

ROBSON BARBOSA DE OLIVEIRA

ESTUDO CONCEITUAL PARA UTILIZAÇÃO DA CONVERSÃO  
TÉRMICA DA ENERGIA SOLAR PARA SUPRIR AS DEMANDAS DE  
UMA PLANTA DE BIODIESEL

São Paulo  
2012

ROBSON BARBOSA DE OLIVEIRA

**ESTUDO CONCEITUAL PARA UTILIZAÇÃO DA CONVERSÃO  
TÉRMICA DA ENERGIA SOLAR PARA SUPRIR AS DEMANDAS DE  
UMA PLANTA DE BIODIESEL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização “Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética”, do PECE da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

São Paulo  
2012

ROBSON BARBOSA DE OLIVEIRA

**ESTUDO CONCEITUAL PARA UTILIZAÇÃO DA CONVERSÃO  
TÉRMICA DA ENERGIA SOLAR PARA SUPRIR AS DEMANDAS DE  
UMA PLANTA DE BIODIESEL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização “Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética”, do PECE da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Área de Concentração: Energias Renováveis com ênfase em Energia Solar

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto de Freitas Pacheco

São Paulo  
2012

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus familiares, que ao longo dessa trajetória, sempre me apoiaram incansavelmente, em todas as circunstâncias.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as realizações e vitórias conquistadas, me permitindo chegar até aqui; e ao meu orientador, professor doutor Cláudio Roberto de Freitas Pacheco, pela orientação, esclarecimento, conhecimento transmitidos, e pela atenção dispensada durante a realização deste trabalho.

Não há sucesso sem grandes privações.  
(Sófocles)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Evolução do Consumo Final de Energia (EPE, 2011) <sup>2</sup> .....	1
Figura 1-2 - Oferta de Energia Elétrica por Fonte em 2010 (EPE, 2011) <sup>2</sup> .....	3
Figura 1-3 - Evolução da potência instalada por região, gerada através de recursos eólicos (GWEC, 2011) <sup>3</sup> .....	4
Figura 2-1 - Reação de Transesterificação .....	10
Figura 2-2 - Fluxograma de um modelo de planta de Biodiesel (TAPASVI,2005 in COSTA, 2009) .....	11
Figura 2-3 - Incidência Solar, localização da usina e parâmetros geoespaciais.....	14
Figura 2-4 - Relação sugerida entre $HdH$ e $KT$ , mostrado para diferentes $\omega_S$ (DUFFIE & BECKMAN, 1991) <sup>6</sup> .....	18
Figura 2-5 - Coletor Solar Plano .....	19
Figura 2-6 - Coletor Concentrador Solar .....	20
Figura 2-7 - Fluxograma do Gerador Thermax .....	24
Figura 2-8 – Esquema tridimensional do Gerador de Vapor Solar, da Thermax .....	25
Figura 3-1 - Componentes do sistema de captação de energia solar para geração de vapor .....	26
Figura 3-2 - Distribuição da energia diária média, em $MJ/m^2*dia$ , gerada em função dos meses	30
Figura 4-1 - Arranjo proposto para o campo de coletores .....	32
Figura 4-2 - Componentes do sistema com os valores calculados.....	36
Figura 5-1 – Participação do campo de coletores e do sistema auxiliar a gás para aquecimento do fluído .....	37
Figura 5-2 – Participação mensal na energia necessária para aquecer o fluído .....	38
Figura 5-3 - Comportamento do rendimento do Parabolic Trough Collector .....	38

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 - Equipamentos .....	12
Quadro 2-2 - Correntes de processo .....	12
Quadro 2-3 - Descrição dos parâmetros geoespaciais.....	14
Quadro 2-4 – Radiação Extraterrestre Diária Média $H_0$ em função do mês e da latitude $\phi$ , em MJ/m <sup>2</sup> (DUFFIE & BECKMAN, 1991) <sup>6</sup> .....	16
Quadro 2-5 - Opções de coletores planos e concentradores .....	20
Quadro 2-6 - Opções de fluídos da Dowtherm .....	23
Quadro 3-1 - Características do fluído térmico Dowtherm A.....	28
Quadro 3-2 - Cálculo da energia térmica média diária absorvida, em função dos meses .....	29
Quadro 4-1 - Características do Fasol Parabolic Trough Collector.....	31
Quadro 4-2 - Comportamento da temperatura no tanque, sem a atuação dos coletores .....	34
Quadro 4-3 - Comportamento da temperatura no tanque, com a atuação dos coletores. ....	35
Quadro 5-1 - Valores para consumo de gás .....	39
Quadro 5-2 - Consumo de gás ao longo do ano, utilizando os coletores .....	40
Quadro 5-3 - Consumo de gás ao longo do ano, sem utilizar os coletores .....	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

TEP Tonelada Equivalente de Petróleo

EPE Empresa de Pesquisa Energética

PCI Poder Calorífico Inferior

## SIMBOLOGIA

$\phi$	Latitude
$\omega$	Ângulo Horário
$\delta$	Declinação Solar
$\beta$	Ângulo de Inclinação do coletor com relação à superfície
HS	Hora Solar
n	Número do dia do ano
Cor	Fator de correção para o dia do ano
$\bar{H}_0$	Radiação Extraterrestre Diária Média
$\bar{H}_T$	Radiação Solar Média Mensal Diária
$\bar{H}$	Radiação Solar Média Mensal Diária no plano horizontal
$\bar{K}_T$	Índice de Claridade Média Mensal
$\bar{H}_d$	Radiação Difusa no plano horizontal
R	Número de Reynold
$P_R$	Número de Prandtl
$N_u$	Número de Nusselt
$\dot{Q}$	Vazão de energia (energia por unidade de tempo)
$\dot{m}$	Vazão de massa (massa por unidade de tempo)

## SUMÁRIO

1	Descrição da Situação Problema .....	1
1.1	A importância da questão energética no brasil .....	1
1.2	O interesse por energias de caráter renovável.....	2
1.2.1	Fontes Naturais para Geração de Energia Elétrica.....	2
1.2.1.1	Energia Eólica .....	3
1.2.1.2	Energia Solar Fotovoltaica .....	4
1.2.2	Fontes para Geração de Energia Térmica .....	5
1.2.2.1	Energia Solar Térmica .....	5
1.2.3	Combustíveis Líquidos a partir de Biomassa .....	6
1.2.3.1	Etanol .....	7
1.2.3.2	Biodiesel.....	7
1.3	Proposta deste Trabalho de Conclusão de Curso .....	8
2	Revisão Bibliográfica.....	10
2.1	O uso da energia térmica no processo de produção do Biodiesel.....	10
2.2	avaliação do potencial da energia solar .....	13
2.3	avaliação da Radiação Direta e Difusa .....	17
2.4	Coletores Solares Planos e concentradores.....	19
2.5	Fluídos Térmicos .....	22
2.6	Geradores de Vapor - Thermax .....	24
3	Componentes do Sistema e Métodos de Cálculo .....	25
3.1	Componentes .....	25
3.2	Descrição da Usina Objeto de Ensaio .....	27
3.3	Gerador de Vapor Thermax .....	27
3.4	Fluído Térmico.....	28
3.5	Estimativa da Energia disponibilizada pelo Coletor Solar.....	28
3.6	Armazenamento .....	30
4	Resultados.....	31

4.1	Considerações sobre o Campo de Coletores.....	31
4.2	Cálculo da vazão do campo de coletores $mC$ .....	33
4.3	Ganho de temperatura $\Delta T$ do campo de coletores.....	33
4.4	Volume do reservatório .....	34
4.5	Resultado do dimensionamento do sistema.....	35
5	Discussões.....	36
5.1	Previsão para consumo de gás no processo .....	36
5.2	Rendimento do Campo de Coletores nos demais meses .....	37
5.3	Análise do Investimento .....	39
5.4	Validação do Parabolic Trough Collector através da temperatura interna do tubo .....	41
	Referências .....	42

# 1 Descrição da Situação Problema

## 1.1 A IMPORTÂNCIA DA QUESTÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

A conversão da energia entre suas diferentes formas é essencial para prover conforto às pessoas e alimentar suas indústrias, gerando riquezas e desenvolvendo o país.

Como base para sustentar o desenvolvimento do Brasil nas últimas décadas, o consumo energético também evoluiu, de forma a ser apresentado em uma curva crescente para quase todas as fontes, conforme mostrado na Figura 1-1, à exceção das biomassas tradicionais, como a lenha, que vêm sendo substituídas por outras opções, como biomassas modernas.

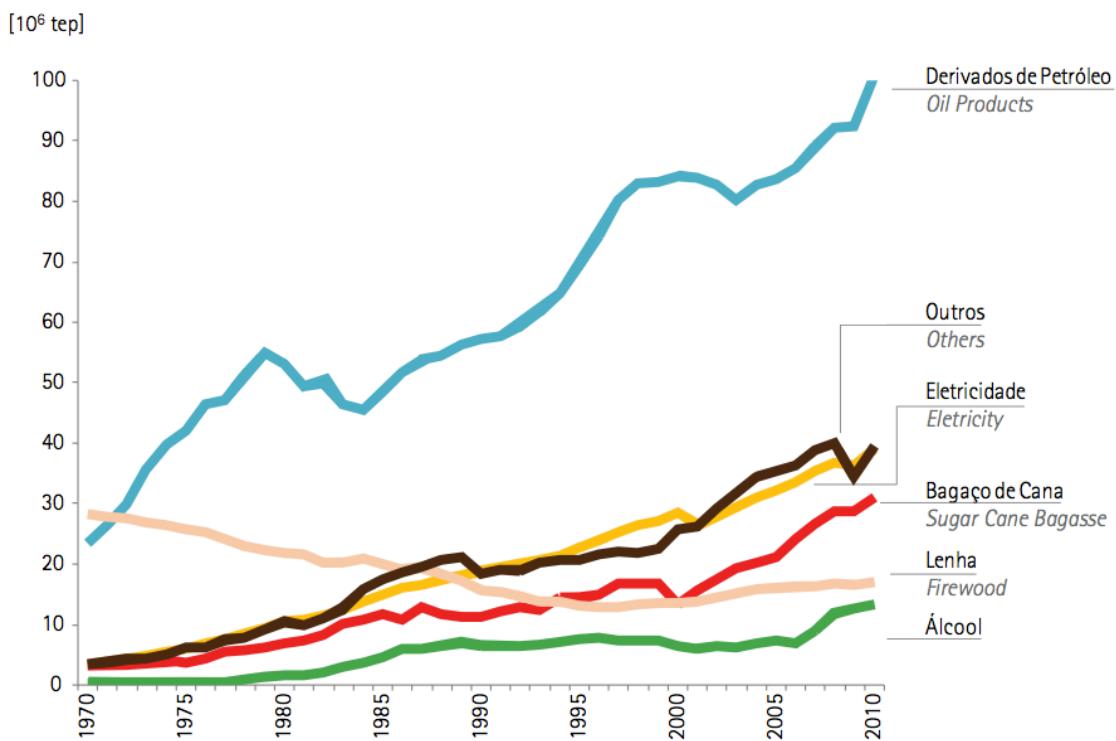


Figura 1-1 - Evolução do Consumo Final de Energia (EPE, 2011)<sup>2</sup>

Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (EPE, 2012)<sup>1</sup>, o consumo de energia deve continuar crescendo nos

próximos anos e haverá mais energia disponível por brasileiro. Contudo, para manter o crescimento da riqueza – e assim, o desenvolvimento do país – será necessário melhorar a eficiência na utilização desses recursos.

## 1.2 O INTERESSE POR ENERGIAS DE CARÁTER RENOVÁVEL

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar nas usinas é um exemplo de como é possível melhorar a eficiência na geração e utilização da energia: elas alimentam geradores de vapor com o resíduo do processo (bagaço) e, com esse vapor, não só conseguem suprir suas demandas térmicas e elétricas locais como ainda exportam eletricidade para a rede interligada do sistema elétrico.

Essa geração de energia elétrica próxima ao consumo final permite reduzir significativamente as perdas resultantes da transmissão – característica de um sistema de geração centralizado no 5º país com maior extensão territorial.

Não só devido à cana-de-açúcar, mas o Brasil é um país privilegiado por sua variedade de recursos naturais (plantas oleaginosas; características favoráveis nos rios, ventos e incidência solar) que, através de diferentes tecnologias, permitem diversificar nossa matriz energética – e consequentemente diminuir o impacto sazonal na geração, além de possibilitar atender comunidades isoladas.

Além dos impactos econômicos e sociais acima, a utilização de fontes renováveis – como opção aos derivados de petróleo – reduz a emissão de gases que colaboram com o efeito estufa, cujo impacto transcende as fronteiras dos países, e geram distorções climáticas ao redor de todo o mundo.

### 1.2.1 Fontes Naturais para Geração de Energia Elétrica

Utilizada para prover conforto à nossa sociedade através de inúmeros dispositivos (iluminação, equipamentos eletrônicos, eletrodomésticos, refrigeração,

entre outros), a eletricidade também desempenha um papel fundamental nos processos industriais.

Enquanto grande parte dos países ainda gera eletricidade essencialmente através de derivados de petróleo, o Brasil, em grande parte, gera através de grandes hidrelétricas. Apesar de tratar-se de um recurso natural, esse modelo torna nossa geração centralizada e, considerando a dimensão territorial de nosso país, é inevitável haver grandes perdas no processo de transmissão.

Contudo já é possível notar que a participação de outras fontes naturais, como mostra a Figura 1-2, vem ganhando notoriedade – descentralizando nossa geração e tornando nosso sistema elétrico mais robusto.

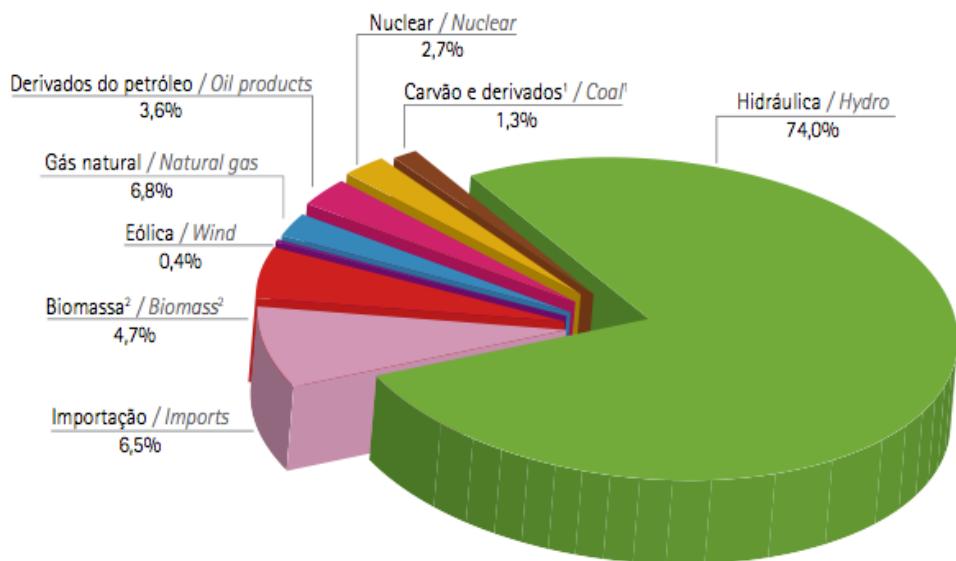


Figura 1-2 - Oferta de Energia Elétrica por Fonte em 2010 (EPE, 2011)<sup>2</sup>

### 1.2.1.1 Energia Eólica

A utilização dos ventos para gerar eletricidade é um exemplo de fonte natural de energia que vem sendo utilizada para tornar mais robustas as matrizes energéticas ao redor do mundo, e alguns países – principalmente na América do Norte, Europa e

Ásia – têm investido muito esforço para desenvolver esse setor (GWEC, 2011)<sup>3</sup>, conforme mostra a Figura 1-3.

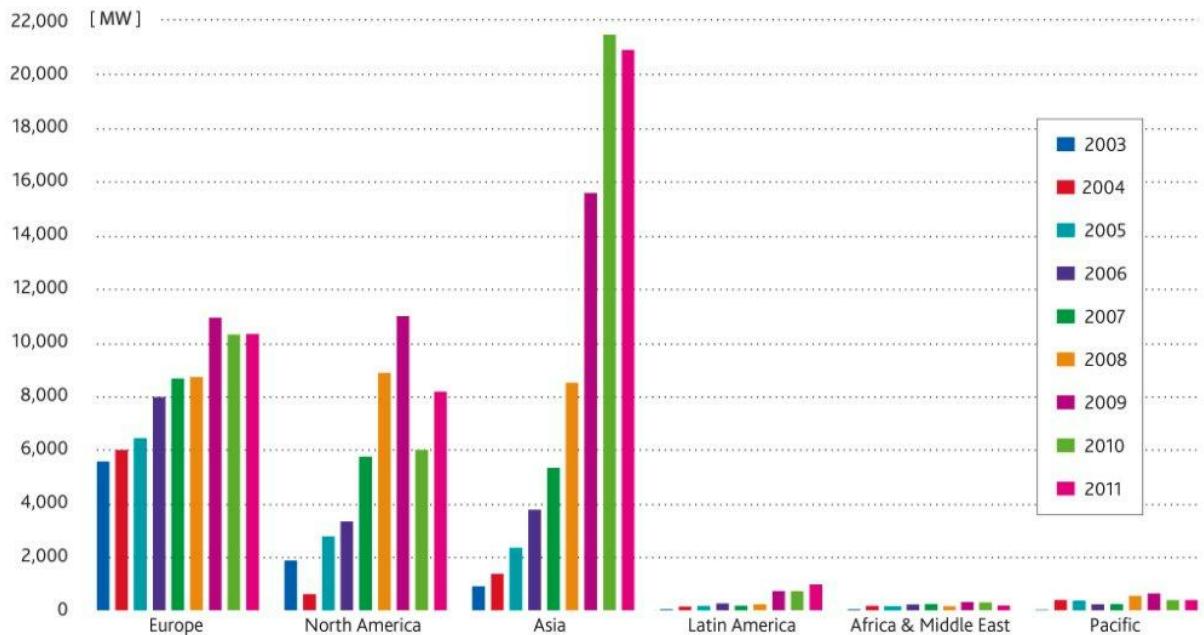


Figura 1-3 - Evolução da potência instalada por região, gerada através de recursos eólicos (GWEC, 2011)<sup>3</sup>

Apesar de um comportamento mais discreto, também é possível notar um crescimento na potência instalada na América Latina, representada essencialmente pelo Brasil, que aproveitou o avanço tecnológico do setor para atingir preços compatíveis com outras formas de geração nos últimos leilões.

### 1.2.1.2 Energia Solar Fotovoltaica

Para países situados entre as regiões dos trópicos, onde a incidência solar é mais intensa, também é possível utilizar tecnologias de conversão fotovoltaica, onde os fótons excitam elétrons ao se movimentarem, gerando eletricidade.

Com um preço elevado essa tecnologia ainda não foi adotada em massa para compor a matriz energética dos países. No Brasil, contudo, há algumas iniciativas de

plantas comerciais fotovoltaicas, como a de Tauá (CE), do grupo MPX, com capacidade instalada de 1 MW (MPX, 2012)<sup>4</sup>.

Porém algumas aplicações isoladas podem tirar proveito dessa tecnologia, ou por utilizarem pouca energia – onde os custos de material fotovoltaico são reduzidos – ou por conseguirem benefícios através de uma geração local que justificam o alto custo. É o caso, por exemplo, de satélites em órbita, ou de dispositivos elétricos móveis de baixo consumo.

### **1.2.2 Fontes para Geração de Energia Térmica**

Desde o século XIX a sociedade tem utilizado carvão e derivados de petróleo para aquecer as caldeiras e alimentar os processos industriais. Contudo esses recursos são finitos, e os particulados e gases que resultam de suas queimas têm causado grande impacto ambiental ao redor do mundo.

É preciso buscar fontes que possam gerar o calor necessário para os processos industriais, que minimizem os efeitos negativos para o meio ambiente e que a sociedade possa produzir de forma sustentável, permitindo seu desenvolvimento contínuo.

Nesse cenário as fontes renováveis de energia – como raios solares e biomassa – ganham destaque no ambiente industrial, onde se busca desenvolver e aprimorar as tecnologias de conversão.

#### **1.2.2.1 Energia Solar Térmica**

Parte dos custos da energia, para alimentar os processos industriais das usinas está no seu transporte, que a retira do local onde é produzida até sua utilização em caldeiras.

Assim como para outros recursos naturais, o Brasil possui um excelente potencial para explorar a energia contida nos raios solares, inclusive nas regiões onde estão localizados os centros industriais, e uma grande vantagem dessa fonte de energia é que ela já está disponível para ser utilizada, evitando assim os custos de transporte.

As tecnologias de conversão da energia solar para térmica consistem em aquecer um fluido através de coletores e armazená-lo em um reservatório com isolamento térmico, para quando necessário, utilizá-lo nas caldeiras para gerar vapor.

Para obter temperaturas mais elevadas pode-se configurar um arranjo de painéis refletores na forma de um concentrador solar, permitindo assim atender às demandas industriais.

### **1.2.3 Combustíveis Líquidos a partir de Biomassa**

Os combustíveis líquidos permitiram que a sociedade armazenasse e transportasse energia de forma fácil, como em tanques de combustível para os automóveis, e que poderia ser liberada em um processo de combustão.

E foram os derivados do petróleo os combustíveis líquidos mais utilizados ao longo da história – e os gases e particulados emitidos durante sua queima foram se acumulando, gerando os problemas ambientais que podemos presenciar atualmente.

Contudo, através do processamento de diversas biomassas, temos outras opções – naturais e renováveis – para produzir combustíveis líquidos.

### **1.2.3.1      Etanol**

Desde a década de 1920 já eram realizados no Brasil estudos para alimentar motores com etanol, mas somente com as crises do petróleo na década de 70, e o consequente programa Proálcool, que houve o desenvolvimento de um subsetor da indústria automobilística: os carros a álcool.

O baixo desempenho dos motores desses veículos – quando comparados a motores a diesel e a gasolina – e a alta do preço do açúcar no mercado internacional no início dos anos 90 foram fatores que geraram uma resistência a essa tecnologia, cuja força só foi retomada uma década depois, com a substituição do chumbo (tóxico) por etanol anidro na gasolina e com o desenvolvimento da tecnologia Flex.

O crescente interesse por esse combustível vai além da geração a partir da fermentação e destilação da cana-de-açúcar e do milho – atualmente já há projetos de usinas que produzirão etanol de segunda geração (a partir da celulose do bagaço de cana, e não somente de seu caldo) em escala comercial.

### **1.2.3.2      Biodiesel**

No final do século XIX, Rudolf Diesel concebeu um motor com um ciclo termodinâmico melhor que os de ciclo Otto. Inicialmente planejado para funcionar com óleos minerais, sofreu influência do governo francês para que fossem realizados testes com óleos vegetais, buscando autossuficiência energética de suas colônias na África, reduzindo os custos com importação de carvão e outros combustíveis (COSTA, 2009)<sup>5</sup>.

Assim como na época da concepção dessa tecnologia, hoje também se busca opções energéticas para reduzir os gastos com importação de combustíveis, além de procurar formas de minimizar o impacto ambiental da combustão de substâncias de origem fóssil.

Uma alternativa renovável, biodegradável e não tóxica, o biodiesel é gerado a partir de gorduras de restos de animais, óleos vegetais ou residuais, que reagem com álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (SANTOS, 2007)<sup>6</sup>.

Oriundo de diversas opções de óleos vegetais, o biodiesel pode ser produzido por oleaginosas de diferentes regiões do Brasil, permitindo explorar a riqueza natural do país e descentralizando os pontos de geração.

Contudo, apesar de reduzir impactos ambientais e tornar mais robusta a matriz energética, o biodiesel eleva a emissão de óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), e possui um ponto de ignição superior ao diesel (COSTA, 2009)<sup>5</sup>, exigindo que os motores suportem uma temperatura de funcionamento mais elevada.

Em 13 de Janeiro de 2005, através da Lei 11.097, tornou-se obrigatório no Brasil um percentual mínimo de biodiesel no diesel e, com essa condição, tornou-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que produzissem esse combustível com custo e quantidade adequados, através de um balanço energético coerente (COSTA, 2009)<sup>5</sup>.

Costa (2009) apresenta em seu trabalho que aproximadamente 25% da energia contida no biodiesel produzido em uma usina é consumida nas necessidades térmicas do seu processo de produção.

### 1.3 PROPOSTA DESTE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O Curso Energias Alternativas do PECE conferiu um conjunto de conhecimentos que possibilitam aos seus alunos uma base para análise de questões envolvendo estas novas opções energéticas.

Assim, no intuito de combinar a geração de vapor por conversão térmica de energia solar com o processo de produção de Biodiesel foi realizado este estudo visando substituir os combustíveis usados na geração de vapor deste processo pela energia solar. O escopo deste trabalho é realizar um estudo conceitual para

utilização da conversão térmica da energia solar para suprir as demandas de uma planta de biodiesel.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 O USO DA ENERGIA TÉRMICA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL

Apesar de ser possível a utilização direta de óleo vegetal ou óleos de origem animal em motores a diesel, a baixa volatilidade e a alta viscosidade desses óleos influenciam em sua combustão incompleta, formando, além de depósitos no motor, substâncias tóxicas resultantes da decomposição térmica do glicerol (COSTA, 2009)<sup>5</sup>.

Alguns processos podem ser usados para diminuir a viscosidade dos óleos vegetais, como a transesterificação, onde os glicerídeos reagem com um álcool – na presença de um catalisador – produzindo uma mistura de glicerina e ácidos graxos. Após a remoção da glicerina e da recuperação do álcool utilizado no processo, os mono-alquil ésteres (ácidos graxos) passam a ter características próximas ao diesel, e são conhecidos como Biodiesel.

O processo de transesterificação, mostrado na Figura 2-1, é relativamente simples – e o biodiesel que resultante pode ser utilizado diretamente nos motores a diesel, sem necessidade de adaptação.

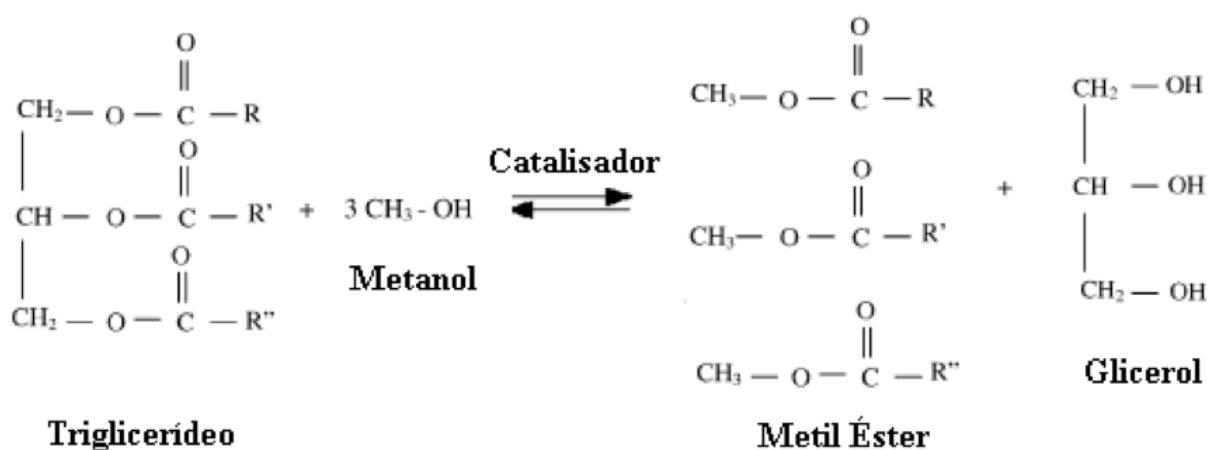


Figura 2-1 - Reação de Transesterificação

O fluxograma mostrado na Figura 2-2 ilustra o processo de transesterificação, através dos reatores J e L, da adição de álcool e catalisador em 19, 20, 24 e 25, e separadores de biodiesel, álcool e glicerol (decantadores) em K e M.

Os demais equipamentos e correntes, utilizados para lavagem e recuperação do metanol, encontram-se listados nos Quadro 2-1 e Quadro 2-2.

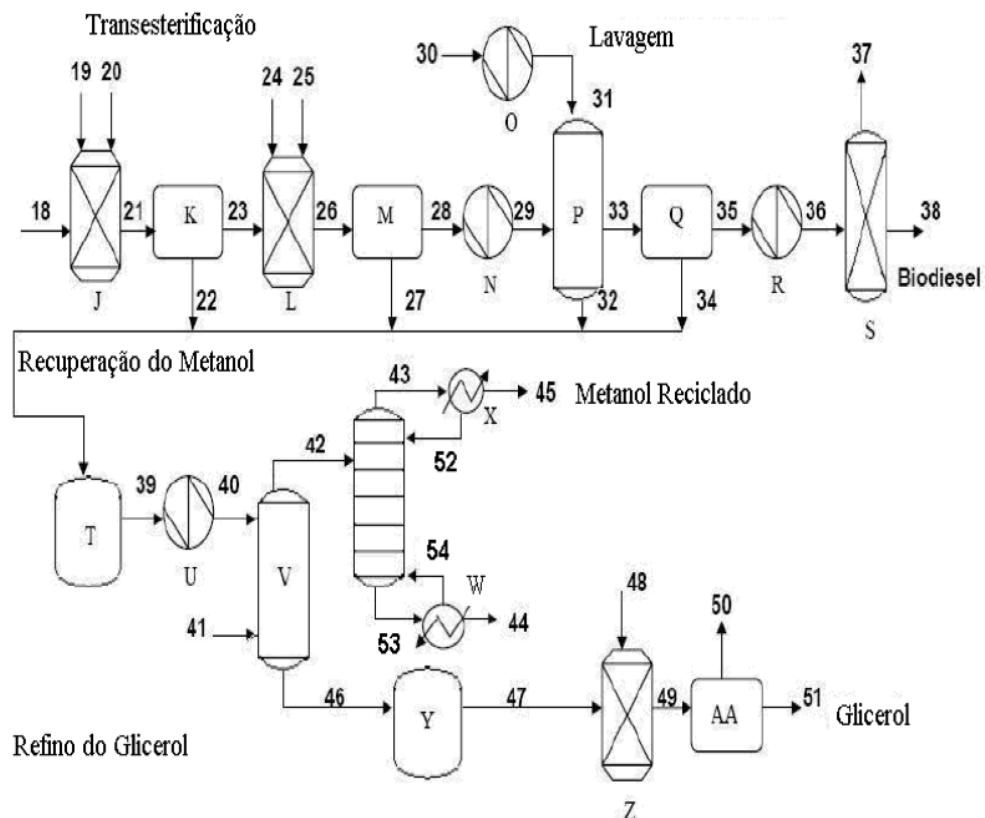


Figura 2-2 - Fluxograma de um modelo de planta de Biodiesel (TAPASVI,2005 in COSTA, 2009)

Quadro 2-1 - Equipamentos

Equipamento	Descrição	Equipamento	Descrição
J	Reator de Mistura 1	S	Secador à vácuo
K	Decantador	T	Tanque Coletor
L	Reator de Mistura 2	U	Aquecedor
M	Decantador	V	Stripper glicerol-água
N	Aquecedor	W	Reervedor
O	Aquecedor	X	Condensador
P	Lavador	Y	Tanque de Espera
Q	Decantador	Z	Reator de Acidificação
R	Aquecedor	AA	Decantador

Quadro 2-2 - Correntes de processo

Corrente	Descrição	Corrente	Descrição
18	Óleo Refinado	37	Vapor d'Água
19	Solução de Metóxido de Sódio	38	Biodiesel
20	Metanol	39	Fase de Glicerol Recolhida
21	Produto da Reação do Reator 1	40	Fase Aquecida
22	Fase Glicerol	41	Vapor Superaquecido
23	Fase Éster	42	Vapor de Metanol Saturado
24	Solução de Metóxido de Sódio	43	Vapor de Metanol
25	Metanol	44	Água e Metanol Remanescentes
26	Produto da Reação do Reator 2	45	Metanol Reciclado
27	Fase Glicerol	46	Solução de Glicerol
28	Fase Éster	47	Glicerina
29	Fase Éster Aquecida	48	Solução de Ácido Clorídrico
30	Água	49	Produto do Reator de Acidificação
31	Água aquecida	50	Impurezas
32	Fase Aquosa	51	Glicerol Purificado
33	Éster Lavado	52	Refluxo Metanol
34	Fase Aquosa Remanescente	53	Vapor d'Água e Metanol
35	Éster	54	Água e Metanol
36	Éster aquecido	-	-

Segundo Costa,2009, para 100 kg/h de glicerídeo o processo gera 98,45 kg/h de biodiesel, consumindo 334,9 kg/h de vapor para alimentar os equipamentos no processo – aquecedores N, R, U e O, consumindo 4,3 kg/h, 3,2 kg/h, 2,7 kg/h e 1,7 kg/h; reatores J e L, consumindo de 60,6 kg/h e 9,2 kg/h; reervedor W, consumindo

33,3 kg/h; e, principalmente, a Stripper (V), consumindo 218,76 kg/h (aproximadamente 65% do total de vapor).

Utilizando biodiesel ( $PCI = 38,9 \text{ MJ/kg}$ ) para gerar o vapor necessário seriam consumidos 24,21 kg/h, correspondendo a 25% do total gerado pela planta (98,45 kg/h).

## 2.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR

Para alcançar o objetivo proposto nesse trabalho, de utilizar a conversão térmica da energia solar como fonte de calor para o processo, é preciso compreender como calcular a Energia Solar em um determinado ponto no globo terrestre.

A Figura 2-3 ilustra um cenário onde seria preciso calcular a Energia Solar incidente em uma usina de biodiesel, e os parâmetros geoespaciais da posição do sol e da usina.

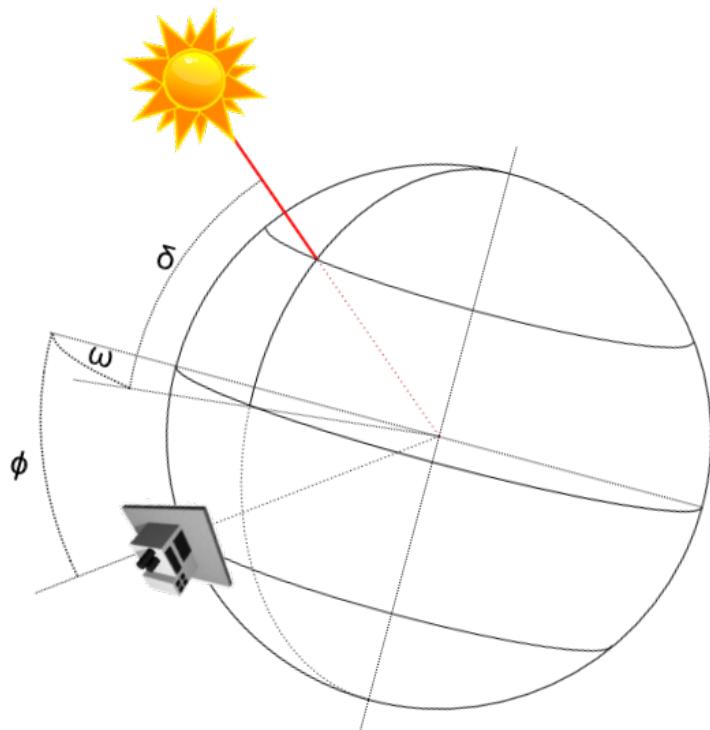


Figura 2-3 - Incidência Solar, localização da usina e parâmetros geoespaciais

O quadro apresenta os parâmetros ilustrados, e os demais que derivam desses.

Quadro 2-3 - Descrição dos parâmetros geoespaciais

Parâmetro	Descrição	Fórmula
φ	Latitude	$-90 \leq \phi \leq 90$ , Norte > 0, Equador = 0
ω	Ângulo Horário	$\omega = (HS - 12) * 15$ , HS = hora solar $-180 < \omega < 180$ , manhãs < 0 e tardes > 0
n	Número do dia do ano	$n = Dia + (Mês - 1)*30 + Cor$
Cor	Fator de correção para o dia do ano	$Mês \leq 2 \rightarrow Cor = Int(Mês/2)$ $2 < Mês \leq 8 \rightarrow Cor = Int(Mês/2) - 2$ $Mês > 8 \rightarrow Cor = Int(Mês/2 + \frac{1}{2}) - 2$
δ	Declinação Solar	$\delta = 23,45 * \text{Seno}(360 / 365 * (284 + n))$ $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$ Norte > 0

Para captar a maior intensidade solar possível é preciso posicionar os painéis (presentes na usina) de forma ortogonal aos raios solares.

A Figura 2-3 mostra a usina posicionada  $\phi$  graus abaixo da linha do equador, enquanto em um certo dia a declinação solar está a  $\delta$  graus acima do equador, num horário em que o ângulo horário vale  $\omega$ . Dessa forma, para deixar os painéis da usina na posição ideal, é preciso incliná-los em  $\beta = \delta - \phi$  respeitando as convenções de sinais.

Dois pontos importantes a considerar são:

- Devido à referência (Equador = 0 e Norte > 0), o valor de  $\phi$ , na Figura 2-3 é negativo.
- Não ocorrem deslocamentos angulares nos painéis no eixo do ângulo horário  $\omega$  mostrado na Figura 2-3, devido à complexidade e custo que estes mecanismos requerem sendo os coletores alinhados ao longo do eixo L-W sendo alinhados mensalmente.

Através da latitude  $\phi$  onde a usina se encontra é possível calcular a Radiação Extraterrestre Diária Média mês-a-mês  $\bar{H}_0$ , de acordo com o Quadro 2-4.

Quadro 2-4 – Radiação Extraterrestre Diária Média  $\bar{H}_0$  em função do mês e da latitude  $\phi$ , em MJ/m<sup>2</sup>  
(DUFFIE & BECKMAN, 1991)<sup>6</sup>

$\phi$	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	38.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	30.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
-5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
-10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
-15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
-20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.1	34.3	38.6	41.2	42.1
-25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
-30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
-35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
-40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
-45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
-50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
-55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
-60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
-65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
-70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
-75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
-80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
-85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
-90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

## 2.3 AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO DIRETA E DIFUSA

Os coletores solares concentradores utilizados para geração de vapor em baixa pressão são do tipo com refletores parabólicos e receptores lineares orientados ao longo do eixo L-W com sua superfície de abertura inclinada em relação a horizontal ajustada diariamente, por exemplo, para uma incidência normal na passagem meridiana.

O planejamento do campo de coletores pode ser realizado com auxílio do método proposto por Liu e Jordan (DUFFIE & BECKMAN, 1991)<sup>6</sup> para avaliação da radiação solar média mensal diária  $\bar{H}_T$ [kJ/m<sup>2</sup> dia] sobre a área de abertura inclinada com a horizontal de um ângulo  $\beta$ .

Para tanto em cada mês deve-se obter no Atlas Solarimétrico o valor da radiação solar média mensal diária no plano horizontal  $\bar{H}$  e a respectiva radiação solar média mensal diária extraterrestre do Quadro 2-4 obtendo-se, assim, o índice de claridade média mensal  $\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$ .

Para o dia representativo do mês considerado, obtido no Quadro 2-3, deve-se obter o ângulo horário do por do Sol dado por  $\cos \omega_S = -\tan \phi \tan \delta$ .

Com estes valores pode-se obter a razão entre a fração difusa e total no plano horizontal da radiação solar média mensal diária pela Figura 2-4 ou pela expressão analítica  $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00653(\omega_S - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_S - 90)]\cos [115\bar{K}_T - 103]$

Calcula-se então  $\omega_S$ , através das expressões válidas para instalações no hemisfério Sul: mínimo entre  $\arccos(-\tan \phi \tan \delta)$  e  $\arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta)$ .

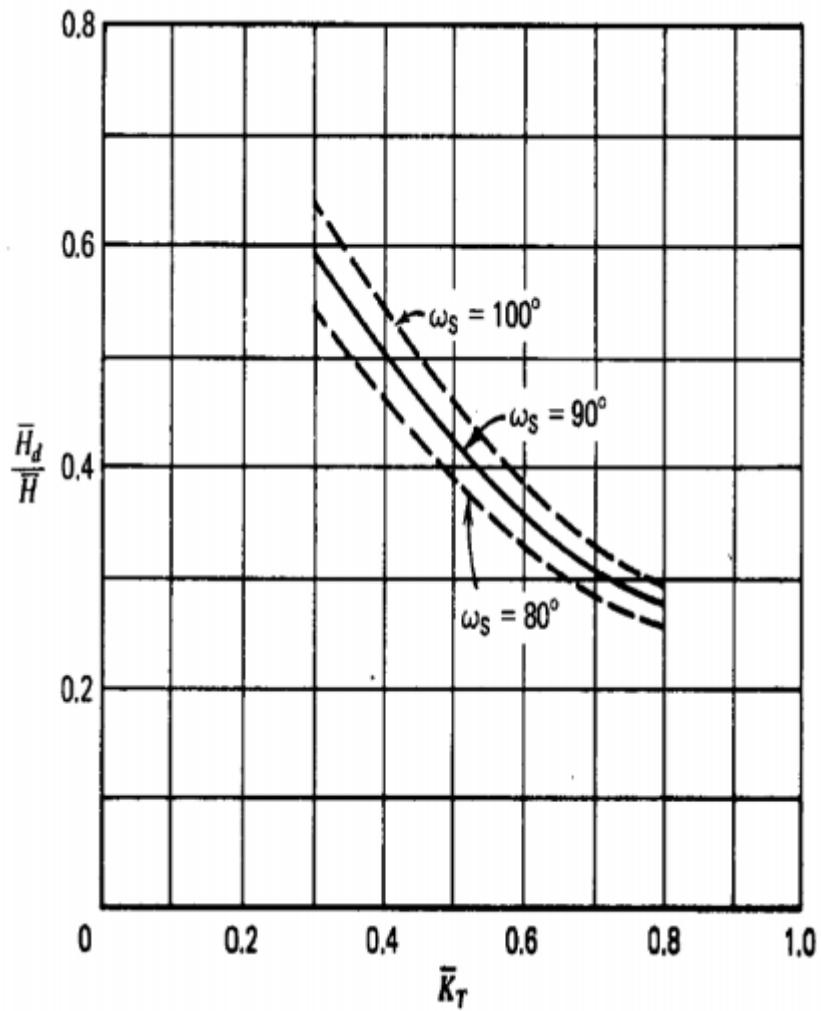


Figura 2-4 - Relação sugerida entre  $\bar{H}_d/\bar{H}$  e  $\bar{K}_T$ , mostrado para diferentes  $\omega_S$  (DUFFIE & BECKMAN, 1991)<sup>6</sup>

Então é possível obter  $\bar{R}_b$  (hemisfério Sul), por:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega_S + (\pi/180) \omega_S \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_S + (\pi/180) \omega_S \sin \phi \sin \delta}$$

Com estes valores pode-se calcular  $\bar{H}_T$  (hemisfério Sul) pela expressão:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H}_\rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

No caso do uso de coletores concentradores a avaliação da energia coletada restringir-se-á apenas à primeira parcela referente à radiação direta.

## 2.4 COLETORES SOLARES PLANOS E CONCENTRADORES

Para realizar a conversão térmica da energia solar podem ser usados coletores solares planos ou concentradores.

A Figura 2-5 ilustra a composição de um coletor solar plano, onde:

- O vidro superior serve como uma estufa, permitindo que a radiação solar incidente entre no coletor, mas a radiação difusa (com uma frequência de onda menor) não seja emitida para o ambiente externo;
- Placa Absorvedora (idealmente preto) absorve o máximo possível de calor;
- Fluído, onde o calor é coletado e transferido para um reservatório, cujo objetivo é permitir acumular energia térmica e usá-la em um momento apropriado.

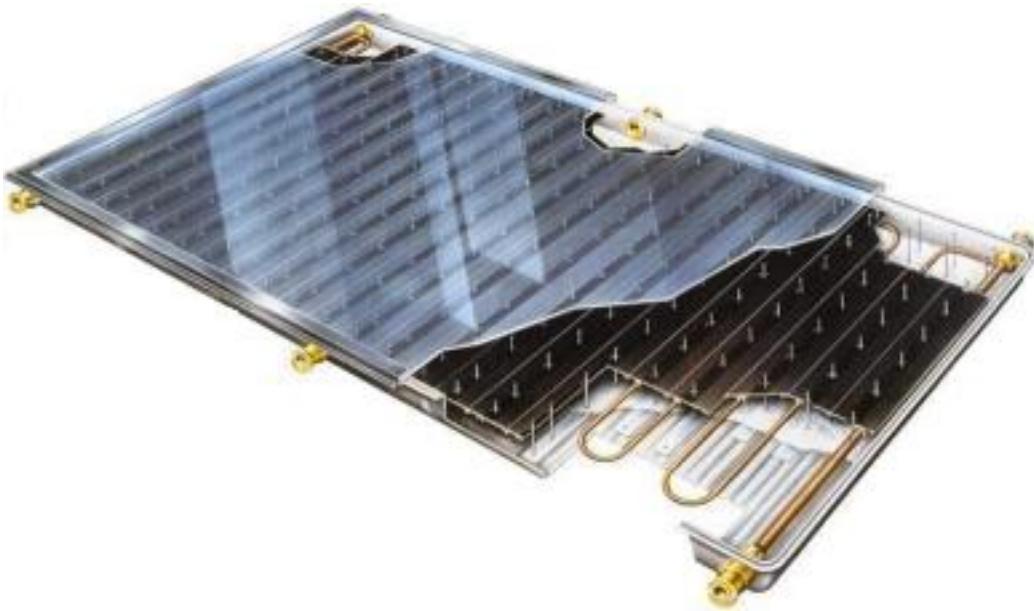


Figura 2-5 - Coletor Solar Plano

A composição de um sistema com concentradores, Figura 2-6, mostra que os raios solares refletidos convergem para onde o fluido está circulando, aquecendo-o.

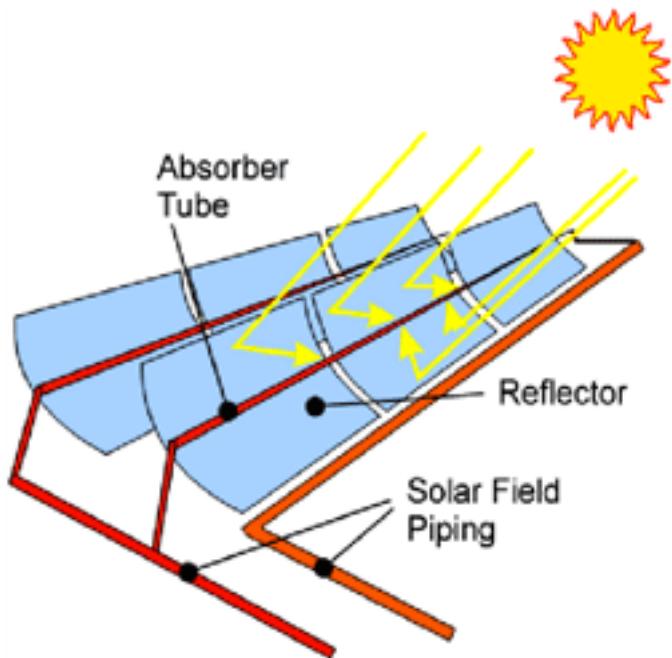
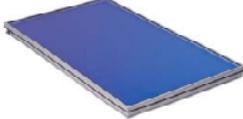


Figura 2-6 - Coletor Concentrador Solar

O Quadro 2-5 mostra algumas opções comerciais de coletores a serem considerados nesse estudo conceitual.

Quadro 2-5 - Opções de coletores planos e concentradores (IEA -2005)

Tipo de Coletor	Temp. de Op. [°C]	Fluído	
	<b>2AR Flat-Plate Collector</b> Double Glazed Flat-Plate Collec w/ Anti-Reflec. Glasses	80 - 150	Water-Glycol
	<b>SCHÜCO</b> Double-Glazed Flat-Plate Collector	80 - 150	Water-Glycol
	<b>AoSol</b> Stationary CPC Collector	80 - 110	Water-Glycol

---

	<b>Solarfocus-CPC - collector</b>	80 - 120	Water-Glycol
	<b>Maximum Reflector Collector</b>	50 - 90	Water-Glycol
	<b>PARASOL</b> Parabolic Trough Collector	100 - 200	Water or Steam
	<b>SOLITEM PTC 1800</b> Parabolic Trough Collector	100 - 200	Water
	<b>PTC 1000</b> Modular parabolic trough collector	80 - 300	Water
	<b>FASOL</b> Parabolic Trough Collector	130 - 300	Water
	<b>Parabolic Trough Collector</b>	n/a	Water
	<b>Fix Focus Trough</b>	100 - 200	Water, steam, thermal oil, air
	<b>Linear Concentrating Fresnel Collector</b>	100 - 400	Water, steam, thermal oil

---

---

	<b>CHAPS</b> Combined Heat and Power Solar collector	80 - 150	Water
---	---	----------	-------

---

## 2.5 FLUÍDOS TÉRMICOS

Como se pode observar no quadro 2-5 o fluido utilizado nos coletores solares de baixa e média temperatura é água ou água com etileno glicol. Todavia neste caso deve-se assegurar que vapor não seja gerado no interior do absorvedor ou se isto vier a ocorrer que o mesmo se mantenha saturado, ou seja, com fase líquida presente.

O Quadro 2-6 mostra um elenco de fluidos térmicos (Dow Chemical) que podem ser utilizados no interior dos receptores dos coletores concentradores, possibilitando operação com temperaturas de 300 °C na fase líquida, sem mudança de fase, e em baixas pressões.

Assim, o Quadro 2-6 servirá como referência para a escolha do fluido que melhor atende o cenário analisado em nosso estudo.

Quadro 2-6 - Opções de fluídos da Dowtherm

Typical Properties <sup>1</sup>	Temperature Use Range, °F	Vapor Pressure, psia at max. use temp.	Thermal Conductivity, Btu/(hr · ft <sup>2</sup> )(°F/ft)	Specific Heat, Liquid, Btu/(lb · °F)	Viscosity, cps	Density, Liquid, lb/ft <sup>3</sup>	Freezing Point, °F	Flash Point, °F	Autoignition Temperature, °F	Closed Cup	ASTM E659-78
<b>DOWTHERM® A</b> Diphenyl Oxide/ Biphenyl Blend	60 to 750 (495° to 750)	152.02 (0.045)	0.081 (0.045)	0.373 (0.644)	4.91 (0.13)	66.37 (42.57)	53.6	236	1139		
<b>DOWTHERM® G</b> Mixture of Di- and Tri-Aryl Ethers	20 to 680	49.12	0.074 (0.047)	0.363 (0.565)	146 (0.23)	70.34 (51.68)	<40	266	1083		
<b>DOWTHERM® J</b> Alkylated Aromatic	-110 to 600 (358° to 600)	174.52 (0.037)	0.086 (0.721)	0.376 (0.164)	9.67 (35.46)	58.31 (35.46)	<100	136	788		
<b>DOWTHERM® HT</b> Partially Hydrogenated Terphenyl	25 to 650	14.17	0.072 (0.061)	0.376 (0.656)	1815 (0.331)	63.54 (48.36)	25	342	662		
<b>DOWTHERM® Q</b> Mixture of Diphenylethane and Alkylated Aromatics	-30 to 625	48.08	0.084 (0.048)	0.353 (0.618)	48.2 (0.187)	63.23 (45.88)	-30	249	773		
<b>DOWTHERM® RP</b> Diaryl Alkyl	30 to 660	13.63	0.0775 (0.0513)	0.372 (0.621)	249 (0.32)	65.25 (49.12)	<4	381	725		
<b>DOWTHERM® MX</b> Mixture of Alkylated Aromatics	-10 to 625	15.1	0.0735 (0.0523)	0.351 (0.625)	281.7 (0.20)	61.9 (44.8)	-13	329	788		
<b>DOWTHERM® T</b> C <sub>14</sub> to C <sub>30</sub> Alkyl Benzene Derivatives	14 to 550	2.6	0.081 (0.043)	0.446 (0.659)	252 (0.39)	55.81 (43.03)	<14	370	70 <sup>b</sup>		
<b>SYLTHERM® 800<sup>c</sup></b> Polydimethylsiloxane	-40 to 750	197.32 (0.037)	0.085 (0.539)	0.360 (0.25)	51.0 (34.3)	61.9 (34.3)	<40	320 <sup>a</sup>	725 <sup>a</sup>		
<b>SYLTHERM® XLT</b> Polydimethylsiloxane	-150 to 500	75.46	0.078 (0.0295)	0.320 (0.541)	90.17 (0.18)	59.3 (35.2)	-158 (35.2)	116	662 <sup>a</sup>		
<b>SYLTHERM® HF</b> Polydimethylsiloxane	-100 to 500	39.76 (0.0274)	0.0752 (0.543)	0.347 (0.22)	16.65 (39.28)	60.31 (39.28)	<115	145	671 <sup>a</sup>		

<sup>1</sup>Properties shown are typical and should not be considered specifications.

<sup>a</sup>Properties for aged fluid except flash point, viscosity.

<sup>b</sup>Boiling Point at atmospheric pressure.

<sup>c</sup>Properties of fluid as supplied. Properties may differ after extended use.

## 2.6 GERADORES DE VAPOR - THERMAX

Um gerador de vapor para operar com fluido térmico como fonte quente é basicamente composto por um trocador de calor tipo casco e tubo acoplado a um balão armazenador de vapor saturado.

Com o calor contido no fluido térmico é possível gerar o vapor necessário para o processo de produção de biodiesel, através de geradores de vapor deste tipo.

Na Figura 2-8 é apresentado o modelo tridimensional de um gerador de vapor solar, da Thermax, onde o circuito em vermelho é percorrido pelo fluido em alta temperatura, e o vapor gerado percorre o circuito em amarelo. Os tubos em azul fazem a recirculação entre o trocador de calor e o balão armazenador.

As origens e destino dos fluidos componentes do sistema estão mostrados na Figura 2-7.

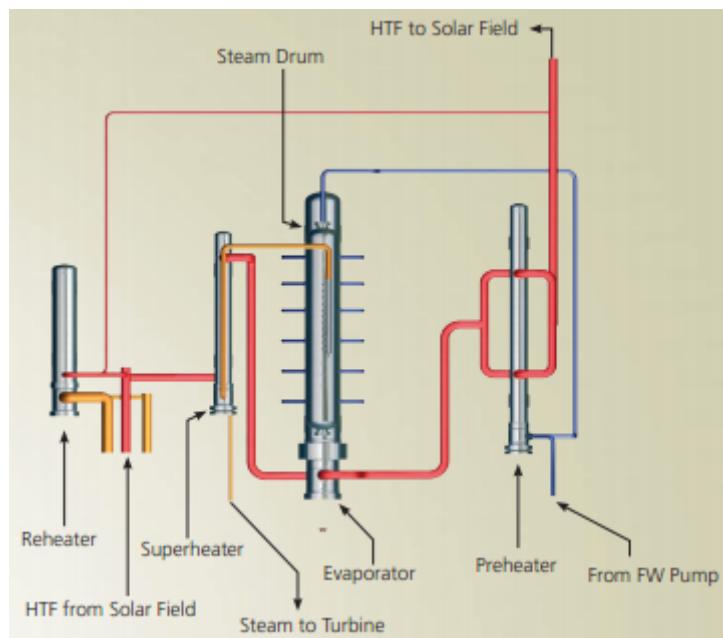


Figura 2-7 - Fluxograma do Gerador Thermax

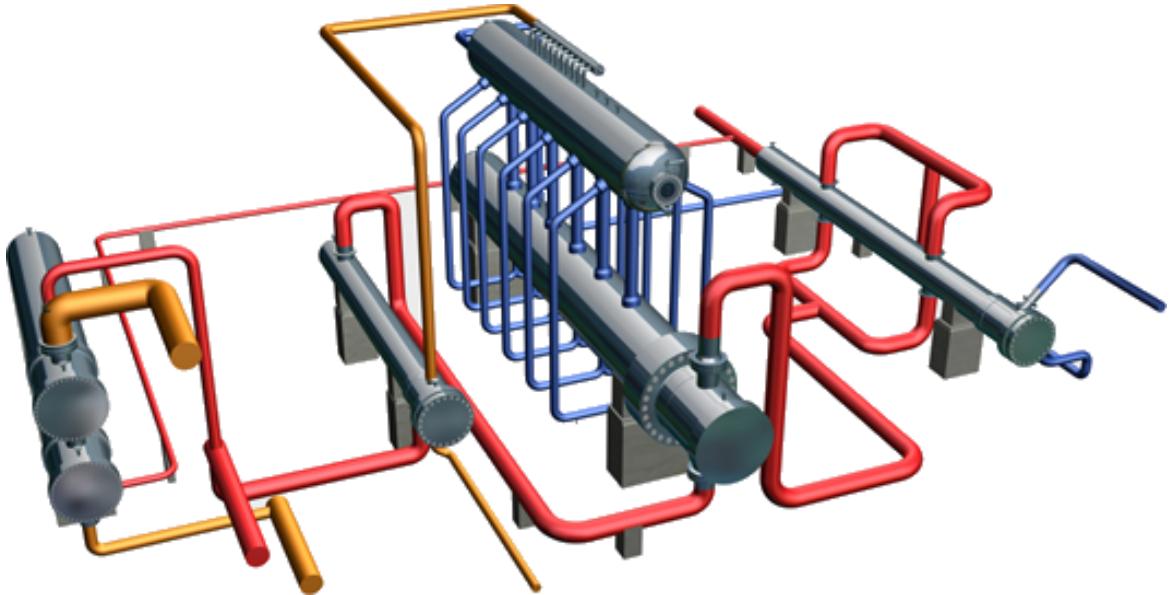


Figura 2-8 – Esquema tridimensional do Gerador de Vapor Solar, da Thermax

Observe que o evaporador é composto por um trocador de calor aonde o fluido térmico efetua dois passes no interior dos tubos trocando calor com a água que está na carcaça. Esta, por circulação natural, se movimenta para o balão superior aonde ocorre separação da fase líquida daquela do vapor.

Neste caso o vapor saturado removido do balão e que poderia ir diretamente para o processo é dirigido para um superaquecedor, pois a figura pressupõe seu envio para uma turbina de geração de energia elétrica.

### 3 Componentes do Sistema e Métodos de Cálculo

#### 3.1 COMPONENTES

Para dimensionar o sistema previsto nesse estudo se propõe que a demanda energética da planta deverá ser suprida em 60% no melhor mês de insolação - este valor foi escolhido como exercício a que se propõe esta monografia de divulgar a possibilidade de emprego da energia solar térmica em processos industriais através da geração de vapor de baixa pressão.

A melhor proporção evidentemente dependerá de cada processo real e condições de preço e energia de mercado constituindo um estudo meticuloso fora do escopo desta monografia.

O sistema proposto está ilustrado na Figura 3-1, e é composto por:

- Coletor concentrador solar, responsável por converter a energia solar em térmica, através do aquecimento de um fluído;
- Reservatório, onde o fluido térmico fica armazenado para ser utilizado quando necessário;
- Aquecedor de fluido térmico, por exemplo, por gás combustível. Sua função é elevar a temperatura do fluido térmico do valor em que se encontra no reservatório para aquele especificado para a entrada do gerador de vapor.
- Gerador de vapor Thermax, que, através da energia térmica contida no fluido, gera vapor a ser utilizado no processo de produção de biodiesel.

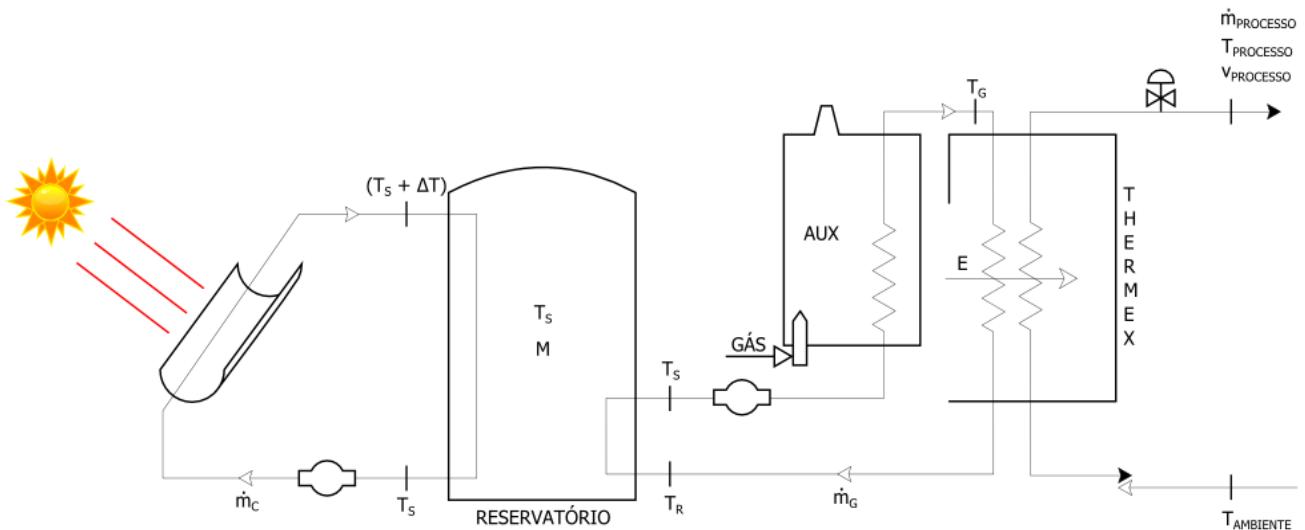


Figura 3-1 - Componentes do sistema de captação de energia solar para geração de vapor

### 3.2 DESCRIÇÃO DA USINA OBJETO DE ENSAIO

Para realizar esse estudo optou-se por considerar uma planta na região de Piracicaba (latitude  $\phi = 22^{\circ}43'30''S = -22,72^{\circ}$ ), capaz de produzir 13.715 litros de biodiesel por dia – considerando a massa específica do biodiesel  $875 \text{ kg/m}^3$  (dentro da faixa da ANP (COSTA, 2009)<sup>5</sup>), equivale a 12.000 kgs de biodiesel por dia, ou 500 kg/h.

Segunda Costa, 2009, para produzir 98,45 kg/h de biodiesel, uma planta consome 334,9 kg/h de vapor, ou seja, para produzir 500 kg/h de biodiesel, a usina objeto de ensaio precisaria consumir  $\dot{m}_{\text{PROCESSO}} = 1.700,86 \text{ kg/h}$  (40.820,72 kg/dia) de vapor, gerado pelo equipamento da Thermax.

### 3.3 GERADOR DE VAPOR THERMAX

O gerador de vapor Thermax, mostrado no item 2.6, é responsável por captar a energia contida no fluido térmico e gerar o vapor para atender a demanda da planta.

O vapor gerado neste caso destina-se a atender às necessidades de aquecimento de processo, por isso sua geração é saturado em baixa pressão, sendo escolhida pressão  $P_{\text{PROCESSO}} = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$  e temperatura  $T_{\text{PROCESSO}} = 134^{\circ}\text{C}$ .

Para gerar 1 kg de vapor saturado partir de água a  $20^{\circ}\text{C}$  são necessárias 630 kcal. Supondo o rendimento para geração de vapor do Thermax  $\eta=90\%$ , a energia a ser fornecida pelo fluido térmico será de 700 kcal/kg, ou para gerar 40.820,64 kg/dia de vapor o gerador Thermax deverá receber do fluido térmico  $28,57 \cdot 10^6 \text{ kcal/dia}$ , ou  $E = 119,62 \cdot 10^3 \text{ MJ/dia}$ .

### 3.4 FLUÍDO TÉRMICO

Para gerar o vapor proposto no item 3.3, o fluído térmico deve entrar no gerador com temperatura  $T_G = 280^\circ\text{C}$ , saindo a  $T_R = 250^\circ\text{C}$ , sofrendo uma variação de  $30^\circ$ .

O fluido Downtherm A, mostrado no Quadro 2-6, pode ser considerado uma opção válida para ser usado na solução proposta, com as seguintes características:

Quadro 3-1 - Características do fluido térmico Dowtherm A

Característica	Unidade	Valor	
		Temp. mínima	Temp. máxima
Faixa de Operação	°C	15	400
Viscosidade	cps	4,91	0,13
Calor Específico ( $c_P$ )	$\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$1,56 \ 10^{-3}$	$2,69 \ 10^{-3}$
Densidade	$\text{Kg m}^{-3}$	1.063,15	681,91
Condutibilidade Térmica	$\text{MJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$1,73 \ 10^{-3}$	$0,08 \ 10^{-3}$

Como será necessário oferecer  $E = 119,62 \ 10^3 \text{ MJ/dia}$  de energia pelo fluido térmico, podemos calcular a vazão mássica através da equação  $\dot{m}_G = \frac{E}{c_P * \Delta T}$ .

Usando  $c_P = 2,0 \ 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  é preciso uma vazão de  $\dot{m}_G = 8,29 \ 10^4 \text{ kg/h}$ , que com uma densidade média de  $800 \text{ kg/m}^3$  resulta numa vazão de recirculação de  $104 \text{ m}^3/\text{h}$  o que permite também considerar possíveis bombas responsáveis pela circulação do fluido entre o reservatório e um ou mais geradores Thermax.

### 3.5 ESTIMATIVA DA ENERGIA DISPONIBILIZADA PELO COLETOR SOLAR

Considerando que a usina se localiza em Piracicaba ( $\phi = -22,72^\circ$ ), e que o coletor escolhido conseguiria uma conversão térmica com um rendimento  $\eta$  de, pelo menos, 50%.

O Quadro 3-2 mostra a energia térmica absorvida, em forma em calor, média mensal diária, em  $\text{MJ/m}^2\text{*dia}$ .

Quadro 3-2 - Cálculo da energia térmica média diária absorvida, em função dos meses

Mês	$\phi$ (°)	n	$\delta$ (°)	$\beta$ (°)	$\omega_s$ (°)	$\bar{H}$ ( $\text{MJ/m}^2$ )	$\bar{H}_0$ ( $\text{MJ/m}^2$ )	$\bar{K}_T$	$\bar{H}_d$ $\bar{H}$	$\bar{R}_b$	E ( $\text{MJ/m}^2$ )
Jan	-22.72	17	-20.92	1.8	98.4	16.0	41.83	0.38	0.55	0.99	3.55
Fev	-22.72	47	-12.95	9.8	93.0	16.0	39.56	0.40	0.52	1.06	4.08
Mar	-22.72	75	-2.42	20.3	90.1	14.0	35.57	0.39	0.51	1.08	3.72
Abr	-22.72	105	9.41	32.1	86.0	12.0	30.00	0.40	0.48	1.07	3.32
Mai	-22.72	135	18.79	41.5	81.8	10.0	24.96	0.40	0.47	1.03	2.76
Jun	-22.72	162	23.09	45.8	79.7	10.0	22.49	0.44	0.42	1.01	2.89
Jul	-22.72	198	21.18	43.9	80.7	11.0	23.48	0.47	0.41	1.02	3.30
Ago	-22.72	228	13.45	36.2	84.3	12.0	27.62	0.43	0.45	1.06	3.50
Set	-22.72	258	2.22	24.9	89.1	13.0	33.13	0.39	0.50	1.08	3.50
Out	-22.72	288	-9.60	13.1	91.6	16.0	38.00	0.42	0.50	1.07	4.30
Nov	-22.72	318	-18.91	3.8	96.7	16.0	41.05	0.39	0.54	1.03	3.76
Dez	-22.72	344	-23.05	-0.3	100.3	16.0	42.21	0.38	0.56	1.00	3.50

Para calcular a declinação solar  $\delta$ , foi considerado o número do dia (n) médio sugerido por Duffie & Beckman, 1991, para cada mês.

Este coletor será movimentado mês-a-mês de tal maneira que a diferença entre a declinação  $\delta$  e a inclinação  $\beta$  resulta na latitude, ou seja,  $\phi = \delta - \beta$ .

O gráfico da Figura 3-2 mostra a distribuição da energia térmica absorvida, em  $\text{MJ/m}^2$  de coletor, mostrando que Outubro é o mês com maior capacidade de conversão (4,30  $\text{MJ/m}^2\text{*dia}$ ), e será usada para os demais cálculos.

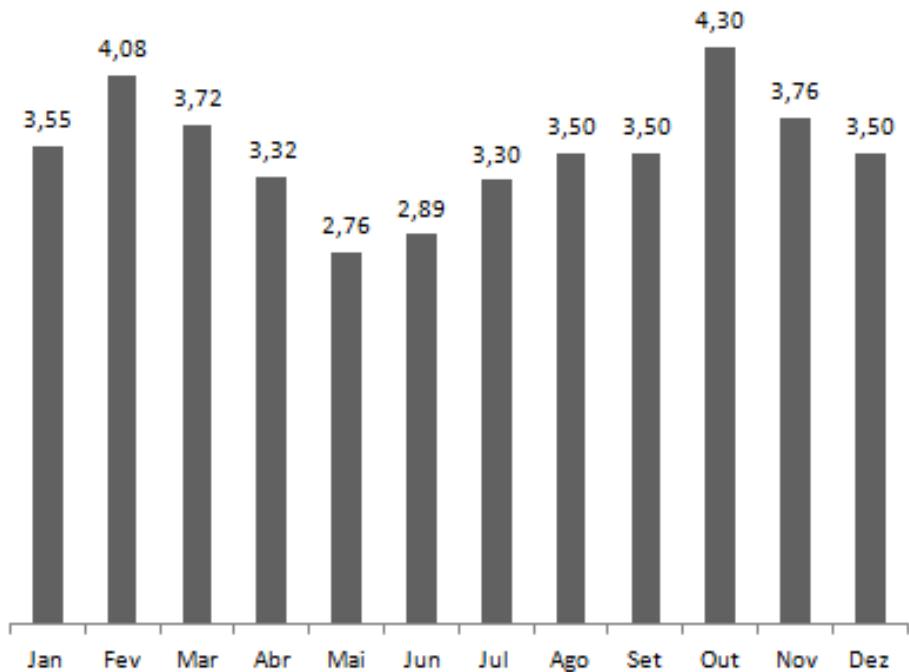


Figura 3-2 - Distribuição da energia diária média, em  $\text{MJ/m}^2\text{dia}$ , gerada em função dos meses

### 3.6 ARMAZENAMENTO

O balanço térmico do reservatório indicado na Figura 3-1, supondo a aproximação de mistura perfeita que resultaria em temperatura uniforme no interior do reservatório, pode ser escrito como:

$$Mc_P \frac{dT_S}{dt} = \dot{m}_G c_P T_R + \dot{m}_C c_P (T_S + \Delta T) - \dot{m}_G c_P T_S - \dot{m}_C c_P T_S.$$

Resolvendo a equação acima, no formato  $A \frac{dT_S}{dt} = -BT_S + C$ , onde  $A = Mc_P$ ,  $B = \dot{m}_G c_P$  e  $C = \dot{m}_C c_P \Delta T + \dot{m}_G c_P T_R$ , temos  $T_S(t) = \frac{C}{B} + \left(T_{S0} - \frac{C}{B}\right) e^{-\frac{A}{B}t}$ , que nos permite calcular a temperatura do fluido no reservatório  $T_S$  em função do tempo.

É importante notar que no período sem insolação a vazão do fluido que passa pelos coletores é  $\dot{m}_C = 0$ .

## 4 Resultados

### 4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAMPO DE COLETORES

Considerando a distribuição de potencial mostrado no gráfico da Figura 3-2, temos que o mês com melhor captação solar é o mês de Outubro, com  $4,30 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$ , enquanto o mês com menor captação é Maio, com  $2,76 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$ .

Adotando o coletor solar Fasol Parabolic Trough Collector, mostrado no Quadro 2-5, temos as seguintes características:

Quadro 4-1 - Características do Fasol Parabolic Trough Collector

Característica	Valor
Área de abertura $A_C$	$2,62 \text{ m}^2$
Comprimento $L_C$	$6,00 \text{ m}$
Distância Focal $L_F$	$0,70 \text{ m}$
Rendimento $\eta_0$	$0,70 \text{ a } 0,75$
Diâmetro do Tubo Receptor $d_R$	$1,5 \text{ pol} = 38,1 \text{ mm (estimado)}$
Velocidade Média no tubo $\bar{v}$	$1,5 \text{ m/s (estimado)}$

Dos valores acima se obtém que a área da secção transversal do tubo  $\frac{\pi d_R^2}{4}$  é  $1,14 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  e, portanto, a vazão do fluido no tubo de um único coletor é  $\dot{V}_C = 6,16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Para atender a demanda proposta nesse estudo – 60% de toda a demanda da planta no mês de Outubro, ou seja, 60% de  $1,19 \cdot 10^5 \text{ MJ/dia} = 7,14 \cdot 10^4 \text{ MJ/dia}$  – deve-se considerar que cada coletor é capaz de fornecer  $2,62 \cdot 4,30 = 11,27 \text{ MJ/dia}$ , sendo preciso, portanto, o mínimo de 6.335,4 coletores, com  $16.598,75 \text{ m}^2$  de área.

Para compor a área de 16.598,75 m<sup>2</sup> considere a Figura 4-1, um dos arranjos possíveis, que ilustra um arranjo com 80 linhas de 2 bancos em paralelo, onde cada banco possui 40 coletores organizados com eixo leste-oeste conectados em série.

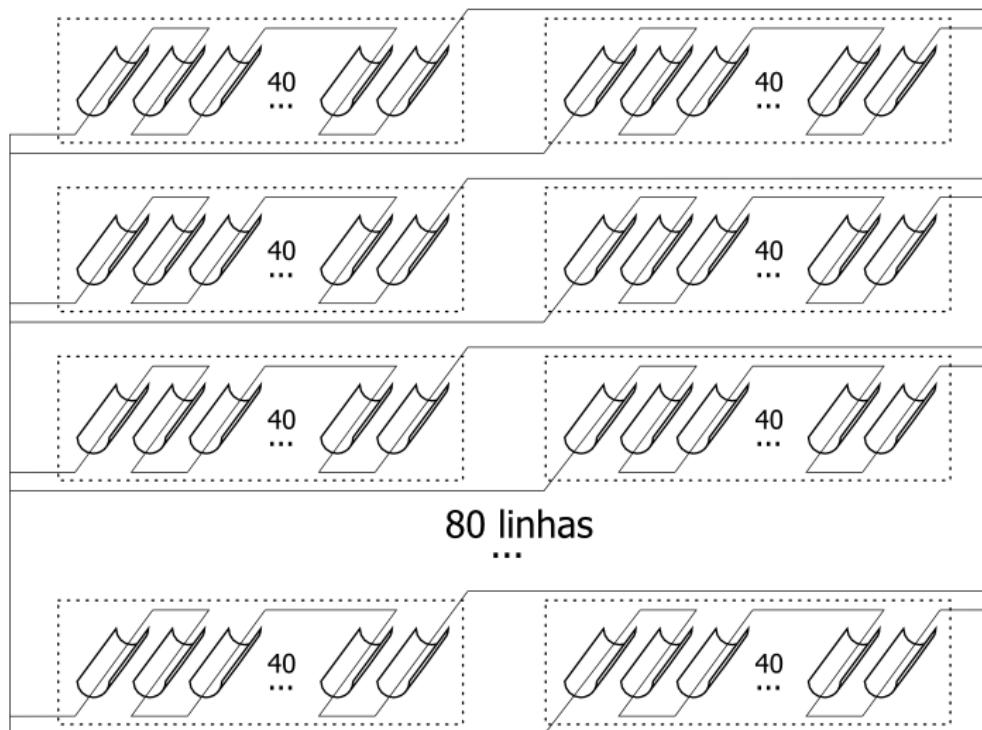


Figura 4-1 - Arranjo proposto para o campo de coletores

Para compor esse arranjo estamos considerando usar 80 linhas de 2 bancos de 40 coletores, ou seja,  $80 * 2 * 40 = 6.400$  coletores, com 16.768 m<sup>2</sup> de área, e obtendo, em média, **72.128 MJ/dia em Outubro**, o que equivale a **60,61% da carga térmica total**.

De acordo com o fornecedor o preço unitário do coletor é €150/m<sup>2</sup>, o que nos permite concluir que o preço para aquisição dos coletores necessários seria **€2.515.200,00**.

Outro aspecto importante do campo de coletores é a área útil de planta que seria necessário alocar para posicionar os painéis. Dado a área de abertura  $A_C$  e o comprimento  $L_C$  de cada painel, mostrado na Quadro 4-1, calcula-se a corda  $C_C = A_C / L_C = 0,44\text{m}$ . Considerando que a sombra de um painel não deve obstruir a

incidência do sol no painel adjacente, podemos considerar que serão posicionados, lateralmente, 1 painel a cada 1,0 m.

Como o arranjo está desenhado para posicionar 80 coletores lado-a-lado – formando uma fila, e cada fila estaria separada da outra por 0,5 m, podemos calcular que a área total ocupada pelo arranjo é dada por 80 coletores (fila) \* 1 m (distância lateral por coletor) \* 6,5 m (comprimento por coletor) \* 80 filas, ou seja, **A<sub>Ocupada</sub> = 41.600 m<sup>2</sup>**. Esta área é equivalente a de um quadrado com 204 m de lado.

#### 4.2 CÁLCULO DA VAZÃO DO CAMPO DE COLETORES $\dot{m}_c$

Sabendo-se a densidade do fluido  $\rho_{FLUIDO} = 800 \text{ kg m}^{-3}$ , a vazão de cada banco é dada por  $\dot{m}_{BANCO} = \rho_{FLUIDO} * \dot{V}_c = 4.928 \text{ kg/h}$ .

Como temos 80 linhas com 2 bancos em paralelo, temos que  $\dot{m}_c = 80 * 2 * \dot{m}_{BANCO}$ , ou seja,  **$\dot{m}_c = 7,88 \cdot 10^5 \text{ kg/h}$** .

#### 4.3 GANHO DE TEMPERATURA $\Delta T$ DO CAMPO DE COLETORES

Como cada coletor é capaz de coletar 11,27 MJ/dia, considerando o banco com 40 coletores temos um total de 450,80 MJ/dia para cada banco.

Sabe-se também que a taxa de energia que poderá ser coletada por banco é dada por  $\dot{Q}_{BANCO} = \dot{m}_{BANCO} * c_p * \Delta T$ , ou seja,  $\Delta T = \frac{\dot{Q}_{BANCO}}{\dot{m}_{BANCO} * c_p}$ .

Supondo que o campo de coletores estará em funcionamento 6 horas por dia, temos que a taxa média de energia coletada por banco será 450,80 MJ / 6 horas, ou seja,  $\dot{Q}_{BANCO} = 75,13 \text{ MJ/h}$ .

Considerando o calor específico do fluido  $c_p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , temos  $\Delta T = 7,62^{\circ}\text{C}$ .

## 4.4 VOLUME DO RESERVATÓRIO

A equação  $T_S(t) = \frac{C}{B} + \left(T_{S0} - \frac{C}{B}\right) e^{-\frac{A}{B}t}$ , originada do balanço térmico do reservatório (mostrada no item 3.6), deve ser analisada tanto para o período de 6 horas, onde temos o aquecimento do fluido pelo campo de coletores, quanto para o período de 18 horas, onde a vazão  $\dot{m}_C$  é zero.

O objetivo dessa análise é encontrar uma quantidade de fluido no reservatório tal que o campo de coletores consiga aquecer rapidamente, mas que também seja capaz de armazenar energia térmica durante o período em que o campo não estiver atuando.

Considere os parâmetros já calculados:  $\dot{m}_G$ ,  $\dot{m}_C$ ,  $T_R$ ,  $T_S$  e  $\Delta T$ .

Quadro 4-2 - Comportamento da temperatura no tanque, sem a atuação dos coletores

Reservatório		Parâmetros			Evolução (por hora) da temperatura no tanque				
M(kg)	V(m <sup>3</sup> )	A	B	C	1	2	...	17	18
700000	875	1400			276.65	273.67	...	254.01	253.56
800000	1000	1600			277.05	274.38	...	255.15	254.65
900000	1125	1800			277.36	274.95	...	256.27	255.72
1000000	1250	2000	166	41450	277.61	275.42	...	257.33	256.75
1100000	1375	2200			277.82	275.80	...	258.33	257.73
1200000	1500	2400			278.00	276.13	...	259.27	258.65
1300000	1625	2600			278.15	276.41	...	260.15	259.52
1400000	1750	2800			278.28	276.65	...	260.96	260.33

O Quadro 4-2 mostra os resultados da análise no período sem atuação dos coletores, onde o fluido está inicialmente a  $T_{S0} = 280^\circ\text{C}$ , pois acabou de passar pelo ciclo de aquecimento no campo de coletores. Note que, para as massas propostas na análise, após as 18 horas ainda há uma quantidade de calor armazenada no reservatório.

Quadro 4-3 - Comportamento da temperatura no tanque, com a atuação dos coletores.

Reservatório		Parâmetros			Evolução (por hora) da temperatura no tanque				
M(kg)	V(m <sup>3</sup> )	A	B	C	1	...	4	5	6
700000	875	1400			258.09	...	277.33	282.37	286.84
800000	1000	1600			257.13	...	274.58	279.29	283.54
900000	1125	1800			256.37	...	272.32	276.73	280.75
1000000	1250	2000			255.76	...	270.44	274.58	278.39
1100000	1375	2200	166	53459	255.26	...	268.85	272.74	276.35
1200000	1500	2400			254.83	...	267.49	271.16	274.58
1300000	1625	2600			254.47	...	266.31	269.77	273.03
1400000	1750	2800			254.16	...	265.28	268.56	271.66

Já o Quadro 4-3 mostra os resultados da análise para o período em que há a atuação dos coletores, e é possível notar que, rapidamente, o fluído no reservatório passa de  $T_{S0} = 250^{\circ}\text{C}$  para a temperatura de  $280^{\circ}\text{C}$ .

Através da comparação dos dois resultados sugere-se um reservatório capaz de armazenar **M = 800.000 kgs** do fluido, que ocuparia um volume de **1.000 m<sup>3</sup>** – o que equivale a um cilindro de 13 m de altura e 10 m de diâmetro. Volume este compatível com aqueles encontrados na indústria química em geral.

#### 4.5 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Após os cálculos realizados, o sistema proposto apresenta os seguintes valores, ilustrados na Figura 4-2.

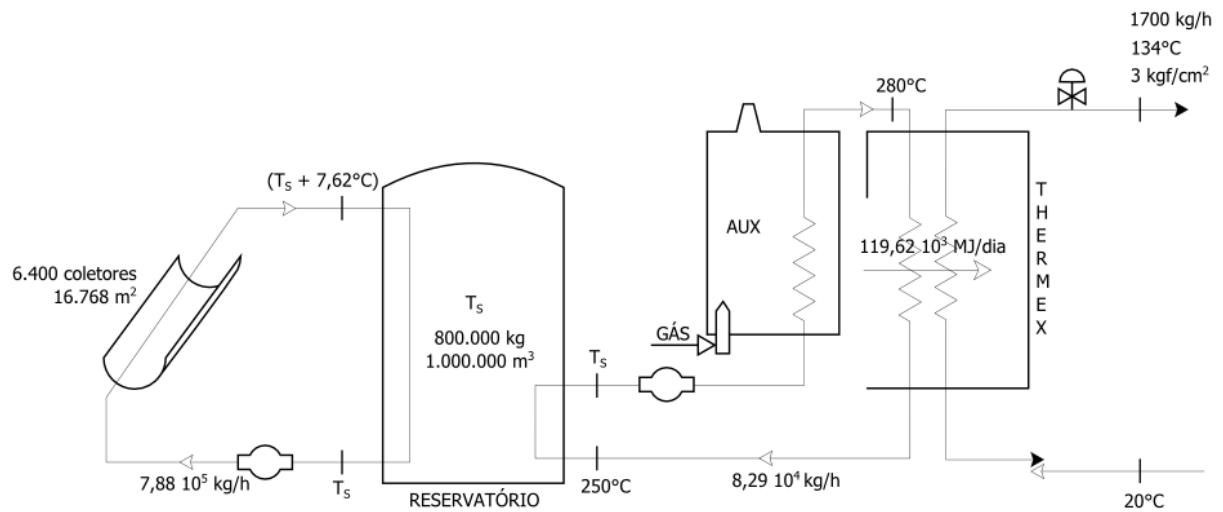


Figura 4-2 - Componentes do sistema com os valores calculados

## 5 Discussões

### 5.1 PREVISÃO PARA CONSUMO DE GÁS NO PROCESSO

Os resultados obtidos no item 4 indicam que a temperatura  $T_s$  do fluido não é suficiente para atender a demanda do processo ( $280^\circ\text{C}$ ), e que será necessário consumir uma quantidade de gás para elevar a temperatura do fluido até a temperatura ideal.

A Figura 5-1 compara a participação do campo de coletores e do sistema auxiliar a gás ao longo de um dia médio, para o fluido atingir a temperatura ideal, considerando que o campo de coletores só estará ligado entre 10:00 e 16:00.

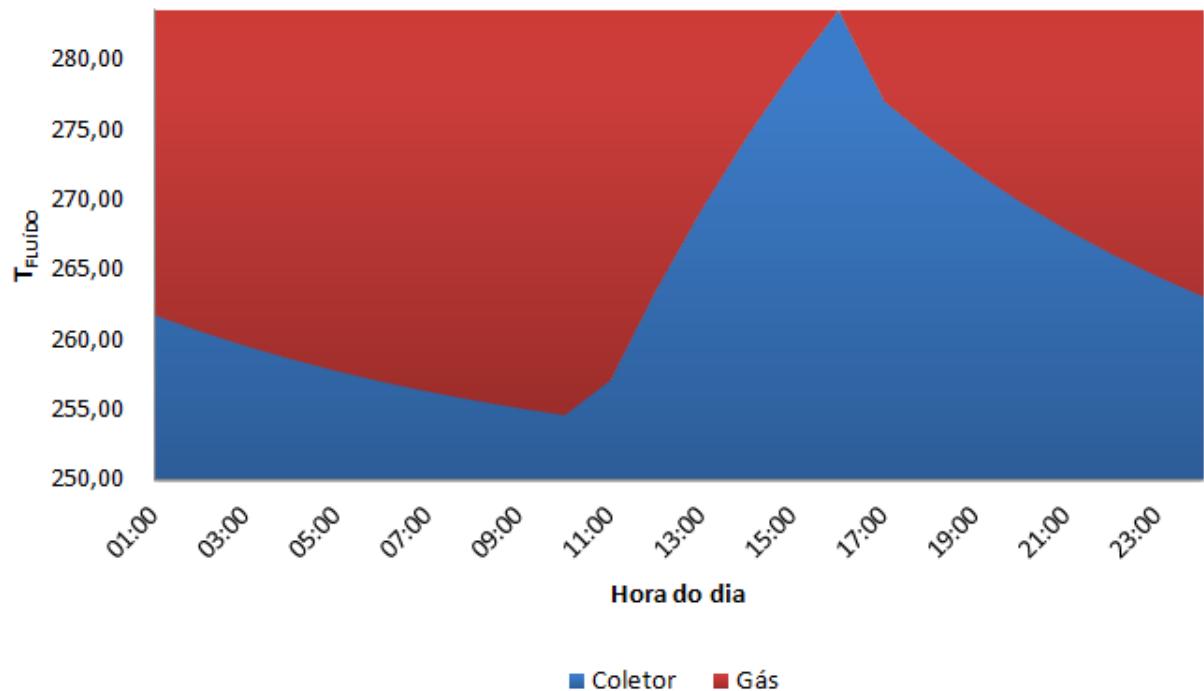


Figura 5-1 – Participação do campo de coletores e do sistema auxiliar a gás para aquecimento do fluido

Conforme discutido no item 4.1, o sistema dimensionado consegue suprir 60,61% da demanda diária, sobrando 39,39% de  $1,19 \cdot 10^5$  MJ/dia, ou seja,  $4,69 \cdot 10^4$  MJ/dia a ser obtido através da queima do gás natural.

Considerando o poder calorífico do gás natural  $PCI_{GÁS} = 39,35$  MJ/m<sup>3</sup>, serão consumidos  **$3,58 \cdot 10^4$  m<sup>3</sup>/mês** de gás.

## 5.2 RENDIMENTO DO CAMPO DE COLETORES NOS DEMAIS MESES

Através dos 6.400 coletores foi dimensionado um campo com 16.768 m<sup>2</sup> de área.

Conforme mostrado no Quadro 3-2, a energia média diária absorvida pelos coletores varia a cada mês, e a Figura 5-2 mostra a participação dos coletores, a cada mês, no fornecimento da energia necessária.

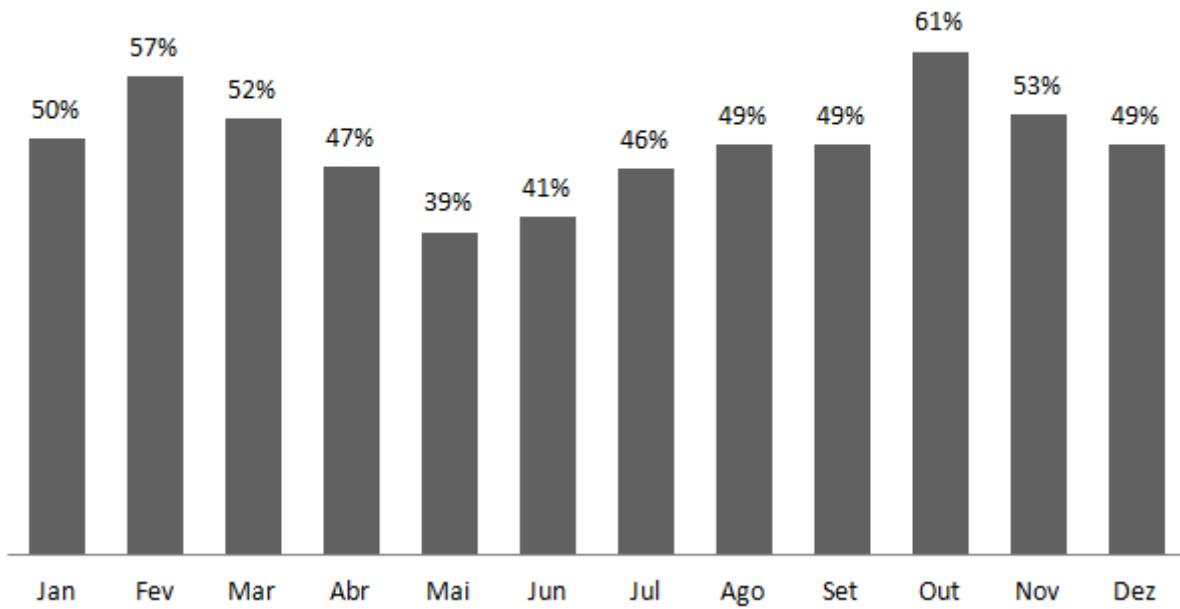


Figura 5-2 – Participação mensal na energia necessária para aquecer o fluído

É importante notar que foi utilizado um rendimento  $\eta = 50\%$ , que pode ser considerado conservador, diante do Parabolic Trough Collector, mostrado na Figura 5-3, que pode chegar a rendimentos próximos a 70%.

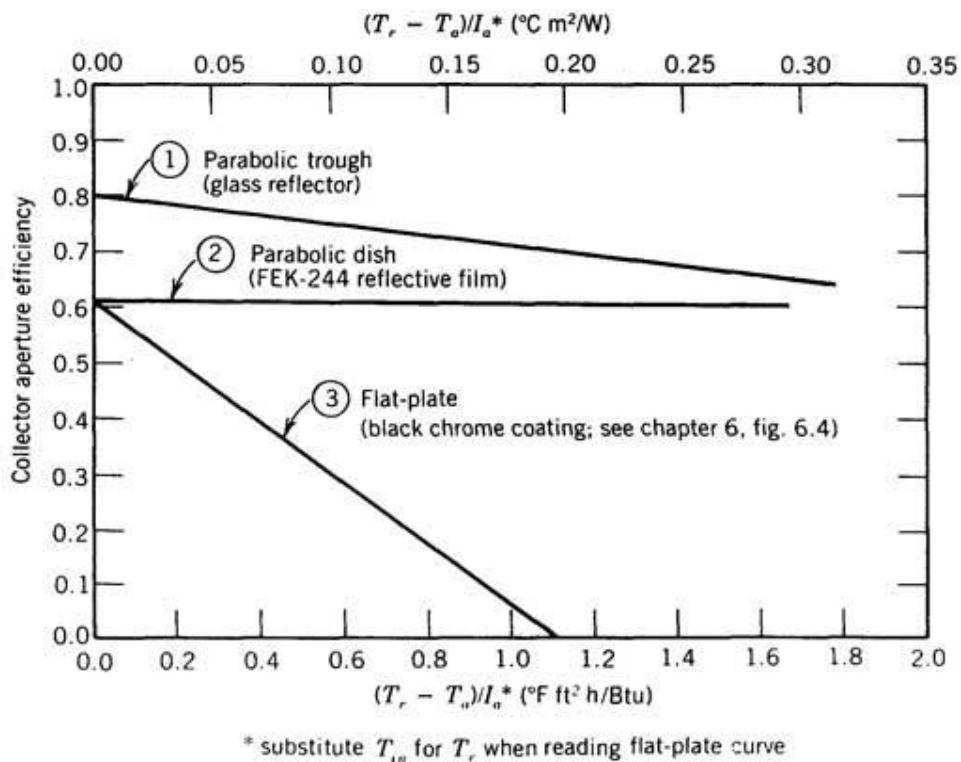


Figura 5-3 - Comportamento do rendimento do Parabolic Trough Collector

## 5.3 ANÁLISE DO INVESTIMENTO

Para analisar possíveis retornos financeiros é necessário considerar os custos para adquirir e montar a estrutura proposta no estudo, e comparar com a redução de custo com consumo do gás.

No item 4.1 concluiu-se que seriam necessários €2.515.200,00 para adquirir os coletores necessários. Também se pode considerar €500.000,00 como custo de todos os demais componentes, incluindo parte elétrica, segurança, estrutura do reservatório, tubulações, bombas, etc.

Assim, temos que o investimento inicial seria de, aproximadamente, €3.000.000,00 (três milhões de Euros).

Para comparar o investimento necessário, com a redução de consumo do gás, considere a Quadro 5-1.

Quadro 5-1 - Valores para consumo de gás

Volume m <sup>3</sup> /mês	R\$/mês (Fixo)	R\$/m <sup>3</sup> (Variável)
Até 50.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 169,61	R\$ 1,80
50.000,01 a 300.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 26.537,23	R\$ 1,27
300.000,01 a 500.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 44.228,72	R\$ 1,22
500.000,01 a 1.000.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 49.655,47	R\$ 1,20
1.000.000,01 a 2.000.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 71.836,66	R\$ 1,18
> 2.000.000,00 m <sup>3</sup>	R\$ 110.979,94	R\$ 1,16

O Quadro 5-2 mostra o consumo de gás com o uso dos coletores ao longo do ano, enquanto o Quadro 5-3 mostra como seria o consumo caso toda a energia fosse gerada a partir do gás.

Note que é possível reduzir aproximadamente €270.370,00 (R\$ 730.000,00) por ano e, como o investimento inicial previsto é €3.000.000,00, o retorno de um investimento baseado nesse estudo se daria em torno de 11 anos, desconsiderando-

se inflação e assumindo que o modelo de cobrança de gás também não sofreria mudanças significativas.

Quadro 5-2 - Consumo de gás ao longo do ano, utilizando os coletores

Mês	%GÁS	E <sub>GÁS</sub> (MJ)	m <sup>3</sup> <sub>GÁS</sub>	Fixo	Consumido	Total
Jan	50%	1.843.681,60	46.853,41	R\$ 169,61	R\$ 84.440,38	R\$ 84.609,99
Fev	43%	1.467.010,24	37.281,07	R\$ 169,61	R\$ 67.188,88	R\$ 67.358,49
Mar	48%	1.755.314,24	44.607,73	R\$ 169,61	R\$ 80.393,17	R\$ 80.562,78
Abr	53%	1.899.907,20	48.282,27	R\$ 169,61	R\$ 87.015,51	R\$ 87.185,12
Mai	61%	2.254.329,92	57.289,20	R\$ 26.537,23	R\$ 73.035,19	R\$ 99.572,42
Jun	59%	2.116.214,40	53.779,27	R\$ 26.537,23	R\$ 68.560,56	R\$ 95.097,79
Jul	54%	1.973.633,60	50.155,87	R\$ 26.537,23	R\$ 63.941,26	R\$ 90.478,49
Ago	51%	1.869.672,00	47.513,90	R\$ 169,61	R\$ 85.630,74	R\$ 85.800,35
Set	51%	1.809.360,00	45.981,19	R\$ 169,61	R\$ 82.868,46	R\$ 83.038,07
Out	39%	1.453.825,60	36.946,01	R\$ 169,61	R\$ 66.585,03	R\$ 66.754,64
Nov	47%	1.678.569,60	42.657,42	R\$ 169,61	R\$ 76.878,27	R\$ 77.047,88
Dez	51%	1.869.672,00	47.513,90	R\$ 169,61	R\$ 85.630,74	R\$ 85.800,35
					<b>Total ano</b>	<b>R\$ 1.003.306,38</b>

Quadro 5-3 - Consumo de gás ao longo do ano, sem utilizar os coletores

Mês	E <sub>GÁS</sub> (MJ)	m <sup>3</sup> <sub>GÁS</sub>	Fixo	Consumido	Total
Jan	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Fev	3.451.000,00	87.700,13	R\$ 26.537,23	R\$ 111.804,59	R\$ 138.341,82
Mar	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Abr	3.570.000,00	90.724,27	R\$ 26.537,23	R\$ 115.659,93	R\$ 142.197,16
Mai	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Jun	3.570.000,00	90.724,27	R\$ 26.537,23	R\$ 115.659,93	R\$ 142.197,16
Jul	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Ago	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Set	3.570.000,00	90.724,27	R\$ 26.537,23	R\$ 115.659,93	R\$ 142.197,16
Out	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
Nov	3.570.000,00	90.724,27	R\$ 26.537,23	R\$ 115.659,93	R\$ 142.197,16
Dez	3.689.000,00	93.748,41	R\$ 26.537,23	R\$ 119.515,26	R\$ 146.052,49
					<b>Total ano</b>
					<b>R\$ 1.729.497,85</b>

## 5.4 VALIDAÇÃO DO PARABOLIC TROUGH COLLECTOR ATRAVÉS DA TEMPERATURA INTERNA DO TUBO

De acordo com as características especificadas para o coletor escolhido nesse estudo, é possível mantê-lo em operação desde que a temperatura dos tubos não ultrapasse os 300°C.

Como a temperatura do fluido vai alcançar valores em torno de 280°C, é importante analisar se o aquecimento dos tubos não faça sua temperatura subir acima do limite especificado.

Com  $\mu = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ seg}^{-1}$ ,  $\rho = 0,8 \text{ g/cm}^3$ ,  $\bar{v} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ cm/s}$  e  $d_r = 3,81 \text{ cm}$ , temos o número de Reynolds  $R = \rho \bar{v} d_r / \mu = 18.288$  que, como é superior a 4.000, caracteriza que o fluido se comporta em regime turbulento dentro dos tubos do coletor.

Como  $f = (0,79 \ln(R) - 1,64)^{-2} = 0,0268$ ,  $k = 0,060 * 0,0173 = 0,0010 \text{ °C/cm}$  e  $c_p = 2,0 \text{ J g}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ , é possível calcular o número de Prandtl, dado por  $P_R = c_p \mu / k = 50$ , e o número de Nusselt  $N_u$ , dado por:

$$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) R P_R}{1,07 + 12,7 \sqrt{\left(\frac{f}{8}\right)} \left(P_R^{2/3} - 1\right)} = \frac{h d_r}{k}$$

Assim, temos que  $N_u = 301,54$  e  $h = 0,0791 \text{ W cm}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ .

Visto que a quantidade de energia que cada banco transmite ao fluido é dada por  $\dot{Q}_{Banco} = h A_{BANCO} \Delta t = 75,13 \text{ MJ h}^{-1}$ , e que  $A_{BANCO} = 40\pi d_r l_C = 287.267,23 \text{ cm}^2$ , temos  $\Delta t = \frac{h A_{BANCO}}{\dot{Q}_{Banco}} = 0,91 \text{ °C}$ , ou seja transferência de calor da superfície dos tubos para o fluido se faz na faixa de temperatura de operação indicada pelo fabricante do coletor.

## REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Informe à imprensa: Demanda de energia elétrica – 10 anos.** Rio de Janeiro: EPE, 2012. 3p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional: ano base 2010.** Rio de Janeiro: EPE, 2011.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global Wind Report: Annual Market Update 2011:** GWEC, 2012.

MPX - **Solar Tauá.** Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/solar-taua.aspx>>. Acesso em: 23 maio. 2012.

COSTA, R. A. B. **Estudo das Eficiências de Operação e Consumo de Energia em Plantas de Biodiesel.** 2009. 102 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, M. A. **A Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira: Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados ao seu Uso em Motores.** 2007. 130p. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN; W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 1991.

IEA International Energy Agency **Medium Temperature Collectors.** State of the Art. 2005