

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMA FRESNEL PARA USO INDUSTRIAL

Marcio André Nazareno Marques, marciomarkes@yahoo.com.br¹

Bruno Monte de Carvalho, bruno_monthth@hotmail.com¹

Jean-Marc Stephane Lafay, jeanmarc@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do conhecimento, Km 1, CEP 85503-390, Pato Branco – PR, Brasil

Resumo: Energia térmica de processo representa um terço do consumo de energia do setor industrial. Tradicionalmente é obtida a partir de combustíveis fósseis, lenha e energia elétrica. Os maiores percentuais de eficiência de conversão de energia solar ocorrem na conversão térmica. Dentre as tecnologias disponíveis a de concentradores de energia solar por concentração Fresnel linear vem obtendo destaque devido a relativa simplicidade tecnológica de seus componentes e baixo custo. Para a disseminação do uso desta tecnologia estudos de viabilidade técnica e econômica são necessários para as localidades em que se pretenderia aplicá-la.

Para selecionar os materiais bibliográficos foram utilizados os motores de busca do IEEE e Sciencedirect, utilizando as palavras chave Solar energy, concentrator, solar tracking, Fresnel combinados através do operador lógico OR, no período de 2012 à 2015 formando um banco de dados com 221 artigos. A partir destes foram identificados 53 artigos que apresentaram características de funcionamento de sistemas Fresnel e foram compilados os parâmetros e equacionamentos que determinam o desempenho desses sistemas.

O presente trabalho apresenta um método de determinação da viabilidade econômica a partir de dados de entrada de calor de processo e dados climatológicos do local de instalação. O equacionamento para o dimensionamento do sistema foi obtido a partir da realização do estado da arte de plantas de conversão de energia implantadas com a tecnologia Fresnel, permitindo identificar os principais parâmetros técnicos de dimensionamento que afetam os cálculos de viabilidade econômica. Aspectos como design do receptor, arranjo ótico dos espelhos que impactam a eficiência do coletor e uso de torres receptoras, assim como a determinação do campo solar em conjunto com a tubulação do concentrador se fazem necessários para o atendimento dos requisitos de energia demandada pelo calor de processo.

Palavras-chave: energia solar, concentrador, Fresnel, viabilidade econômica.

1. INTRODUÇÃO

O sol é responsável por quase todas as outras fontes de energia direta ou indiretamente, seja através do calor, do fenômeno da fotossíntese, da radiação solar captada de alguma maneira e transformada ou utilizada diretamente, ou até mesmo do petróleo que é gerado através de resíduos de plantas e animais que retiraram energia necessária para seu desenvolvimento da radiação solar, então em última instância pode-se dizer que quase todas as fontes de energia são derivadas do sol. Atualmente o homem está desenvolvendo métodos para utilizar essa energia, que é inesgotável se considerada a escala humana de tempo. A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica.

Através de cálculos óticos e dos princípios de transferência de calor é possível dimensionar um sistema solar para uso de aquecimento de fluido de trabalho empregado na indústria.

2. ENERGIA SOLAR

A energia solar é transmitida para nosso planeta através de radiação eletromagnética, constituída por ondas eletromagnéticas que possuem frequência e comprimento de ondas diferentes. Segundo Halliday (2009) a energia que uma onda pode transmitir está associada a sua frequência e quanto maior a frequência maior a energia transmitida. O comprimento da onda eletromagnética é inversamente proporcional a frequência. A equação de Planck-Einstein demonstra a relação entre frequência e energia de uma onda eletromagnética, como pode ser observado na Eq. (1).

$$E = h.f \quad (1)$$

Onde E é a energia da onda, f a frequência e h uma constante física de proporcionalidade chamada constante de Planck que tem o valor aproximado de $6,636 \cdot 10^{-34}$ [Joules.segundo].

O espectro da radiação solar é o conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol, sejam elas visíveis ou não, as quais transportam energia que podem ser captadas na forma de calor ou elétrica. A Fig. 1 demonstra alguns dados sobre irradiância espectral e comprimento de onda.

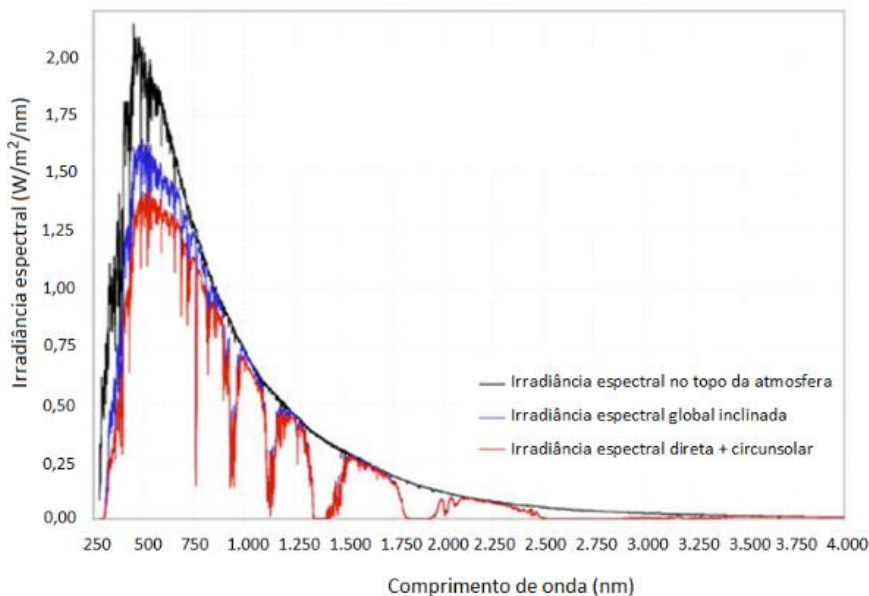


Figura 1. Distribuição espectral da irradiância no topo da atmosfera, da irradiância ao incidir perpendicularmente sobre uma superfície inclinada a 37° ao nível do mar e voltada para a linha do equador, da irradiância após atravessar uma massa de ar de 1,5, Adaptado de NREL (2012).

Pode-se utilizar a energia solar basicamente de duas formas: concentrada ou não concentrada. Um bom exemplo da utilização da energia solar térmica não concentrada é a utilização direta através de painéis fotovoltaicos, os quais são expostos diretamente a radiação solar e tem-se o princípio da conversão fotovoltaica. A tecnologia da energia solar térmica concentrada, conhecida como CSP (Concentrated Solar Power), consiste basicamente da utilização de concentradores para focar a radiação solar em um receptor, que em seguida aquece um fluido de transferência, que será transferido para uma etapa de armazenagem ou terá seu uso imediato. Para tal fim, o item primordial a ser observado é o tipo de espelhos que serão usados nos concentradores, além disso, deve-se maximizar a eficiência do sistema e analisar os custos e benefícios envolvidos.

Segundo Villalva (2013) “a captação do calor solar é a transformação da energia eletromagnética em energia térmica pelos corpos e materiais que recebem sua radiação. Quando essas ondas incidem sobre um corpo que tem a capacidade de absorver a radiação, a radiação é transformada em energia cinética e transmitida para as moléculas e átomos que compõem esse corpo, esse processo corresponde à transmissão de calor ou energia térmica. Já a transformação de radiação eletromagnética do sol em energia elétrica recebe o nome de efeito fotovoltaico”.

2.1 Energia solar e sua utilização

A energia solar é uma energia de baixo custo e as faixas de temperaturas obtidas com este tipo de energia variam de moderadas a altas. Para Kumara et al. (2015) em coletores de espelhos planos não se tem a possibilidade de temperaturas maiores que 100°C, porém em concentradores solares podem ser alcançadas temperaturas superiores a 3000 °C. A tecnologia utilizando energia de concentradores solares se mostra relevante devido à sua capacidade de suprir as demandas de energia elétrica e térmica. Uma vez que a temperatura de funcionamento da referida tecnologia é alta, tem-se uma eficiência termodinâmica melhor.

O Brasil pelo seu tipo de clima, pelos altos índices de insolação, tipo de indústrias presentes e seus tamanhos variados, possui um grande potencial a ser explorado para a utilização de sistemas de aquecimento solar de água nos processos industriais. Sua principal aplicação são os processos industriais os que utilizam água aquecida em baixas temperaturas, até aproximadamente 200°C, que representam aproximadamente 40% das aplicações de água aquecida na indústria, diretamente ou para pré-aquecimento nos processos de temperaturas mais elevadas. A fig. 2 demonstra o mercado brasileiro de aquecimento solar.

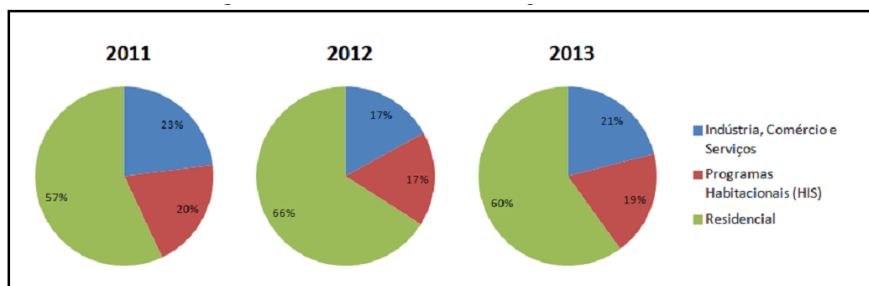


Figura 2. Mercado Brasileiro de aquecimento solar segundo DASOL (2013).

O gráfico da Fig. 2 se refere a área instalada por setor de atividade, onde 60% é destinada a fins residenciais, cerca de 20% em residências de programas habitacionais sociais e restante é compartilhado entre indústria, comércio e serviços.

3. COLETORES SOLARES

Os coletores são dispositivos que transformam a energia da radiação em energia térmica e são os principais componentes de qualquer sistema solar térmico. Este dispositivo absorve a radiação solar, a converte em calor, e transfere esse calor a um fluido específico, o qual flui através de um coletor. Assim a energia solar coletada é transmitida para o fluido circulante, que pode ser utilizado imediatamente ou acondicionado em um local específico.

Segundo Kalogirou (2004) pode-se separar os coletores solares em duas grandes categorias: não concentrados ou estacionários e concentrados. Os coletores não concentrados possuem a mesma área para interceptar e para absorver a radiação solar, enquanto os coletores concentrados geralmente possuem superfícies côncavas para interceptar os raios solares e direcioná-los para uma área de recepção menor, aumentando assim o influxo de radiação.

Os coletores solares estacionários ainda podem ser classificados em outras três categorias: Coletores Planos (Flat Plate Collectors, FPC), Coletores de Tubos de Vácuo (Evacuated Tube Collectors, ETC) e Coletores Parabólicos Compostos, (Compound Parabolic Collector CPC). Já os coletores concentrados, aos quais pertence o Concentrador Linear Fresnel (Linear Fresnel Reflector, LFR), se classificam em mais categorias. A Fig. 3 demonstra algumas das tecnologias utilizadas atualmente em concentradores solares.

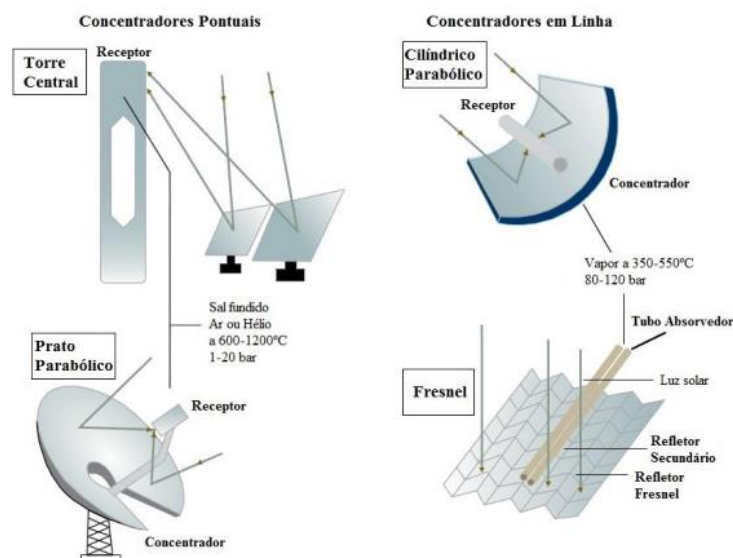


Figura 3. Exemplos de concentradores solares segundo Miller (2012).

Tyagi (2012) cita que há uma grande disponibilidade de coletores solares no mercado, os quais podem ser visualizados na Tab. 1.

Tabela 1. Coletores de energia solar segundo Kalogirou (2004).

Tipo de movimento	Tipo de Coletor	Tipo de Absorção	Relação de Concentração*	Faixa de temperatura (°C)
Estacionário	Coletor de prato plano	Plano	1	30 - 80
	Coletor de tubo de vácuo	Plano	1	50 - 200
	Coletor parabólico composto	Tubular	1 - 5	60 - 240
Eixo simples			5 - 15	60 - 300
	Refletor linear Fresnel	Tubular	10 - 40	60 - 250
	Coletor de calha parabólica	Tubular	15 - 45	60 - 300
	Coletor de calha cilíndrica	Tubular	10 - 50	60 - 300

Eixo duplo	Prato refletor parabólico	Pontual	100 - 1000	100 - 500
	Coletor de campo heliostático	Pontual	100 - 1500	150 - 2000

* Relação de concentração é definida como a área de abertura dividida pela área do absorvedor/receptor do coletor.

3.1 Coletores Fresnel

Giorgio Francia foi o pioneiro na utilização do princípio de coletores lineares Fresnel (por volta dos anos 60 na Itália ele desenvolveu um sistema tanto linear quanto de dois eixos). Para Francia (1968) a grande vantagem se dá pelo uso de refletores planos ou elasticamente curvados que são mais baratos se comparados com refletores parabólicos de vidro (quanto maior o diâmetro da circunferência maior a dificuldade de fabricação, sendo exigidos fornos especiais e tendo uma massa maior devido a quantidade de material utilizado), além de serem montados próximos ao solo, minimizando assim as componentes estruturais do sistema. Os dois primeiros trabalhos publicados nesta são os de Nelson (1975) e Collares (1979).

Segundo Mills (2001) em 1979, uma empresa chamada FMC Corporation produziu um estudo para a concepção de um projeto detalhado para usinas LFR para o Departamento de Energia dos EUA, sendo que a maior delas usaria um absorvedor de cavidade linear 1,68 quilômetros. Porém o projeto nunca foi executado, visto que não houve o financiamento do órgão interessado. Outro projeto relevante para produzir um sistema utilizando Fresnel foi feito pela empresa Paz no início dos anos 90 por Feuermann (1991). Estes utilizaram um coletor secundário do tipo parabólico composto com alta eficiência e um absorvedor de tubo de vácuo.

A tecnologia de Coletores Lineares Fresnel (CLF em português ou LFR mencionado anteriormente) se baseia no arranjo de uma série de faixas de espelhos lineares onde a luz é concentrada em um receptor fixo montado em um receptor secundário, como pode ser observado na Fig. 4.

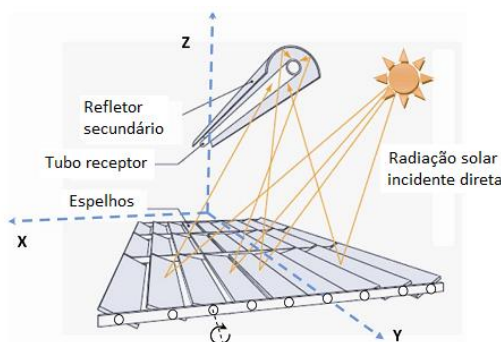


Figura 4. Modelo de um sistema utilizando Coletor linear Fresnel.

Para Miller et al. (2012) os refletores utilizados nas plantas CLF são espelhos baratos, de fácil fabricação e normalmente tem espessura de cerca de 1-2 mm. Isso permite que os espelhos sejam comprados de diferentes fabricantes em todo o mundo, diferente dos de calha parabólica, onde são necessários espelhos dobrados com alta precisão. Os espelhos Fresnel são relativamente baratos para a aquisição (cerca de US \$9,8 por metro quadrado), pesando cerca de 3 Kg, o que corresponde aproximadamente a um terço do peso de um espelho de calha parabólica, porém apresentam perdas óticas maiores devido à menor faixa de ângulos de incidência favoráveis. As estruturas de montagem dos sistemas de espelhos em sistemas CLF são mais simples do que as outras tecnologias que utilizam concentradores.

Como os espelhos não precisam suportar o peso do receptor, o peso total da estrutura pode ser reduzido em comparação com a tecnologia da calha parabólica e em alguns casos, um pequeno espelho parabólico é adicionado no topo do receptor para ajudar no foco da luz solar, além disso, não são necessárias juntas flexíveis nos tubos absorvedores de calor, pois estes são fixos. Segundo Miller (2012), como os sistemas CLF usam espelhos localizados muito próximos ao nível do solo, o vento tem um efeito reduzido sobre a estrutura, o que permite usar uma estrutura mais leve. Quando não estiverem em uso, os espelhos podem ficar virados de cabeça para baixo para maior proteção contra o vento, areia e outros fatores climáticos. Os concentradores Fresnel utilizam área menor do que os concentradores cilíndrico-parabólicos.

Uma desvantagem do refletor linear Fresnel é o cuidado necessário no projeto para evitar sombreamento e bloqueio entre os espelhos adjacentes, para isso, é necessário o aumento do espaçamento entre refletores, aumentando a área da planta. O sombreamento também pode ser reduzido, através do aumento da altura das torres, mas isto aumenta os custos.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, inicialmente verificou-se o estado da arte e as contribuições científicas existentes utilizando sistemas lineares Fresnel. Para selecionar os materiais bibliográficos foram utilizados os motores de busca do IEEE e ScienDirect, utilizando as palavras chave Solar energy, concentrator, solar tracking, Fresnel combinados através do operador lógico OR, no período de 2012 à 2015 formando um banco de dados com 221 artigos. A partir destes

foram identificados 53 artigos que apresentaram características de funcionamento de sistemas Fresnel e foram compilados os parâmetros e equacionamentos que determinam o desempenho desses sistemas.

A metodologia do presente trabalho consiste em identificar um design otimizado do módulo de acordo com os princípios da análises ópticas e térmicas. Esta tarefa implica a escolha e especificações para cada um dos componentes da cadeia de transmissão de energia de acordo com a análise qualitativa utilizado em cada um dos passos da cadeia, e realizando os cálculos necessários.

4.1 Parâmetros para o Dimensionamento

Para que seja possível o cálculo do dimensionamento do sistema, fazem-se necessários alguns conceitos, os quais estão elencados nos itens na sequência. Os focos deste documento se atem aos dimensionamentos do campo solar que contém os espelhos, da tubulação que cotem o fluido e do refletor secundário.

4.1.2 Dimensionamento do campo solar

Para que o sistema opere sempre na máxima eficiência é necessário calcular e discutir quais são os parâmetros de projeto que maximizam o desempenho do sistema CLF.

Como por exemplo, o posicionamento e geometria dos espelhos refletores e as características do receptor, que, se mal dimensionados podem induzir o sistema em perda de eficiência. Torna-se então necessário minimizar os erros de precisão ótica dos raios refletidos. Erros, esses relacionados com a sombra provocada pelos espelhos, que estão dispostos em filas paralelas, assim como, do próprio receptor, posicionado acima dos espelhos.

Para o dimensionamento entre espelhos e altura do receptor, existe um compromisso direto entre o espaçamento dos espelhos e o erro associado à perda de precisão dos raios refletidos, no receptor.

O dimensionamento do campo solar é realizado com base no múltiplo solar. O múltiplo solar, representado na equação abaixo, é uma forma de expressar a área de abertura do campo solar (área de coleta total de energia solar do campo solar) como sendo uma função da capacidade nominal do ciclo de potência. Um múltiplo solar igual a 1 ($S_m = 1$) representa a área da abertura do campo solar que, quando exposta a radiação solar equivalente a radiação de projeto, fornece energia térmica suficiente para atender os requisitos do projeto atendendo a Eq. (2).

$$A_{sf} = S_m \cdot A_{esf} \quad (2)$$

Onde: A_{sf} é a área de abertura do campo solar (m^2) não incluindo o espaço entre os coletores, S_m é o múltiplo solar e A_{esf} é a área (em m^2) de abertura do campo solar necessária para entregar energia térmica suficiente para que o calor de processo opere nas condições nominais de projeto dentro das condições de tempo de referência do projeto.

Os valores de múltiplos solares encontrados nas revisões literárias de usinas em operação apontam valores normalmente entre 1,65 e 3,4.

A definição da área do campo solar exato (A_{esf}) em função da energia térmica de entrada no bloco de potência está expressa na Eq. (3).

$$A_{esf} = \frac{Q_{tin}}{Q_{nr} \cdot O_{ec} - Q_{loss}} \quad (3)$$

onde:

Q_{tin} é a energia térmica necessária para a operação com sua capacidade nominal de projeto (MWt).

Q_{nr} é a radiação normal direta de referência (W/m^2).

O_{ec} é a eficiência óptica de captação da radiação pelo conjunto coletor/receptor.

Q_{loss} são as perdas térmicas baseadas na perda de calor ligada à captação do calor da radiação solar transferido para o fluido de transferência de calor e as perdas de calor na tubulação (Wt/m^2).

Existe um outro item a ser levando em consideração no dimensionamento de um sistema CLF, que é a existência de uma relação entre a altura do receptor e a oclusão entre espelhos. Uma maior altura do receptor ocasiona um aumento do erro da concentração focal, mas por outro lado, uma altura baixa do receptor ocasiona o bloqueio do trajeto dos raios solares refletidos pelos espelhos mais afastados do receptor horizontal.

4.1.3 Dimensionamento da tubulação

Os sistemas de tubulação são empregados para a entrada do fluido a uma temperatura específica (podendo ser a temperatura ambiente) e sua consequente saída na forma de fluido aquecido. O tubo absorvedor deve ter um diâmetro adequado ao fluido e a temperatura em questão, não podendo ter um diâmetro muito grande nem muito pequeno. O objetivo é ter um material com uma elevada absorção e baixa emissividade. Neste caso, o tubo deve ser revestido por um material especial com uma absorvância próxima a unitária no espectro visível, e uma emissividade muito baixa no espectro infravermelho.

O material deve ser feito de algo como o alumínio coberto com um revestimento especial a fim de aumentar a refletividade. Um bom exemplo é o borosilicato (pirex), que tem a vantagem de ser capaz de lidar com grandes choques térmicos e à temperatura elevada.

Segundo Beckman (1978) a perda de energia para tubulações e dutos que fluem no coletor de energia solar em um sistema podem ser decisivas. A combinação de tubos ou dutos mais o coletor solar é equivalente em desempenho térmico de um coletor solar com diferentes valores de comprimento e variação de temperatura.

Para esta etapa optou-se pela seleção de materiais já utilizados na indústria e recorreu-se a catálogo de fabricantes.

4.1.4 Dimensionamento do refletor secundário.

Os refletores secundários permitem que a radiação solar seja refletida pelos espelhos (refletores primários) sobre a superfície absorvente, o que resulta numa menor área de absorvedor para a mesma quantidade de energia absorvida.

Levando em conta que as perdas térmicas são proporcionais à área da superfície, absorvedores com menor área apresentam por este motivo menores perdas térmicas. Neste sentido, vários receptores CLF têm sido propostos. Os dois conceitos de design mais conhecidos são demonstrados na Fig. 5.

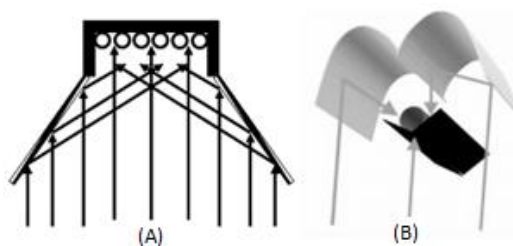


Figura 5. Tipos de refletores secundários.

O conceito contido em A utiliza um conjunto de pequenos tubos de absorção paralelos aninhados dentro de uma cavidade refletora trapezoidal, termicamente isolada e o receptor concentrador parabólico composto é apresentado em B, constituído por um refletor secundário que reflete a radiação para um absorvedor tubular.

4.2 Análise Econômica

Durante a realização deste trabalho, percebeu-se no estado da arte, que a maioria das referências, no tangente a análise econômica, utilizam ferramentas econômicas de formas diferentes, em outras palavras, detalham os projetos de forma simplificada ou mais detalhada, porém todos os autores visam verificar a viabilidade do investimento. Na análise apontada por Souza (2000) a análise econômica simplificada, utilizada por muitos pesquisadores, apresentam-se dois ou três indicadores (VPL, TIR e *Payback* em geral) para estudo do projeto. Nesse caso não há uma separação com relação aos indicadores de risco ou de retorno.

Para Kreuz,(2008), na análise detalhada (análise de multiindicadores) apresentam-se dois grupos de indicadores: os de rentabilidade do projeto e os de risco do mesmo. Nos indicadores de rentabilidade se incluem o Valor Presente Líquido (VPL), o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), o Índice Benefício Custo (IBC) e o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA). Nos indicadores de risco incluem-se a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Recuperação do Investimento (*Payback*) e o Ponto de Fisher.

Para o estudo da viabilidade alguns autores ainda fazem algumas considerações. Para Atkins et al. (2010), a aplicação industrial da tecnologia solar térmica é erroneamente considerada como uma simples ampliação de instalações de água quente residenciais, embora diferenças significativas entre as necessidades e restrições de usuários industriais e residenciais devem ser consideradas. Aplicações industriais requerem maiores temperaturas e volumes maiores do que aplicações residenciais e comerciais. Para uma instalação solar utilizada em planta integrada aos processos devem ser consideradas: onde e em que temperatura o calor será utilizado, a natureza variável tanto da oferta de energia solar quanto da demanda do calor de processo. A análise da integração da energia solar térmica para aquecimento de processos é problemática e difícil de tratar porque tanto a demanda quanto a oferta são instáveis e não contínuas.

Angelis-Dimakis et al. (2011) apontam como um dos principais fatores de influência na viabilidade econômica de sistemas solares, a disponibilidade de energia sobre a superfície do território que pode ser convertida em calor apontando três classes diferentes de valores: (1) energia potencial teórica, que é a radiação solar bruta incidente sobre a superfície do local; (2) energia potencial técnica, que a fração que pode ser coleada pela superfície coletora do sistema; (3) energia explorável ou energia potencial econômica, a fração que pode ser utilizada considerando critérios de sustentabilidade e que há diferentes abordagens para estimar a radiação solar sobre uma superfície, a primeira baseada nos dados locais da instalação, a segunda considera dados de radiação solar gerados por satélite e a terceira combina as duas anteriores.

Os mesmos autores mostram que a taxa de eficiência de conversão da radiação solar em energia térmica utilizável é influenciada por fatores como a geometria do planeta, revolução e rotação, a topografia, a inclinação e orientação da superfície coletora, temperatura ambiente, incidência de sombras, bem como atenuações atmosféricas como absorção de gases, partículas sólidas e líquidas e nuvens. O potencial estimado é então reduzido por consideráveis limitações técnicas,

gerando perdas associadas à conversão da radiação solar em calor, o que leva a ter que considerar tais fatores de eficiência de conversão. Kulkarni et al. (2008) também evidenciam a importância da radiação solar e da fração solar disponíveis para determinar a viabilidade do sistema solar.

4.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Indicador que analisa as entradas e saídas de recursos para a data de início do projeto. Neste caso, descontam-se todas as receitas e despesas futuras do fluxo de caixa utilizando a taxa mínima de juros que representa a taxa de atratividade do projeto (TMA). Para Sandrini (2007) um investimento é considerado economicamente viável quando os recursos presentes nas entradas forem maiores que os recursos presentes na saída do caixa, ou seja, com VPL positivo, o projeto é viável. Também quanto maior o valor positivo do VPL mais atrativo é considerado o investimento. Calcula-se o VPL segundo a Eq. (4)

$$VPL = \sum_0^n F_n(1+i)^{-n} \quad (4)$$

Na qual o VPL representa o Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa, n representa o número de períodos em cada elemento de receitas e despesas do fluxo de caixa, F representa os valores envolvidos no fluxo de caixa líquido e i representa a taxa mínima de atratividade (TMA).

4.2.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Segundo Souza (2000) a TIR é a taxa de juros que torna nulo o VPL de um investimento e pode ser calculada pelo monitoramento dos fluxos de entrada e saída do caixa. A Taxa Interna de Retorno (TIR) deve ser comparada à taxa mínima de atratividade (TMA) para verificar a rentabilidade do investimento. Para que um investimento seja considerado atrativo, por esse método, é preciso que a TIR seja maior que a TMA. A TIR pode ser calculada através da Eq. (5).

$$\sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+j)^t} = 0 \quad (5)$$

em que j é igual a TIR e F representa o retorno líquido em cada ano e N representa o horizonte de planejamento.

4.2.3 Payback

O Payback (PB) visa à recuperação dos investimentos em um empreendimento dentro do horizonte de planejamento e é uma ferramenta que possibilita calcular essa recuperação de investimento. Souza (2010) analisa que quanto menor o payback do projeto, menor o risco do investimento, assim como um payback alto revela um risco alto do projeto.

Para Rasoto et al. (2012) esse indicador deve ser empregado com cautela para comparar projetos de diferentes ramos de atividade, pois desconsidera todos os eventos posteriores ao período de recuperação de investimento. O PB poderá ser calculado pela Eq. (6).

$$\sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \geq |FC_0| \quad (6)$$

Onde N representa o horizonte de planejamento do projeto, FC representa o fluxo de caixa no período zero e FC expressa o fluxo de caixa no período de recuperação dos investimentos no empreendimento.

4.2.4 Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA)

Segundo Rasoto et al. (2012) VPLA é um indicador econômico que expressa o indicador VPL ajustado em um horizonte de tempo mensal ou anual. Esse ajuste se faz necessário para expressar os benefícios gerados pelo projeto. O VPLA é indicado para comparar projetos com horizontes de planejamento longo ou diferente, possibilitando que os gestores avaliem melhor a magnitude do ganho econômico do investimento. O VPLA é obtido por meio da Eq. (7).

$$VPLA = \frac{VPL \times [TMA \times (1+TMA)^N]}{[(1+TMA)^N - 1]} \quad (7)$$

4.2.5 Índice Benefício Custo (IBC)

Para Kreuz et al. (2008), o Índice Benefício Custo (IBC) é um indicador que representa a quantia que se espera ganhar com cada unidade de capital investido. Também se pode definir o IBC como um indicador para corrigir a deficiência do VPL e do VPLA representando os valores de retorno proporcionado pelo investimento. O IBC pode ser calculado através da Eq. (8).

$$IBC = \frac{VPFB}{VPFI} \quad (8)$$

Onde *VPFB* representa o valor presente do fluxo de benefícios e o *VPFI* representa o valor presente do fluxo de investimento. Para interpretar o IBC basta verificar se o valor obtido é superior ou inferior a 1, pois nos casos em que o IBC for superior a 1 o projeto apresenta-se viável.

4.2.6 Retorno Adicional Sobre o Investimento (ROIA)

Para Rasoto et al. (2012), o ROIA é um indicador que representa a possível rentabilidade anual do projeto. Esse indicador está na mesma unidade de tempo da TMA e deriva da taxa equivalente ao IBC para cada período do projeto, como descrito na Eq. (9).

$$Roia = \sqrt[N]{IBC} - 1 \quad (9)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de entrada para o dimensionamento foram obtidos como base a cidade de Chapecó no estado de Santa Catarina que possui uma irradiação solar média diária no plano horizontal de 4,78 Kwh/m² e uma temperatura média de 20°C. O fluido requerido foi água a 100°C e a volume diário 2 mil litros. A eficiência térmica condizente com as literaturas pesquisadas foi de 56% e as perdas na ordem de 20%.

Fazendo-se uso destes dados e com base nas equações de campo solar, tem-se uma área de campo solar de aproximadamente 178m² para um múltiplo solar de 1,65, uma área de aproximadamente 195m² para um múltiplo solar de 1,8 e de 238m² para um múltiplo solar com valor de 2,2.

Para fins de cálculo, padronizou-se o comprimento do campo solar em 18 metros, variando a sua largura para atender os múltiplos solares.

O dimensionamento da tubulação se deu com análise nos produtos disponíveis no mercado, sendo que a tubulação escolhida tem as características demonstradas na Tab. 2. para minimizar as perdas os tubos são tubos de vácuo.

Tabela 2. Dados levantados junto ao fabricante da tubulação.

Comprimento	18000 mm
Diâmetro externo do tubo	47 mm
Diâmetro interno do tubo	38 mm
Espessura do vidro	1,6 mm
Material	Vidro Borossilicato 3,3
Revestimento absorvivo	Grade Cu-SS/Al
Expansão térmica	3,3.10 ⁻⁶ °C
Absortância	> 92% (AM 1,5)
Emissividade	< 8% (80°C)
Vácuo	P < 5.10 ⁻³ Pa
Temperatura de estagnação	> 200°C

O dimensionamento do espelho secundário é baseado na Fig. 5 modelo A. Para o espelho mais afastado do centro do arranjo, o ângulo máximo de abertura estipulado é de 33°. Levando em consideração a existência de 30 tubos absorvedores dentro da cuba do receptor secundário (cuos dados individuais de cada tubo estão mencionados na tabela anterior) a área do refletor secundário será de 34,3 m², sendo suas medidas representadas na Fig. 6.

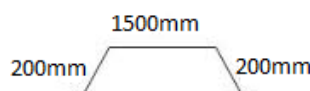


Figura 6. Desenho representativo da cuba do receptor secundário.

Segundo a tomada de preços realizada, o metro quadrado de lentes Fresnel no Brasil fica em torno de R\$ 36,00 o m². O preço do metro de cada tubo é em torno de R\$ 110,00. O custo das estruturas de suporte foi fixado em R\$ 2.000,00. O valor da economia de energia, baseado no preço médio do Kw fixado em R\$ 0,35, fica em torno de R\$ 15.624,00 por ano e os custos de manutenção anual em torno de R\$ 2.400,00. A taxa de juros anual condizente com o mercado atual fica na

faixa de 17% ao ano. As tab. 2 e 3 se referem aos cenários com campo de 178m² e 238m². Nas tabelas 3 e 4 tem-se uma análise de custos e viabilidade do projeto.

Tabela 3. Análise para o campo solar de 178m²

DADOS DO PROJETO (input)				
TMA	17,00%	Taxa Mínima de Atratividade ou Taxa de juros por período		
N	10	Horizonte de planejamento ou horizonte de análise		
FCO	R\$ 70.000,00	Investimento inicial: aquisição, transporte, instalações e aporte inicial de capital de giro.		
FCj	R\$ 13.624,00	Fluxo de caixa esperado para cada período = Receitas esperadas - Custos estimados.		
Vr	R\$ 34.500,00	Valor residual ou valor de revenda.		
INDICADORES		PROJETO	ANÁLISE	ESPERADO
Retorno	VP	R\$ 70.646,11	Não usar como critério de decisão	Não usar
	VPL	R\$ 646,11	Continue analisando o projeto	"VPL ≥ 0"
	VPLA	R\$ 138,69	Continue analisando o projeto	"VPLA ≥ 0"
	IBC ou IL	1,0092	Continue analisando o projeto	"IBC ≥ 1"
	ROIA	0,09%	Continue analisando o projeto	"ROIA ≥ 0"
	Índice ROIA/TMA	0,54%	Continue analisando o projeto	"Índice ROIA/TMA ≥ 0"
	ROI ou TIRM	17,11%	Continue analisando o projeto	"ROI ≥ TMA"
Risco	Payback	10	REPENSAR	"Payback ≤ N"
	TIR	17,22%	Continue analisando o projeto	"TIR ≥ TMA"
	Índice Payback/N	100,00%	REPENSAR	"Índice Payback/N ≤ 100%"
	Índice TMA/TIR	98,71%	Continue analisando o projeto	"Índice TMA/TIR ≤ 100%"
Análise de sensibilidade	Var. TMA	1,31%	Continue analisando o projeto	"Quanto > Melhor"
	Var. Custos	0,92%	Continue analisando o projeto	"Quanto > Melhor"

Tabela 4. Análise para o campo solar de 238 m²

DADOS DO PROJETO (input)				
TMA	17,00%	Taxa Mínima de Atratividade ou Taxa de juros por período		
N	10	Horizonte de planejamento ou horizonte de análise		
FCO	R\$ 72.000,00	Investimento inicial: aquisição, transporte, instalações e aporte inicial de capital de giro.		
FCj	R\$ 13.624,00	Fluxo de caixa esperado para cada período = Receitas esperadas - Custos estimados.		
Vr	R\$ 34.500,00	Valor residual ou valor de revenda.		
INDICADORES		PROJETO	ANÁLISE	ESPERADO
Retorno	VP	R\$ 70.646,11	Não usar como critério de decisão	Não usar
	VPL	-R\$ 1.353,89	REPENSAR	"VPL ≥ 0"
	VPLA	-R\$ 290,62	REPENSAR	"VPLA ≥ 0"
	IBC ou IL	0,9812	REPENSAR	"IBC ≥ 1"
	ROIA	-0,19%	REPENSAR	"ROIA ≥ 0"
	Índice ROIA/TMA	-1,12%	REPENSAR	"Índice ROIA/TMA ≥ 0"
	ROI ou TIRM	16,78%	REPENSAR	"ROI ≥ TMA"
Risco	Payback	0	Continue analisando o projeto	"Payback ≤ N"
	TIR	16,54%	REPENSAR	"TIR ≥ TMA"
	Índice Payback/N	0,00%	Continue analisando o projeto	"Índice Payback/N ≤ 100%"
	Índice TMA/TIR	102,76%	Continue analisando o projeto	"Índice TMA/TIR ≤ 100%"
Análise de sensibilidade	Var. TMA	-2,68%	REPENSAR	"Quanto > Melhor"
	Var. Custos	-1,88%	REPENSAR	"Quanto > Melhor"

Com base nas análises e no índice IBC nas Tab. 3 e 4, nota-se que o caso para a planta com 178m² pode ser viável. Já para o caso da planta com 238m² padece de maior estudo ou mudança de índices. Outras análises podem ser vistas na coluna "ESPERADO" bem como na "ANÁLISE" nas referidas tabelas.

6. REFERÊNCIAS

- Angelis-Dimakis, A. et al. 2011. "Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources". Renewable And Sustainable Energy Reviews, Brighton-UK, v. 15, n. 2, p.1182-1200.
- Atkins, M. J.; Walmsley, M. R.W.; Morrison, A. S. 2010. "Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes". Energy, Brightonuk, v. 35, n. 5, p.1867-1873.
- Beckman W. A. 1978. Solar energy.
- Collares M. 1979 "High temperature solar collector with optimal concentration: non-focusing Fresnel lens with secondary concentrator". Solar Energy.
- DASOL (2013).Departamento Nacional de Aquecimento Solar da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA). Disponível em:<<http://www.dasolabrava.org.br>>.
- Feuermann D., Gordon J. M. 1991. "Analysis of a two-stage linear Fresnel reflector solar concentrator". ASME J Solar Energy Engineering.
- Francia G. 1968 "Pilot plants of solar steam generation systems". Solar Energy.
- Halliday D.; Resnick R.; Walker J. 2009. "Fundamentos de Física". Vol. 2, 8ª Edição, LTC.
- Kalogirou, S. 2004. "Solar thermal collectors and applications".
- Kreuz, C. L.; Souza, A.; Clemente, A. 2008. "Custos de Produção, Expectativas de Retorno e de Riscos do Agronegócio Mel no Planalto Norte de Santa Catarina". Revista Custo e Agronegócio on line – Vol. 4, n.1.
- Kulkarni, G. N., Kedare, S. B. e Bandyopadhyay, S. 2008. "Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications". Solar Energy, Brighton-UK, v. 82, n. 8, p.686-699.
- Miller, A., Lumby, B. 2012. "Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers and Investors". International Finance Corporation.
- Mills D. R. 2001. "Solar thermal electricity". In: Gordon J, editor. Solar energy: the state of the art. Germany: ISES; p. 577–651.
- Nelson D.T., Evans D.L., BansaL R.K. 1975. "Linear Fresnel lens concentrators". Solar Energy.
- NREL. 2012 "Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5".
- Rasoto, A.; et al. 2012. "Gestão Financeira: enfoque em Inovação". Curitiba- PR, Série UTFInova, 2012.
- Souza, A.; Clemente, A. 2000. "Matemática Financeira: Fundamentos, Conceitos e Aplicações". São Paulo: Atlas.
- Villalva M. G., Gazoli J. R. 2012. "Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações". 1º Edição São Paulo: Érica.
- Kumara V.; Shrivastava R.L.; S.P. Untawaleb, 2015. "Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power". J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 376–390, Elsevier.
- Tyagi V. V., Kaushik S. C., Tyagi S. K. 2012. "Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology".

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF ECONOMIC VIABILITY IN FRESNEL SYSTEM FOR INDUSTRIAL USE

Marcio André Nazareno Marques, marciomarkes@yahoo.com.br¹

Bruno Monte de Carvalho, bruno_monthy@hotmail.com¹

Jean-Marc Stephane Lafay, jeanmarc@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do conhecimento, Km 1, CEP 85503-390, Pato Branco – PR, Brasil

Abstract: Thermal energy of process represents a third part of consumption of energy from industrial branch. Traditionally is obtained from fossil fuels, firewood and electric energy. The most percentage of solar energy conversion efficiency occurs in thermal conversion. Among the available technologies Fresnel linear is being highlight due to relative simplicity technological of its compounds and lower cost. To disseminate this technology researches of technical and economic viability are necessary to sites where pretends to apply it. The bibliographic material was researched in IEEE and ScienceDirect data bases, using as key words solar energy, concentrator, solar tracking, Fresnel combined through logical operator or, from 2012-2015, creating a data base with 221 papers. From this point were identified 53 works which presented characteristics of Fresnel systems operation and compiled the parameters and equating which determine the performance of these systems. This work presents a method of determination of economic viability from process heat input data and weather data from installation site. The equating for system sizing was obtained from accomplishment of state of art of energy conversion plants implanted with Fresnel technology, allowing identify the main technical parameters of sizing that affects the economical viability calculation. Specifications as receptor design, optical arrangement of mirrors that impacts collector efficiency and the use of receptor towers, as the determination of solar camp together with concentrator pipeline are requested to attendance of heat process demand for energy.

Keywords: solar energy, concentrator, Fresnel, economic viability.