	0										
tarifa cobrada	R\$/MWh	358										

4 – Conclusão

O projeto caminhou de uma forma geral alinhado com o cronograma apresentado no *Anexo I*, sendo que uma nova frente de estudo surgiu no meio do projeto, quando se questionou a viabilidade da utilização do bagaço de cana na planta. Os prováveis locais de implementação da planta solar são: estado do Tocantins, oeste da Bahia e sul dos estados de Maranhão e Piauí ou a região central do país, incluindo Minas Gerais, dependendo da época do ano de maior demanda (estas são as regiões com maior incidência de radiação útil, ou seja, a irradiação global em plano inclinado em ângulo igual a latitude local).

Observamos claramente que as células fotovoltaicas são aplicadas em geral em pequenos empreendimentos. Entre as tecnologias de termo conversão, os espelhos cilindro-parabólicos são os que apresentam menor custo, mas são limitados a plantas de até 50MW em geral. Já a torre central apresenta um custo um pouco superior, mas pode ser empregada em empreendimentos de até 200MW.

Para este trabalho escolhemos a tecnologia que se utiliza dos espelhos parabólicos, devido à sua alta eficácia. Foi concebida uma planta de 50MW, integrada com uma usina sucro-alcooleira, gerando energia suficiente para abastecer uma cidade com 100.000 habitantes aproximadamente. Consideraremos que esta cidade se situa nas regiões de maior incidência solar, o que leva a uma potência de aproximadamente $6\text{kwh/m}^2/\text{dia}$ segundo os dados obtidos junto ao INPE.

Devido ao grande porte da planta, com capacidade de 50MW, pressupõe-se que ela estaria inserida em uma propriedade de mais de 1.000 hectares de plantação de cana, o que parece muito. Este trabalho tem um caráter genérico, ou seja, não se aplica a uma usina específica, mas devido às conclusões sobre as dimensões da área plantada e da área necessária para a armazenagem do bagaço, uma possibilidade seria a construção da planta nas adjacências de um conjunto de plantações, que juntas seriam capazes de gerar o bagaço necessário. Do ponto de vista organizacional, a criação de uma cooperativa seria uma forma de coordenar a operação da planta, que poderia abastecer a população local.

Este projeto de formatura é a continuação de uma série de projetos que vem sendo executados nas áreas de co-geração e de energias renováveis, sendo seu principal diferencial o fato de se tratar do projeto de uma planta de grande porte, com as problemáticas que o tema acarreta. Uma possível continuação seria a aplicação dos conceitos aqui discutidos em um caso real, idealmente em parceria com uma usina específica, o que permitiria a obtenção de dados reais e daria maior confiabilidade às análises.

5 – Referências

ANEEL, **Informações técnicas**, disponível em

<<http://www.aneel.gov.br/areaPerfil.cfm?idPerfil=2>>. Acesso em 14/10/2010

Cavalcanti E. S. C. & Brito R. B. S., **GERAÇÃO HELIOTÉRMICA: UMA NOVA OPÇÃO DE ENERGIA LIMPA PARA O BRASIL**, artigo submetido pela CEPEL para o VIII Congresso Brasileiro de Energia.

Cavaliero C. K. N. & Silva E. P., **GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, AS NOVAS REGULAMENTAÇÕES PARA AS FONTES RENOVÁVEIS ALTERNATIVAS**. Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2002.

CEPEL, **Pesquisa em Energias Solar e Eólica**. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20090527_ETERJ.pdf>. Acesso em: 10/11/2009

Feng L. & Kurita R., **CICLO RANKINE DE BAIXA TEMPERATURA ASSISTIDO POR COLETOR SOLAR DE ALTA EFICIENCIA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Trabalho de formatura apresentado ao departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, 2009.

Martins F. R., **MAPAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA O BRASIL – RESULTADOS DO PROJETO SWERA**. Estudo publicado no website do INPE. Disponível em:

<<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.15.49/doc/3137.pdf>>. Acesso em: 27/10/2009

Pellegrini M., **INSERÇÃO DE CENTRAIS COGERADORAS A BAGAÇO DE CANA NO PARQUE ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO: EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DOS ASPECTOS LOCACIONAIS E DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP (EP/FEA/IEE/IF), 2002.

Van WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNACKE, C.; **Fundamentos da Termodinâmica**, 6ª edição., Edgard Blücher Ltda, 2003.

6 – Anexo 1 – Cronograma físico

Bruno Oliveira Amorim
10/11/2010

nUSP 5176698

Projeto integrado III

Cronograma físico:

Data	Aividade
Semestre 1	
Setembro / Outubro 2009	Determinação das regiões mais propícias para a implantação de uma planta solar de geração de energia elétrica no Brasil
Outubro / Novembro 2009	Estudo das tecnologias existentes para construção de tais plantas
Novembro/Dezembro 2009	Confecção do relatório final
Semestre 2	
Março/Abril 2010	Estudo das tecnologias existentes para construção de tais plantas
Maió/Junho 2010	Início do projeto da planta solar de geração de energia elétrica
Junho 2010	Confecção do relatório final
Semestre 3	
Agosto a Novembro 2010	Projeto da planta solar de geração de energia elétrica
Novembro 2010	Confecção do relatório final