

CRISTHIAN LAO VOROBIEFF

CONCENTRADORES SOLARES PLANOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

V954c Vorobieff, Cristhian Lao, 1978-
2008 Concentradores solares planos /Cristhian Lao Vorobieff.
– Viçosa, MG, 2008.
xiv, 80f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Coletores solares. 2. Aquecedores solares de água.
3. Análise Econômica. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

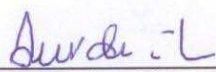
CDD 22. ed. 621.47

CRISTHIAN LAO VOROBIEFF

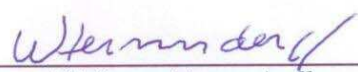
CONCENTRADORES SOLARES PLANOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

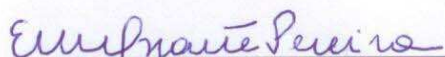
APROVADA: 04 de dezembro de 2008.



Adil Ranier Alves



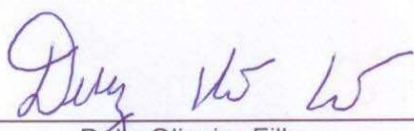
Wathney Hermsdorff



Elizabeth M. Duarte Pereira



Aristides Ribeiro
(Coorientador)



Dely Oliveira Filho
(Orientador)

Ao Deus
À toda minha família
Aos meus amigos

AGRADECIMENTOS

Devo a Deus cada momento, cada olhar, meu respirar.

Agradeço a meus familiares pelo apoio, pelo incentivo, meu motivo de sempre continuar.

Aos meus amigos, pelo incentivo e amizade, especialmente os irmãos e irmãs do alojamento 2112 e do “Sovaco do Cristo” e Rejane Rodrigues da Costa e Maria Luiza Fernandes, que nesse período, foram cruciais para conseguir vencer esta fase.

Ao professor Delly Oliveira Filho, pela amizade, confiança e orientação.

Aos professores conselheiros Aristides Ribeiro e José Márcio Costa, pela amizade, orientação e sugestões dispensadas.

A todos da Área de Energia na Agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, meus amigos, pela amizade, companheirismo e lealdade, especialmente ao Doutor Carlos Alberto Teixeira pela amizade e pelo grande incentivo para continuar essa caminhada acadêmica.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola.

À Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento dos estudos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola

A todos demais que de uma forma ou de outra, pelo apoio, pelo incentivo e pela torcida.

BIOGRAFIA

Cristhian Lao Vorobieff, nascido na cidade de Contagem, Minas Gerais, morou em Belo Horizonte e sua região metropolitana até ingressar no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa no ano de 1999. No ano de 2003 transferindo-se para o curso de Agronomia da mesma universidade, graduando-se em 2006. Desde então, é mestrando do programa de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa onde atua na área de racionalização do uso de energia na agricultura e energia solar.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
Contexto energético mundial e heliografia.....	1
Energia renovável e os problemas relacionados com a energia.....	4
Energia solar.....	7
Energia solar Fotovoltaica.....	7
Energia Solar Fototérmica.....	9
Concentradores Solares	13
Calha.....	13
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
2 GANHO DE RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES INCLINADAS COM O USO DE CONCENTRADORES PLANOS.....	20
2.1 INTRODUÇÃO.....	21
2.2 OBJETIVO	26
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	27
Saldo de energia solar e	27
2.3.1 avaliação do ganho adicional de radiação solar	27
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
2.5 CONCLUSÃO	48
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
3 CONCENTRADORES SOLARES EM SISTEMAS FOTOTÉRMICOS	51
3.1 INTRODUÇÃO.....	53
3.2 OBJETIVO	59
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	60
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.5 CONCLUSÃO	75
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
4 CONCLUSÃO GERAL	78
4.1 Estudo comparativo de ganho de radiação de uma superfície de um coletor solar com e sem o concentrador	79

4.2	Aplicação da metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos	79
-----	--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1	Tecnologias fotovoltaicas comerciais e seus parâmetros típicos.....	8
Quadro 1.2	Tecnologias de coletores solares térmicos disponíveis e suas características.....	11
Quadro 2.1	Principais modelos e suas expressões analíticas de cálculo para concentradores solares planos	24
Quadro 3.1	Alternativas de aquecimento de água consideradas para análise.....	66
Quadro 3.2	Composição dos custos iniciais para a análise de sensibilidade e vida útil para a situação estudada	67
Quadro 3.3	Dados de entrada para a análise de sensibilidade e vida útil para a situação estudada	68
Quadro 3.4	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do valor da taxa de inflação.....	68
Quadro 3.5	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do valor da taxa de juros	69
Quadro 3.6	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do reajuste da energia elétrica acima da inflação	69
Quadro 3.7	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do reajuste da tarifa de energia elétrica.....	70
Quadro 3.8	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do custo inicial do sistema	70
Quadro 3.9	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação da vida útil do sistema	71
Quadro 3.10	Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do número de usuários para o mesmo sistema (fração solar)	72

Quadro 3.11 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do número de coletores.....	72
Quadro 3.12 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do sistema proposto em sua configuração padrão, substituição de parte do sistema coletor por espelho e em sua configuração padrão acrescido de espelhos.	73
Quadro 3.13 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação tipo de combustível no aquecimento auxiliar.	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Parâmetros para cálculo do coletor.....	23
Figura 2.2	Reflexão e transmissão no meio.	35
Figura 2.3	Reflexão, transmissão, radiação incidente e índice de refração em seus respectivos meios.	36
Figura 2.4	Simulação de curvas de radiação para o mês de janeiro e fevereiro com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	40
Figura 2.5	Simulação de curvas de radiação para o mês de março e abril com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	41
Figura 2.6	Simulação de curvas de radiação para o mês de maio e junho com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	42
Figura 2.7	Simulação de curvas de radiação para o mês de julho e agosto com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	43
Figura 2.8	Simulação de curvas de radiação para o mês de setembro e outubro ano com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	43
Figura 2.9	Simulação de curvas de radiação para o mês de novembro e dezembro com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia	

	líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).	44
Figura 2.10	Simulação do ganho em percentagem do saldo de energia ao longo de um dia típico de cada mês e percentagem instantânea do ganho no meio dia solar para o mesmo dia.....	45
Figura 2.11	Efeito da inclinação do coletor térmico ou painel fotovoltaico solar na recepção de energia com a inclinação igual à latitude + 15° e ângulo azimutal de superfície, -21°, para correção da declinação magnética para Viçosa - MG.	46
Figura 3.1	Sistema solar de aquecimento com concentradores planos (a), detalhe em perspectiva do concentrador acoplado ao coletor indicando sua orientação (b).....	65
Figura 3.2	Limite dos raios solares refletidos no coletor, com orientação normal aos raios solares.....	65

RESUMO

VOROBIEFF, Cristhian Lao, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Dezembro de 2008. **Concentradores solares planos**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Aristides Ribeiro e José Márcio Costa.

A energia é considerada um agente primordial na geração de riqueza e um fator significativo no desenvolvimento econômico, sendo essa relevância reconhecida universalmente por dados históricos. Verifica-se que existe uma forte relação entre a disponibilidade de energia e de atividade econômica. A energia solar é a fonte de energia menos poluente e menos finita do planeta Terra. Cerca de 5% do total da energia utilizada em edifícios residenciais no Brasil é para aquecimento da água por dispositivos de passagem, chegando a 9% do pico de demanda do sistema elétrico nacional, ou seja, 6.300 MW. Existem muitas fontes alternativas de energia que podem ser utilizadas na substituição dos combustíveis fósseis, principalmente utilizados no aquecimento de água. A decisão sobre o tipo de fonte de energia que deve ser utilizada, em cada caso deve ser feita no ponto de vista econômico, ambiental e de segurança. A capacidade instalada no mundo de energia elétrica por fontes renováveis chega a 240 GW ao fim de 2007, 50% a mais do que no final de 2004,

representando 5% da capacidade total instalada e 3,4% da geração. Excetuando-se a energia proveniente de grandes centrais hidrelétricas (GCH's), que por si só, alcança 15% do total de energia gerada. A capacidade instalada no mundo com energia solar como sistema de aquecimento de ar e água no ano de 2005 era de 396.738 GJ, ficando o Brasil com 6.805,08 GJ, ou seja, apenas cerca de 1,7% do total mundial. No entanto, o Brasil possui 8,5 milhões de km² e cerca de 3% da população mundial. As tecnologias de aquecimento solar da água têm maior eficiência em relação às outras tecnologias solares. O desempenho depende do local de implantação e da tecnologia utilizada nos coletores planos, de tubos e dispositivos de armazenamento de calor, podendo vir a ter eficiências acima de 60 por cento durante condições normais de funcionamento. Uma forma de melhorar o rendimento global do sistema de aquecimento de água é a utilização de concentrador solar, que para uma mesma área externa de coletor solar, aumenta a radiação solar incidente no coletor solar. Estudos realizados sobre utilização de concentrador solar em coletores planos na área de energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa mostraram que há viabilidade técnica e econômica em seu uso, por meio de uma análise de sensibilidade e de vida útil do sistema em estudo. O investimento inicial no preço de aquisição do equipamento, a tarifa de energia elétrica, a vida útil estimada, o tipo de combustível para energia complementar ao sistema de aquecimento de água com coletor solar, o tipo de utilização da energia solar, são fatores importantíssimos que decidirão pela maior ou menor lucratividade na substituição de chuveiros elétricos.

ABSTRACT

VOROBIEFF, Cristhian Lao, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December of 2008. **Flat-plate solar concentrators**. Adviser: Delly Oliveira Filho. Co-Advisers: Aristides Ribeiro and José Márcio Costa.

Energy is considered a primary agent in the generation of wealth and a significant factor in economic development, which is universally recognized by relevant historical data. There is a strong relationship between the availability of energy and economic activity. Solar energy is the energy source less polluting, less finite on planet Earth. About 5% of total energy used in residential buildings in Brazil is for water heating devices for the movement, reaching 9% of peak demand of the national electric system, or 6300 MW. There are many alternative sources of energy that can be used in place of fossil fuels, used mainly for heating water. The decision on the type of energy source to be used in each case must be made in the economic, environmental and security. The worldwide installed capacity of electric energy from renewable sources up to 240 GW by end of 2007, 50% more than in 2004, representing 5% of the total installed capacity and 3.4% of generation. Except for the power from large hydroelectric plants (LHP's), which alone reaches 15% of total energy generated. The installed capacity in the world with solar energy and heating system of air and water in 2005 was 396,738 GJ, leaving Brazil with GJ 6805.08, or only about 1.7% of world total. However, Brazil

has 8.5 million square km and about 3% of world population. The technology of solar water heating have higher efficiency compared to other solar technologies. The performance depends on the location and the technology used in flat collectors, tube and heat storage devices and may have efficiencies above 60 percent during normal operation. One way to improve the overall efficiency of the system Water heating is the use of solar concentrator, which for the same external area of solar collector, increasing the incident solar radiation in the solar collector. Studies on the use of concentrating solar collectors in the area of energy plans of the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa showed that there are technical and economical in their use, through an analysis of sensitivity and lifetime of the system under study . The initial investment in the purchase price of equipment, the price of electricity, the estimated useful life, the type of fuel for additional power to the heating water with solar collector, type of use of solar energy are important factors that more or less decide the profitability of the replacement of electric showers.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Contexto energético mundial e heliografia

Em 2007, o total de energia consumida em nível mundial foi de 543 EJ ($1,51 \times 10^{14}$ kWh), com 86,5% $\pm 10\%$ obtidas a partir da queima de combustíveis fósseis (IEA, 2008). Este valor equivale a uma potência média de 17,2 TW. Alguns dados não são claramente conhecidos, pois, nem todas as economias do mundo monitoram o seu consumo energético com o mesmo rigor, e a energia contida de um barril de petróleo ou de uma tonelada de carvão varia com a qualidade.

A emissão total de energia do Sol é de $3,8 \times 10^{20}$ MW, que é igual a 63 MWm^{-2} de sua superfície. Esta energia irradia para o exterior em todas as direções. Apenas uma ínfima parte, $1,7 \times 10^{14}$ kW, é interceptada pela Terra (KREITH e KREIDER, 1978).

O termo *constante solar* é definida como a taxa de radiação solar recebida por unidade de área, medida sobre a superfície exterior da atmosfera da Terra, num plano perpendicular aos raios. A constante solar inclui todos os tipos de radiação solar, e não apenas a luz visível. É medido por satélite e o seu valor é de aproximadamente $1366 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, embora ele flutue em cerca de 6,9% durante o ano - no início do mês de janeiro é 1412 Wm^{-2} e no início de julho de 1321 Wm^{-2} , devido à variação de distância da Terra - Sol (PMOD, 2006). Na seção transversal Terra, com uma área de aproximadamente $127.400.000 \text{ km}^2$, recebe aproximadamente 174 PW (SMILL, 1991).

A maior parte dos recursos energéticos mundiais é derivada da radiação solar que atinge a superfície. Uma parte desses recursos tem sido preservada como energia fóssil, outras são utilizáveis direta ou indiretamente, por exemplo, via eólica, hidráulica ou oceânica. As estimativas dos restantes recursos energéticos mundiais variam, sendo os restantes combustíveis fósseis, totalizando um valor estimado de 0,4 YJ ($1 \text{ YJ} = 10^{24} \text{ J}$) e da disposição de energia nuclear como urânio a 2,5 YJ. Devido ao Sol, a Terra tem um fluxo de energia renovável utilizável que excede 120 PW (SMILL, 1991), o que corresponde a aproximadamente 7000 vezes uso total mundial em 2007, tornando o valor de todos os recursos não renováveis insignificante.

A energia solar é a fonte de energia menos poluente e menos finita do planeta Terra. Disponível mesmo antes da humanidade surgir, e desde então, nunca foi aproveitada de forma tão eficiente comparada com outras fontes de energia, mesmo considerando-se que todas as outras fontes de energia têm alguma desvantagem. Outro fato que reforça essa idéia é que praticamente todas as outras fontes podem ser julgadas secundárias, quando se considera que são derivadas da energia solar, com algumas exceções, como a energia geotérmica, das marés e a nuclear.

Percebe-se a utilização da energia solar está em seu benefício, desde os tempos pré-históricos. O historiador grego Xenophon no seu 'The memorabilia' registrou alguns dos ensinamentos do filósofo grego Sócrates (470-399 aC) quanto à correta orientação de habitações, a fim de ter conforto térmico em suas casas no verão e no inverno (XENOPHON, 2004).

Desde a pré-história, a energia solar tem sido utilizada para secar, preservar alimentos e, também, para evaporação da água do mar na produção de sal. Após o homem ter adquirido consciência psicossocial, ele reconheceu o Sol como uma força motriz por trás de cada fenômeno natural. É por isso que muitas tribos pré-históricas consideram o Sol como um 'deus'. Muitos hieróglifos do antigo Egito dizem que a grande pirâmide, uma das maiores conquistas de engenharia do homem, foi construída como uma escada para o Sol.

O petróleo, carvão mineral e gás natural foram originalmente produzidos pela fotossíntese, seguido de reações químicas complexas em que a vegetação foi submetida a temperaturas muito elevadas e pressões durante um longo período de

tempo (KREITH e KREIDER, 1978). Até mesmo o vento têm origem na energia solar, causadas por diferenças de temperatura em várias regiões da Terra. A energia das marés, também são provenientes em parte da energia solar, uma vez que é resultado da interação dos campos gravitacionais da Terra com a lua e o Sol.

Ao longo do século passado, os combustíveis fósseis forneceram a maior parte da nossa energia, porque estes eram muito mais baratos e mais convenientes do que energia de fontes alternativas, e até recentemente, a poluição ambiental, foi objeto de pouca preocupação da sociedade.

Em 1973 (após a guerra do Yom Kipur) a relação econômica de combustíveis e de energia foi alterada, provocando uma crise internacional e, pela primeira vez, os países foram envolvidos como parte da estratégia árabe, a ameaça do *petróleo como arma*. Tanto o preço como as questões de armas políticas chegaram aos seis membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) do Golfo, que se reuniram no Kuwait e rapidamente abandonaram a idéia de realizar qualquer consulta de preços com as companhias petrolíferas, anunciando que eles realizariam um aumento do preço do petróleo bruto em 70% chegando a 400% em cinco meses. Depois e, além disso, fariam um embargo às exportações dos Estados Unidos da América e dos países europeus que apoiavam a sobrevivência de Israel.

A razão para o rápido aumento da demanda de petróleo ocorreu principalmente devido aumento da oferta de petróleo, produzido a um custo muito baixo, ficando disponível durante a década de 50 e 60 a partir do Oriente Médio e Norte da África. Para os países consumidores de petróleo importado foi mais barato comparado com o da energia nacional produzida a partir de combustíveis sólidos como biomassa e carvão mineral.

Mas o principal problema é que as reservas comprovadas de petróleo e gás, a atual taxa de consumo, seriam suficientes para satisfazer a demanda de 40 e 60 anos, respectivamente (EWG, 2007b). As reservas de carvão estariam em melhor situação, uma vez que seriam suficientes para, pelo menos, os próximos 250 anos (EWG, 2007a).

Tentando-se avaliar as implicações destas reservas limitadas, pode-se concluir que os preços dos combustíveis serão acelerados enquanto as reservas serão diminuídas. Considerando que o preço do petróleo tornou-se firmemente

estabelecido como índice para o preço de todos combustíveis, a conclusão é que os preços da energia irão aumentar nas próximas décadas em taxas maiores do que as taxas de inflação. Além do mais, existe a preocupação crescente com a poluição ambiental causada pela queima de combustíveis fósseis.

Existem muitas fontes alternativas de energia que podem ser utilizadas na substituição dos combustíveis fósseis. A decisão sobre o tipo de fonte de energia que deve ser aproveitada, em cada caso deve ser feita no ponto de vista econômico, ambiental e de segurança. Devido aos aspectos ambientais e de segurança desejáveis, é amplamente aceitável que a energia solar deve ser aproveitada preferencialmente de outras formas energéticas alternativas, mesmo quando os custos envolvidos sejam ligeiramente superiores em sua vida útil. Dentre as razões da importância de energia solar tem-se: custos iniciais de pré-eletrificação a partir de qualquer outra fonte, são mais elevados, além de depender da disponibilidade do recurso próximo ao local de uso da energia o que é muitas vezes indisponível no caso de pequenas hidrelétricas e turbinas eólicas.

Energia renovável e os problemas relacionados com a energia

A energia é considerada um agente primordial na geração de riqueza e de um fator significativo no desenvolvimento econômico. A importância da energia no desenvolvimento econômico é reconhecida universalmente por dados históricos e verificada que existe uma forte relação entre a disponibilidade de energia e de atividade econômica. Embora no início dos anos 70, após a crise do petróleo, a preocupação era sobre o custo da energia, durante as últimas duas décadas, o risco e a realidade da degradação ambiental têm se tornado mais evidente. Essa recente preocupação se deve à uma combinação de vários fatores posto que, o impacto ambiental das atividades humanas tem crescido dramaticamente. Isto é, devido ao aumento da população mundial o consumo de energia e de atividades industriais também acelera. A concretização de soluções para os problemas ambientais que a humanidade enfrenta hoje impõe, no longo prazo, a necessidade de ações para o desenvolvimento sustentável. A este respeito, recursos energéticos renováveis parecem ser uma das mais eficientes e eficazes soluções.

Até a década de 70 a grande preocupação com emissões atmosféricas se concentrava no controle de particulados e, especialmente, no dióxido de enxofre

(SO₂), óxido de azoto (NO_x) bem como de monóxido de carbono (CO), porém, recentemente, a preocupação ambiental que ampliou o controle de poluentes atmosféricos perigosos, que são geralmente substâncias químicas tóxicas prejudiciais até mesmo em pequenas doses, bem como a outros poluentes significativos em nível global, tais como o dióxido de carbono (CO₂).

Uma das definições mais amplamente aceitas de desenvolvimento sustentável é: “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” que foi proposta pelo Relatório Brundtland na Rio 92. Existem muitos fatores que podem ajudar a alcançar um desenvolvimento sustentável. Na última década e ainda hoje, um dos principais fatores que devem ser considerados é a energia e de forma mais ampla, abrange a necessidade de aprovisionamento que seja plenamente sustentável (ROSEN, 1996; DINCER, 1998). A segurança do fornecimento de energia é geralmente uma condição necessária, mas não uma condição suficiente para o desenvolvimento dentro de uma sociedade. Além disso, para um desenvolvimento sustentável de uma sociedade é necessário que um fornecimento de energia e de utilização eficaz e eficiente dos recursos energéticos seja garantido. Esse tipo de fornecimento em longo prazo deve ser prontamente disponível a custos razoáveis e poder ser utilizada para todas as tarefas exigidas, causando em relação a outras fontes, menores impactos negativos na sociedade. É por isso que existe uma estreita ligação entre as fontes de energia renováveis e o desenvolvimento sustentável.

Em geral, o consumo de energia gera aumento da poluição. Hoje o consumo diário mundial de petróleo está em torno de 84 milhões de barris. Apesar das bem conhecidas conseqüências da queima de combustíveis fósseis no ambiente, há uma previsão de que esse consumo venha a aumentar para 123 milhões de barris por dia, até o ano 2025 (REN21, 2008).

Há um grande número de fatores que são importantes na determinação dos níveis de consumo padrão de energia no futuro. Nesses fatores incluem o crescimento da população e outros parâmetros demográficos, o desempenho econômico, as preferências dos consumidores e a evolução tecnológica. Além disso, as políticas governamentais relativas à energia e à evolução dos mercados da energia no mundo estão sendo e, certamente, continuarão a desempenhar um

papel fundamental no nível e padrão de produção e de consumo energético (DINCER, 1999).

Prognósticos indicam que a população do mundo deve duplicar até meados deste século (UNFPA, 2008) e, com a aceleração do desenvolvimento econômico irá, certamente, continuar a crescer, a procura mundial de energia deverá aumentar. Já existem evidências, que sugere que o futuro do nosso planeta e das próximas gerações poderá ser negativamente afetado se os seres humanos mantiverem o nível de degradação do meio ambiente, praticado na década de 2000.

Atualmente, três dos principais problemas ambientais podem ser destacados: (i) a chuva ácida, (ii) a diminuição do ozônio estratosférico e (iii) as alterações climáticas globais de forma geral.

Aproximadamente US\$ 100 bilhões de dólares são investidos por ano em energia renovável no mundo, com o aumento da capacidade de geração, criação de novas usinas, pesquisa e desenvolvimento (REN21, 2008); no entanto, o que se investe em energia fóssil é bem superior a esse valor.

A capacidade instalada de energia elétrica de fontes renováveis chega a 240 GW ao fim de 2007, 50% a mais que no fim de 2004, e representa 5% da capacidade instalada e 3,4% da geração, excetuando energia proveniente de grandes centrais hidrelétricas (GCH's), que por si só, alcança 15% do total de energia gerada no mundo (REN21, 2008). A energia renovável, sem contabilizar as GCH's, alcança apenas um quarto da energia gerada por usinas nucleares no mundo (REN21, 2008, WNA, 2007). A maior parte da energia renovável, desconsiderando as GCH's, é de fonte eólica, com 95 GW instalados (GWEC, 2008).

Outros dados importantes da energia renovável em nível mundial são:

- (i) Os sistemas de energia alternativa com maior índice de crescimento mundial são os sistemas solares fotovoltaicos conectados a rede com 7,7 GW, com um índice de crescimento de 50% por ano (REN21, 2008);
- (ii) O aquecimento solar de água e ar já contempla 50 milhões de casas com 105 gigawatts térmicos (GWt) no mundo (REN21, 2008);
- (iii) Energia de biomassa e geotérmica são empregadas para aquecimento, resfriamento e geração de energia elétrica, e têm como principais fontes o subsolo (com 9,5 GW) e a lenha (com 45 GW) (REN21, 2008); e

- (iv) Os biocombustíveis, com 53 bilhões de litros por ano, o que correspondem a aproximadamente 314.000 TWh de energia primária com estimativa de maior incremento nos próximos anos.

Energia solar

A capacidade instalada no mundo como sistema de aquecimento de ar e água no ano de 2005 era de 396.738 GJ, ficando o Brasil com 6.805 GJ, ou seja, apenas cerca de 1,7% do total mundial (WEISS *et al.*, 2007). No entanto, o Brasil possui 8,5 milhões de km² e cerca de 3% da população mundial. Acredita-se que muito pode ser feito para incentivar e desenvolver o uso direto de energia solar no Brasil.

Energia solar Fotovoltaica

Eletricidade pode ser gerada a partir do Sol de várias maneiras. A energia fotovoltaica (FV) foi desenvolvida principalmente para pequenas e médias aplicações, desde uma calculadora alimentada por uma única célula solar, até uma central FV de uso industrial. As tecnologias Mono-Si, ou silício monocristalino e a de silício policristalino representam cerca de 86% de todo o mercado mundial de tecnologia fotovoltaica. A tecnologia amorfa cerca de 13% e outras representam 1%.

O balanço energético da fabricação de células solares mostra que, em geral, é necessária a geração de energia elétrica de um ano para compensar a utilização dessa tecnologia do ponto de vista energético.

Assim, aplicações devem ser cuidadosamente pensadas a fim de compensar a utilização da tecnologia Mono-Si, de acordo com o balanço energético. O Quadro 1 mostra as tecnologias comerciais disponíveis e suas características típicas, tais como rendimento, temperatura normal de operação da célula, coeficiente de temperatura da eficiência, entre outros. Para a geração em grande escala, centrais de energia solar térmica com concentradores são mais comuns, porém já existem centrais multi-megawatts construídas recentemente a partir de células FV. Outras tecnologias solares de geração elétrica ainda estão em fase experimental como células multijunção, ou orgânicas.

Quadro 1.1 Tecnologias fotovoltaicas comerciais e seus parâmetros típicos

Tipo	Rendimento	Temperatura normal de operação da célula	Coefficiente de temperatura da eficiência
	η (%)	TNOC (°C)	β_p (%/°C)
Mono-Si: Silício monocristalino	13,0	45	0,40
Poli-Si: Silício policristalino	11,0	45	0,40
a-Si: Silício amorfo (filme fino)	5,0	50	0,11
CdTe: Telureto de cádmio (filme fino)	7,0	46	0,24
CIS: Disseleneto de cobre e índio (filme fino)	7,5	47	0,46

Uma célula solar ou célula fotovoltaica é um dispositivo que converte luz em eletricidade usando o efeito fotoelétrico. O primeiro trabalho com células solares foi desenvolvido em 1883 por Charles Fritts. Essas células protótipo foram feitas de selênio e tinham eficiência de cerca de um por cento. Na sequência dos trabalhos fundamentais de Russell Ohl na década de 1940, os pesquisadores Gerald Pearson, Calvin Fuller e Daryl Chapin criaram as células solares de silício em 1954.

Em 1958, a energia FV foi utilizada com sucesso como fonte de energia para o satélite Vanguard I. Este exemplo foi seguido por muitos outros satélites soviéticos e americanos, de modo que, pelo final dos anos 1960, FV foi estabelecida como fonte de energia para satélites. Ela passou a desempenhar um papel essencial para o sucesso comercial dos primeiros satélites, como TelStar e Syncom.

Em toda a década de 1960, o elevado custo da FV limitava a aplicação de usos terrestres, mas isso começou a mudar no início dos anos 1970, quando os preços dos módulos atingiram níveis que fizeram da geração FV competitiva em áreas remotas, de pré-eletrificação ou impossibilitadas de ligação à rede. Posteriormente, incluiu-se a utilização terrestre em estações elétricas remotas de telecomunicações, proteção catódica de gasodutos em locais remotos, ferrovias e faróis de trânsito.

A crise do petróleo de 1973 iniciou uma reorganização das políticas energéticas de todo o mundo e trouxe, sem precedentes, a atenção para o desenvolvimento da geração FV; incentivou o estabelecimento de programas nos E.U.A. (*the Federal Photovoltaic Utilization Program*) e o Japão (*the Sunshine Program*). Outros esforços incluíram a formação de centros de pesquisa solar nos E.U.A. (NREL), no Japão (NEDO), e na Alemanha (Fraunhofer Institute for Solar

Energy Systems ISE). Estes desenvolvimentos ajudaram a reduzir o preço do PV a partir de US\$ 100 por Watt em 1970 para US\$ 11 por Watt em 1980, e levou à instalação de cerca de 12,5 MW de FV durante a década de 1970 (FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT, 2008).

Grande aumento da produção começou no início dos anos 1980, mas a queda progressiva dos preços do petróleo enfraqueceu a demanda por energia fotovoltaica. O crescimento da produção atingiu um pico de mais de 65% em 1983, mas caiu para uma média de 13,2% a partir de 1984 até 1996. Durante este período de tempo de crescimento moderado entre 1984 e 1996, o preço do FV caiu de US\$ 7 a US\$ 4 por Watt e a capacidade aumentou de 81 MW para 699 MW em um ano.

Hoje, com 131 MW, mesmo sendo irrisória em relação ao álcool, por exemplo, sendo aproximadamente 0,001% de sua produção primária de energia equivalente no Brasil, o incremento da capacidade instalada, ou seja, a instalação de painéis fotovoltaicos é cerca de três vezes maior que o incremento da produção de álcool e aproximadamente a produção de biocombustíveis líquidos no mundo.

A taxa de crescimento de sistemas de geração fotovoltaica tem aumentado desde 1997, e atingiu cerca de 48% ao ano no final de 2007. Com muitas localidades agora dando incentivos fiscais para a geração FV, passou-se a ter tempo de retorno de capital de cinco a dez anos. Sistemas integrados à rede utilizam um inversor, de preferência, para se conectarem à rede pública, ao invés de confiarem em baterias. Os sistemas conectados à rede são a maior parte do mercado. Embora a implantação da geração FV dependa, em grande parte, das condições e exigências do local, a maioria dos países vem aumentando o interesse em desenvolver energia FV como uma das suas opções para o abastecimento de energia renovável.

Energia Solar Fototérmica

A energia solar térmica é a designação da tecnologia de captação que transforma a luz solar para calor usado para o aquecimento de fluídos como água ou ar. Coletores solares planos térmicos são caracterizados como de baixa, média, ou alta temperatura, com temperaturas de operação de cerca de 30, 60 e 100 °C, respectivamente. Coletores de baixa temperatura são placas planas geralmente utilizadas para aquecer piscinas. De média temperatura, normalmente, também são

placas planas que podem ser ou não associadas a concentradores, mas são usados no aquecimento de água para uso residencial e comercial. Os de alta temperatura utilizam concentradores de luz solar com espelhos e/ou lentes, e são, geralmente, utilizadas para a produção de energia elétrica por meio de vapor que movimenta uma microturbina, e refrigeração por cogeração.

Aquecimento de Água – coletores de energia solar

Sistemas solares de aquecimento de água utilizam da radiação solar para aquecer a água. Aquecedores comerciais solares começaram a aparecer nos Estados Unidos na década de 1890. Esses sistemas tiveram uma utilização cada vez maior até a década de 1920, mas foram gradualmente substituídos por combustíveis convencionais relativamente mais baratos e confiáveis. As vantagens econômicas dos combustíveis convencionais têm variado ao longo do tempo, resultando em interesses periódicos em aquecedores solares de água (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2008).

Porém, tecnologias de aquecimento de água solar ainda tiveram o dinamismo favorável até a década de 1920. Recentes aumentos nos preços devido ao início da 5ª fase da crise do petróleo, das quais se dividem em 1ª fase em 1956 com a Guerra de Suez, a 2ª fase em após a Guerra do Yom Kippur em 1973 a 3ª fase com a Guerra Irã – Iraque em 1980 a 4ª fase com a guerra do golfo em 1991 e a 5ª fase em 2008 com a crise econômica mundial, redução da disponibilidade de combustíveis convencionais, e de outros fatores estão renovando interesse em tecnologias de aquecimento solar. Cerca de 5% do total da energia utilizada em edifícios residenciais no Brasil é para aquecimento da água por mecanismos de passagem, chegando a 9% do pico de demanda do sistema elétrico nacional, ou seja, 6.300 MW (Adaptado IBGE, 2000). Em muitos climas, um sistema de aquecimento solar, economicamente viável, pode fornecer normalmente 50 a 75 por cento, em alguns casos até 90 por cento, da água quente para uso doméstico.

Os coletores solares são tipos especiais de trocadores de calor que transformam a energia da radiação solar em energia térmica em um meio, geralmente água, propilenoglicol ou ar. O principal componente de qualquer sistema solar para aquecimento de água é o coletor solar. Este é um dispositivo

que absorve a radiação solar recebida, converte-os em calor, transferindo-o para um fluido (normalmente ar ou água) que flui através do coletor. A energia solar é transportada, assim que recolhida, a partir do fluido circulante, ou diretamente, para o aquecimento de água ou para o equipamento condicionador de ambiente, ou ainda para um tanque de armazenamento de energia térmica, que pode ser para uso durante a noite e/ou em dias nublados.

Existem basicamente dois tipos de coletores solares: com e sem concentradores fixos e os concentrados com e sem rastreamento. Os coletores sem concentradores tem a mesma área de intercepção e de absorção de radiação solar, enquanto os concentradores solares têm normalmente superfícies côncavas refletoras para interceptar o feixe de radiações do Sol e focá-las em uma menor área, aumentando assim, o fluxo de radiação.

De acordo com Kalogirou (2003) um grande número de tipos de coletores solares estão disponíveis no mercado (Quadro 2).

Quadro 1.2 Tecnologias de coletores solares térmicos disponíveis e suas características

(Continua)

Movimento	Tipo de coletor	Tipo de absorvedor	Fator de Concentração	Faixa de temperatura (°C)
Fixo	Coletor Plano (CP)	Plano	1	30–80
	Coletor Tubo Evacuado (CTE)	Plano	1	50–200
	Coletor Parabólico Composto (CPC)	Tubular	1–10 5–15	60–240 60–300
	Refletor Linear Fresnel (FLR)	Tubular	10–40	60–250
Rastreamento em um eixo	Coletor Parabólico em Calha (PTC)	Tubular	15–45	60–300
	Coletor Parabólico em Cilíndrico (CTC)	Tubular	10–50	60–300
	Refletor Parabólico Prato (PDR)	Pontual	100–1000	100–500
Rastreamento em dois eixos	Coletor de Campo de Heliostato (HFC)	Pontual	100–1500	150–2000

Em 2007, a capacidade total instalada de sistemas solares de água quente foi de, aproximadamente, 128 GWth, e o crescimento de 15 a 20 por cento por ano (REN21, 2008). A China foi líder mundial na implantação de água quente solar com área de coletores solares igual a 100 km² em 2006, e tem como objetivo de longo prazo de possuir 300 km² em 2020 (REN21, 2008).

Israel é o líder no uso de água quente solar *per capita* com 90 por cento dos lares usando essa tecnologia (DEL CHIARO, 2007).

Nos Estados Unidos, Canadá e Austrália, o aquecimento piscina de natação é a aplicação dominante de água quente solar com uma capacidade instalada de 18 GWth em 2005 (PHILIBERT, 2005).

As tecnologias de aquecimento solar da água têm maior eficiência em relação aos de outras tecnologias solares. O desempenho vai depender do local de implantação e da tecnologia utilizada nos coletores planos e de tubos de calor, podendo vir a ter eficiências acima de 60 por cento durante condições normais de funcionamento (PHILIBERT, 2005). Além disso, aquecimento solar de água é particularmente apropriado para aquecimento de 25 a 80°C , aplicações tais como piscinas de água quente para uso doméstico e aquecimento espacial. Os tipos mais comuns de aquecedores solares são sistemas integrados de aquecimento e armazenamento, coletores planos e coletores de tubos de calor.

Concentradores Solares

Calha

Sistemas combinados com concentradores tipo V

Fotovoltaicos

De acordo Rabl (1976) este tipo de concentrador, não-focal, de baixa relação de concentração, apresenta extrema simplicidade construtiva, podendo ser utilizado com células solares convencionais, sendo compatível com sistemas de dissipação natural de calor. Concentradores tipo V foram utilizados por Stacey e McCormick (1984) com células mono e policristalinas, obtendo bons resultados em termos de eficiência dos módulos, tendo como um fator limitante o aumento de temperatura nas células que compõem os módulos.

O desenvolvimento desses equipamentos tinha como objetivo principal minimizar o custo da geração de energia elétrica, quando comparados aos sistemas de coletores fixos. Contudo, esta associação demanda que sejam tomados cuidados relativos (BERRY et. al, 1982) como rastreamento da trajetória do Sol ao longo do dia, resfriamento das células solares, uniformidade da iluminação dos módulos e estrutura construtiva do concentrador.

O trabalho pioneiro em sistemas fotovoltaicos acoplados a concentradores de cavidade tipo V foi apresentado por Hollands (1971). Diversos estudos sobre sistemas fotovoltaicos com rastreamento e com concentração foram desenvolvidos por Nann (1990); Fraidenraich e Almeida (1991); Freilich e Gordon (1991); Gordon et. al. (1991); Lorenzo e Macagnan (1994); Rauh et. al. (1995); Fraidenraich (1995); Fraidenraich e Barbosa (1999); Dobón et. al. (2001), Bione Filho 2004, Sangani e Solanki (2007).

As cavidades tipo V fazem parte da família de concentradores de baixa relação de concentração (RABL, 1976). Constituídas por duas paredes planas que se interceptam formando um ângulo igual a 2Ψ no vértice, permitem a utilização de espelhos comuns, amplamente disponíveis no mercado, cujo índice de refletividade se encontra em torno de 80%. Em consequência disso, pode-se esperar eficiências óticas relativamente elevadas.

Uma característica que torna estes concentradores particularmente aptos para seu uso em combinação com sistemas fotovoltaicos é a propriedade que estas

cavidades possuem, para certas combinações da relação de concentração (RC) e do ângulo do vértice (Ψ), de iluminar uniformemente a região absorvedora (HOLLANDS, 1971; FRAIDENRAICH, 1995 e 1998). Isto permite um acoplamento ótico correto da cavidade a módulos fotovoltaicos comerciais, cujas células estão interligadas em série e ocupam a largura do absorvedor em número de três ou quatro. A não uniformidade da iluminação na região absorvedora faz com que a corrente gerada seja determinada pela região com menor fluxo de radiação incidente, prejudicando o desempenho de todo o gerador.

Fototérmicos Os trabalhos com aquecedores planos de água tiveram início após o começo da 1ª fase da crise do petróleo com Tabor (1966) como pioneiro, e durante a crise houve interesse no tema com trabalhos na mesma linha de pesquisa (SEITEL, 1975), após esta crise, se perdeu o interesse pelo tema devido ao reduzido custo do petróleo e somente retornando a tona somente após as discussões ambientais da ECO 92 com o trabalho de Perers (1994).

Este trabalho foi estruturado em três capítulos, sendo eles: (i) introdução geral sobre energia renovável e solar e a sua utilização; (ii) ganho de radiação em superfícies inclinadas com o uso de concentradores planos; e (iii) aplicação de concentradores planos em sistemas fototérmicos.

O primeiro capítulo é uma revisão de literatura sobre energia solar e a sua utilização no Brasil e no mundo.

O segundo capítulo é sobre a possibilidade de aumentar a superfície de interceptação de radiação solar com o uso de concentradores planos. Este estudo consistiu em aumentar o rendimento global de um sistema de aquecimento de água.

O último capítulo trata do estudo de concentradores solares em sistemas fototérmicos. Este estudo consistiu em aplicar a metodologia da utilização de concentradores em sistemas fototérmicos, como um estudo de caso que inclui uma análise econômica e de sensibilidade de vida útil.

Desta forma, as contribuições científico-tecnológicas deste trabalho foram: (i) utilização de concentradores solares em sistemas de aquecimento de água; (ii) simulação da utilização de concentradores solares em sistemas de aquecimento de água em um caso proposto; e (iii) realização de análise econômica de um sistema de aquecimento de água com a utilização de concentrador solar.

Estes estudos visaram melhorar a eficiência do processo de aquecimento de água com a utilização de coletores planos e concentradores solares, com possibilidade de redução do preço de aquisição destes equipamentos; minimização de impacto ambiental decorrente da produção das células solares; e redução dos gastos com energia elétrica e gás liquefeito de petróleo (GLP) em sistemas híbridos compostos de aquecedor de passagem e coletor com concentrador solar.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERRY, J.P, ESTEVE, D, FOLLEA, D, VIALARET, G, Photovoltaic generators with concentration summary of the studies concerning the SOPHOCLE 1000 prototype, **Solar Energy**, Volume 29, Issue 3, pp. 235-243, 1982

BIONE FILHO, J. ; VILELA, Olga De Castro ; FRAIDENRAICH, N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. **Solar Energy**, v. 76, 2004 pp. 703-711.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, **Energy Quest**, *online*, 2008, Disponível em: <<http://www.energyquest.ca.gov/>> Acesso em: 20 set. 2008

DEL CHIARO, Bernadette. **solar Water Heating (How California Can Reduce Its Dependence on Natural Gas)**,. Environment California Research and Policy Center, 2007. Disponível em: <<http://www.environmentcalifornia.org/>> Acesso em: 31 jun. 2007

DINCER I, ROSEN MA. A worldwide perspective on energy,environment and sustainable development. **Int J Energy Res** 1998;22 (15):1305–21.

DINCER, Ibrahim; Environmental impacts of energy. **Energy Policy** 27 14 (1999), pp. 845–854.

DOBÓN, F.; ACOSTA, L. E OSUNA, R. Very low concentration system. In: **Anais of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, Munique, Alemanha, 2001, pp. 22-26.

EWG, **crude oil: The supply outlook**, Report to the Energy Watch Group, EWG-Series No 3/2007, 2007b, 101p. Disponível em: <<http://www.energywatchgroup.org/>> Acesso em: 31 jun. 2007

FRAIDENRAICH, N. Analytic solutions for the optical and radiative properties of non-accepted light radiation of Vtrough concentrators. **Applied Optics**, Vol. 34, 1995, pp. 4800-4811.

FRAIDENRAICH, N. Design procedure of V-trough cavities for photovoltaic systems. In **Progress in photovoltaics: Research and Applications**. Vol. 6, No. 1, 1998, pp. 43-54.

FRAIDENRAICH, N. Analytic solutions for the optical and radiative properties of nonaccepted light radiation of V-trough concentrators. **Applied Optics**, v. 34, n. 22, 1995, pp. 4800-4810,.

FRAIDENRAICH, N.; ALMEIDA, G. J. Optical properties of V-trough concentrators. **Solar Energy**, v. 47, n. 3, 1991, pp. 147-155.

FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E. M. Experimental performance of a PV V-trough system. In: **ISES Solar World Congress**, Jerusalém, Israel, 1999.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT, **Chronicle of 1972-1982**, Munique, 2008. Disponível em: <<http://www.fraunhofer.de/EN/>> Acesso em: 31 jun. 2007

FREILICH J.; GORDON J.M.. Case study of a central-station grid intertie photovoltaic system with V-trough concentration, **Solar Energy**, v. 46, 199,1 pp. 267-273.

GORDON, J. M.; KREIDER, J. F.; REEVES P. Tracking and stationary flat plate solar collectors: yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications. **Solar Energy**, v. 47, n. 4, 1991, pp. 245-252.

GWEC, **GLOBAL WIND 2007 REPORT**, Bruxelas, Global Wind Energy Council, 2008, 72p. Disponível em: < <http://www.gwec.net/>> Acesso em: 2 de maio de. 2008.

HOLLANDS, K. G. T. A concentrator for thin film solar cells. **Solar Energy**, 13, 1971, pp. 149-163.

IBGE. **Censo Demográfico 2000**, Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 31 jun. 2007

IEA, **World Energy Outlook 2008**, Paris, IEA, 2008, 578p. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/>> Acesso em: 31 jun. 2007

KALOGIROU S. The potential of solar industrial process heat applications. **Appl Energy**, 2003;76:337–61

KREITH, Frank e KREIDER, Jan F., **Principles of solar engineering**, Washington : Hemisphere Pub. Corp., 1978, 778p.

LORENZO E.; MACAGNAN M. H. Considerations in the design of a one-axis tracking photovoltaic system. In: **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 2, 1994, pp. 45-55.

NANN, S. Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates, **Solar Energy**, 45,1990, pp. 385

PERERS, B., KARLSSON, B., BERGKVIST, M., Intensity distribution in the collector plane from structured booster reflectors with rolling grooves and corrugations **Solar Energy**, 53, 1994, pp. 215.

PHILIBERT, Cédric. **The Present and Future use of solar Thermal Energy as a Primary Source of Energy**. International Energy Agency, 2005. Disponível em: <<http://www.iea.org/>> Acesso em: 31 jun. 2007.

PMOD, **Solar Constant: Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present**, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/ World Radiation Center, 2006, Disponível em: <<http://www.pmodwrc.ch/>> Acesso em: 31 jun. 2007.

RABL A. Comparison of solar concentrators. **Solar Energy**. Volume 18, Issue 2, 1976, pp. 93-111.

RAUH, H. U.; DREB, A.; PRUSCHEK, R. Annually generated electricity of one and two axes solar tracking systems. In: **13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, Nice, France, outubro, 1995.

REN21, **Renewables 2007 Global Status Report**, 54p. 2008 Disponível em: <<http://www.ren21.net/>> Acesso em: 2 de maio de. 2008.

ROSEN M. A. The role of energy efficiency in sustainable development. **Technol Soc**, 1996;15(4):21–6.

SANGANI, C.S., SOLANKI, C.S. Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 91, 2007, pp. 453–459

SEITEL, SC. Collector performance enhancement with flat reflectors. **Solar Energy** 1975; 17 pp. 291

SMILL, Vaclav, General **Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization**. Wiley, 1991, 369p.

STACEY, R. W.; MCCORMICK, P. G. Effect of concentration on the performace of flat plate photovoltaic modules. **Solar Energy**, v. 33, n. 6, 1984, pp. 565-569,

TABOR, H., Mirror boosters for solar collectors, **Solar Energy**, Vol. 10, Issue 3, July-September 1966, pp. 111-118.

UNFPA, **State of world population 2008**, United Nations Population Fund, 2008, 99p. Disponível em: <<http://www.unfpa.org/>> Acesso em: 12 de novembro de. 2008.

WEISS, Werner; BERGMANN, Irene; FANINGER, Gerhard. **Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2005**. IEA Solar Heating & Cooling Programme. April 2007. 50p. Disponível em: <<http://www.iea.org/>> Acesso em: 2 de maio de. 2008.

WNA, **Nuclear Power in the World Today**, Londres, World Nuclear Association, 2008, online. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/>> Acesso em: 12 de maio de. 2008.

XENOPHON, **The Memorabilia**, Kessinger Publishing, 2004, 208p.

2 GANHO DE RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES INCLINADAS COM O USO DE CONCENTRADORES PLANOS

Foi analisada a metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos. As principais conclusões deste trabalho foram: (i) a utilização de concentrador solar melhorou a captação anual da energia solar em um coletor plano em cerca de 62%, para o município de Viçosa-MG; (ii) o saldo de energia com a utilização de concentrador solar em um coletor plano durante um ano é de cerca de 60% para o município de Viçosa-MG; (iii) existe a possibilidade de redução do número de coletores solares em um sistema de aquecimento de água pelo aumento da área de incidência de radiação solar do coletor; e (iv) o posicionamento correto do coletor solar maximiza a radiação solar incidente anual no plano do coletor, podendo-se priorizar os períodos mais frios do ano.

PALAVRAS CHAVE: coletor solar; concentrador solar.

2.1 INTRODUÇÃO

Um concentrador plano (CP) simples equipados com refletores pode aumentar significativamente a quantidade de radiação direta e difusa que chega ao coletor. Uma análise exaustiva de um sistema deste tipo é apresentada por Garg (1988). O modelo facilita a previsão do total de energia absorvida pelo coletor para diferentes horas do dia, ângulos de latitude aleatórios, ângulos de azimute e inclinação do coletor e refletores. Esta simples melhoria do CP foi inicialmente sugerida por Tabor, (1966) e do painel fotovoltaico por Hollands (1971). Outros importantes estudos sobre esta área foram apresentados por Seitel (1975) e Perers et al. (1994) no caso dos CP e por diversos autores no caso dos painéis fotovoltaicos. De uma forma geral, Rabl (1976) classificou este tipo de concentrador sendo não-focal, de baixa relação de concentração.

2.1.1 Concentradores solares com fins térmicos (CST)

CST pode ser usado para produzir calor ou eletricidade novas renováveis (esta última, geralmente através de vapor). Em sistemas CST pode-se usar espelhos, lentes e sistemas de rastreamento para concentrar uma grande área de radiação solar em relação a área do receptor que pode ser uma área menor ou um tubo. A radiação concentrada é, então, utilizada diretamente como calor ou como fonte de calor para centrais elétricas convencionais (héliotérmicas).

Apesar da vasta variedade de tecnologias de concentradores existentes, as mais desenvolvidas são a calha parabólica ou cilíndrica, disco parabólico (conhecido como prato parabólico) e torre solar. Cada método de concentração é capaz de produzir temperaturas e eficiências termodinâmicas diferentes, e variam de acordo com o método de rastreamento do Sol e razão de concentração, podendo chegar até 95% de eficiência em alguns casos (SHEC, 2008).

O concentrador parabólico de energia solar é constituído por uma calha linear que reflete a radiação para um receptor posicionado ao longo da linha focal. O refletor é projetado para seguir a direção do Sol durante as horas do dia ao longo de um único eixo. Um fluido de trabalho é aquecido entre 150-350 °C, uma vez que flui através do receptor e, em seguida, é utilizado como fonte de calor para um sistema de geração de energia elétrica (MARTIN et al., 2005).

Sistemas em calha, dentro da tecnologia CSP, são os mais desenvolvidos. Os sistemas de geração de energia solar são mais comuns nos Estados Unidos, principalmente na Califórnia e na Espanha.

Disco parabólico consiste em refletor parabólico isolado que concentra radiação no seu ponto focal. Este refletor rastreia o Sol ao longo do dia em dois eixos e o fluido de trabalho é aquecido entre 250 e 700°C e em seguida utilizado em um motor Stirling para gerar energia. (MARTIN et al., 2005). Discos parabólicos apresentam as maiores eficiências, e por serem modulares, apresentam escalabilidade. Esta tecnologia é mais evidente na Austrália.

Torre de energia solar consiste em uma matriz de eixo duplo de rastreamento (Heliostatos) que concentram luz sobre um receptor central em cima de uma torre, onde existe um depósito de água, que pode ser água do mar. O fluido de trabalho no receptor é aquecido entre 500 e 1000 °C e, em seguida, utilizados como fonte de calor para produção de eletricidade ou como sistema armazenamento de energia (MARTIN et al., 2005). Mais uma vez, Estados Unidos e Espanha são os principais representantes desta tecnologia.

Existem outras tecnologias que ainda estão em estágio embrionário de implantação, principalmente as de uso domésticos como é o caso de concentradores planos, que com baixa razão de concentração, entre 2 e 4 vezes, que podem ser acoplados em sistemas coletores solares térmicos comerciais, melhorando seu rendimento, o fluido de trabalho está entre 20 e 80°C

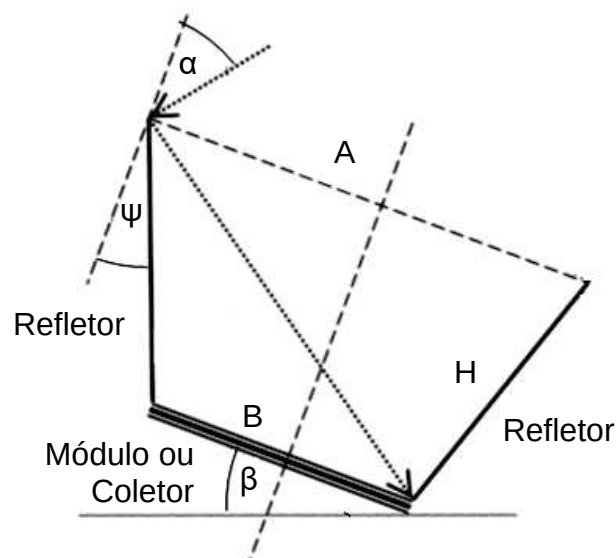
Concentração Solar Térmica de Energia (CST) pode ser considerada a tecnologia mais difundida para produzir eletricidade e água dessalinizada nas regiões áridas da África do Norte e do Sul da Europa, nordeste Brasileiro devido a elevada insolação em relação a outros locais, ou água quente para uso doméstico em todo restando do mundo que se tenha uma insolação média maior que 2500 kWh/ano/m² para que se atenda a necessidade energética mínima dos modelos comerciais mais eficientes (INMETRO, 2009).

De acordo com o exposto o objetivo geral deste capítulo foi mostrar o dimensionamento de um sistema de aquecimento de água solar com a utilização de um concentrador de radiação solar.

Ótica do concentrador em “V”

Diversos modelos de dimensionamento de concentradores em “V” já foram propostos, como citado anteriormente, os principais modelos atualmente utilizados, são mostrados no Quadro 2.1.

A abordagem utilizada para o seu dimensionamento tem variação de acordo com a literatura disponível. Os parâmetros mais comuns para o cálculo analítico das dimensões do refletor (H) e da razão de concentração (RC) que são em função do ângulo de inclinação do refletor (ψ) e do ângulo de aceitação (α) em relação perpendicular ao plano do coletor (Figura 2.1).



Fonte: Adaptado de Sangani e Solanki (2007)

Figura 2.1 Parâmetros para cálculo do coletor.

O Quadro 2.1 mostra os principais modelos e suas expressões analíticas de cálculo para concentradores solares planos.

Quadro 2.1 Principais modelos e suas expressões analíticas de cálculo para concentradores solares planos

	Razão de concentração (RC)	Altura do refletor
Modelo de Mannan (1978)	$RC = \frac{\sin(3\psi + \alpha)}{\sin(\psi + \alpha)}$	$\frac{H}{A} = \frac{2 \cos(2\psi + \alpha)}{\cos(3\psi + \alpha)}$
Modelo de Burkhard (1978)	$RC = \frac{\sin[(2n+1)\psi + \alpha]}{\sin(\psi + \alpha)}$	$\frac{H}{B} = \frac{\sin[(2n+1)\psi + \alpha] - \sin(\psi + \alpha)}{2\sin(\psi + \alpha) \sin\psi}$
Modelo de Fraidenraich (1998)	$RC = 1 + \frac{2 \sin(n\psi) \cos(n+1)\psi}{\sin\psi} \dots \times \frac{1 + \tan\alpha \tan(n+1)\psi}{1 - \tan\alpha / \tan\psi}$	-
Modelo de Burkhard (1978)	$RC = \frac{[\sin(2n+1)\psi]}{\sin\psi}$	$\frac{H}{B} = \frac{\sin(2n\psi) \cot\psi - 1}{\sin\psi}$
Modelo de Irshid (1988)	$RC = \frac{\sin(2n+1)\psi}{\sin\psi}$	$H = \frac{1}{2}(A - B) \cot\psi$

Escolha do modelo

A escolha do modelo mais adequado, a cada caso, se deve principalmente ao tipo de rastreamento ou a ausência deste.

O Modelo de Mannan (1978) é usado, principalmente, para projetos com ajustes sazonais de inclinação, e parte do princípio de que o raio que atinge a borda superior do refletor atinge a borda inferior (ou oposta) do absorvedor, e que os raios, dentro do limite do ângulo de aceitação, chegarão com uma reflexão, ou diretamente, ao absorvedor.

O primeiro Modelo de Burkhard (1978b), como o modelo de Mannan, é para projetos com ajustes sazonais de inclinação, porém, o razão de concentração leva em consideração o número de reflexões. Os valores apresentam pequena variação no tamanho do refletor e no fator de concentração.

O Modelo de Fraidenraich (1998), leva em consideração o rastreamento em um eixo norte-sul, isto é, rastreamento diurno. O critério principal é que tenha uma distribuição uniforme da radiação sobre a superfície absorvedora, o que é exigência para FV.

O segundo Modelo de Burkhard (1978) derivou uma expressão analítica para RC que considera um número arbitrário de reflexões, para um ângulo normal de incidência. Com isto, o critério principal é se obter um nível máximo de concentração após n reflexões. O absorvedor foi colocado no cone em que ocorre a n -ésima reflexão. Com isto o ângulo de aceitação para este modelo é zero, pois é maximizado para concentração e indicado para sistemas com, pelo menos, um eixo de rastreamento.

O Modelo de Irshid (1988) é similar ao segundo modelo de Burkhard, tendo critério similar este, não permitindo ângulo de aceitação diferente de zero, sendo apropriado para uso em sistemas rastreadores em dois eixos.

Portanto, o modelo mais adequado ao presente trabalho, foi o modelo de Mannan (1978), por se tratar de um sistema fixo com ajustes sazonais, o que reduz os custos com sistemas auxiliares de rastreamento e manutenção destes.

2.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste capítulo foi analisar a metodologia de dimensionamento de um sistema de aquecimento de água com utilização de um coletor com concentrador de radiação solar. Os objetivos específicos deste trabalho são: (i) realizar um estudo comparativo de ganho de radiação de uma superfície de um coletor solar com e sem concentrador; e (ii) mostrar a variação do ganho de energia solar mensal durante um ano para a cidade de Viçosa, MG.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

A análise foi realizada nos Laboratórios de Energia na Agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Foi realizada uma simulação matemática com os dados históricos de radiação para o município de Viçosa, altitude: 650 m; latitude: 20° 45' S; e longitude: 42° 52' W para um dia de cada mês do ano considerando um coletor utilizando ou não um concentrador solar, visando aumentar o ganho de energia na superfície absorvedora fixa.

2.3.1 Saldo de energia solar e avaliação do ganho adicional de radiação solar

Balanço de energia solar

O modelo de cálculos de radiação solar utilizado no dimensionamento de sistemas de aquecimento solar neste trabalho, é o modelo de Klein e Theilacker, descrito por Duffie e Beckman (1991), devido ao seu nível de precisão equiparável aos outros modelos e simplicidade nos cálculos.

Declinação

A declinação solar é o ângulo entre o raio vetor do sol e o plano equatorial terrestre. Seu valor é obtido pela equação de Cooper, equação 2.1.

$$\delta = 23,45 \sin \left[2\pi \frac{284 + j}{365} \right] \quad (2.1)$$

Erro! Dígito esperado.em que

δ = declinação, grau; e
 j = dia do ano, dia juliano;

Ângulo horário solar e ângulo horário do por do sol

O ângulo horário solar é a posição angular do sol a leste (ou oeste), a partir do meridiano local. É negativo pela manhã, positivo pela tarde e igual a zero ao meio dia solar. Varia 15 graus por hora solar, que é baseado no movimento aparente do Sol cruzando o céu.

O ângulo horário do por do sol, ω_s , dado pela equação 2.2, corresponde ao horário quando o sol se põe no horizonte local.

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (2.2)$$

em que

ω_s = ângulo do por do sol, grau;
 δ = declinação, grau; e
 φ = latitude local, grau.

Radiação extraterrestre e índice de claridade

A radiação solar que incide fora da atmosfera terrestre é chamada de radiação extraterrestre. Essa radiação extraterrestre diária em um plano horizontal, H_0 , foi calculada para o dia j pela equação 2.3.

$$H_0 = \frac{86.400 G}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(360 \frac{j}{365} \right) \right] (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \varphi \sin \delta) \quad (2.3)$$

em que

j = dia do ano, dia juliano;
 G = constante solar média, 1366 Wm⁻²; e
 H_0 = radiação extraterrestre diária em um plano horizontal, MJm⁻².

A atmosfera, com seus gases e particulados, atenua a radiação que atinge o seu topo, isto é, antes de atingir à superfície terrestre. A razão entre a radiação

solar que atravessa a atmosfera, e a radiação extra terrestre é conhecida como índice de claridade, $\bar{K}_T$, é adequado a condições tropicais (LIU e JORDAN, 1960), e foi calculado pela equação 2.4.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.4)$$

em que

- $\bar{K}_T$ = índice de claridade, decimal;
- $\bar{H}$ = média mensal da radiação diária em um plano horizontal, MJm⁻²; e
- $\bar{H}_0$ = média mensal da radiação extraterrestre diária em um plano horizontal, MJm⁻².

Radiação global e difusa

A radiação solar foi dividida em duas componentes: a radiação direta, proveniente do disco solar; e a radiação difusa, que emana do restante da abóbada celeste e refletida em superfícies adjacentes.

A base de dados utilizada para os cálculos foi a do *Langley Atmospheric Science Data Center (ASDC)* da NASA, com dados médios de julho de 1983 a junho de 2005 que fornece os dados de radiação no plano horizontal em kWh m⁻² dia⁻¹ (NASA, 2008). Esta base de dados, é uma das mais abrangentes disponíveis, tornando fácil a reaplicação de dados para outras localidades. A partir destes dados, foram considerados os de radiação e ganho de radiação para cada hora do dia na superfície inclinada.

A média da radiação direta diária mensal, $\bar{H}_d$, foi obtida por meio da correlação de Erbs, equação 2.5, descrita por Duffie e Beckman (1991).

Quando o ângulo do por do sol é menor que 81,4°:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \bar{K}_T + 4,189 \bar{K}_T^2 - 2,137 \bar{K}_T^3 \quad (2.5)$$

em que

- $\bar{H}_d$ = média mensal da radiação direta diária, MJm⁻²;
- $\bar{H}$ = média mensal radiação diária em um plano horizontal, MJm⁻²; e
- $\bar{K}_T$ = índice de claridade; decimal.

Quando o ângulo do por do sol é maior que 81,4°:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K}_T + 3,417 \bar{K}_T^2 - 1,821 \bar{K}_T^3 \quad (2.5)$$

em que

$$\begin{aligned} \bar{H}_d &= \text{média mensal da radiação direta diária, MJm}^{-2}; \\ \bar{H} &= \text{média mensal radiação diária em um plano horizontal, MJm}^{-2}; \text{ e} \\ \bar{K}_T &= \text{índice de claridade; decimal.} \end{aligned}$$

A radiação diária média foi calculada em valores horários, e isto foi feito por meio das fórmulas de Collares-Pereira e Rabl (1979), para se obter a razão da irradiância global horária, equações 2.6, 2.7 e 2.8.

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (2.6)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (2.7)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin \left(\omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (2.8)$$

em que

$$\begin{aligned} r_t &= \text{razão horária da radiação total global, decimal/h;} \\ \omega_s &= \text{ângulo do por do sol, grau; e} \\ \omega &= \text{ângulo horário solar, grau.} \end{aligned}$$

Da mesma forma, se obteve a razão horária de irradiância difusa por meio da equação de Liu e Jordan.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (2.9)$$

onde

$$r_d = \text{razão horária da irradiância difusa, decimal/h;}$$

A irradiância global na superfície horizontal e suas componentes difusa e direta foram calculadas pelas equações 2.10, 2.11 e 2.12.

$$H = r_t \bar{H} \quad (2.10)$$

em que

H = irradiância global na superfície horizontal, MJm⁻².

$$H_d = r_d \bar{H}_d \quad (2.11)$$

em que

H_d = radiação difusa na superfície horizontal, MJm⁻².

$$H_b = H - H_d \quad (2.12)$$

em que

H_b = radiação direta na superfície horizontal, MJm⁻².

Irradiância solar em planos fotovoltaicos inclinados

A intensidade da radiação solar recebida sobre uma superfície está fortemente relacionada com sua inclinação e orientação. Como a maioria dos bancos de dados fornece as medidas sobre a radiação solar incidente na superfície terrestre coletadas sobre superfícies horizontais (valores da radiação solar global), torna-se necessário estimar a intensidade da radiação solar recebida numa superfície inclinada, que foi obtida pela equação 2.13 (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

$$H_t = H_b R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.13)$$

em que

- H_t = radiação horária total, MJm⁻²/h;
- H_b = radiação direta na superfície horizontal, MJm⁻²;
- H_d = radiação difusa na superfície horizontal, MJm⁻²;
- H = radiação global na superfície horizontal, MJm⁻²;
- R_b = razão entre a intensidade da radiação direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade e ou radiação direta sobre uma superfície horizontal, decimal;
- β = inclinação da superfície, grau; e
- ρ = albedo, decimal.

A razão entre a intensidade da radiação direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade e ou radiação direta sobre uma superfície horizontal, foi obtida pela equação 2.14.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.14)$$

em que

- θ = ângulo de incidência da radiação direta na superfície, grau;
- θ_z = ângulo zenital do sol, grau; e
- R_b = razão entre a intensidade da radiação direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade de ou radiação direta sobre uma superfície horizontal, decimal.

O comprimento do dia, D_L , foi calculado pela equação 2.15.

$$D_L = \frac{2\omega_s}{15} \quad (2.15)$$

em que

- D_L = comprimento do dia, h; e
- ω_s = ângulo horário do por do sol, grau.

A irradiância diária total, $\bar{H}_t$, foi calculada multiplicando-se a radiação horária total, H_t , pelo comprimento do dia, D_L .

$$\bar{H}_t = H_t D_L \quad (2.16)$$

em que

- $\bar{H}_t$ = radiação diária total, $\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}$;
- H_t = radiação horária total, $\text{MJm}^{-2} \text{h}^{-1}$; e
- D_L = comprimento do dia, h.

Irradiância em planos fototérmicos inclinados

A radiação solar no plano inclinado foi calculada pela equação 2.17.

$$\bar{H}_t = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.17)$$

em que

- $\bar{H}_t$ = radiação diária total, MJm^{-2} ;
- $\bar{H}_b$ = radiação direta na superfície horizontal, MJm^{-2} ;
- $\bar{H}_d$ = radiação difusa na superfície horizontal, MJm^{-2} ;
- $\bar{H}$ = radiação global na superfície horizontal, MJm^{-2} ;
- $\bar{R}_b$ = razão média entre a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície horizontal, decimal;

β = inclinação da superfície, grau; e
 ρ = albedo, decimal.

A razão média entre a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície horizontal, $\bar{R}_b$, foi obtida pela equação 2.18.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.18)$$

em que

$\bar{R}_b$ = razão média entre a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade da radiação média direta sobre uma superfície horizontal, decimal;
 φ = latitude local, grau;
 β = inclinação da superfície, grau;
 δ = declinação, grau;
 ω'_s = ângulo do por do sol para superfície inclinada, grau; e
 ω_s = ângulo horário do por do sol, grau.

O ângulo horário do por do sol para uma superfície inclinada, ω'_s , foi calculado pela equação 2.19, deve-se escolher o menor valor.

$$\omega'_s = \min \begin{cases} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{cases} \quad (2.19)$$

em que

ω'_s = ângulo do por do sol para superfície inclinada, grau;
 φ = latitude local, grau;
 β = inclinação da superfície, grau; e
 δ = declinação, grau.

Por fim, a radiação direta na superfície horizontal, $\bar{H}_b$, foi calculada pela equação 2.20.

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (2.20)$$

em que

$\bar{H}_b$ = radiação direta na superfície horizontal, MJm⁻²;
 $\bar{H}$ = radiação global na superfície horizontal, MJm⁻²; e
 $\bar{H}_d$ = radiação difusa na superfície horizontal, MJm⁻².

Ganho adicional de radiação pelo uso de refletores planos

Reflexão da radiação incidente

Devido à cobertura, geralmente de vidro, de proteção de sistemas fotovoltaicos e fototérmicos e a posição oblíqua dos refletores lateralmente em relação ao absorvedor, é preciso incluir as perdas por reflexão e a subsequente transmitância, a fim de se contabilizar o ganho da energia pelo uso de refletores planos.

Para superfícies planas, a lei de Fresnel expressa a reflexão de luz não polarizada quando passa de um primeiro para um segundo meio. As reflexões são divididas em duas componentes, uma perpendicular e outra paralela ao plano. As equações 2.21, 2.22 e 2.23 são usadas para o cálculo desses componentes.

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.21)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.22)$$

$$r = \frac{1}{2} (r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (2.23)$$

em que

- r = média da reflexão das duas componentes, decimal;
- $r_{\perp}$ = reflexão da componente perpendicular, decimal;
- $r_{\parallel}$ = reflexão da componente paralela, decimal;
- θ_2 = ângulo de incidência no segundo ângulo, grau; e
- θ_1 = ângulo de incidência no primeiro ângulo, grau.

Reflexão e transmissão no meio

De acordo com ângulo de incidência do raio de radiação e a e a fração refletida, r , a parte do raio que penetra no meio é $(1 - r)$ e a que é transmitida através do meio é $(1 - r)^2$. As reflexões internas ao meio se repetem continuamente, Figura 2.2. As transmitâncias podem ser obtidas pela equação 2.24, 2.25 e 2.26.

$$\tau_{\perp} = \frac{(1 - r_{1\perp})(1 - r_{2\perp})}{1 - r_{1\perp} r_{2\perp}} \quad (2.24)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{(1 - r_{1\parallel})(1 - r_{2\parallel})}{1 - r_{1\parallel}r_{2\parallel}} \quad (2.25)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) \quad (2.26)$$

em que

- τ = transmitância total, decimal;
- $\tau_{\parallel}$ = transmitância da componente paralela, decimal;
- $\tau_{\perp}$ = transmitância da componente perpendicular, decimal;
- r = média da reflexão das duas componentes, decimal;
- $r_{\perp}$ = reflexão da componente perpendicular, decimal; e
- $r_{\parallel}$ = reflexão da componente paralela, decimal.

Hipótese simplificada das reflexões

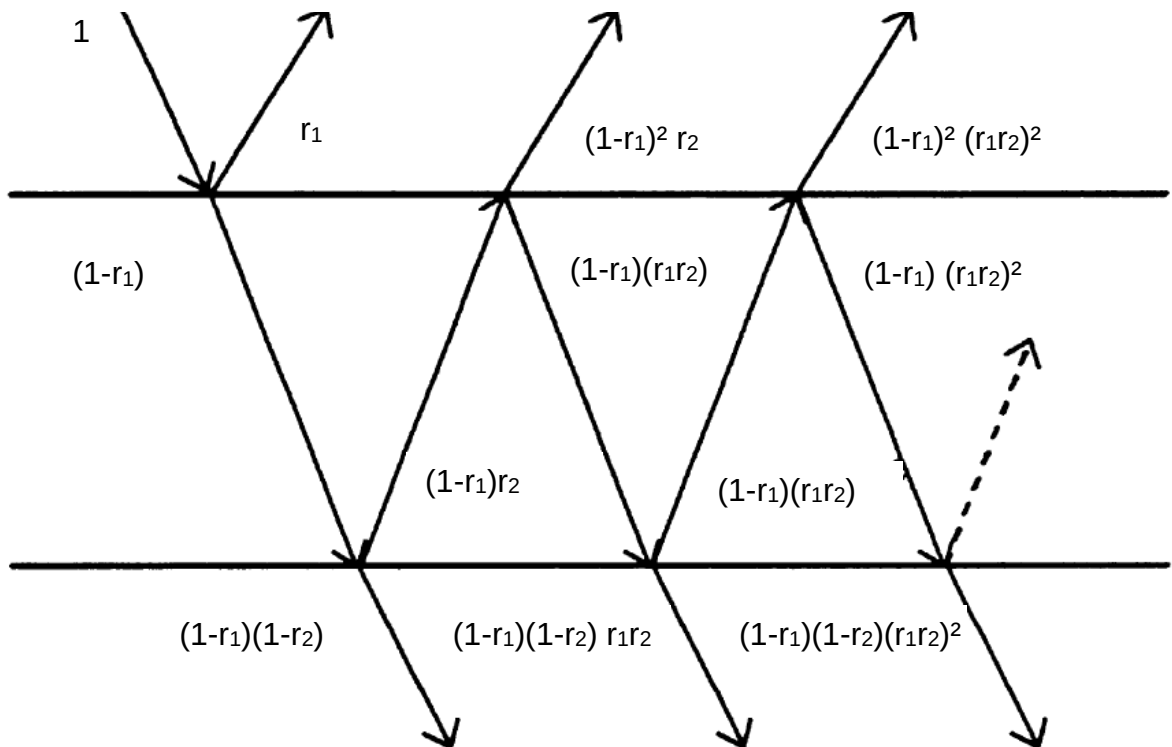


Figura 2.2 Reflexão e transmissão no meio.

Os ângulos em cada meio foram obtidos pela lei de Snell, equação 2.27.

$$\frac{\sin \theta_{n1}}{\sin \theta_{n2}} = \frac{n_{n1}}{n_{n2}} \quad (2.27)$$

em que

- θ_{n1} = ângulo de incidência no primeiro meio, grau;
- θ_{n2} = ângulo de incidência no segundo meio, grau;

n_{n1} = índice de refração do primeiro meio, decimal; e
 n_{n2} = índice de refração do segundo meio, decimal.

Hipótese de reflexão especular não difusa

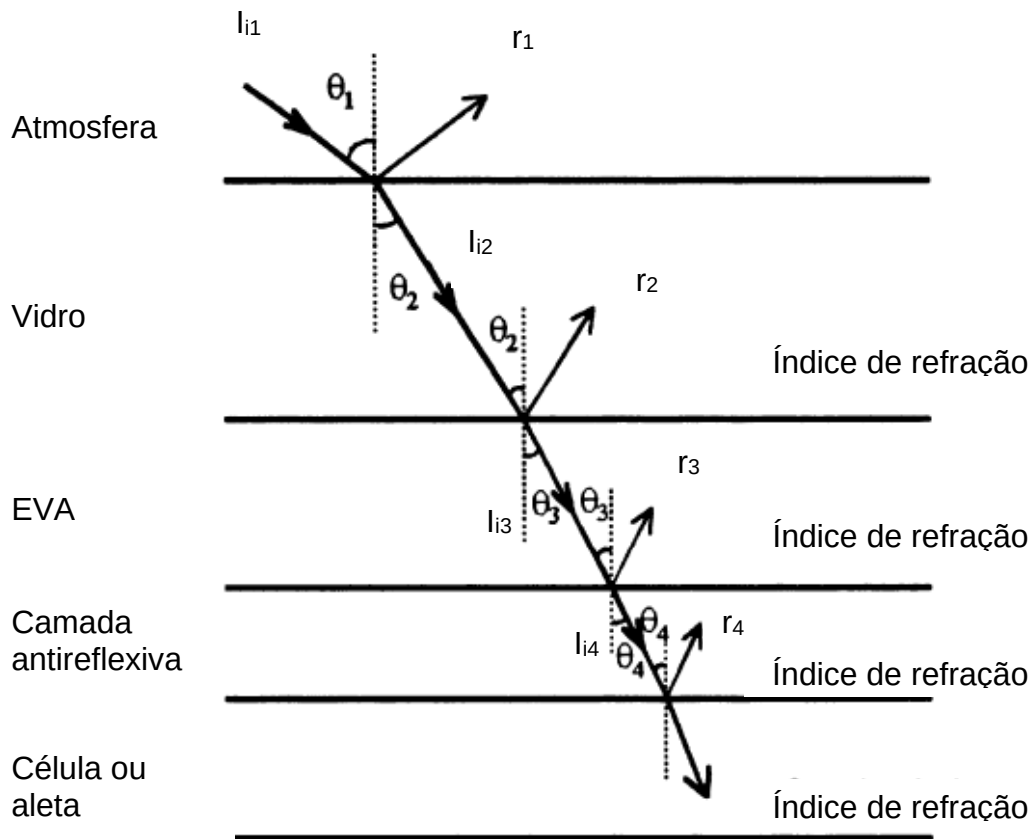


Figura 2.3 Reflexão, transmissão, radiação incidente e índice de refração em seus respectivos meios.

Modificador do ângulo de incidência

Para coletores planos fixos, há uma mudança no ângulo de incidência durante a trajetória diária do sol, sendo perpendicular ao plano ao meio dia solar, de 90° , com a normal ao plano, ao pôr do sol e de -90° ao nascer do sol, para superfícies inclinadas com o ângulo apropriado a declinação local. Os raios provenientes do refletor, no caso do uso de concentradores planos em "V", também sofrem uma modificação, porém de ângulo fixo, relativa à inclinação deste refletor. Coletores com uma superfície plana absorvedora têm ganho energético máximo de irradiância ao meio-dia solar (0°).

Segundo Duffie e Beckman (1991) O modificador do ângulo de incidência, K_d , o qual depende diretamente do ângulo de incidência, θ_i , foi calculado para o vidro pela equação 2.28.

$$K_d = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) \quad (2.28)$$

em que

K_d = modificador do ângulo de incidência, decimal;
 b_0 = coeficiente do modificador do ângulo de incidência, decimal; e
 θ_i = ângulo de incidência, grau.

Os valores aproximados para o coeficiente do modificador do ângulo de incidência, b_0 , são -0,10, para uma camada de vidro, e -0,17, para duas camadas (DUFFIE E BECKMAN, 1991).

Nos casos que a fração difusa de radiação teve valor considerável, foi distinguida a componente radiação direta da radiação difusa e da refletida pelo solo.

A componente difusa e refletida pelo solo teve o valor equivalente a se usar um ângulo de incidência na equação 2.24 de $\theta_i = 60^\circ$ para casos típicos (DUFFIE E BECKMAN, 1991).

Equações de ganho de radiação

A radiação incidente, pode ser classificada em três componentes: (i) radiação direta, (ii) radiação refletida após uma ou mais reflexões e (iii) radiação difusa.

A primeira fração é a parte da radiação que incide diretamente no absorvedor, a segunda, a radiação que incide no espelho e é refletida no absorvedor, e a terceira, devido a dispersão atmosférica e superfície do solo com vista para o absorvedor, para dias com céu isotrópico. Ignorou-se a terceira fração de radiação, pois se torna insignificante com relação ao total de radiação direta e refletida no sistema.

Para o cálculo das frações de cada intensidade de energia incidente no absorvedor, foram usadas as equações 2.29, 2.30 e 2.31 adaptadas de RABL (1985).

$$I_i = I_n \cos(\theta_i) K_{di} \quad (2.29)$$

em que

- I_i = Intensidade de radiação incidente diretamente no absorvedor, Wm^{-2} ;
- I_n = Intensidade de radiação incidente em um plano horizontal, Wm^{-2} ;
- θ_i = ângulo de incidência, grau; e
- K_{di} = modificador do ângulo de incidência do raio incidente diretamente no absorvedor, decimal.

$$I_r = I_n \cos(\theta_r) K_d \rho_{esp} \quad (2.30)$$

em que

- I_r = Intensidade de radiação incidente diretamente no absorvedor, Wm^{-2} ;
- I_n = Intensidade de radiação incidente em um plano horizontal, Wm^{-2} ;
- θ_r = ângulo de incidência dos raios refletidos, grau;
- K_d = modificador do ângulo de incidência do raio incidente no absorvedor após reflexão, decimal; e
- ρ_{esp} = refletância do espelho, decimal.

$$I_{dt} = \frac{I_d}{RC} \quad (2.31)$$

em que

- I_{dt} = Intensidade de radiação difusa total para sistema com concentração, Wm^{-2} ;
- I_d = Intensidade de radiação difusa total, Wm^{-2} ; e
- RC = fator de concentração, decimal.

Somando os três componentes do sistema chegou-se a intensidade total de radiação solar incidente, equação 2.32.

$$I = I_i + I_r + I_{dt} \quad (2.32)$$

em que

- I = Intensidade de radiação total, Wm^{-2} .

Para a energia total gerada pelo sistema, G , foi utilizada a seguinte relação, equação 2.33.

$$G = \sum_{i=0}^{D_L} I_i \quad (2.33)$$

em que

- G = energia total gerada pelo sistema com concentração, Jm^{-2} ;
- D_L = comprimento do dia, s;
- I = intensidade de radiação total, Wm^{-2} ; e
- i = intervalo de tempo entre dados, s.

Para a entrada dos dados em procedimentos analíticos de cálculo ou mesmo de softwares que não dão suporte a entradas de dados de concentradores solares, partiu-se de dois princípios: (i) que a radiação disponível no plano do absorvedor, será a energia normalmente incidente somada a energia proveniente dos refletores, e (ii) que parte da superfície absorvedora pode ser substituída por refletores a fim de se ter a energia útil equivalente no plano absorvedor.

Não foi escolhido nenhum modelo em específico visto que a concentração não depende do modelo em si, mas dos parâmetros de cada modelo como tamanho de refletor requerido para cada um, combinado com o ângulo de inclinação deste resultando no mesmo nível de radiação incidente na superfície absorvedora.

Para o caso estudado neste trabalho, por ser sem rastreamento, ou seja, apenas ajustado sazonalmente ou fixado com o ângulo otimizado para o mês com menor nível de radiação, os modelos de Mannan e de Burkhard foram mais apropriados. Em outros casos que se tenha disponível sistema de rastreamento em dois eixos, pode-se usar qualquer outro modelo, pois apenas o ângulo de incidência da radiação incidente, ângulo de aceitação e na distribuição deste sobre o absorvedor são alterados.

Todas as equações foram implementadas e calculadas por meio de planilha eletrônica de cálculos do MS Excel®.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação do ganho de radiação no absorvedor sem com concentração

As análises foram feitas de 30 em 30 dias considerando: (i) para o mês de janeiro e fevereiro a análise foi feita para o dia 15; (ii) março e abril para o dia 17; (iii) maio e junho para o dia 18; (iv) julho, agosto e setembro para o dia 19; (v) outubro e novembro para o dia 20; e (vi) dezembro para o dia 21.

As figuras de 2.4 a 2.9 mostram a simulação de curvas de radiação para cada um dia de mês do ano considerando a concentração (+C) e ou não concentração e o ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa.

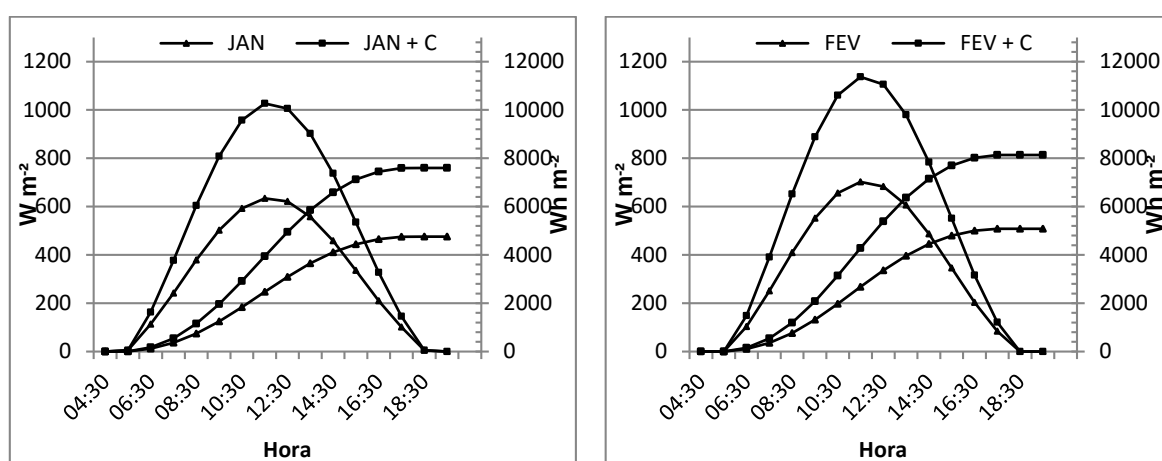


Figura 2.4 Simulação de curvas de radiação para o mês de janeiro e fevereiro com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

De acordo com a Figura 2.4 para o dia 15 do mês de janeiro, no meio dia solar, a radiação global líquida que estaria disponível no coletor plano com a utilização do concentrador solar seria um valor em torno de 1058 W m^{-2} . Caso o coletor não possuisse o concentrador este valor seria igual a 654 W m^{-2} . Observa-se então, que desde a 4h30 a 18h30 a quantidade de radiação solar que chega no coletor é superior quando se utiliza o concentrador solar.

No decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima, meio dia solar, este valor foi superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria em torno de 60% pela comparação das áreas abaixo das curvas.

Para o mês de fevereiro, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

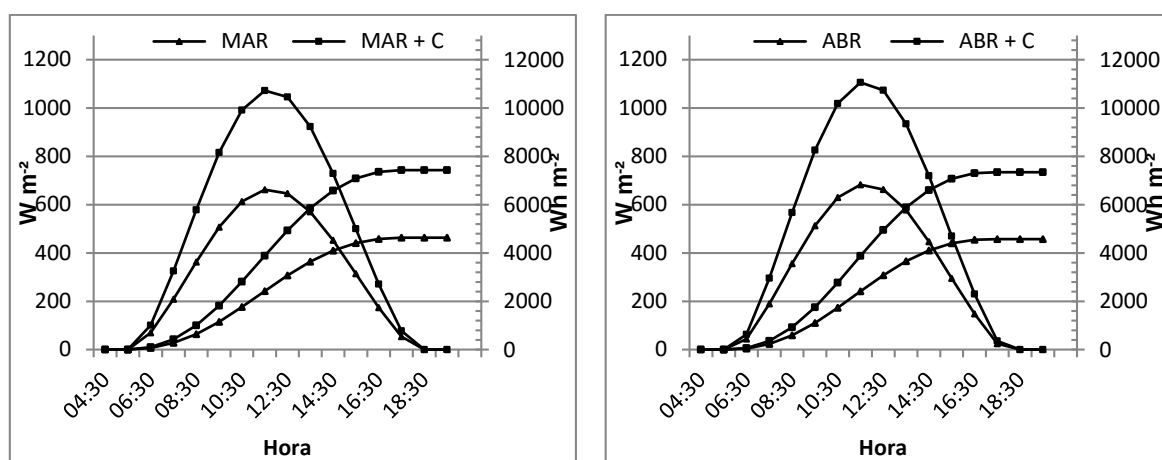


Figura 2.5 Simulação de curvas de radiação para o mês de março e abril com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

Para o mês de março, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

Para o mês de abril, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 61%.

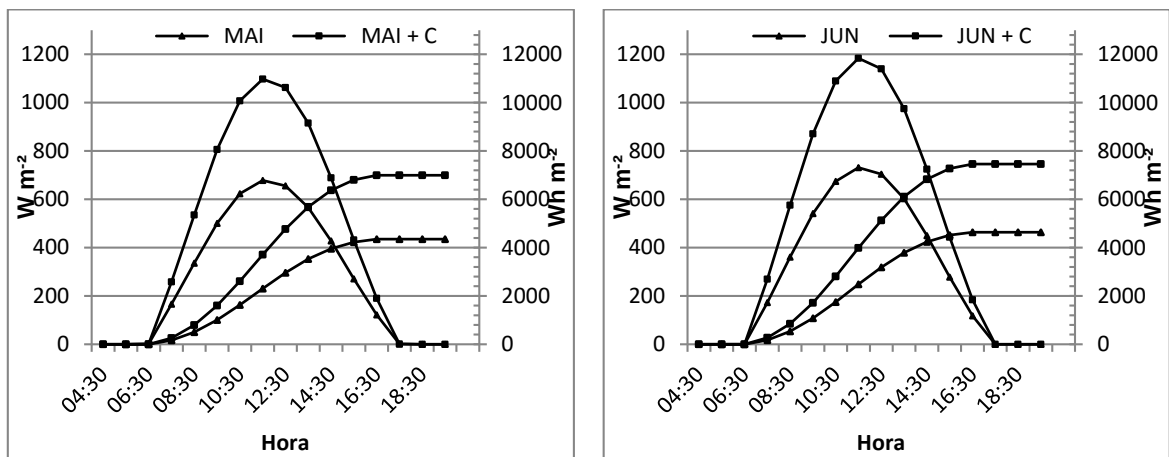


Figura 2.6 Simulação de curvas de radiação para o mês de maio e junho com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

Para o mês de maio, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 61%.

Para o mês de junho, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 61%.

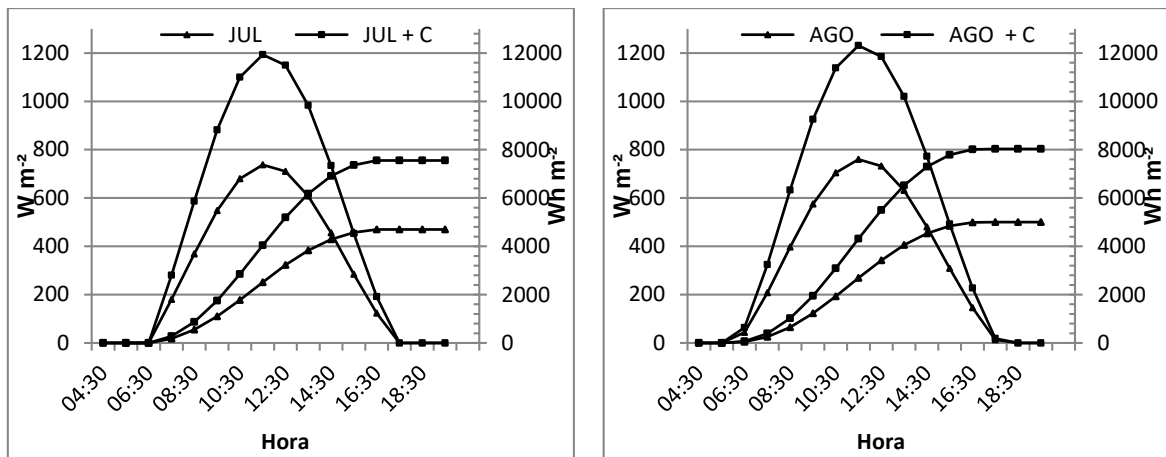


Figura 2.7 Simulação de curvas de radiação para o mês de julho e agosto com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

Para o mês de julho, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 61%.

Para o mês de agosto, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 61%.

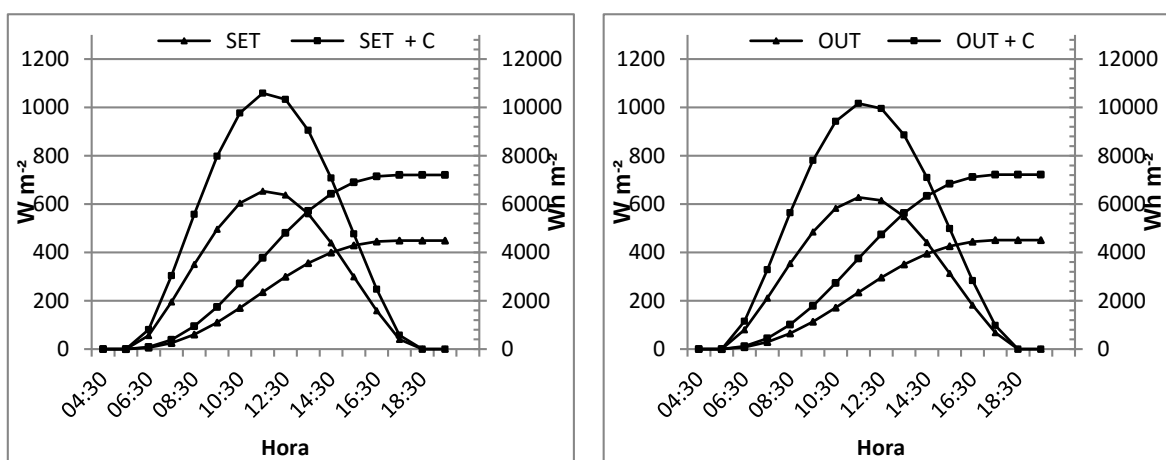


Figura 2.8 Simulação de curvas de radiação para o mês de setembro e outubro ano com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho

de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

Para o mês de setembro, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

Para o mês de outubro, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

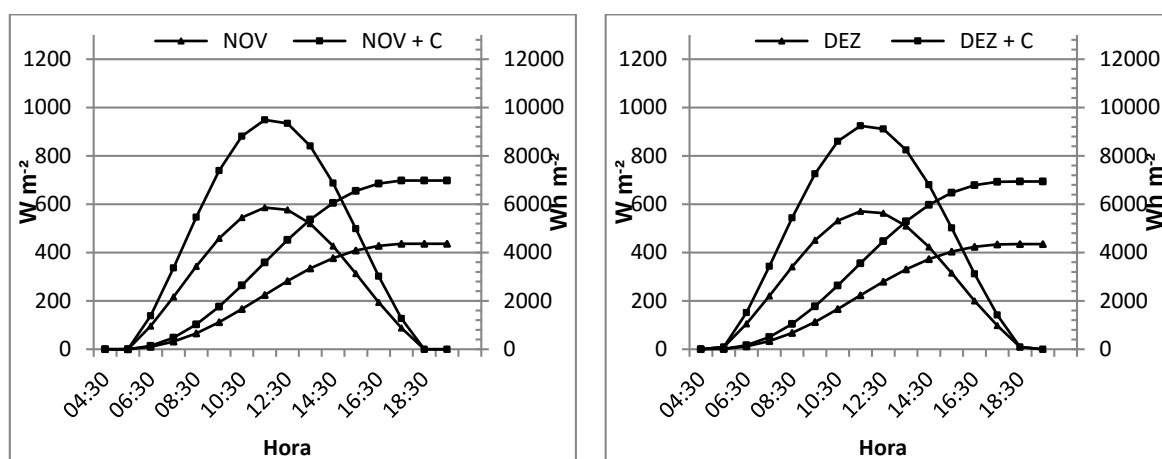


Figura 2.9 Simulação de curvas de radiação para o mês de novembro e dezembro com concentração (+C) e sem concentração, curvas fechadas e ganho de energia líquida na superfície absorvedora fixa, curvas abertas, nos seus cursos diários (hora a hora).

Para o mês de novembro, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

Para o mês de dezembro, no decorrer do dia, no horário de radiação solar máxima este valor poderia ser superior a cerca de 62% da radiação que o coletor recebe sem a utilização do concentrador solar. O saldo de radiação líquida, que

considera todo o período do dia, este aumento de radiação solar seria igual em torno de 60%.

A Figura 2.10 mostra a simulação do ganho em percentagem do saldo de energia ao longo de um dia típico de cada mês e percentagem instantânea do ganho no meio dia solar para o mesmo dia.

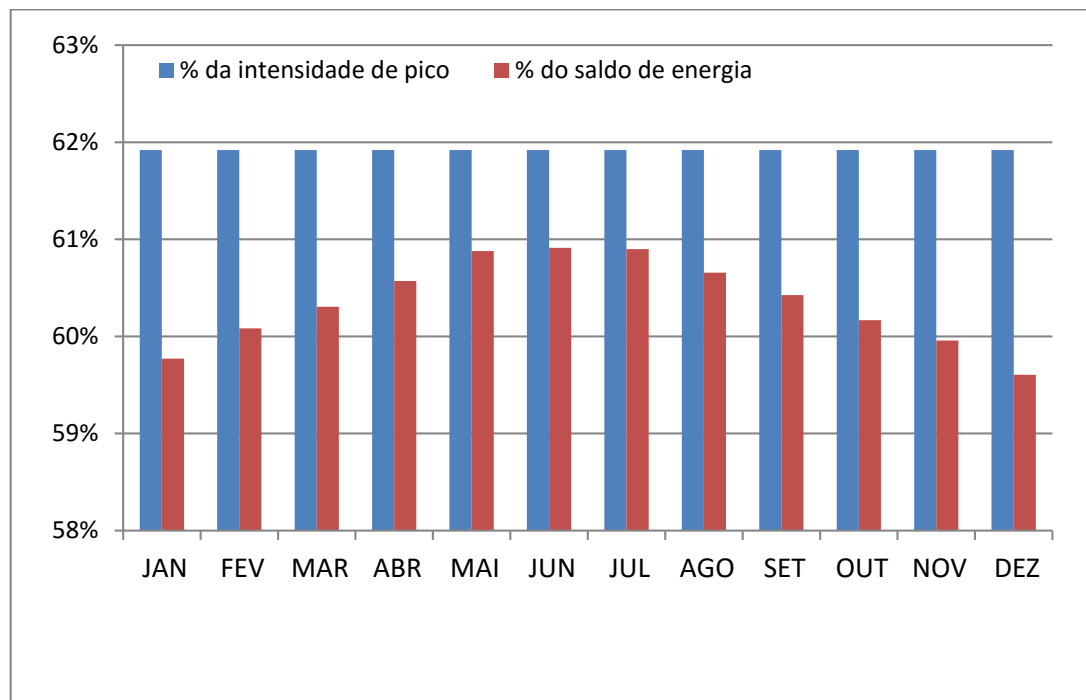


Figura 2.10 Simulação do ganho em percentagem do saldo de energia ao longo de um dia típico de cada mês e percentagem instantânea do ganho no meio dia solar para o mesmo dia.

A Figura 2.11 mostra o efeito da inclinação do coletor térmico ou painel fotovoltaico solar durante um dia de sol na quantidade de radiação incidente no módulo.

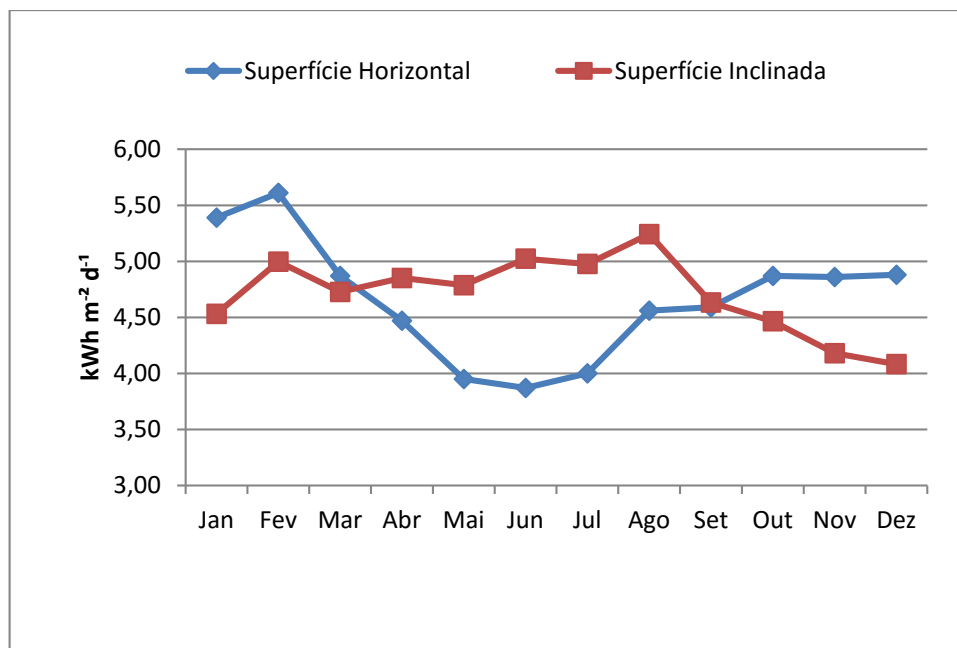


Figura 2.11 Efeito da inclinação do coletor térmico ou painel fotovoltaico solar na recepção de energia com a inclinação igual à latitude + 15° e ângulo azimutal de superfície, -21°, para correção da declinação magnética para Viçosa - MG.

De acordo com a Figura 2.11 a energia incidente no coletor solar foi maximizada, na posição inclinada, em detrimento a posição horizontal para maximizar o ganho de radiação nos meses mais frios, que normalmente ocorrem entre junho e agosto.

O posicionamento do coletor em relação ao sol e a declinação magnética influenciam diretamente a quantidade de radiação que o coletor receberá durante o ano todo.

Nos sistemas que não apresentam acompanhamento do movimento do sol, a estratégia de posicionamento do coletor é fundamental para maximizar a radiação solar incidente no coletor.

No ajuste da inclinação da superfície foi considerada sendo igual a latitude local + 15° e a correção da declinação magnética da Terra em 21° no ângulo azimutal de superfície do coletor para a localidade, sendo assim, nos meses mais frios do ano, haverá a maximização da radiação incidente no coletor em sistemas fixos.

Outra alternativa, não utilizada neste trabalho, para maximização da captação de energia solar durante maior parte do ano seria ajuste sazonal, normalmente feito em março e setembro, ou periódico, para ajustes com períodos

menores que 6 meses, da inclinação da superfície, sendo o sazonal mais indicado para climas tropicais, o periódicos para climas mais frios durante o ano todo.

2.5 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir.

- a utilização de concentrador solar pode melhorar a captação da energia solar em um coletor plano em cerca de 62% em um ano, para o município de Viçosa-MG;
- o saldo de radiação líquida com a utilização de concentrador solar em um coletor plano durante um ano é de cerca de 60% para o município de Viçosa-MG;
- existe a possibilidade de redução do número de coletores solares em pelo menos 1/3 em um sistema de aquecimento de água pelo aumento da área de incidência de radiação solar do coletor; e
- o posicionamento correto do coletor solar maximiza a radiação solar incidente no coletor nos períodos mais frios do ano.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURKHARD, D. G., STROBEL G. L., BURKHARD D. R., Flat sided rectilinear trough as a solar concentrator: An analytical study. **Applied Optics**, 17, 1978, pp. 1870-1877

COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, v.22, 1979, p.155-164.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar energy thermal processes**, New York: J. Wiley. 1991. 944p.

FRAIDENRAICH, N., Design procedure of V- trough cavities for photovoltaic systems. Prog. Photovolt. **Res. Appl.**, 6, 1998, pp. 43-54,.

GARG, H. P.; Hrishikesan, D. S. Enhancement of solar energy on flat-plate collector by plane booster mirrors. **Solar Energy**, Volume 40, Issue 4, 1988, pp. 295-307.

HOLLANDS, K. G. T., A concentrator for thin film solar cells. **Solar Energy**, 13, 1971, pp. 149-163.

INMETRO, **Tabelas de consumo/eficiência energética: Sistemas e Equipamentos Para Aquecimento Solar de Água** - Edição 08/2009,

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM, *online*, 2009 Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/>>, Acessado em 27 de Julho de 2009.

IRSHID, M. I., OTHMAN, M. O., V - Troughs with high concentration ratio for PV Concentrator Cells. **Solar Energy**; 23, 1988, pp. 159-172.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, [S.l.], v. 4, 1960, p. 1-19.

MANNAN, K. D., BANNEROT R. B., Optimal geometries for one and two faceted symmetric side wall booster mirrors. **Solar Energy**, 21, 1978, pp. 389-391.

MARTIN, Christopher L., GOSWAMI, D. Yogi, **Solar Energy Pocket Reference**, Londres, Earthscan Publications Ltd. 2005, 92p.

NASA, **Surface meteorology and Solar Energy**, Nasa Langley ASDC, *online*, 2008 Disponível em < <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>>, Acessado em 27 de maio de 2008.

PERERS, B., KARLSSON, B., BERGKVIST, M., Intensity distribution in the collector plane from structured booster reflectors with rolling grooves and corrugations **Solar Energy**, 53, 1994 pp. 215.

RABL, A. Comparison of solar concentrators. **Solar Energy**. Volume 18, Issue 2, 1976, pp. 93-111.

SANGANI, C.S., SOLANKI, C.S. Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 91, 2007, pp. 453–459

SEITEL, SC. Collector performance enhancement with flat reflectors. **Solar Energy** 1975; 17 pp. 291

SHEC, **SHEC LABS has developed the world's most efficient Solar Thermal technology**, *online*, 2008, Disponível em <<http://www.shec-labs.com/>>, Acessado em 27 de novembro de 2008.

TABOR, H., Mirror boosters for solar collectors, **Solar Energy**, Vol. 10, Issue 3, July-September 1966, pp. 111-118

3 CONCENTRADORES SOLARES EM SISTEMAS FOTOTÉRMICOS

RESUMO

A análise foi realizada nos Laboratórios de Energia na Agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. Foi aplicada a metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos em um estudo de caso. Foram feitos: (i) estudo comparativo entre formas diferentes de aquecimento de água, a saber: (a) chuveiro elétrico; (b) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, com e sem concentrador de energia, com energia complementar a propano; e (ii) realização de uma análise econômica de vida útil e de sensibilidade. Observou-se que a utilização do concentrador solar reduziu o investimento necessário para a aquisição do sistema de aquecimento de água na vida útil do projeto. O fator que mais influenciou nas análises foi a variação do custo da energia elétrica e o custo inicial na vida útil do sistema. As principais conclusões deste trabalho foram: (i) o custo inicial do equipamento é um fator preponderante para a substituição do chuveiro por aquecimento solar, no entanto, é viável economicamente; (ii) os fatores relacionados a variação do preço da energia elétrica influenciam diretamente na análise de retorno de investimento da substituição do chuveiro elétrico por coletores solares com concentrador de radiação solar; (iii) a utilização do concentrador solar minimiza a utilização de combustível complementar ao sistema de aquecimento de água com coletor solar; e (iv) para o caso base

estudado o GLP é indicado para combustível complementar em sistemas de aquecimento de água com coletor solar.

PALAVRAS CHAVE: concentrador solar; energia solar; análise econômica de vida útil.

3.1 INTRODUÇÃO

Atualmente uma das mais viáveis formas de aproveitamento da energia solar é o aquecimento de água. Sendo estas necessárias em residências, hotéis, indústrias, edifícios e propriedades rurais, entre outras aplicações. Em geral, este aquecimento ocorre via equipamentos solares térmicos, também conhecidos como aquecedores de água fototérmicos.

Os aquecedores solares térmicos mais usados são compostos por coletor solar plano e reservatório térmico. Seu princípio de funcionamento é baseado na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar. O calor das placas é transmitido para a água que circula no interior dos tubos ou canais, os quais, normalmente são projetados em cobre. O reservatório térmico é um recipiente onde é armazenada a água aquecida. São cilindros de cobre ou inox, isolados termicamente com poliuretano expandido ou lã de vidro. Desta forma, a água permanece aquecida e disponível para uso a qualquer hora do dia. A caixa de água fria alimenta o reservatório, mantendo-o sempre cheio. Em sistemas mais simples, a água circula entre os coletores e o reservatório por meio de sistema de termosifão (também conhecido como sistema de circulação por convecção natural). É um mecanismo natural, em que a água dos coletores fica mais quente e por consequência menos densa que a água no reservatório. Assim a água fria impulsiona a água quente gerando a circulação por convecção natural.

Para aumentar a eficiência dos sistemas fototérmicos, pode-se fazer uso de concentradores. Existem dois tipos básicos: o parabólico e o plano. Normalmente os concentradores são constituídos por folhas de alumínio anodizado especular, o qual apresenta grande refletância que varia entre 80% (IQBAL, 1983) e 95% (RONNELID e KARLSSON, 1996). Para equipamentos solares de aquecimento de água, o custo de implantação dos concentradores é aproximadamente 30% de um coletor para sistemas simples sem rastreamento com refletores de alumínio anodizado especular (DUFFIE e BECKMAN, 1991). Portanto, o uso de concentradores permite maior absorção de radiação solar e conseqüente aumento de temperatura da água com menores custos financeiros.

No Brasil, o aquecimento de água é um dos grandes usos finais de energia. Estima-se que o país possua aproximadamente 81% de residências com chuveiros instalados sendo que 73% utilizam energia elétrica como fonte (ELETROBRAS, 2007). Conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), o custo marginal de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (GTD) para responder a demanda dos chuveiros elétricos é da ordem de até US\$ 850 por unidade instalada. O uso intenso desse equipamento no horário de pico, compreendido entre 18 e 21 horas, resulta na queda da qualidade do fornecimento da energia e na sobrecarga dos transformadores de distribuição. A potência total instalada para satisfazer a demanda de chuveiros elétricos é da ordem de 224.000 MW, considerando cerca de 50.000.000 de chuveiros no Brasil com potência média de 4.500 W (ELETROBRAS, 2007). Entretanto, parte desta energia requerida para aquecimento de água poderia ser obtida por 250 km² de coletores de sistemas fototérmicos padrão. Pois o país se encontra numa região tropical, recebendo altos índices de radiação solar em todo seu território.

A tecnologia de sistemas solares térmicos vem sendo usada no Brasil desde a década de 60. Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), existiam cerca de 500.000 coletores solares residenciais instalados no Brasil em 2007 e que hoje estima-se em 4,5 milhões de metros quadrados (ABRAVA, 2009). Um dos principais entraves à difusão da tecnologia de aquecimento solar de água é o custo de aquisição dos equipamentos, particularmente para residências de baixa renda. Mas a tendência ao longo dos anos é a redução dos custos, em função da escala de produção, dos

avanços tecnológicos, do aumento da concorrência e dos incentivos governamentais. Fatores que têm contribuído para o crescimento do mercado são: a divulgação dos benefícios do uso da energia solar; a isenção de impostos que o setor obteve; linhas de financiamentos, como o da Caixa Econômica Federal, aos interessados em implantar o sistema; e a necessidade de reduzir os gastos com energia elétrica durante crises de abastecimento como o racionamento de energia elétrica em 2001. Outro elemento propulsor dessa tecnologia é a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e a promoção da eficiência nas edificações construídas no Brasil. O crescimento médio no setor conta com aproximadamente 600.000 m² por ano (ABRAVA, 2009).

Entretanto, para que sistemas fototérmicos tornem-se competitivos com outras fontes de energias, como hidrelétricas e termoeletricas, além da redução de custos dos equipamentos, é necessário que seja feito o dimensionamento correto do sistema. Existem dois métodos básicos de dimensionamento, o estocástico e o determinístico. O estocástico leva em consideração parâmetros probabilísticos, ou seja, fenômenos que ocorrem aleatoriamente, como o índice de nebulosidade. Enquanto o determinístico considera que os fenômenos são regidos por leis naturais, portanto, acontecimentos determinados por um conjunto de circunstâncias possíveis.

Por conseguinte, este capítulo simulará o ganho adicional de radiação solar direta em coletores pelo uso de concentradores planos, realizando balanços de energia solar e energia útil. Além disso, foi adaptada metodologia para dimensionamento determinístico de sistemas fototérmicos com concentradores para aquecimento de água.

Análise econômica

Valor presente líquido – VPL

Segundo Lapponi (1996), o Valor Presente Líquido compara todas as entradas e saídas de dinheiro na data inicial do projeto, descontando todos os valores futuros do fluxo de caixa na taxa de juros k , que mede o custo de capital. A expressão geral do VPL do projeto de investimento é dada pela equação 3.1

$$VPL = I + \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+k)^t} + \frac{Q}{(1+k)^n} \quad (3.1)$$

em que

- VPL = valor presente líquido, R\$;
- I = investimento de capital na época zero, R\$;
- R_t = retornos depois de descontados os impostos, R\$;
- n = prazo da análise do projeto ou vida útil, ano;
- k = taxa de juros, decimal;
- Q = valor residual do projeto no final do prazo da análise, R\$; e
- t = subperíodos de análise, ano.

Portanto, o critério do método do VPL estabelece que, enquanto o valor presente das entradas for maior que o valor presente das saídas, que foi calculado com a taxa de juros k, que mede o custo de capital, o projeto deve ser aceito. Resumindo, sempre que: (i) $VPL > 0$, o projeto deve ser aceito; (ii) $VPL = 0$, é indiferente aceitar ou não; e (iii) $VPL < 0$, o projeto não deve ser aceito.

Taxa interna de retorno – TIR

Segundo Lapponi (1996), esta é a taxa de juros que anula o VPL, isto é, que torna $VPL = 0$. Como a soma de todos os capitais na data inicial do projeto de investimento deve ser igual a zero, impõe-se esta condição na fórmula do VPL do projeto. A equação 3.2 apresenta a fórmula para cálculo da TIR.

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1 + TIR)^t} + \frac{Q}{(1 + TIR)^n} \quad (3.2)$$

em que

- TIR = taxa interna de retorno, decimal;
- VPL = valor presente líquido, R\$;
- I = investimento de capital na época zero, R\$;
- R_t = retornos após descontados os impostos, ou imposto de renda, R\$;
- n = prazo da análise do projeto ou vida útil, ano; e
- Q = valor residual do projeto no final do prazo da análise, R\$.

O critério do método da taxa interna de retorno estabelece que, enquanto o valor da TIR for maior que o valor do custo de capital k, o projeto deve ser aceito,

isto é, sempre que (i) $TIR > k$, o projeto deve ser aceito; (ii) $TIR = k$, é indiferente aceitar ou não; e (iii) $TIR < k$, o projeto não deve ser aceito.

Razão benefício custo – R B/C

Segundo Frizzone e Silveira (2000), a razão benefício/custo é o quociente entre a soma dos benefícios e dos custos, descontada taxa de juros adotada para cada período considerado. O importante é verificar se os benéficos são maiores que os custos.

Há várias formas para representar a razão benefício/custo (B/C), dependendo apenas de como se mede cada uma dessas variáveis. Um conceito freqüentemente utilizado é a razão entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos, que é representado pela equação

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n B_t (1+j)^t}{\sum_{t=0}^n C_t (1+j)^t} \quad (3.3)$$

em que

- B = benefício, R\$;
- C = custos, R\$;
- n = vida útil, ano;
- j = taxa de juros, decimal; e
- t = subperíodos de capitalização, ano.

Na equação 3.3, o numerador mede o valor presente dos benefícios advindos no decorrer da vida do projeto, enquanto o denominador mede o valor presente dos custos relativos à implantação e operação do projeto. Outra forma para calcular a razão B/C é diretamente a partir dos cálculos do VPL, dividindo-se o somatório dos valores descontados dos benefícios líquidos pelo investimento inicial.

Taxa de retorno do capital –TRC

É o período de tempo necessário para que o investimento inicial aplicado seja recuperado. Para comparação entre opções de investimento o tempo de

retorno do capital pode ser calculado, considerando-se a renda anual não descontada, ou seja:

$$TRC = \frac{C_i}{R_a} \quad (3.4)$$

em que

C_i = capital inicial, R\$; e
 R_a = renda anual não descontada, R\$.

O critério do método do tempo de retorno de capital estabelece que:
(i) $TRC >$ vida útil do projeto, o projeto não deve ser aceito; (ii) $TRC =$ vida útil do projeto, é indiferente aceitar ou não; e (iii) $TRC <$ vida útil do projeto, o projeto deve ser aceito.

3.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo foi avaliar financeiramente a adaptação da metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos. Os objetivos específicos deste trabalho foram: (i) realizar um estudo comparativo entre formas diferentes de aquecimento de água, a saber: (a) chuveiro elétrico; (b) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, sem concentrador de energia, com energia complementar a propano; e (c) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano com concentrador de radiação solar e energia auxiliar com GLP; e (ii) realizar uma análise econômica de investimento e de sensibilidade para o sistema em estudo utilizando os indicadores econômicos Taxa Interna de Retorno, Valor Presente Líquido, Razão Benefício Custo e Tempo de Retorno de Capital – não descontado.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

A análise foi realizada nos Laboratórios de Energia na Agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG

O método de dimensionamento utilizado para obter a fração solar suprida por área de um conjunto de coletores solares para atender a uma determinada quantidade de água a ser aquecida foi o descrito por Duffie e Beckman (1991) e seguiu o seguinte procedimento analítico, que pode ser estimado pelas equações 3.1 a 3.17.

As equações 3.1 a 3.11 baseadas em princípios termodinâmicos foram usadas para calcular a necessidade de energia requerida para suprir as diversas situações simuladas neste trabalho.

$$L_{\text{céu}} = \sigma(T_{\text{céu}} + 273,2)^4 \quad (3.1)$$

em que

$$\begin{aligned} L_{\text{céu}} &= \text{contra radiação atmosférica, } \text{Wm}^{-2}; \\ \sigma &= \text{constante de Stefan-Boltzmann, } 5.669 \times 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{)/K}^4; \text{ e} \\ T_{\text{céu}} &= \text{temperatura do céu, temperatura ideal de um corpo negro} \\ &\quad \text{emitindo a mesma quantidade de radiação, } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

$$L_{\text{claro}} = 5,31 \times 10^{-13} (T_a + 273,2)^4 \quad (3.2)$$

em que

$$L_{\text{claro}} = \text{contra radiação atmosférica sem nebulosidade, } \text{Wm}^{-2}; \text{ e}$$

T_a = temperatura ambiente, °C.

$$L_{nub}=0,96 \sigma (T_a+ 273,2-5)^4 \quad (3.3)$$

em que

L_{nub} = contra radiação atmosférica com nebulosidade, Wm^{-2} ; e
 σ = constante de Stefan-Boltzmann, $5.669 \times 10^{-8} (Wm^{-2})/K^4$.

$$L_{c\acute{e}u}=(1- c)L_{claro}+ c L_{nublado} \quad (3.4)$$

em que

c = fração média mensal do céu nublado, decimal.

$$c=\frac{(K_d - 0,165)}{0,835} \quad (3.5)$$

em que

K_d = Índice médio mensal de radiação difusa, decimal.

$$K_d = \begin{cases} 0,99 & \text{para } \leq 0,17 \\ 1,188-2,272K_T+9,473 K_T^2-21,865K_T^3+14,648K_T^4 & \text{para } 0,17 < K_T < 0,75 \\ -0,54K_T+0,632 & \text{para } 0,75 \leq K_T < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_T \geq 0,80 \end{cases} \quad (3.6)$$

em que

K_t = Índice diário de céu limpo, decimal.

Para estimar a temperatura da água de entrada no sistema, usou-se a equação 3.7.

$$T_s=\frac{T_{min} + T_{m\acute{a}x}}{2} - \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{min}}{2} h \cos\left(2 \pi \frac{n - 2}{12}\right) \quad (3.7)$$

em que

T_s = temperatura estimada da água fria, °C;
 T_{min} = temperatura mínima do solo, °C;
 $T_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima do solo, °C;
 h = Indicador do hemisfério terrestre, 1 e -1 para hemisfério norte e sul respectivamente; e
 n = número do mês do ano.

$$Q_{req}= C_p \rho V_l (T_h - T_c) \quad (3.8)$$

em que

- Q_{req} = energia requerida pelo sistema, J;
 C_p = calor específico da água, (4.200 (J/kg)/°C);
 ρ = densidade da água, kg/L;
 V_l = quantidade de água quente necessária, L;
 T_h = temperatura da água quente, °C; e
 T_c = temperatura mínima da água fria, °C .

$$Q_{col} = F_R (\tau \alpha) G - F_R U_L \Delta T \quad (3.9)$$

em que

- Q_{col} = energia coletada pelo sistema, J;
 F_R = fator de remoção do coletor, decimal;
 τ = transmitância da cobertura de vidro, decimal;
 α = absorptância da superfície coletora a ondas curtas, decimal;
 G = radiação global incidente no coletor, Wm⁻²;
 U_L = coeficiente de perda do coletor, decimal; e
 ΔT = diferença de temperatura entre a parte externa do coletor e a temperatura do fluido quente, °C.

$$Q_{lib} = Q_{adq} (1 - f_{perd}) \quad (3.10)$$

em que

- Q_{lib} = energia liberada pelo coletor, J;
 Q_{adq} = energia efetivamente adquirida, J; e
 f_{perd} = perdas diversas no sistema, decimal.

$$Q_{req,tot} = Q_{req} (1 + f_{perd}) \quad (3.11)$$

em que

- $Q_{req,tot}$ = energia requerida pelo sistema incluindo perdas diversas, J.

As equações 3.12 a 3.17 demonstram o procedimento propriamente dito do método da carta - f, um dos métodos mais utilizados atualmente por ser de rápido cálculo e fácil implementação em planilhas e linguagens de programação.

$$X = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - T_a)}{L} \quad (3.12)$$

em que

- A_c = área do coletor, m²;
 T_{ref} = temperatura de referencia empírica, 100 °C;
 L = carga de aquecimento total mensal, J;
 X = grupo X de cálculo da carta f; e
 F'_R = fator modificado de remoção do coletor, decimal.

$$Y = \frac{A_c F_R (\overline{\alpha}) H_T N}{L} \quad (3.13)$$

em que

- $\overline{\alpha}$ = produto da transmitância - absorptância média mensal, decimal;
- H_T = média diária mensal de radiação incidente no coletor, Whm^{-2} ;
- N = número de dias no mês; e
- Y = grupo Y de cálculo da carta f.

$$\frac{F_R'}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A_c F_R U_L}{(\dot{m} C_p)_c} \right) \left(\frac{(m C_p)_c}{\varepsilon (m C_p)_{\min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (3.14)$$

em que

- ε = eficiência da transferência de calor, decimal; e
- $\dot{m}$ = fluxo de massa através do coletor, kg/min.

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Capacidade considerada de armazenamento}}{\text{Capacidade padrão de armazenamento}} \right)^{-0,25} \quad (3.15)$$

em que

- $\frac{X_c}{X}$ = fator de correção simplificado para tanques de água quente com capacidade diferente de 75 litros de água quente por m^2 de coletor com valor entre 0,5 e 4,0 vezes, decimal.

$$\frac{X_{cc}}{X} = \frac{11,6 + 1,18 T_w + 3,86 T_m - 2,32 T_a}{100 - T_a} \quad (3.16)$$

em que

- $\frac{X_{cc}}{X}$ = fator de correção ampliado para tanques de água quente com capacidade diferente de 75 litros de água quente por m^2 de coletor, decimal;
- T_w = temperatura mínima aceitável para entrada de água no sistema, $^{\circ}C$; e
- T_m = maior flutuação da temperatura da água que entra no sistema, $^{\circ}C$.

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3 \quad (3.17)$$

em que

- f = fração solar da energia requerida pelo sistema, decimal.

Para a simulação foi considerado que o sistema foi dimensionado para uma família de quatro pessoas, com uma demanda de 60 litros de água quente *per capita* por dia e uma autonomia de três dias, totalizando uma necessidade de 720 litros, porém, como há um sistema de aquecimento auxiliar no sistema de referencia para fim de alternativas de investimentos, optou-se pelo reservatório de 600 litros, tamanho comercial imediatamente inferior.

Os padrões utilizados na simulação são de coletores de perfil em monobloco em alumínio polido, serpentina com tubos de cobre e aletas em cobre enegrecido com aditivos Ultra Violeta, isolamento térmico em poliuretano, dimensões de 1324 mm x 1070 mm e vedação de vidro liso transparente e de borracha de silicone.

Foi considerada uma vida útil de 20 anos e uma taxa de manutenção e limpeza do sistema igual a R\$ 50.00 por ano. Não foram consideradas depreciações do sistema de aquecimento e financiamento para compra. O custo da energia foi cotado em R\$ 0,57 por kWh e um incremento anual do custo da energia foi estimado em 8%.

Cada coletor de 1,42 m² custa no mercado brasileiro cerca de R\$ 476,64 para venda avulsa e o reservatório de 600 litros custa R\$ 1.720,00. Para o caso em questão, o dimensionamento exigiu 2 coletores para manter aquecidos 600 litros de água com, em média 45 °C na saída do chuveiro, mesmo no mês mais frio, que normalmente ocorre no mês de junho com uma fração solar de 72%.

Foi considerado uma perda nas tubulações e reservatório de 10%.

Os coletores com os espelhos são orientados na posição leste-oeste com a correção de 21° de azimuth para correção devido a declinação magnética da terra e de modo que os espelhos não obstruam a incidência dos raios solares com a mudança da orientação do sol ao longo do dia, Figura 3.1.

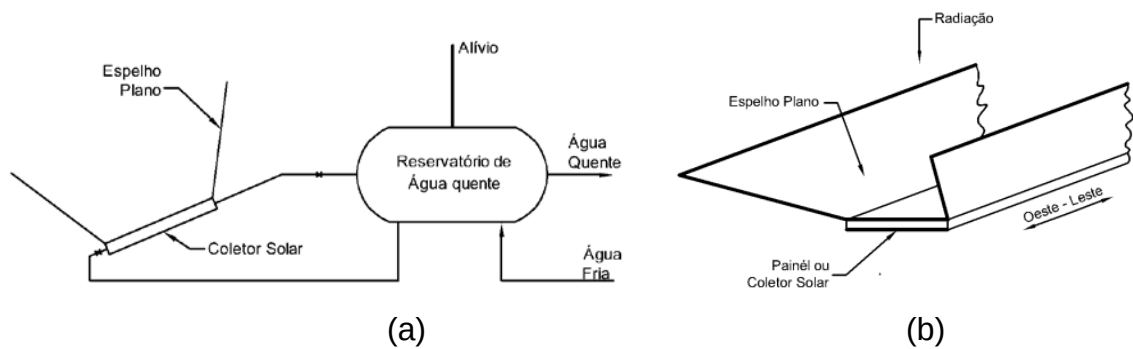


Figura 3.1 Sistema solar de aquecimento com concentradores planos (a), detalhe em perspectiva do concentrador acoplado ao coletor indicando sua orientação (b).

A Figura 3.2 mostra o limite dos raios refletidos paralelamente ao eixo de simetria do dispositivo, para um coletor com orientação normal aos raios solares.

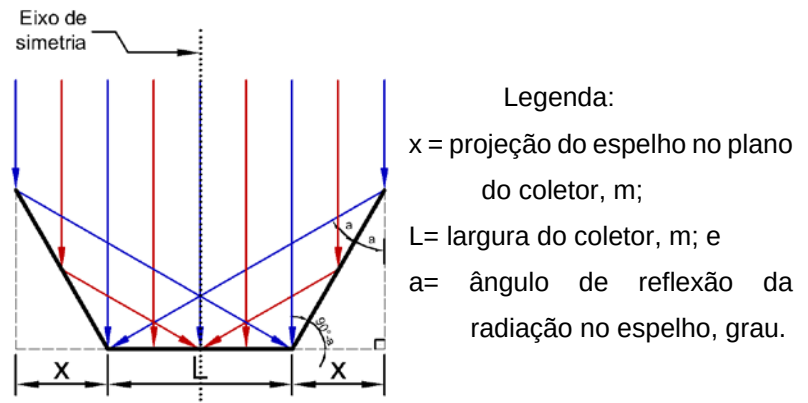


Figura 3.2 Limite dos raios solares refletidos no coletor, com orientação normal aos raios solares.

A eficiência térmica do coletor é avaliada por meio da comparação entre a quantidade de calor retirado pela água e a quantidade de energia interceptada pela área de abertura do concentrador.

A eficiência instantânea para os coletores solares foi considerada de 55% segundo o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Inmetro (2009).

Por fim, foi feita análise econômica de sensibilidade e de vida útil considerando os seguintes índices econômicos: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, Razão benefício custo e Taxa de retorno do capital – não descontado para três configurações que atendam objetivos iguais de demanda de água quente e três dias de autonomia.

As análises foram feitas comparando as seguintes alternativas de investimento, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Alternativas de aquecimento de água consideradas para análise

	Caso de referência	Caso proposto
1	Aquecimento com energia elétrica	Aquecimento solar padrão com fração solar de 77% e aquecimento auxiliar a com GLP.
2	Aquecimento com energia elétrica	Aquecimento solar com coletor substituído por espelho com fração solar de 68% e aquecimento auxiliar a com GLP .
3	Aquecimento com energia elétrica	Aquecimento solar padrão complementado com espelho com fração solar de 91%.

Para o incremento do caso proposto, foi feita uma análise de sensibilidade dos seguintes fatores: (i) inflação; (ii) reajuste do combustível acima da inflação (%); (iii) tarifa de energia elétrica (R\$/kWh); (iv) custo inicial do sistema (%); (v) vida útil do sistema (anos); (vi) número de usuários para o mesmo sistema; (vii) taxa de juros ou desconto (%); e (viii) tipo de energia no aquecimento auxiliar.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudo de caso

O Quadro 3.2 mostra os dados de entrada para a análise de sensibilidade e vida útil para a situação estudada.

Quadro 3.2 Composição dos custos iniciais para a análise de sensibilidade e vida útil para a situação estudada

Preço do coletor solar (R\$/un)	=	476,64
Preço do reservatório térmico (R\$/un)	=	1.720,00
Preço do espelho concentrador (R\$m ⁻² , com 1 US\$ = 1,70 R\$)	=	31,67
Preço do gás (R\$/kg)	=	2,50
Preço da mão-de-obra – engenharia (R\$/instalação)	=	1.000,00
Preço da manutenção – R\$/ano	=	100,00
Contingência (1% do custo total do projeto)	=	1
Eficiência de conversão do chuveiro elétrico (%)	=	95
Eficiência de conversão do aquecedor a gás (%)	=	85
Eficiência do coletor solar (%)	=	54,7
Eficiência do concentrador solar (% da radiação incidente)	=	60
Temperatura da água fria para o banho (°C)	=	21,5
Temperatura da água quente para o banho (°C)	=	45,0
Perdas diversas do sistema (%)	=	10

Quadro 3.3 Dados de entrada para a análise de sensibilidade e vida útil para a situação estudada

Variação da inflação (%)	=	0	3	6*	9	12	-
Taxa de juros (%)	=	0	3	6	9	12*	15
Reajuste do combustível acima da inflação (%)	=	0	2*	4	6	8	-
Valor da energia elétrica (R\$/kWh)	=	0,29	0,43	0,57*	0,71	0,86	-
Custo inicial do sistema (%)	=	50	75	100*	125	150	-
Vida útil do sistema (anos)	=	10	15	20*	25	30	-
Número de usuários para o mesmo sistema (fração solar)	=	1 (100%)	2 (95%)	3 (86%)	4* (77%)	5 (68%)	6 (61%)
Número de coletores no sistema (fração solar)	=	1 (52%)	2* (77%)	3 (87%)	4 (92%)	5 (99%)	-

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.3 a variação do índice de inflação variou de 0 a 12% ao ano; a taxa de juros variou de 0 a 15% ao ano; o reajuste do combustível acima da inflação variou de a a 8% ao ano; o valor da energia elétrica variou de 0,29 a 0,86 R\$/kWh; o custo inicial do sistema variou de 50 a 150 % do valor inicial do custo do sistema; a vida útil do sistema variou de 10 a 30 anos; o número de usuários para o mesmo sistema e sua respectiva fração solar variaram de 1 (100%) a 6 (61%); e o número de coletores solares no sistema e sua respectiva fração solar variaram de 1 (52%) a 5 (99%).

Os Quadros de 3.4 a 3.12 mostram os resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para cada situação estudada.

Quadro 3.4 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do valor da taxa de inflação

Inflação (%)	0	3	6*	9	12
VPL (R\$)	6.062,00	8.695,00	12.309,00	17.325,00	24.352,00
TIR (%)	31,3	35,3	39,1	42,9	46,8
R B/C (vez)	2,51	3,17	4,07	5,32	7,07
TRC (ano)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.4 o VPL, a TIR, a R B/C aumentam com o aumento da taxa da inflação. Isto se deve ao aumento do custo da energia elétrica,

que é uma variável importantíssima na composição do custo no fluxo de caixa do sistema estudado. Já o TRC é constante.

Sendo assim, os índices do caso base melhoram com o aumento da taxa de inflação e vice versa.

Quadro 3.5 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do valor da taxa de juros

Taxa de desconto (%)	0	3	6	9	12*	15
VPL (R\$)	54.076,00	36.068,00	24.689,00	17.278,00	12.309,00	8.879,00
TIR (%)	39,1	39,1	39,1	39,1	39,1	39,1
R B/C (vez)	14,47	9,99	7,15	5,30	4,07	3,21
TRC (ano)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.5 o VPL, e a R B/C diminuem com o aumento da taxa da inflação. Isto se deve ao aumento do custo do investimento inicial do projeto, que é uma variável importantíssima na composição do custo no fluxo de caixa do sistema estudado. Já a TIR e o TRC são constantes.

Sendo assim, os índices do caso base melhoram com a diminuição da taxa de juros e vice versa.

Quadro 3.6 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do reajuste da energia elétrica acima da inflação

Reajuste da energia elétrica acima da inflação (%)	0	2*	4	6	8
VPL (R\$)	9.598,00	12.309,00	15.680,00	19.892,00	25.173,00
TIR (%)	36,3	39,1	41,8	44,6	47,3
R B/C (vez)	3,39	4,07	4,91	5,96	7,27
TRC (ano)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.6 o VPL, a TIR, a R B/C aumentaram com o aumento do reajuste da energia elétrica acima da inflação. Isto se deve ao aumento do custo da energia elétrica, que é uma variável importantíssima na composição dos custos variáveis no fluxo de caixa do sistema estudado. Já o TRC é constante.

Sendo assim, os índices do caso base melhoram quando a tarifa de energia elétrica é reajustada com valores acima da inflação e vice versa.

Quadro 3.7 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do reajuste da tarifa de energia elétrica

Tarifa de energia elétrica (R\$/kWh)	0,29	0,43	0,57*	0,71	0,86
VPL (R\$)	2.937,00	7.623,00	12.309,00	16.994,00	22.015,00
TIR (%)	19,6	29,7	39,1	48,2	57,9
R B/C (vez)	1,73	2,90	4,07	5,23	6,48
TRC (ano)	8,3	4,9	3,5	2,7	2,2

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.7 o VPL, TIR, e R B/C aumentam com o aumento da tarifa de energia elétrica. Isto se deve ao custo da energia elétrica na vida útil do equipamento, que é uma variável importantíssima na composição dos custos variáveis no fluxo de caixa do sistema estudado. Já o TRC diminui com o aumento da tarifa de energia elétrica.

Sendo assim, os índices do caso base melhoram com um valor elevado da tarifa de energia elétrica, tornando cada vez mais viável a substituição do chuveiro elétrico.

Quadro 3.8 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do custo inicial do sistema

Porcentagem do Custo inicial do sistema (%)	50	75	100*	125	150
VPL (R\$)	14.316,00	13.312,00	12.309,00	11.305,00	10.302,00
TIR (%)	70,4	49,6	39,1	32,6	28,2
R B/C (vez)	8,13	5,42	4,07	3,25	2,71
TRC (ano)	1,7	2,6	3,5	4,3	5,2

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.8 o VPL, TIR, R B/C e o TRC aumentam com o aumento do custo inicial do sistema. Isto se deve a grande diferença de preço entre o chuveiro e um sistema de aquecimento de água com coletor solar, que é uma variável importantíssima na composição do custo fixo no fluxo de caixa do sistema estudado.

Sendo assim, os índices econômicos do caso base pioram com um alto custo de investimento inicial do sistema, tornando a análise cada vez inviável pelo aumento do investimento inicial nos sistemas de aquecimento de água.

Quadro 3.9 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação da vida útil do sistema

Vida útil do sistema (ano)	10	15	20*	25	30
VPL (R\$)	5.563,00	9.232,00	12.309,00	14.888,00	17.049,00
TIR (%)	36,2	38,5	39,1	39,2	39,2
R B/C (vez)	2,39	3,30	4,07	4,71	5,25
TRC (ano)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.9 o VPL, TIR, e R B/C aumentam com o número de anos de vida útil do sistema. Isto se deve aos custos variáveis, que são os combustíveis, que representam o maior percentual de gastos no custo total na vida útil dos equipamentos. Já o TRC permanece constante com o aumento do número de anos de vida útil dos equipamentos.

Sendo assim, os índices econômicos do caso base melhoram com o aumento do número de anos de vida útil dos equipamentos, tornando cada vez mais viável a substituição do chuveiro elétrico por coletores solares.

Quadro 3.10 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do número de usuários para o mesmo sistema (fração solar)

Número de usuários para o mesmo sistema (fração solar)	1 (100%)	2 (95%)	3 (86%)	4 (77%)*	5 (68%)	6 (61%)
VPL (R\$)	-424,00	4.170,00	8.423,00	12.309,00	15.940,00	19.413,00
TIR (%)	10,7	22,4	31,3	39,1	46,1	52,9
R B/C (vez)	0,89	2,04	3,10	4,07	4,97	5,84
TRC (ano)	16,6	7,0	4,6	3,5	2,8	2,4

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.10 os índices econômicos VPL, TIR, R B/C e TRC aumentam com o número de usuários para o mesmo sistema. Isto se deve a diluição do custo do investimento inicial do sistema de aquecimento de água, que é uma variável importantíssima na composição do custo fixo do fluxo de caixa do sistema estudado.

Sendo assim, os índices do caso base melhoram com o aumento do número de usuários para um sistema já existente, tornando cada vez mais viável economicamente, a substituição do chuveiro elétrico.

Quadro 3.11 Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do número de coletores

Número de Coletores no sistema (Fração Solar)	1 (52%)	2 (77%)*	3 (87%)	4 (92%)	5 (99%)
VPL (R\$)	11.128,00	12.309,00	12.494,00	12.377,00	12.404,00
TIR (%)	39,7	39,1	36,8	34,5	32,8
R B/C (vez)	4,15	4,07	3,78	3,49	3,27
TRC (ano)	3,4	3,5	3,7	4,1	4,3

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.11 o índice econômico VPL aumenta com o número de coletores no sistema. Isto se deve a diminuição dos custos com o gás, que é o combustível complementar a energia solar, que é uma variável importantíssima na composição dos custos variáveis do fluxo de caixa do sistema estudado. O preço inicial dos coletores também influencia o custo fixo da análise.

Já os índices econômicos TIR, R B/C e TRC aumentam com o aumento do número de coletores.

Sendo assim, de forma geral, os índices do caso base pioram com o aumento do número de coletores para o sistema em estudo, tornando cada vez menos viável economicamente, a substituição do chuveiro elétrico.

Quadro 3.12. Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação do sistema proposto em sua configuração padrão, substituição de parte do sistema coletor por espelho e em sua configuração padrão acrescido de espelhos.

Configuração (Fração Solar)	1 (77%) (Aquecimento solar padrão)*	2 (68%) (Aquecimento solar com painel substituído por espelho)	3 (91%) (Aquecimento solar com painel adicionado com espelho)
VPL (R\$)	12.309,00	12.076,00	12.264,00
TIR (%)	39,1	40,9	34,2
R B/C (vez)	4,07	4,31	3,45
TRC (ano)	3,5	3,3	4,1

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.12 em comparação do sistema de aquecimento de água com coletor solar (opção 1) observou-se que o aquecimento solar com painel substituído por espelho (opção 2) é a opção mais vantajosa economicamente e ambientalmente. Nesta opção com a utilização de concentrador solar a utilização de gás como combustível complementar seria minimizada pela maximização da radiação incidente nas placas dos coletores solares. porém de um ponto de vista geral, não há diferenças expressivas entre os sistemas pela proximidades dos parâmetros.

Quadro 3.13. Resultados das análises de sensibilidade e de vida útil para o sistema com a variação tipo de combustível no aquecimento auxiliar.

Tipo de combustível no aquecimento auxiliar	GLP*	Energia elétrica
VPL (R\$)	12.309,00	9.463,00
TIR (%)	39,1	33,4
R B/C (Vez)	4,07	3,36
TRC (Ano)	3,5	4,2

* - Caso base.

De acordo com o Quadro 3.13 o combustível mais indicado para a situação estudada foi o GLP que apresentou os índices econômicos mais viáveis economicamente na vida útil do projeto, principalmente em muitas cidades que é ainda oferecido subsídio em impostos urbanos por se usar aquecimento alternativos de água no imóvel residencial. Sendo assim, indica-se a utilização do GLP, como combustível complementar ao sistema de aquecimento de água com coletor solar em substituição ao chuveiro elétrico.

Além das vantagens econômicas atuais, logisticamente para locais sem eletrificação, o GLP permite aquecimento sem ter necessidade de acesso de rede pública de gás e elétrica, pois permite seu transporte armazenamento em cilindros metálicos de média pressão. Além dos benefícios da redução da demanda de energia nos horários de ponta em locais com acesso a rede elétrica gerenciada pelo operador nacional do sistema.

3.5 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho foram:

- o custo inicial do equipamento é um fator de alto impacto dentre os itens estudados para a substituição do chuveiro por aquecimento solar, no entanto, é viável economicamente;
- os fatores relacionados à variação do preço da energia elétrica influenciam diretamente na análise de retorno de investimento da substituição do chuveiro elétrico por coletores solares com concentrador de radiação solar;
- a utilização do concentrador solar minimiza a utilização de combustível complementar ao sistema de aquecimento de água com coletor solar;
- para o caso base estudado o GLP é indicado para combustível complementar em sistemas de aquecimento de água com coletor solar; e

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA, **Mercado de aquecedores solares cresce no 1º trimestre**, notícia online, DATA: 08/06/2009, DASOL/ABRAVA, 2009. Disponível em: <www.dasolabrava.org.br> Acesso em: 31 julho de 2009

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar energy thermal processes**, New York: J. Wiley. 1991. 944p.

FRIZZONE, J. A., SILVEIRA, S. de F. R. Avaliação e custos de projetos de irrigação. In: **1º SEMINÁRIO ENERGIA NA AGRICULTURA - CEMIG**, Uberaba: 2000. Anais. s.n. v1, 1-87 p.

ELETROBRAS, **AVALIAÇÃO DO MERCADO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL**: Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso (Ano Base 2005) online, 2007, Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/>> Acesso em: 31 outubro. 2007

INMETRO, **Tabelas de consumo/eficiência energética**: Sistemas e Equipamentos Para Aquecimento Solar de Água - Edição 08/2009, PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM, online, 2009 Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/>>, Acessado em 27 de Julho de 2009.

IQBAL, Muhammad. **An introduction to solar radiation**. Toronto: Academic Press, 1983. 390p.

LAPPONI, J. C. (ed.), **Avaliação de projetos e investimento: modelos em Excel**. São Paulo: Lapponi Treinamento e Editora Ltda, 1996. 264 p.

RONNELID, Mats; KARLSSON, Bjorn. Experimental investigation of heat losses from low-concentrating non-imaging concentrators. **Solar Energy**.. Vol. 57, No. 2. 1996, pp. 93-109.

4 CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação abrangeu a adaptação da metodologia do dimensionamento padrão para o aquecimento de água com coletor plano e concentrador de radiação solar. Foram analisados: (i) metodologia de dimensionamento de um sistema de aquecimento de água com utilização de um coletor com concentrador de radiação solar: (a) estudo comparativo de ganho de radiação de uma superfície de um coletor solar com e sem o concentrador; e (b) mostrar analiticamente a variação do ganho de energia solar mensal durante um ano para a cidade de Viçosa, MG; (ii) aplicação da metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos: (a) realizar um estudo comparativo entre formas diferentes de aquecimento de água, a saber: (b) chuveiro elétrico; (c) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, sem concentrador de energia, com energia complementar a propano e (d) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano com concentrador de radiação solar com energia complementar a propano; (e) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, sem concentrador de energia, com energia complementar elétrica; e (iii) realização de uma análise econômica de vida útil e de sensibilidade para o sistema em estudo. Demonstrou-se que a utilização do concentrador solar em coletores planos para o aquecimento de água pode reduzir a quantidade de placas de coletores solares,

reduzindo o custo de implementação do sistema, o impacto ambiental com a produção de um número menor de coletores e melhorando a eficiência global de um sistema de aquecimento de água com a utilização de coletores solares.

4.1 Estudo comparativo de ganho de radiação de uma superfície de um coletor solar com e sem o concentrador

Foi estudada a metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos. Observou-se que a utilização de concentradores de radiação solar pode aumentar a eficiência global do sistema de dimensionamento de aquecimento de água com a utilização de coletores solares planos. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas foram: (i) a utilização de concentrador solar pode melhorar a captação da energia solar em um coletor plano em cerca de 62% em um ano, para o município de Viçosa-MG; (ii) o saldo de radiação líquida com a utilização de concentrador solar em um coletor plano durante um ano é de cerca de 60% para o município de Viçosa-MG; (iii) existe a possibilidade de redução do número de coletores solares em um sistema de aquecimento de água pelo aumento da área de incidência de radiação solar do coletor; e (iv) o posicionamento correto do coletor solar maximiza a radiação solar incidente no coletor nos períodos mais frios do ano.

4.2 Aplicação da metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos

Foi aplicada a metodologia de dimensionamento de sistema de aquecimento de água que considera ou não a utilização de concentradores de energia solar em coletores planos em um estudo de caso. Foram estudados: (i) realização de um estudo comparativo entre formas diferentes de aquecimento de água, a saber: (a) chuveiro elétrico; (b) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, sem concentrador de energia, com energia complementar a propano; e (c) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano com concentrador de radiação solar com energia complementar a propano;

(d) aquecimento de água com utilização de energia solar em coletor plano, sem concentrador de energia, com energia complementar elétrica; e (ii) realização de uma análise econômica de vida útil e de sensibilidade para o sistema em estudo. Observou-se que a utilização do concentrador solar reduziu o investimento necessário para a aquisição do sistema de aquecimento de água na vida útil do projeto. O fator que mais influenciou nas análises foi o custo inicial na vida útil do sistema. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas foram: (i) o custo inicial do equipamento é um fator preponderante para a substituição do chuveiro por aquecimento solar, no entanto, é viável economicamente; (ii) os fatores relacionados a variação do preço da energia elétrica influenciam diretamente na análise de vida útil da substituição do chuveiro elétrico por coletores solares com concentrador de radiação solar; (iii) a utilização do concentrador solar minimiza a utilização de combustível complementar ao sistema de aquecimento de água com coletor solar; e (iv) para o caso base estudado o GLP é indicado para combustível complementar em sistemas de aquecimento de água com coletor solar.