

ÉDISON CARLOS DA SILVA TRÍPOLE

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS ÓTICAS NO
DESENVOLVIMENTO DE CONCENTRADORES SOLARES**

Tese 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
2004

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

T835p
2004

Trípole, Édison Carlos da Silva, 1975-

Potencial de utilização de fibras óticas no desenvolvi-
mento de concentradores solares / Édison Carlos da Silva
Trípole. – Viçosa : UFV, 2004.
xi, 72f. : il. ; 29cm.

Orientador: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

1. Coletores solares. 2. Energia solar - Uso. 3. Energia
solar - Fontes alternativas. 4. Concentradores parabólicos.
5. Fibras óticas. 6. Aquecimento solar. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

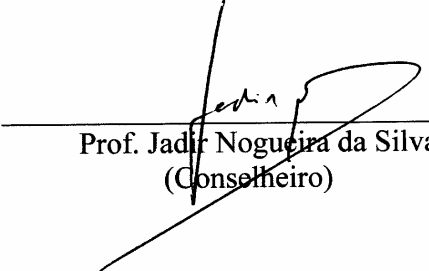
CDD 20.ed. 621.47

ÉDISON CARLOS DA SILVA TRÍPOLE

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE FIBRAS ÓTICAS NO
DESENVOLVIMENTO DE CONCENTRADORES SOLARES**

Tese 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: 27 de fevereiro de 2004.



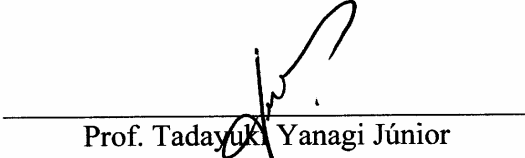
Prof. Jadir Nogueira da Silva
(Conselheiro)



Prof. Evandro Ferreira Passos
(Conselheiro)



Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro



Prof. Tadayuki Yanagi Júnior



Profª Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
(Orientadora)

À minha mãe, Ana e à memória de meu pai, José, a cujo amor devo não somente a existência, como também a descoberta primordial de seu sentido;

Aos meus irmãos Higina e Júlio, grandes companheiros na aventura do existir;

Aos meus sobrinhos Gabriel e Maria Alice, inspiração e motivação maior.

A Maria Elizabete, que nos dias mais difíceis deste importante desafio acadêmico, dirigiu-me palavras amigas, conselhos sinceros, inculcando em minha alma o perdido sentido de religiosidade, a perda sensibilidade espiritual...

E à minha amiga Pâmela Castro Pimentel, a quem devo sentidas desculpas por não ter cumprido a promessa de “ensinar-lhe a tabuada...” que, no entanto, aprendeu com muita independência e persistência... Apoiando-me em seu exemplo de luta, estendo esta dedicatória a todas as FUTURAS GERAÇÕES HUMANAS, herdeiras da terra e da hercúlea tarefa de lutar por uma vida auto-sustentável e por uma sociedade mais justa e equilibrada...

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro do universo, pela existência e graça destes dias, e pelo capricho dedicado a esta fração de sua obra que tanto nos maravilha: o Sol.

Aos atuais pesquisadores do AMBIAGRO E PROFESSORES DO DEA, a quem sou devedor insolvente não só pelo conhecimento transmitido como também e principalmente pela amizade, motivação, confiança, apoio e paciência, verdadeiros pilares desta humilde e limitada consciência em formação. Especialmente Ilda, Jadir, Delly, Leda, Aristides, Cecília, Baeta, Humberto, Marcelo, Mariano e Cláudio Elias, cuja amizade e contagiante paixão acadêmica tem tornado tão especiais estes anos de pós-graduação.

Aos professores do DAU-UFV, especialmente a Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá, Rogério Lelis, Paulo Tadeu, Aline e Pedro Novais. Aos mestres do COLUNI. Aos mestres do 1º Grau e, em especial, ao Geraldo Magela Baltazar e à Mileide Baltazar, que despertaram no menino que fui não só a admiração pela ciência, como também o orgulho e o prazer de me dedicar a uma atividade tão nobre e tão enriquecedora do gênero humano.

A todos os funcionários do DEA, pela amizade e grande sensibilidade, que tantas vezes os levou para tão além de suas obrigações. Especialmente à Edna, ao Galinari, ao Pedro, e ao Marcos.

Ao professor Evandro, do Departamento de Física, pelo paciente perscrutar das entrelinhas deste trabalho.

Ao Jamil, estudante de graduação em engenharia elétrica, estagiário, pela amizade, observações pertinentes, apoio constante e companhia nas aventuras. Ao Carlos André, Grazielle e demais colegas e estagiários.

Ao Fiorotti, Eraldo, Cláudio Elias, Handlei, Vigoderis, Antônio, Cláudia, Cristina, Valeska, Júlio e Maria Clara, pela inesquecível convivência.

À Schott, pela doação das fibras óticas especiais, imprescindíveis para futuras experimentações.

A todos aqueles (não poucos) a quem incomodei com esta história de fazer tese, muitas vezes com pedidos descabidos. Desculpe-me pela confessa chatice. Agradeço-os e parabenizo-os pelo compromisso, paciência, responsabilidade e humanismo. SEM VOCÊS, DESTE TRABALHO NÃO SAIRIA UMA VÍRGULA.

BIOGRAFIA

ÉDISON CARLOS DA SILVA TRÍPOLE, filho de José Carlos da Silva Trípole e Ana Lourenço Lessa Trípole, nasceu em 5 de maio de 1975, na cidade de Visconde do Rio Branco, Minas Gerais.

Em 1996, iniciou o Curso de Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, formando-se em março de 2001. No mesmo ano iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, concluindo-o em fevereiro de 2004.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. O Problema	1
1.2. Hipóteses	2
1.2.1. Hipótese Principal	2
1.2.2. Hipóteses Complementares	3
1.2.3. Objetivos.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Considerações Gerais	5
2.1.1. Energia Solar e Seu Uso	6
2.1.2. Questões Gerais.....	7
2.2. O Estado da Arte na Utilização da Energia Solar	8
2.2.1. Sistemas Atuais	8
2.2.2. Aquecedores Solares	19
2.2.3. Fornos Solares; Energia Renovável na Cocção de Alimentos.....	23
2.2.4. Iluminação Solar Diurna.....	25
2.3. Concentradores Solares	26

	Página
2.4. Utilização da Fibra Ótica para o Translado da Potência Solar Concentrada	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1. Montagem dos Protótipos.....	42
3.1.1. Espelho Parabólico	42
3.1.2. Sistema de Rastreamento Baseado em Dilatação	48
3.1.3. Sistema de Rastreamento Eletrônico	50
3.1.4. Feixe de Fibras Óticas	51
3.1.5. Concentrador Parabólico Composto.....	52
3.1.6. Dispositivo de Utilização Final.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1. Cálculo de Eficiência do Coletor.....	57
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	62
5.1. Discussão das Hipóteses Assumidas.....	62
5.2. Recomendação de um Protótipo Efetivo	64
5.2.1. Concentrador Parabólico	65
5.2.2. Fibra Ótica	67
5.2.3. Possíveis Dispositivos de Utilização Final.....	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

RESUMO

TRÍPOLE, Édison Carlos da Silva, MS, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2004. **Potencial de utilização de fibras óticas no desenvolvimento de concentradores solares.** Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Conselheiros: Jadir Nogueira da Silva e Evandro Ferreira Passos.

Este trabalho foi desenvolvido visando os seguintes objetivos: i) projetar e estimar a eficiência de um sistema de captação solar, composto por um espelho parabólico acoplado a um sistema de rastreamento do sol, um cabo ótico para transporte da potência e possíveis dispositivos de conversão final, ii) construir e testar estes aparelhos através de cálculos matemáticos, simulações computacionais e protótipos, iii) determinar a eficiência dos aparelhos, bem como a funcionalidade e viabilidade técnica de seus diversos componentes, testando as hipóteses assumidas. A partir dos cálculos, simulações, considerações e testes apresentados, foi proposto ao final, o projeto para um protótipo efetivo de testes, calculando-se a eficiência e um custo aproximado para este protótipo. Concluímos, assim, ser possível a construção de um dispositivo de grande eficiência utilizando-se refletores parabólicos, fibra IR1 como canal ótico para o traslado da potência, e sistemas de alinhamento solar, bem como um concentrador parabólico composto para melhorar a mancha focal do sistema. A eficiência calculada para este dispositivo foi de 53,0%, transmitindo a energia a 20 m de distância. Estimou-se ainda o desempenho para o aquecimento de água nas condições de verão para o município de Viçosa, MG. Os cálculos foram feitos para materiais de fácil acesso,

referidos pela literatura. São grandes as consequências ambientais e sociais do estudo em questão, destacando-se o baixo custo, a alta eficiência e principalmente a diversidade e facilidade de aplicações finais, superando inclusive as facilidades oferecidas pela utilização da eletricidade, uma vez que até mesmo esta última pode ser diretamente gerada pelo sistema estudado.

ABSTRACT

TRÍPOLE, Édison Carlos da Silva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2004. **Potential use of optical fibers in the development of solar concentrators. (checar este termo).** Adviser: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Committee members: Jadir Nogueira da Silva and Evandro Ferreira Passos.

This work aimed i) to design and estimate the efficiency of a solar capturing system, composed of a parabolic mirror coupled to a sun - scanning system, an optical cable for potency transport and possible final conversion devices, ii) to build and test this device through mathematical calculations, computer simulations and prototypes, iii) to determine the efficiency of this device as well as the functionality and technical viability of its several components, by testing the assumed hypotheses. Based on the calculations, simulations, considerations and tests presented, a project for an effective test prototype was ultimately proposed, its efficiency and approximate cost being calculated. It was concluded that it was viable to build a highly efficient device using parabolic reflectors, IR1 fiber as an optical channel for potency transfer and solar alignment, as well as a parabolic concentrator composed to improve the focal spot of the system. The efficiency calculated for this device was 53.0%, transferring energy at 20 m distance, under summer conditions for the municipality of Viçosa, MG. The calculations were made for easily available materials referred in the literature. The major environmental and social advantages resulting from this study are low cost, high efficiency, and especially, diversity and facility of final application, even greater than the facilities offered by the use of electricity, since even that can be directly generated by the system studied.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Problema

A energia é um bem estratégico, essencial e imprescindível ao funcionamento das nossas sociedades atuais. O grande problema das fontes convencionais (petróleo, carvão etc.) está no impacto ambiental que proporcionam. O calor e os gases liberados pelo consumo de energia podem causar modificações profundas no clima mundial, uma vez que estes combustíveis foram constituídos e acumulados na superfície da Terra ao longo de milhões e milhões de anos, sendo agora transferidos para a atmosfera em escassas centenas de anos. Isto leva não só à sua exaustão como a consequências ambientais em geral e climáticas em particular, as quais já começam a ser sentidas.

Segundo BEZERRA (1998), a corrida por fontes de energia alternativa se acirrou na década de 70 com a crise do petróleo; quando surgiu a necessidade de intensificar as pesquisas e investimentos na busca por novas soluções energéticas. A energia elétrica é uma energia nobre, e utilizá-la para o aquecimento de água, como tem sido feito em larga escala no Brasil com os chuveiros elétricos, é uma considerável perda entrópica.

O nosso modelo civilizacional, portanto, está limitado pela escassez das matérias-primas e pelos recursos energéticos e fósseis, que também se revelam limitados, e com a faculdade de modificar todo o equilíbrio planetário. É necessário que se encontrem saídas para estas crises e, neste contexto, as chamadas energias limpas são soluções altamente promissoras.

Do exposto, o presente trabalho visa contribuir para a discussão das alternativas tecnológicas para o aproveitamento das energias renováveis, especificamente no que se refere ao aproveitamento da energia solar, em cada um de seus processos de obtenção clássicos:

- Energia Solar Passiva (nos edifícios);
- Energia Solar Fotovoltaica (produção de energia elétrica); e
- Energia Solar Térmica (aquecimento de água e ambientes, cozimento de alimentos etc.).

O presente trabalho se insere na discussão do primeiro e do terceiro itens, investigando aparelhos para utilização final da energia solar térmica (notadamente para aquecimento de água e cocção de alimentos) e de energia solar passiva nos edifícios (sistema de iluminação diurna). Embora não se aborde a questão, os mesmos princípios aqui discutidos poderão ser utilizados para a produção de energia fotovoltaica, como tem sido testado, por exemplo, em Israel (vejam-se, a título de ilustração, os trabalhos de FEUERMANN et al., 2001).

Vale salientar que a energia solar passiva é uma das mais importantes aplicações da energia solar. Ela permite, de uma forma inteligente e sem agravamento significativo dos custos, construir edifícios, incluindo habitações, confortáveis em todas as estações do ano e com menores necessidades de energia de apoio. Inclui, principalmente, preocupações arquitetônicas, como boa orientação do edifício; bom isolamento térmico da envolvente; adequada escolha dos materiais e baixo impacto ambiental. As residências assim construídas devem ser confortáveis tanto no inverno quanto no verão.

1.2. Hipóteses

1.2.1. Hipótese Principal

A hipótese principal desta investigação pode ser assim enunciada, com base em FEUERMANN et al. (2001).

Há grandes e simples alternativas científicas para a viabilização da energia solar, utilizando-se para a sua coleta um sistema ótico de concentração acoplado a um sistema de rastreamento e, para o traslado da potência ao ponto de consumo, feixes de fibra ótica.

1.2.2. Hipóteses Complementares

Desta hipótese principal, derivam-se cinco hipóteses complementares:

Hipótese 1: Um sistema de coleta de energia solar terá maior eficiência em relação aos coletores largamente difundidos se acompanhar o Sol ao longo do dia para que a sua eficiência global seja otimizada ou, em outras palavras, os ganhos com o rastreamento superem os gastos energéticos.

Hipótese 2: Um sistema de rastreamento do Sol terá maior eficiência em relação aos sistemas largamente difundidos se, para acompanhar o Sol, utilizar a energia cedida pelo próprio Sol, em detrimento dos rastreadores manuais ou eletrônicos. Este é o chamado “sistema de rastreamento solar passivo”, que é utilizado em alguns aparelhos de aplicações fotovoltaicas, tendo sido desenvolvido também na natureza pelas chamadas plantas heliotrópicas.

Hipótese 3: para a coleta da energia do Sol, conseguir-se-ão melhores resultados se forem utilizados refletores parabólicos simples e de baixa precisão (economicamente viáveis) acoplados a sistemas de aperfeiçoamento do foco, em detrimento do uso dos espelhos de grande precisão e de difícil construção e manutenção.

Hipótese 4: Para o traslado da energia coletada, obter-se-ão melhores resultados se forem utilizados feixes de fibra ótica que incluam em seu patamar de transmissão, conforme a aplicação, o espectro visível e/ou o espectro térmico da radiação eletromagnética, em detrimento da transmissão da energia por meio de fluidos aquecidos e tubulações isoladas, ou do seu consumo no local de coleta, ou da conversão e posterior transmissão por meio da eletricidade.

Hipótese 5: É possível, através do sistema de coleta e transporte de potência aqui proposto, construir fornos solares, aquecedores solares, e sistemas de iluminação diurna eficientes, além de deixar a energia disponível para diversas outras finalidades, potencializando significativamente o seu completo aproveitamento.

1.2.3. Objetivos

Este trabalho foi desenvolvido visando os seguintes objetivos:

- Estudar a viabilidade de um sistema simples para coleta e transmissão de energia solar que possa ser utilizado para aquecimento de água, cocção de alimentos ou

iluminação diurna, tendo com módulo básico um condutor de fibra ótica, um coletor parabólico espelhado e um sistema de rastreamento solar;

- Construir e testar estes aparelhos; e

- Determinar a eficiência dos aparelhos, bem como a funcionalidade e viabilidade técnica de seus diversos componentes, testando as hipóteses assumidas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações Gerais

O aproveitamento da energia solar pelo gênero humano é anterior até mesmo ao uso do fogo. De diversos relatos arqueológicos, apreende-se que os antepassados utilizavam a energia solar para secagem de grãos, para a cocção de alimentos, em instrumentos primitivos, para a higienização dos alimentos, dos abrigos e do próprio corpo (conhecia-se empiricamente as propriedades bactericidas da luz solar) e para uma infinidade de outras funções.

Nos dias atuais, tem-se a consciência de que uma grave crise energética está a ameaçar não só a qualidade de vida, como também a própria sobrevivência da espécie, levando-se a uma reflexão sobre os avanços e retrocessos da humanidade.

Neste sentido, a importância vital da energia, de um modo geral, e a possível escassez da energia de origem fóssil de um modo particular, em um futuro relativamente próximo, são justificativas suficientes para que muitas pesquisas sejam realizadas, visando à obtenção de alternativas energéticas.

Vale lembrar que a única energia sem impacto ambiental é a energia não produzida e, portanto, impossível de ser consumida. Assim sendo, a produção e o consumo de energia geram benefícios e custos para a nossa sociedade:

Graves impactos em um conjunto de receptores, entre os quais os organismos humanos e animais, os ecossistemas naturais e o ambiente construído. Como causas para esses impactos contam-se a emissão de poluentes atmosféricos com a queima

generalizada de combustíveis fósseis, a liberação de radioatividade e a destruição de valores patrimoniais;

Não é sustentável devido à escassez e aos malefícios ambientais. Assim, o recurso às energias renováveis, e à solar em particular, deverá ser a regra, e não a exceção como atualmente.

Existem duas épocas bem distintas e duas escalas temporais bem diferenciadas para o consumo de energias: antes da Revolução Industrial (há 200 anos) e desde a ocorrência desta até aos nossos dias e futuro próximo.

Deste modo, antes da Revolução Industrial, as energias eram quase exclusivamente renováveis: a eólica servia à navegação, moagem de cereais, bombeamento de água. A hídrica era usada, sobretudo, para a moagem de cereais. A energia da biomassa era importante na cocção de alimentos e no aquecimento doméstico.

Na Revolução Industrial, utilizou-se o carvão (séc. XIX) como fonte energética. O petróleo começou a ser intensivamente utilizado no século XX, figurando nos relatos históricos como a energia deste século.

Segundo PALZ (1981), o transporte e carregamento de petróleo, bem como a produção marítima, causam uma considerável quantidade de poluição e, como resultado dos vazamentos, as praias ficam poluídas com óleo ou alcatrão. O óleo derramado também pode afetar populações locais de peixes. As descargas crônicas resultam numa acumulação contínua de petróleo em certas localidades, e poderão ter um forte impacto a longo prazo. No entanto, o petróleo tem algumas vantagens inerentes: é mais barato de transportar que o gás, o carvão ou a eletricidade, e a sua comodidade de utilização é evidente. Quanto às reservas, a posição do gás natural é igual à do petróleo. A metade das reservas naturais se encontra na Europa, mas, na maioria, as reservas são pouco acessíveis. Será preciso, então, importar gás natural, que também é proveniente dos países petrolíferos.

2.1.1. Energia Solar e Seu Uso

Segundo LIANG et al. (1998), a energia solar tornou-se extensamente utilizada para aplicações térmicas e para a produção direta de eletricidade. Foram desenvolvidos muitos tipos de coletores solares para operar em altas temperaturas e muitos sistemas de

concentração ópticos foram investigados com o objetivo de reduzir o custo de eletricidade gerada.

Segundo BEZERRA (1998), estima-se que cerca de um terço da população mundial (2 bilhões de pessoas), depende diariamente de lenha para satisfação de suas necessidades energéticas direcionadas para a utilização domiciliar (cocção de alimentos e aquecimento).

Curiosamente, esta ocorrência se dá exatamente entre as populações que habitam as regiões tropicais, portanto em áreas propícias ao uso da energia solar, onde a incidência solar chega, em alguns casos, a um potencial de 1 KW/m^2 .

2.1.2. Questões Gerais

Mas, seria possível aproveitar a energia solar direta, acompanhando o movimento do Sol e transferindo a sua energia por meio de fibras óticas? Até que ponto o rastreamento implicaria em perdas da radiação difusa e em gastos de energia pelo movimento do motor? A que faixas do espectro solar a fibra ótica deveria ser translúcida?

Segundo VIANELLO e ALVES (2000), em dias de céu limpo, a radiação difusa contribui apenas com, aproximadamente, 15% do total da radiação solar que chega à superfície.

BROOKS (1959) apresenta uma equação para determinação da irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares, ao nível do solo, sobre condições de céu limpo. A massa ótica de ar, bem como a presença de água e poeira na atmosfera, são variáveis importantes nesta equação.

O espectro eletromagnético, segundo VIANELLO e ALVES (2000), pode ser definido como sendo “o conjunto de radiações eletromagnéticas ordenadas de acordo com as suas frequências, seus comprimentos de onda ou, ainda, números de ondas”.

Segundo JESUZ e OLIVEIRA FILHO (2000), o ganho de energia (energia captada pelo aparelho/energia disponível) utilizando-se um sistema de rastreamento solar ideal, fora da atmosfera, é função da época do ano e varia de cerca de 38,0% a 43,0%, ou seja, o ganho médio é estimado, aproximadamente, em 40,5%.

A segunda lei da termodinâmica, como descrita por SUNTAG et al. (1998), envolve o fato de que processos ocorrem em um determinado sentido, e não em outro. A

concentração de calor, transportado por meio da fibra ótica, ocorrerá naturalmente no interior do reservatório durante o dia, porque o sol, para o qual o aparelho estará orientado, é uma fonte quente, e as superfícies absorventes do interior do reservatório, junto com a massa de água, constituem uma fonte fria.

Segundo LIANG et al. (1998), a idéia de transportar a energia solar concentrada, por meio de fibras óticas foi proposta em 1980 por um grupo de investigadores franceses. Mas, devido à indisponibilidade de fibras óticas de alta qualidade e ao alto custo destas, este projeto se limitou à análise teórica. Com a atual disponibilidade técnica de fibras óticas, a energia solar pode ser transmitida por meio de fibras de alta qualidade, de reduzido diâmetro do núcleo, e grandes aberturas numéricas (ângulo máximo em relação ao eixo da fibra em que o raio de luz não consegue mais escapar da reflexão total). Com o advento da fibra ótica flexível, o poder de transmissão e concentração da energia solar atingiu um novo patamar. Um laser solar, por exemplo, ou qualquer outro dispositivo final de aproveitamento da luminosidade, pode ser ativado fora de sua restrita posição na região focal do espelho parabólico primário, encontrando assim novas aplicações.

A Figura 1 ilustra o espectro eletromagnético, destacando-se a faixa que apresenta efeito térmico (propriedade de aquecer os corpos). É para esta fração do espectro que as fibras óticas devem ser transparentes para aplicações utilizadas em sistemas de aquecimento como fogões e fornos solares. Para aplicações em iluminação, basta à fibra a transparência à fração visível do espectro luminoso.

2.2. O Estado da Arte na Utilização da Energia Solar

2.2.1. Sistemas Atuais

Segundo FEUERMANN et al. (2001), uma míni-revolução está a caminho na engenharia de energia solar em Israel. Trata-se de uma nova abordagem na miniaturização de coletores de luz solar eficientes, em particular para aplicações de alto fluxo e altas temperaturas. O coração do sistema é um pequeno concentrador solar de pequenos pratos parabólicos, denominados mini-prato (normalmente 20 cm de diâmetro) com uma fibra-ótica acoplada a seu foco e capaz de transportar luz solar concentrada a um receptor remoto. Iniciou-se também, com significativos avanços, a moderna utilização da energia solar em aplicações cirúrgicas por meio de fibra ótica.

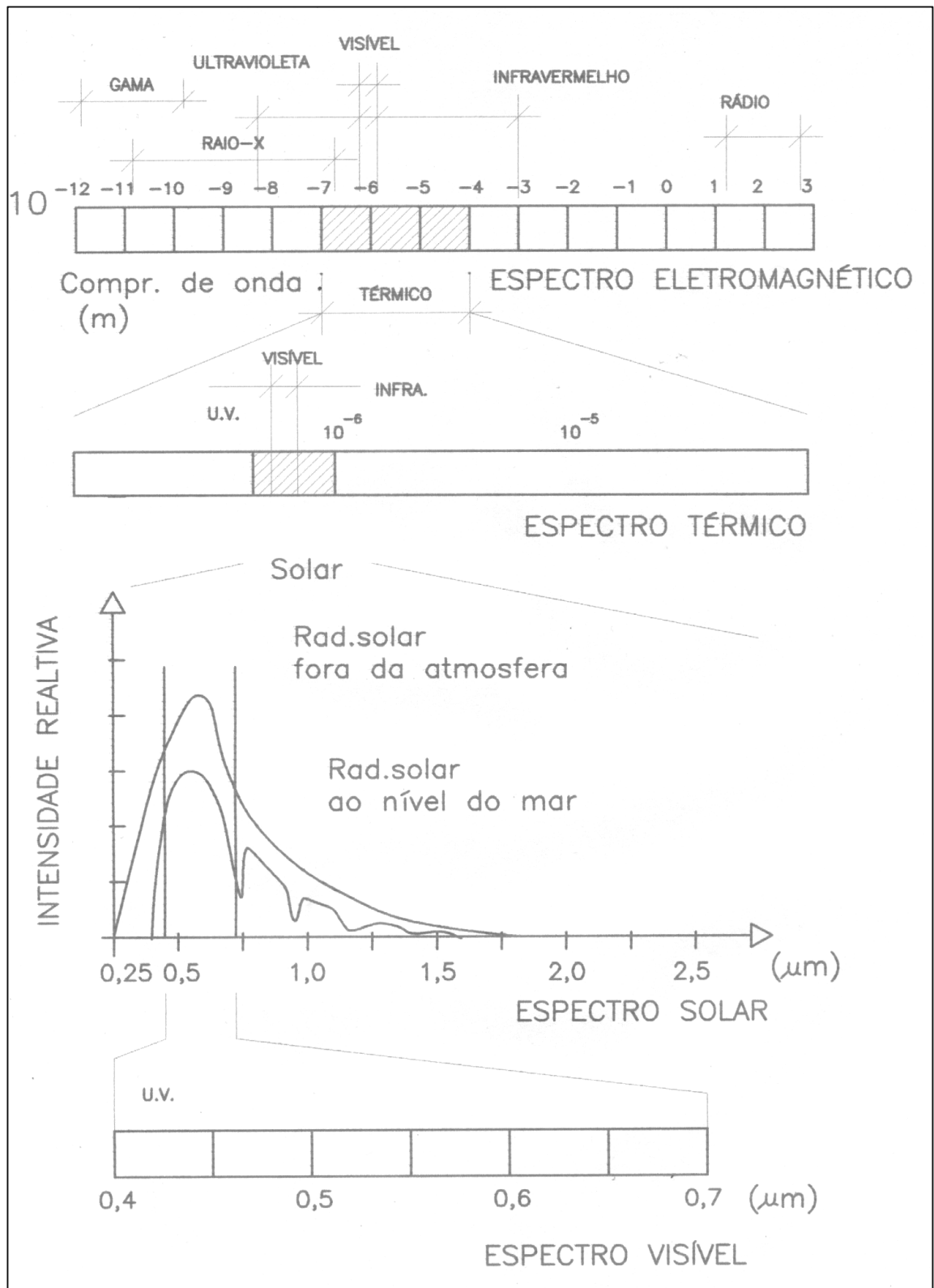


Figura 1 – Espectro eletromagnético, destacando-se a faixa que apresenta efeito térmico (propriedade de aquecer os corpos).

Segundo estes autores, a estratégia dos mini-pratos representa uma mudança de paradigma, distante do conhecimento corrente e convencional, de que coletores solares maiores são melhores.

Segundo ainda FEUERMANN et al. (2001), a miniaturização dos coletores é incentivada pelos seguintes motivos:

- a) o reconhecimento de que é possível construir coletores solares em pequena escala a baixo custo;
- b) a grande vantagem de, complementarmente, coletar e disponibilizar a luz solar concentrada, podendo-se desfrutá-la convenientemente em um local afastado, ao nível do receptor, e em recinto fechado, sob condições controladas;
- c) melhorias significativas nas eficiências dos sistemas de coleta de energia solar de alto-fluxo, que derivam da possibilidade de se transportar opticamente a luz do sol coletada;
- d) aplicações inéditas que podem surgir da possibilidade de se trabalhar a concentrações extremamente altas.

As Figuras 2 e 3 apresentam diagramas esquemáticos de um “mini-prato”. O concentrador primário é um refletor parabólico. Um espelho plano pequeno situa-se abaixo do ponto focal do refletor, redirecionando os raios refletidos do prato na direção descendente. A fibra ótica é afixada de forma a permanecer protegida. Um raio externo é mostrado direcionando-se ao refletor. O sistema ao ar livre possui também um rastreador solar fixado ao suporte e é, enfim, protegido por uma tampa de vidro.

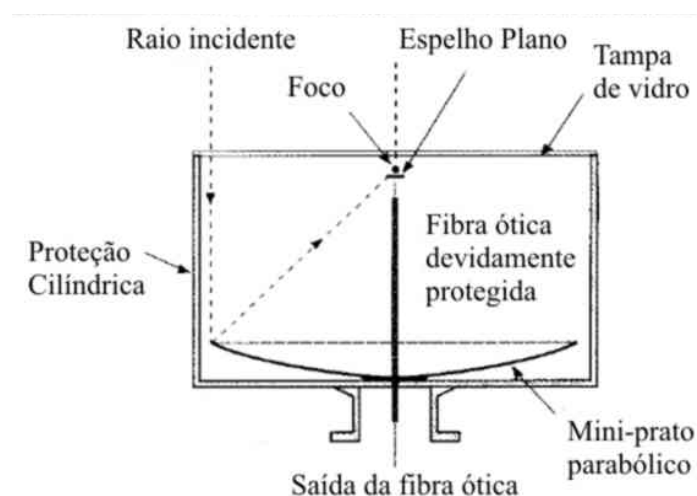


Figura 2 – Mini-prato (adaptado de FEUERMANN et al., 2001).

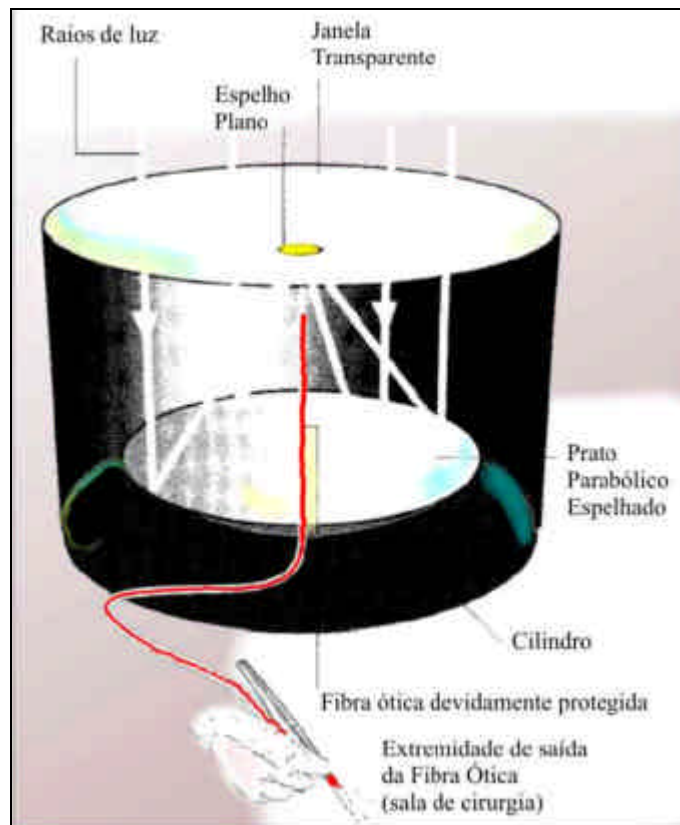


Figura 3 – Mini-prato, representação tridimensional (adaptado de FEUERMANN et al., 2001).

As dimensões típicas, segundo os autores, são:

- 1 mm para o diâmetro de núcleo da fibra ótica, e
- 20 cm para o diâmetro do míni-prato.

FEUERMANN et al. (2001) têm trabalhado, também, na adaptação da estratégia dos mini-pratos para enfrentar novos desafios criados pelo recente desenvolvimento das células solares de alta-eficiência (por exemplo, mais de 30%) para altos níveis de concentração solar – da ordem de 1.000 sóis ou superior.

Em lugar de uma fibra ótica longa, um bastão de vidro curto dirige a radiação solar concentrada pelo míni-prato a uma célula acoplada atrás do prato. Segundo os autores, este canal óptico funciona como um homogeneizador de fluxo: um caleidoscópio. A Figura 4 ilustra este concentrador fotovoltaico. Um corte quadrado do caleidoscópio expõe o canal óptico do prato para a célula que, por sua vez, é acoplada termicamente a um dispositivo de rejeição de calor, disposto atrás do mini-prato.

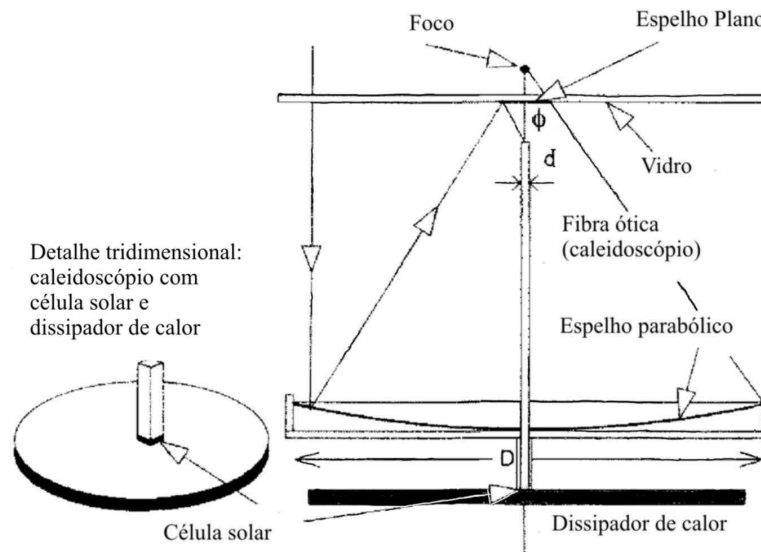


Figura 4 – Mini-prato, aplicação fotovoltaica.

CIAMBERLNI et al. (2003) descrevem a realização de recente experimento que foi por eles próprios definido como “uma arquitetura inovadora para a total exploração da energia solar coletada”.

No sistema proposto, um rastreador e um concentrador ótico da luz solar focalizam a energia recebida contendo parte do espectro solar requerido em uma linha de transmissão de fibra ótica de baixa perda. O painel óptico é de pequenas dimensões e capaz de rastrear o sol para coletar o máximo de sua energia. O suporte é plano, de 5 mm de espessura, e contém quatro concentradores ópticos.

A eficiência do sistema óptico depende dos parâmetros ópticos e do material utilizado nestes componentes. Um único conector para a fixação das fibras conecta quatro extremidades livres de fibras óticas. A energia é, então, corretamente transportada aos usuários com uma instalação simples. O sistema foi testado para iluminação diurna, revelando-se eficiente; foi também acoplado a uma câmara escura para produzir calor, e para aplicações fotovoltaicas. A eficiência total do sistema ficou entre 68% e 72%. Quando a energia solar chega à extremidade da linha de transmissão, pode ser endereçada à aplicação exigida por meio de um interruptor ótico, que redireciona a luz solar para o sistema desejado.

Este procedimento, segundo os mesmo autores, permite uma utilização de 100% da energia solar coletada.

O pequeno diâmetro da fibra ótica utilizada favorece até mesmo a instalação dentro de um ambiente complexo, como um edifício alto, podendo-se utilizar o duto de instalações existente. Na extremidade do cabo ótico, provê-se um interruptor óptico para compartilhar a potência coletada do sol entre módulos de conversão diferentes, que tornam possível compartilhar o tempo utilizando-se 100% da energia disponível.

O referido trabalho visava à investigação de toda uma gama de soluções óticas que pudessem ser integradas em um protótipo no qual os desempenhos e exigências de custo pudessem ser aferidos, como também suas diferentes aplicações práticas.

A arquitetura do sistema, segundo os referidos autores, envolve as seguintes partes:

a) Vários painéis móveis elementares, incorporando cada um deles quatro coletores óticos, que por sua vez são devidamente conectados a suas respectivas fibras óticas, que são reunidas, na parte inferior dos painéis, em um único cabo;

b) Um sistema de localização do Sol, que permite orientar o painel coletor perpendicularmente à direção de sol, durante todo o período de luz;

c) Linha de fibra ótica de baixa perda, de adequado diâmetro e adequada abertura numérica, para transmissão da luz solar da saída do concentrador óptico para o interruptor óptico;

d) O interruptor óptico conectado à extremidade de saída da fibra de vidro. O interruptor é importante para a utilização eficaz da radiação, permitindo explorar os 100% da energia coletada; e

e) Os aplicadores finais projetados em função da utilização requerida.

O diâmetro da fibra ótica, mesmo depois de coberta pela capa protetora, é pequeno o bastante para inseri-la, por exemplo, em um cabo de televisão já presente em toda a casa, conectando o telhado da mesma a praticamente todos os cômodos do edifício.

No que se refere ao painel solar propriamente dito, os autores o descrevem como sendo uma plataforma plana quadrada, incorporada ao suporte (Figuras 5 e 6), permitindo a efetiva fixação dos coletores óticos. A plataforma, segundo os mesmo autores, foi feita com uma placa de liga de alumínio retificada (ALCOA). O rastreador solar e quatro nichos para as lentes foram integrados à placa.

Somente em uma terceira etapa, os referidos pesquisadores testaram os coletores do tipo parabólico. O sistema foi composto por dois espelhos, o primário parabólico e o secundário plano, com ou sem lente de correção. O esquema do coletor é mostrado na Figura 7.



Figura 5 – Exemplo de suporte utilizado para fixar os painéis coletores de radiação.



Figura 6 – A plataforma com o rastreador solar e quatro nichos de lentes. (CIAMBERLNI et al., 2003).

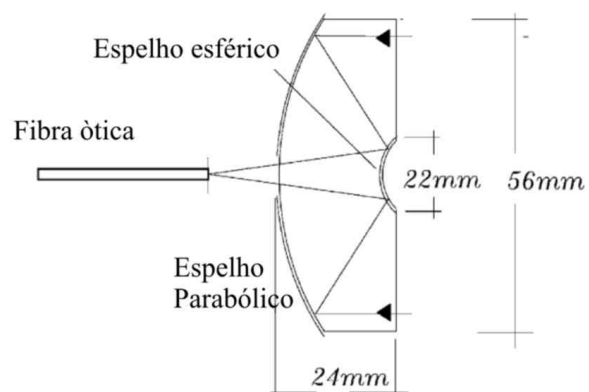


Figura 7 – Esquema do coletor parabólico utilizado no experimento (CIAMBERLNI et al., 2003).

CIAMBERLNI et al. (2003), relatam ainda a utilização de lentes de plástico não-esféricas, selecionadas entre os produtos comercialmente disponíveis. Foram usadas superfícies não-esféricas para alcançar um desenho satisfatório. A finalidade da utilização de superfícies não-esféricas foi a de superar problemas óticos e aberrações cromáticas (diferentes refrações para diferentes comprimentos de onda). Segundo os autores, estas superfícies podem ser geradas facilmente pelas técnicas de polimento, mas para aplicar graus maiores de não-esfericidade, um processo de torneamento é utilizado: emprega uma única ponta de diamante que gira em um torno mecânico modificado. O método é descrito como muito oneroso, juntamente com o controle de não-esfericidade da superfície.

A Figura 8 apresenta outro protótipo da plataforma com o rastreador solar e quatro nichos de lentes (CIAMBERLNI et al., 2003).

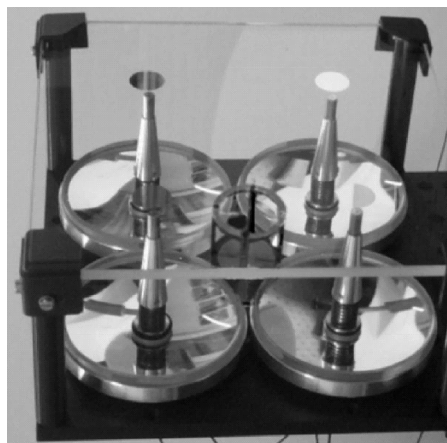


Figura 8 – Outra plataforma com o rastreador solar e quatro nichos de lentes. (CIAMBERLNI et al., 2003).

A fibra ótica utilizada no referido experimento foi apresentada como sendo: quatro cabos de 10 m de comprimento, devidamente encapadas, o núcleo de Sílica, tendo um conector acoplado a um lado, e a outra extremidade deixada descoberta.

O material da fibra foi testado, apresentando abertura numérica (NA) de 0.48 e atenuação de 100 dB/km. Considerou-se uma perda de 15% da energia luminosa, aproximadamente, na própria fibra. Segundo as medições relatadas, os acopladores para os conectores apresentaram eficiência superior a 90%.

O suporte de lente, como descrito pelos referidos autores, incorpora o mecanismo de centralização da fibra e de regulagem de foco.

CIAMBERLNI et al. (2003) relatam ainda o funcionamento do rastreador solar: semelhante ao funcionamento de uma máquina fotográfica de orifício, sem lentes. A distância L do orifício para o detector de quatro quadrantes determina a resolução angular ($\Delta\theta$) do sensor. O tamanho da imagem do sol e a intensidade luminosa no detector dependem do diâmetro do orifício

O valor da distância L é de 5 cm, que corresponde ao comprimento focal do coletor ótico. Conseqüentemente, a imagem do Sol muda no detector fotográfico com a mesma velocidade da mudança de imagem nas fibras óticas. O diâmetro d do orifício é de 0.8 mm e, segundo relataram, foi experimentalmente determinado.

A Figura 9a apresenta, como informa o artigo, todos os componentes do rastreador solar: os três orifícios de diferentes diâmetros, a câmara escura com uma abertura lateral para permitir um controle visual do alinhamento, o detector de quatro-quadrantes e seus respectivos parafusos. O rastreador solar inserido no painel pode ser ajustado (Figura. 9b) para facilitar a operação de alinhamento.

Segundo os autores, a sujeira pode influenciar as medições, devendo-se, em conseqüência, ter a certeza de que até mesmo os acopladores estão limpos em seu interior. Para isto, pode-se utilizar ar comprimido se necessário.

O sistema desenvolvido para a movimentação do equipamento na direção do Sol, é constituído por uma estrutura de um único motor. Com este sistema, a mudança de declinação é muito pequena durante o dia e, como conseqüência, tem-se um baixo consumo de energia (CIAMBERLNI et al., 2003). A Figura 10 mostra o sistema de localização solar, disposto em um suporte contendo quatro concentradores.

Os pesquisadores utilizaram um computador para realizar os cálculos necessários de controle do motor do rastreador com precisão absoluta. Este sistema, conforme relatam, embora tenha se mostrado útil, apresentou-se como barreira ao desenvolvimento do sistema por causa de sua complexidade, uma vez que foram introduzidas muitas variáveis. Relataram também algumas desvantagens práticas, como as folgas ou falhas introduzidas pela mecânica (as reduções de motor utilizadas foram componentes comerciais que, admitiram, não estão isentos de defeitos), podendo inutilizar a precisão de cálculo do computador.

Outra importante questão levantada pela equipe é a alta dinâmica da luminosidade difusa. É difícil saber, por exemplo, apenas pela luminosidade, se o sol está se pondo, ou se está no zênite, se escurecer em ambas as condições, pois o valor da luminância difusa será parecido.

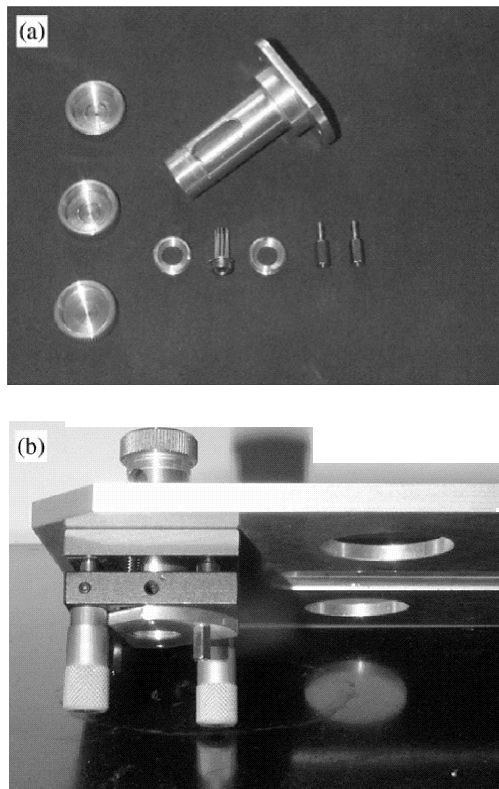


Figura 9 – (a) Os itens que compõem o rastreador solar e (b) Mecanismo de ajuste da posição do rastreador solar.



Figura 10 – Sistema de localização solar, disposto em suporte contendo quatro concentradores.

Para resolver estas questões, primeiramente removeram o computador do sistema. Isto simplificou o mecanismo rastreador. Para obter este resultado, como ensina a astronomia, o dia solar real não tem a mesma duração durante o ano, mudando de um modo notável de acordo com períodos diferentes. A consequência é a mudança do ângulo solar com a passagem do tempo. No primeiro sistema, este problema foi resolvido usando o PC no cálculo do azimute solar.

No primeiro sistema, outra tarefa levada a cabo pelo computador era redirecionar o painel para a posição do Sol quando a sua imagem estivesse perdida (nuvens) para o posicionamento do sensor.

Na versão final do sistema rastreador, os autores optaram pelo uso de um sistema automático. Referindo-se a este sistema, afirmam que ele permite acompanhar o movimento não só do Sol, mas de qualquer objeto celeste, simplesmente orientando o movimento do sistema paralelamente ao eixo de rotação da terra, chamado de eixo de tempo, sendo suficiente transmitir a este eixo de tempo uma troca angular satisfatória que depende do tempo astral, mas, no caso de rastrear o sol, dependerá da duração do dia solar verdadeiro. Qualquer ajuste do eixo de elevação, do chamado eixo de declinação, não é necessário, pelo menos teoricamente.

Os autores deduziram ser este o melhor sistema para rastrear qualquer objeto celeste (motor de passo ao qual se transmite a variação angular).

CIAMBERLNI et al. (2003) não deixaram de observar, também, que o eixo de declinação necessita de uma ínfima correção diária, mas que, anualmente acumulada se transforma em um ajuste necessário de até 47°.

Optaram, para o acompanhamento deste eixo de declinação, pela mesma solução do fotodetector de quatro-quadrantes, utilizado no primeiro protótipo, com um ângulo de aceitação de cerca de 3°. Este fotodetector é capaz, segundo informam, de redirecionar o sistema para o Sol em caso de períodos longos de céu nublado. Um sistema de relojoaria com a data tem a função de informar quando o painel deve ser novamente posicionado. A corrente necessária para se mover todo o sistema foi calculada para ser em média de 18 mA, na potência aproximada de cerca de 200 mW. Segundo relatam os autores, soluções para reduzir este gasto energético estão sendo estudadas; e testes preliminares chegaram à informação sobre a possibilidade de abaixar a voltagem de provisão.

Dispuseram ainda uma bateria pequena, carregada por um pequeno painel solar, para alimentar o sistema. Os autores calcularam que a bateria (1,2 A h) deixará o

instrumento independente durante alguns dias na ausência do Sol, podendo ser novamente recarregada com tão somente 3 h de exposição.

No caso de falta de Sol, a bateria será recarregada parcialmente sempre pela luz difusa presente durante o dia.

Os autores também projetaram e desenvolveram interruptores ópticos para uma total exploração da energia coletada. Segundo relatam, a energia solar pode ser extensamente aplicada a uma grande variedade de módulos de utilização como iluminação, aplicações térmicas, produção direta de eletricidade, e assim por diante. Este interruptor estudado é, segundo relataram, simples, seguro e altamente eficiente.

Consiste, como informa o trabalho, de um espelho montado em um eixo de rotação para redirecionar a luz para a extremidade da fibra de vidro desejada, para utilizações finais diferentes. O espelho tem uma forma elíptica, não ortogonal à linha axial das fibras de vidro, e foi especialmente projetado para o redirecionamento da luz solar, podendo ser programado em diversas posições pré-determinadas. O tamanho do interruptor óptico estudado foi de 50 mm.

O controlador do interruptor é uma placa eletrônica, permitindo três possíveis posições, conforme ilustrado na Figura 11, que apresenta ainda três possíveis utilizações da energia solar coletada: a mesma energia que vem dos painéis ópticos pode ser utilizada por um coletor térmico (ao alto), para geração de energia fotovoltaica, (posição mediana) e para a iluminação de quadros (abaixo). Como observado pelos autores, a eficiência total será aumentada significativamente, e o excesso da potência solar não será perdida.

Se, por exemplo, o reservatório de água quente alcançar a temperatura desejada, pode-se redirecionar a potência convenientemente a outro reservatório colocado mais próximo do usuário, em outro lugar do edifício. Porém, como o reservatório de água quente pode ser colocado facilmente abaixo do porão com este sistema. A capacidade de armazenamento não será limitada como acontece atualmente com a utilização dos coletores instalados no telhado.

2.2.2. Aquecedores Solares

Os coletores solares para aquecimento de água foram largamente difundidos, e obtiveram relativa aceitação e sucesso mercadológico em nosso país.

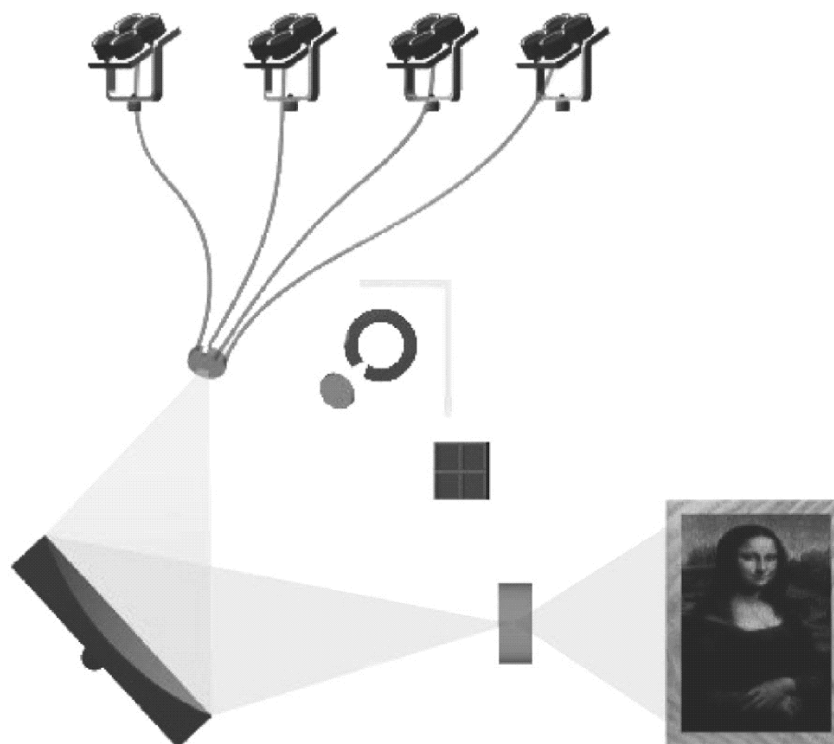


Figura 11 – Três possíveis utilizações da energia solar coletada, redirecionada por um interruptor óptico.

Estes aquecedores, com algumas variações, funcionam da seguinte forma: a água proveniente da caixa abastece o reservatório com isolamento térmico e, deste reservatório, flui por uma tubulação para as placas coletoras de energia solar, colocadas sobre o telhado (Figura 12).

À medida que a radiação do sol aquece a água, esta diminui sua massa específica e sobe, devido à convecção, saindo, portanto, das placas, e voltando ao reservatório térmico, onde fica armazenada até que se demande água quente como, por exemplo, em um chuveiro ou em uma torneira.

A temperatura da água para um banho confortável deve estar entre 38 °C e 40 °C.

Estes sistemas foram muito estudados e são de grande eficiência, mas se pode enumerar as seguintes limitações:

A – Instalações prediais:

Para se trocar o chuveiro elétrico pelo aquecedor é necessário abrir paredes e alterar a instalação hidráulica, trocando tubos de PVC, por cobre ou CPVC (plástico que resiste a altas temperaturas).

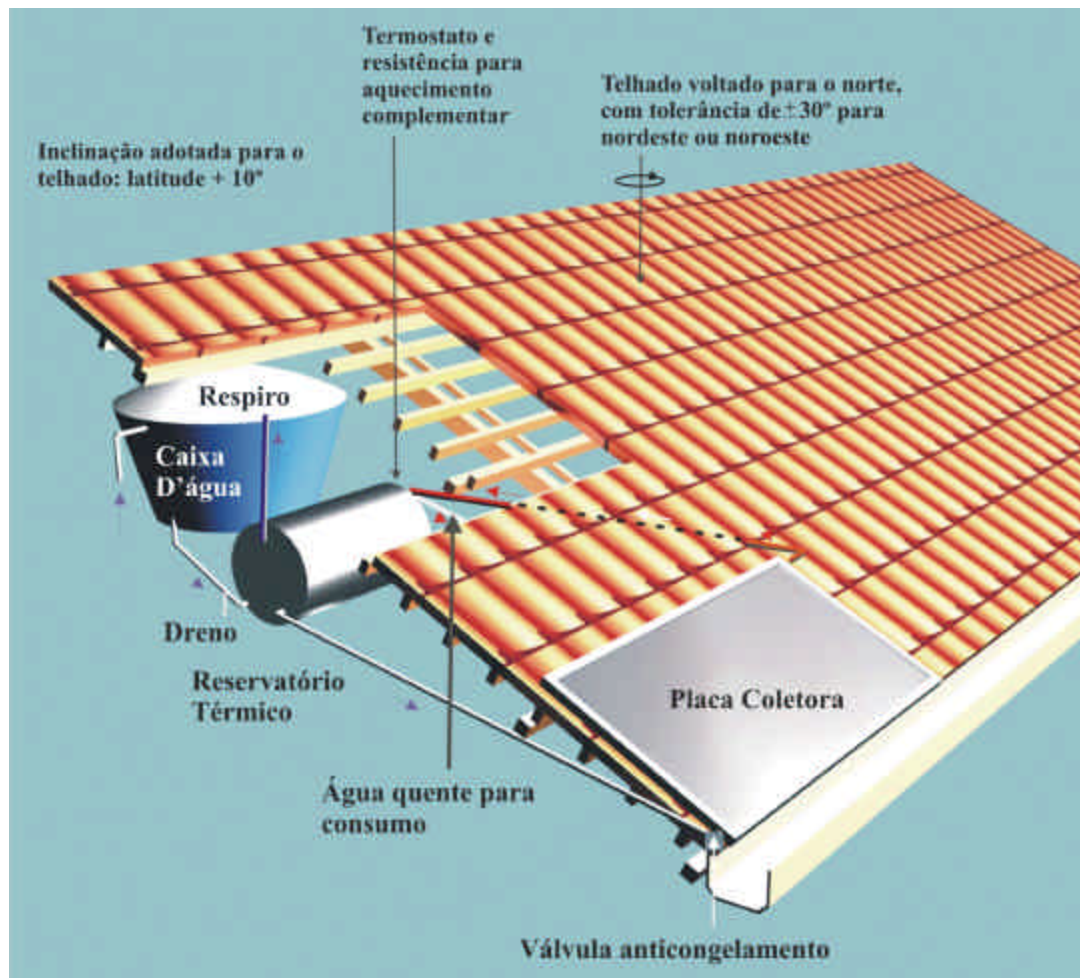


Figura 12 – Requisitos para a instalação de um aquecedor solar comum.

B – Exigências arquitetônicas:

Muitos possíveis compradores descartam a possibilidade do aparelho solar por exigir muitas adaptações no telhado, pois as placas devem estar voltadas para o norte, com desvio máximo de 30° a nordeste ou a noroeste. A inclinação média é função da latitude do local em que o aparelho será instalado (latitude deste local + 10°).

C – Perdas pela tubulação:

Grande parte da energia é perdida quando a água aquecida flui pelas tubulações, que são verdadeiros sumidouros de potência. Este fato tem dupla implicação: as tubulações devem ser isoladas termicamente, o que encarece o sistema, e o local onde a água será consumida não pode estar muito distante de onde a energia é coletada, o que coloca novas barreiras arquitetônicas.

D – Perdas no rendimento pelo movimento do Sol:

A quase totalidade dos coletores atualmente comercializados não acompanha o movimento do sol ao longo do dia, permanecendo estáticos nos telhados, em uma inclinação e orientação que, teoricamente, otimiza seu funcionamento. Isto diminui o rendimento dos aparelhos e encarece o sistema, por exigir maiores superfícies de exposição.

E – Congelamento:

Embora alguns fabricantes admitam ter resolvido este problema com a utilização de fluidos especiais ou “válvulas anticongelamento”, uma das maiores limitações dos aparelhos de grande aceitação mercadológica é que a água, efetivamente, pode congelar nos tubos e rompê-los, (fenômeno comum nas regiões Sul e Sudeste do país), em decorrência de seu aumento de volume, danificando, assim, os sistemas.

F – Alto custo inicial:

Os sistemas existentes são, em sua maioria, ainda inacessíveis às camadas mais pobres da população, embora (a médio prazo) representem grande economia na conta de energia elétrica, o que justificaria por si só a sua instalação. Algumas empresas têm pesquisado e comercializado coletores mais acessíveis, mas o desempenho e o custo destes aparelhos deixam muito a desejar.

G – Limitação espacial:

A área disponível para a instalação dos coletores é apontada por alguns técnicos como a maior de todas as limitações. Grandes edifícios residenciais, por exemplo, têm pouca área em suas coberturas para instalar o sistema. A energia solar que chega a muitas destas coberturas não é suficiente para suprir todo o prédio. Esta constatação aponta para a necessidade de desenvolver coletores mais eficientes, ainda que a custos maiores.

No que se refere ao armazenamento da energia, segundo DUFFIE e BECKMAN (1974), em sistemas solares de aquecimento, a energia pode ser armazenada na forma de calor sensível em meios líquidos ou sólidos, como calor de fusão em sistemas químicos, ou como energia química dos produtos de uma reação reversível.

Segundo KREITH e KREIDER (1978), a água é um meio de armazenamento térmico comumente usado, devido a uma série de particularidades desejáveis, como baixo custo, abundância, atômica, incombustibilidade, excelentes propriedades de transporte, alto calor específico, alta massa específica e metodologia de controle à corrosão já bem conhecida.

Segundo VIEIRA (1984), o reservatório de energia para meios líquidos pode ser fabricado em metal, fibras de vidro, alumínio ou concreto e deve ser capaz de suportar longas exposições e temperaturas variáveis e resistentes à corrosão.

2.2.3. Fornos Solares; Energia Renovável na Cocção de Alimentos

Os fornos solares são utilizados para a cocção de alimentos em geral. Suas principais vantagens são:

- Dispensar combustíveis e sistemas de ignição ou procedimentos de ativação;
- Não produzir fumaça, diminuindo os conhecidos riscos da poluição doméstica;
- Menor probabilidade de ocorrência de acidentes, tão comuns quando se utilizam os combustíveis tradicionais, não havendo perigos de explosão ou incêndios, por exemplo;
- Como os demais sistemas que utilizam a energia solar, evitam desmatamentos, transporte e queima de combustíveis, diminuindo a poluição; e
- Vantagem econômica dos baixos custos para os modelos mais simples.

Segundo BEZERRA (1998), a utilização do fogão solar nas áreas potencialmente propícias dar-se-á praticamente durante todo o dia, sendo o intervalo correspondente entre 9 e 15 horas o que melhor se adequa à sua utilização.

Como principais desvantagens, podem-se citar:

- A necessidade de um modelo convencional para os períodos de baixa insolação (inerente a qualquer sistema que utilize a energia solar); e
- A necessidade de locais com bom nível de radiação solar direta, isentos de sombreamento e de ventos.

A energia calorífica concentrada na região focal do coletor é suficiente para fornecer as calorias necessárias à ebulição da água, cozinhar, assar, fritar, aquecer alimentos etc. Segundo BEZERRA (1998), o uso sistemático do fogão solar somente trará benefícios para o usuário, principalmente os de baixa renda que habitam as zonas rurais.

Por outro lado a sua freqüente utilização representa uma contribuição inestimável à fauna e à flora, hoje tão comprometidas com o desmatamento predatório na busca de lenha, gravetos e outros materiais destinados à produção de energia térmica. As áreas potencialmente utilizáveis, ainda segundo BEZERRA (1998), estão situadas nas zonas do semi-árido nordestino e regiões de características semelhantes e preferencialmente onde há ocorrência de desmatamento para alimentação de fogões a lenha, bastante utilizados na zona rural.

Segundo BEZERRA (1998), captar a energia solar e utilizá-la no preparo dos alimentos é hoje uma prática que tem encontrado adeptos notadamente nos países como o Peru, Índia e China, entre outros.

A literatura especializada faz referência a diversos tipos de fogões, sendo os mais empregados os de concentrador parabólico, como o apresentado na Figura 13, muito embora todos eles sejam sistemas diretamente orientados para o sol.



Figura 13 – Fogão solar do tipo concentrador parabólico (BEZERRA, 1998).

BEZERRA (1998) estudou fogões solares utilizando concentradores parabólicos, cuja eficiência térmica é muito superior aos demais tipos de fogões referidos na literatura (utilizados na África, na Índia e em muitos outros países do mundo).

Segundo este autor, considerando o movimento aparente do sol em sua eclíptica, o funcionamento correto do fogão exige o seu respectivo direcionamento em relação ao

sol, o que será feito em intervalos aproximados de 20 minutos segundo a posição do sol em seu movimento azimutal e declinatório. Estes dois movimentos poderiam ser automatizados conforme o sol vai mudando de posição, mas, segundo analisou o autor, isto representaria um custo adicional.

O referido autor desenvolveu ainda um protótipo de fogão solar com superfície refletiva formada por segmentos de espelhos planos de 2 mm de espessura, e distância focal de 40 cm, e fator de concentração 24. Com este protótipo, obteve-se uma temperatura da ordem de 350° C, aferida segundo um termômetro digital tipo SALVTERM 1200 K. O objetivo deste protótipo foi unicamente testar o vidro espelhado como elemento refletivo.

Experimentando diversos materiais em seus concentradores, BEZERRA (1998) encontrou, para o caso do mylar e do alumínio comercial polido manualmente, as temperaturas máximas obtidas entre 10 e 12 horas do dia com a radiação variando de 1,21 a 1,37 cal/cm².min (converter para W/m², os seguintes valores:

- Mylar: 300 °C; e
- Alumínio: 250 °C.

A confirmação prática da temperatura foi obtida fundindo-se 200 gramas de chumbo num intervalo de dois minutos. Sabendo que o ponto de fusão do chumbo se dá a uma temperatura de 327 °C, conclui-se que a temperatura no foco do fogão foi de no mínimo igual à temperatura de fusão do chumbo.

2.2.4. Iluminação Solar Diurna

A energia solar pode ser eficientemente utilizada para a iluminação diurna de:

- ambientes internos sem janelas (porões, quartos, circulação, depósitos);
- ambientes com luz natural insuficiente (porões, sótãos, túneis);
- ambientes onde somente a luz natural é requerida (estufa fechada); e
- locais onde faz-se necessária a iluminação com boa distribuição do irreproduzível espectro solar (ateliês de pintura ou restauração etc.).

O trabalho de CIAMBERLNI et al. (2003) traz uma interessante aplicação prática da iluminação solar diurna através de sistemas de concentração solar e fibra ótica. Os referidos autores estudaram detalhadamente o desempenho para iluminação de

uma casa antiga do centro de Florença. As casas do centro velho desta cidade possuem normalmente escadarias e corredores sem janelas ou qualquer outro tipo de iluminação natural, prescindindo da iluminação artificial até mesmo durante o dia.

Além disso, utilizando-se um interruptor óptico juntamente com um painel de células fotovoltaicas e um carregador de bateria fez-se possível converter e acumular o excedente da energia solar para a iluminação das áreas escuras durante a noite.

Para determinar o número correto de coletores suficientes para a total iluminação, vários parâmetros espaciais foram levados em conta, como a disposição e forma tridimensional do compartimento no edifício, a comunicação ou condição de isolamento da escadaria, e a eficiência do coletor. Como o melhor resultado obtido pelos pesquisadores com o painel solar havia sido de 4 W em favoráveis condições de insolação, sabia-se que era este o máximo nível de potência luminosa disponível para a iluminação de escadaria diretamente de cada painel. O projeto funcionou de forma integrada e complementar a um sistema convencional que utilizava energia elétrica. Os painéis ópticos forneceram luz a todos os níveis do edifício.

2.3 Concentrados Solares

Há muitos milênios o homem conhece meios de concentrar a energia proveniente do Sol. Dominam-se, portanto, uma infinidade de materiais e métodos para a concentração da energia dos raios solares, que chegam à superfície da terra em vários comprimentos de onda, e em ângulos e intensidade variáveis durante o dia, o ano e as condições climatológicas.

Utilizam-se comumente para este fim os chamados instrumentos refratores e ou os instrumentos refletores. Os instrumentos refratores, como as lentes, apresentam o inconveniente de exigirem o polimento e tratamento de duas faces. Também resultam em instrumentos maiores e, como são geralmente maciços, mais pesados (o que as chamadas “lentes de Fresnel” conseguem amenizar, mas ainda não de maneira completamente satisfatória) (DUFFIE et al., 1974).

Os dispositivos refratores apresentam ainda uma importante desvantagem em relação aos refletores: o fenômeno físico da aberração cromática, que poderia ser entendida como a mudança da distância focal para diferentes comprimentos de onda, o que dificulta ainda mais a concentração ordenada de grandes frações do espectro

luminoso, uma vez que a correção deste fenômeno exigiria uma complexidade ótica ainda maior (DUFFIE et al., 1974).

Os concentradores refletores apresentam, portanto, a vantagem de serem mais leves, menos onerosos, mais fáceis de se construir e de se manter, permitindo grandes concentrações de energia sem o fracionamento dos diferentes comprimentos de onda.

Como ensina a ótica clássica, um espelho esférico de até 10° de abertura tem um foco bastante definido, sendo conhecidos por espelhos de Gauss. A partir deste ângulo de abertura, deve-se utilizar uma forma parabólica, sob pena de grandes distorções no foco.

Segundo BEZERRA (1998), a construção de um concentrador parabólico tem por base, portanto, o traçado geométrico da parábola, cuja equação em coordenadas cartesianas retangulares referida ao eixo de simetria e a tangente no vértice é dada por:

$$y^2 = 2px \quad (1)$$

em que p = distância do vértice ao eixo da parábola.

Um concentrador parabólico com a superfície espelhada (em prata ou alumínio) foi testado por JARAMILO et al. (1998). A sua geometria permitiu à equipe concentrar os raios solares no plano focal onde uma fibra ótica foi disposta. O concentrador parabólico foi descrito pela equação:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (2)$$

Para relacionar a distância focal e o ângulo de abertura, os autores apresentaram a equação:

$$\frac{f}{D_{app}} = \frac{1}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad (3)$$

em que

f = distância focal;

D_{app} = diâmetro de abertura; e

Ôr é o ângulo da margem (ângulo do cone).

Para um concentrador parabólico com superfície polida, os autores utilizam a seguinte equação, equivalente à concentração máxima que pode ser obtida, baseado na total captação da radiação refletida, que está dentro do cone de largura angular $(0.5333 + dA)$. O esquema pode ser visto na Figura 14.

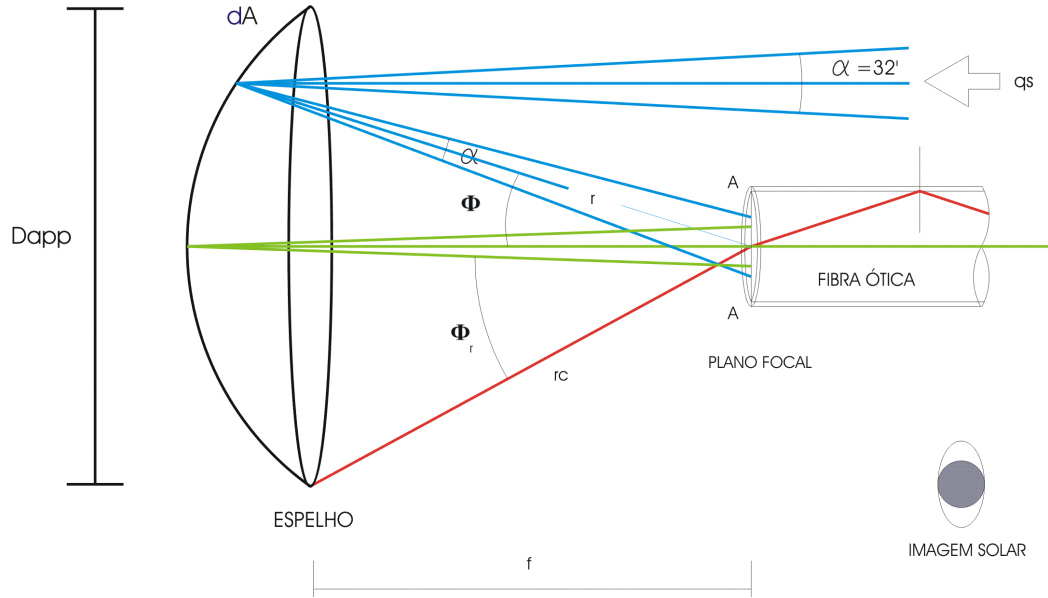


Figura 14 – Relações matemáticas e geométricas entre a fibra ótica e o espelho parabólico (adaptado de JARAMILO et al.,1998).

$$C_{max} = \frac{\sin^2\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \cos^2\left(\phi_r + 0,267 + \frac{\delta}{2}\right)}{4 \sin^2\left(0,267 + \frac{\delta}{2}\right)} - 1 \quad (4)$$

em que

C_{max} = máxima concentração possível,

$\hat{O}_r$ é o ângulo da margem (ângulo do cone)

0,267 = metade do ângulo do cone formado pela radiação solar incidente

d = medida dos limites de erros angulares da superfície refletora (os autores consideram, para efeitos de estudo, $d = 0$).

A relação de concentração é a relação da área de abertura (A_{app}) para a área de recepção (A_{rec}),

$$C_g = \frac{A_{app}}{A_{rec}} = \frac{D_{app}^2}{d_{rec}^2} \quad (5)$$

em que

C_g = relação de concentração;

A_{app} = área de abertura;

A_{rec} = área de recepção;

D_{app} = diâmetro de abertura; e

D_{rec} = diâmetro da fibra ótica.

Os autores ainda apresentam outras equações onde melhor relacionam as variáveis envolvidas na formação da imagem solar no plano focal (ângulo crítico, diâmetro da imagem), partindo em seguida para equações que relacionam parábola e fibra, e por fim o transporte da energia através da fibra ótica, como será visto no item adequado.

A utilização de concentradores parabólicos em larga escala esbarra em um problema técnico de difícil solução: quanto maior o poder de concentração, ou seja, quanto mais precisa a chamada mancha focal gerada pelo aparelho, mais cara e complicada se tornará a construção deste espelho.

Segundo BEZERRA (1998), o material mais indicado para compor a superfície refletiva é o alumínio com alto grau de polimento, muito embora existam outros materiais como o mylar (plástico auto-adesivo), que tem o inconveniente de ser importado, tendo, por este motivo, um custo muito elevado e não sendo, portanto, aconselhável. Ainda segundo BEZERRA (1998), o vidro espelhado de dois milímetros de espessura seria ideal para se utilizar no Brasil, porém tem o inconveniente de ser muito frágil, além de não ser suficientemente flexível para se adaptar à superfície curvada do parabolóide, o que termina por provocar dispersões energéticas.

O referido autor, analisando a problemática dos concentradores parabólicos para utilização em seus fogões solares, afirmou que a temperatura alcançável no foco dependerá basicamente de sua orientação correta, do grau de acabamento a ser dado ao parabolóide, do material que comporá a superfície refletiva e do respectivo fator de concentração.

De um modo geral, segundo informa, as temperaturas obtidas se situam entre 100 e 393 °C para fatores de concentração variando entre 2,5 e 24, aproximadamente

onde o valor máximo se refere a uma superfície refletiva formada por segmentos de espelho planos.

Alguns dispositivos podem ser utilizados em conjunto com os espelhos parabólicos para melhorar a precisão focal. Com lentes simples não é possível alcançar este intento, uma vez que a energia luminosa concentrada pelo espelho não chegará ao foco de maneira ordenada, mais em uma infinidade de variações angulares, providas praticamente de toda a superfície do espelho.

KHATRI et al. (1993) estudaram um sistema de coleta de energia solar no qual as fibras óticas são utilizadas para conduzir a potência. O coletor, um arranjo tridimensional denominado Concentrador Parabólico Composto (CPC), segundo os autores uma variação do concentrador Winston, pode ser constituído por um ou dois estágios.

A equipe desenvolveu um modelo matemático para a montagem do CPC e das fibras, e realizou simulações numéricas para aperfeiçoar o projeto do sistema.

Como descrito pela referida equipe, o sistema proposto é composto pelo CPC conectado às fibras óticas. Um CPC pode alcançar grande concentração para certos ângulos de entrada. Quando comparados a outros concentradores apresentam:

- pequeno fator de perda; e
- abertura de saída suficientemente reduzida para a acoplagem de fibras óticas.

Tais coletores, como mostra a Figura 15, não necessitam de uma orientação exata para o sol, e aceitam maior quantidade de energia difusa que os concentradores de imagem convencionais.

Devido à flexibilidade das fibras, os módulos de CPC podem ser montados em qualquer superfície satisfatoriamente ensolarada, e o dispositivo receptor pode ser disposto em um local afastado.

KHATRI et al. (1993) continuam o relato informando que os concentradores foram preenchidos por ar ou material “dielétrico” como plástico, vidro ou água. A abertura dos concentradores preenchidos com ar foi coberta com vidro para a proteção de sujeira, chuva, umidade e outros contaminantes ambientais. A superfície interna foi preparada com um material satisfatoriamente reflexivo ou com uma camada reflexiva de chapa prateada. O propósito de fazer o espelhamento da camada interior é reduzir as perdas de reflexão que acontecem quando a energia solar, incidente no CPC, sofre

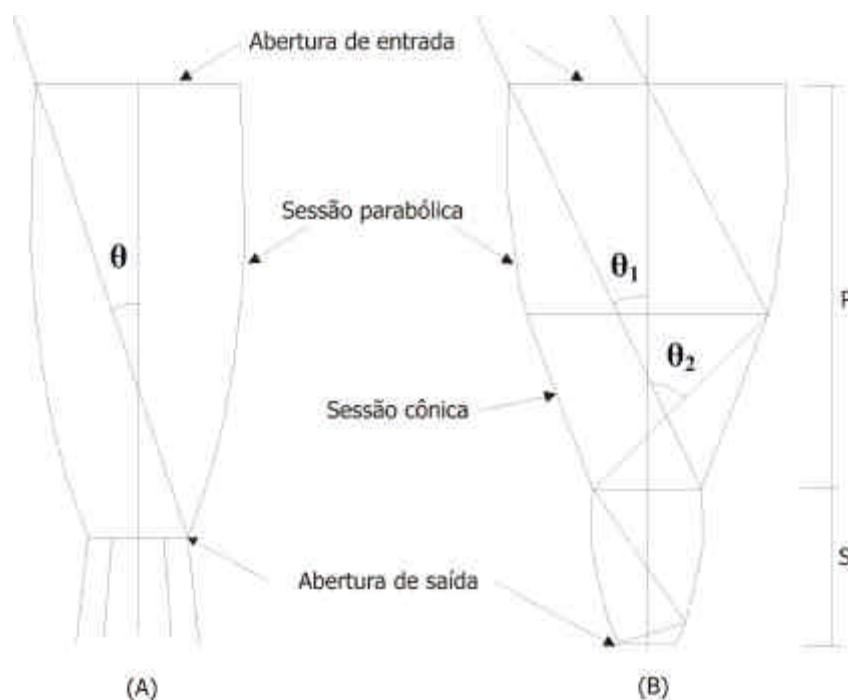


Figura 15 – Sistemas de coleta de energia solar incluindo concentradores e fibras óticas: (A) CPC de estágio único, mostrando o ângulo de aceitação do meio, θ . (B) Módulo de dois estágios, sendo o primário (P) um concentrador θ_1 / θ_2 e o secundário (S) um CPC maciço. θ_1 e θ_2 são ângulos de projeto de entrada e de saída. (Adaptado de KHATRI et al., 1993).

múltiplas reflexões pelas paredes do módulo preenchido com ar. Concentradores preenchidos com material dielétrico têm certos méritos. Para um índice de refração maior que 1,33, a energia é transmitida por reflexões internas totais, sem perdas, considerando que, nos módulos preenchidos apenas pelo ar, as reflexões acontecem acompanhadas de absorção pelas paredes do material. Para o mesmo ângulo de incidência e comprimento de onda, a razão de concentração será tanto maior quanto maior for o índice de refração do material do preenchimento.

Prosseguindo a descrição da metodologia empregada, KHATRI et al. (1993) relataram que, em aplicações práticas, CPC's truncados são normalmente empregados. A quantidade de energia disponível nas extremidades de saída da fibra depende do índice de refração do material de preenchimento destes, da relação de concentração, da qualidade da superfície do CPC e do grau da mutilação.

Uma análise é apresentada para determinar a quantidade de energia concentrada alcançável nas extremidades de saída, tanto para CPC's preenchidos com o ar quanto para os maciços, preenchidos com material dielétrico.

Para executar uma análise de sensibilidade para a razão de entrada sobre a razão de saída de energia, os pesquisadores desenvolveram um modelo matemático com 16 equações. A energia incidente na abertura de entrada do CPC, em meio ângulo de aceitação, é concentrada e focalizada na abertura de saída, sendo em seguida, interceptada pelas fibras e transmitida por meio da reflexão total no interior destas. Após sofrer algumas perdas, portanto, a energia atenuada é transmitida pela fibra ótica até a extremidade final. O modelo matemático descreve tanto o CPC de estágio único, como o de duplo-estágio, com preenchimentos, propriedades e relações de concentração diferentes. Simula-se, assim, a energia que atravessa todos os estágios e suas respectivas perdas.

Pela mesma razão, em um sistema de duplo-estágio, os autores demonstraram que uma produção mais baixa acontece para módulos que têm o estágio primário preenchidos com ar e os estágios secundários preenchidos com material dielétrico. Para estes últimos, as mais baixas taxas ocorrem quando ambos os estágios estão preenchidos pelo ar, pois se perde muita energia com a absorção a cada reflexão. Eficiências de módulos diferentes são determinadas, na Tabela 1, para fibras de até 10 m de comprimento. O significado das perdas por reflexão se torna evidente na Figura 16, onde se pode aferir que, quando se melhoram as propriedades refletoras da superfície, a eficiência aumenta consideravelmente para os concentradores preenchidos com ar. Isto se explica da seguinte forma: quando as respectivas capacidades de reflexão se aproximam, os módulos preenchidos por ar atingem ótimos desempenhos, próximos até mesmo ao dos módulos preenchidos por material dielétrico.

Tabela 1 – Eficiência de diferentes módulos de CPC (%)

Preenchimento	Estágio único	Duplo-estágio
Plástico	38,43	
Vidro	38,18	
Ar	31,07	
Plástico / Plástico		77,24
Vidro/ Vidro		77,24
Ar/Plástico		56,27
Ar/vidro		55,94
Ar/ar		38,81

FONTE: Adaptado de KHATRI et al. (1993).

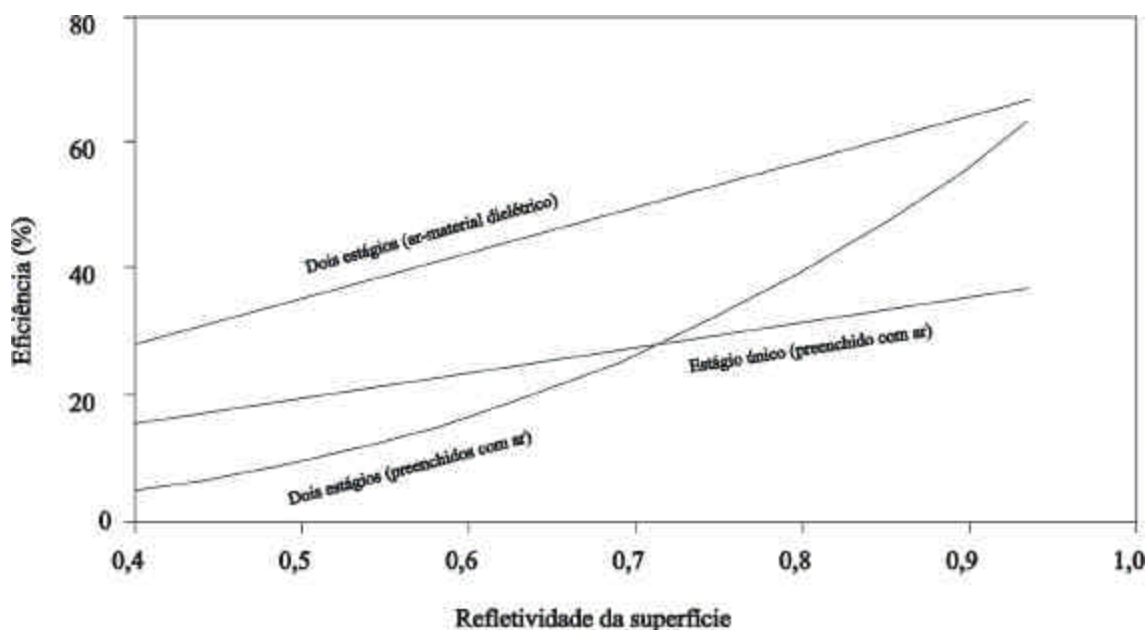


Figura 16 – Efeito de refletividade da superfície em módulos de um ou dois estágios. (KHATRI et al., 1993).

KHATRI et al. (1993) fazem as seguintes **observações finais**: para obter altos fluxos de energia, pratos parabólicos podem ser empregados com o CPC primário e com o concentrador secundário maciço. Porém, segundo os mesmos autores, em um sistema prático, podem queimar as extremidades das fibras, ou deteriorar as suas propriedades óticas devido às altas temperaturas atingidas por este tipo de concentração. Nos sistemas propostos, a construção de uma forma parabólica perfeita pode ainda oferecer constrangimentos mecânicos e econômicos. Concentradores maciços de plástico ou vidro mostraram-se sensivelmente melhores para executar a tarefa de concentração do que os preenchidos simplesmente pelo ar. As razões para isto são principalmente as perdas por reflexão e relações de concentração menores alcançáveis para o mesmo ângulo de aceitação nos módulos preenchidos com ar. Também, a construção de concentradores maciços de material dielétrico é mais fácil que a dos módulos ocas. Considerando-se que não ocorrem perdas de entrada nos concentradores de duas fases, seu desempenho é muito superior ao dos módulos de estágio único. Mas perdas de reflexão maiores excedem em valor esta vantagem quando ambas as fases forem ocas.

Para os autores, enfim, o desempenho do sistema melhora com um aumento na refletividade da superfície, mas, aumentando o comprimento de fibra diminui-se a eficiência devido à transmissão crescente e a perdas por absorção.

As fibras óticas são, concluem os autores, uma opção viável para transportar energia solar concentrada para lugares remotos. A condução inerente e as perdas de transmissão de tubos metálicos são eliminadas pelo uso das fibras óticas como portadoras da energia.

E terminam a explanação, com a seguinte afirmação:

“o sistema de coleta de energia solar como descrito apresenta vários problemas de construção, podendo resultar em custos iniciais altos, a operação do sistema é quase livre de manutenção e oferece grande promessa como um sistema de coleta de energia no próximo futuro” (KHATRI et al., 1993, p. 780).

As considerações e conclusões do estudo anteriormente analisado serão utilizadas em nossa metodologia, como uma eficiente maneira de concentrar a energia do espelho parabólica na extremidade da fibra ótica, o que nos permitirá trabalhar com espelhos parabólicos menos precisos.

2.4. Utilização da Fibra Ótica para o Translado da Potência Solar Concentrada

Na literatura pesquisada são raras as referências quanto ao emprego de fibras óticas para o transporte de energia solar concentrada e, em consequência, quase inexistente as referências quando ao seu emprego em aquecedores solares, fornos solares ou para a iluminação diurna.

A escassez de estudos e documentos se deve, acreditamos, a dois fatores principais:

- A tecnologia das fibras óticas só se tornou viável para estes estudos com o advento da fibra flexível e de materiais especiais de grande transparência para certos comprimentos de onda de a luz solar, ambos relativamente recentes;

- As fibras óticas ainda são caras e a sua manipulação (cortes, emendas, acoplagem a outros dispositivos) requer cuidados especiais para que não sejam danificadas as suas propriedades.

Embora não muito bem documentados pela literatura, foram feitos alguns esforços para se utilizar fibras óticas para a condução de calor. A patente de SEYMORE

(1966) demonstra o uso de um feixe de fibras para conduzir a energia de um laser para a ignição de um foguete. SWET (1973) apresenta um coletor solar feito de fibras. Em uma extremidade, as fibras são arranjadas em forma de arcos, e na outra extremidade são reunidas em uma pequena área para concentrar o fluxo de energia. CARIU et al. (1987) resumiram os detalhes para o transporte de energia por fibras óticas, propondo, já em meados de 1981, que as fibras óticas poderiam ser usadas para transmitir a energia solar concentrada. Esta idéia foi esquecida desde então devido aos altos níveis de atenuação da luz em fibras óticas.

Segundo JARAMILO et al. (1998), uma fibra ótica é um bastão com seção circular feita em plástico transparente ou vidro de alto índice de refração (no cerne ou miolo), incluindo uma capa com índice de refração inferior ao do cerne (Figura 17). As fibras óticas são compostas basicamente por um núcleo interno, feito de sílica pura fundida envolta por uma proteção de silicone.

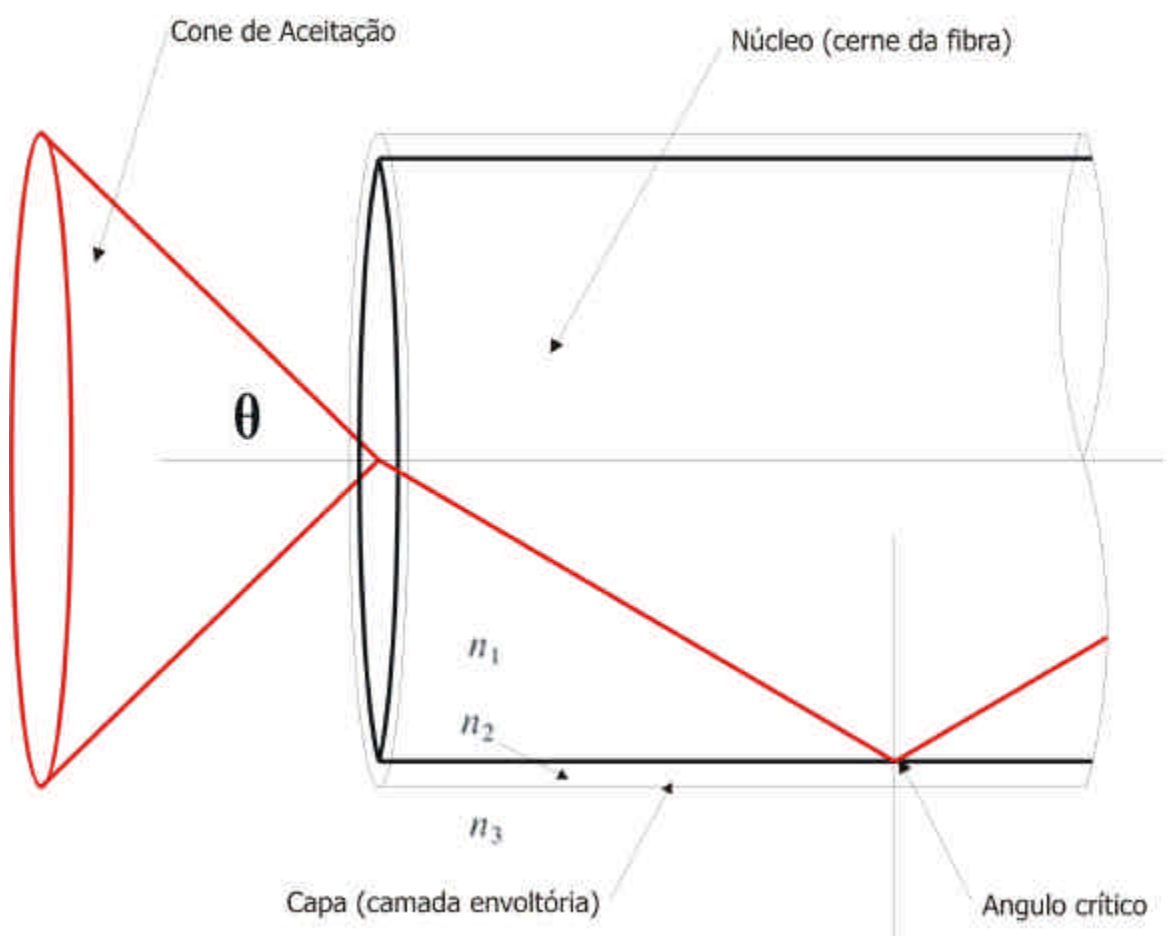


Figura 17 – Esquema da reflexão total no interior de uma fibra ótica, destacando-se o ângulo crítico (adaptado de JARAMILO et al., 1998).

A tecnologia patenteada em meados do século XX permite “canalizar a luz” por meio da chamada “reflexão total”, fenômeno físico decorrente da refração sofrida pela luz ao passar de um meio mais denso (a massa ótica da fibra) para um meio menos denso (o lado exterior da fibra, ou a capa envolvente). Nas telecomunicações, setor em que atualmente mais se utilizam fibras óticas, já se consegue transpor um feixe de laser com perda de 0,3% a cada 40 km, ou seja, perdas insignificantes ou desprezíveis.

Nos trabalhos analisados, as fibras funcionam como canais de energia térmica e ou luminosa entre os dispositivos coletores e os dispositivos receptores.

Prosseguindo na descrição da metodologia (KHATRI et al., 1993), no que se refere aos coletores compostos já analisados, relatam que as fibras são reunidas em um feixe, coladas firmemente e fixadas à base de um CPC de um só estágio, ou uma única fibra é presa à base de um coletor de duplo estágio. O ângulo de cone é determinado por:

$$\sin d = \sqrt{(n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{envoltório}}^2)} \quad (6)$$

em que

d = ângulo do cone;

$n_{\text{núcleo}}$ = índice de refração do núcleo; e

$n_{\text{envoltório}}$ = índice de refração do envoltório.

Os índices de refração do núcleo e do envoltório devem ser tão diferentes quanto possível para obter um ângulo de aceitação maior, maximizando desta maneira a coleta da energia. Porém, devido a motivos econômicos e dificuldades industriais, estão disponíveis ângulos de no máximo 20°.

JARAMILO et al. (1998) relatam em seus experimentos o que eles chamam de um “modo alternativo para transmitir a energia solar concentrada”, que pode ser aplicado na produção de hidrogênio através de foto-eletrólise. Segundo o autor, é possível obter alta eficiência nos sistemas de conversão fotoeletroquímicos com um desenho estrutural muito simples. A idéia básica é colocar uma fibra ótica no foco de um receptor parabólico espelhado. A energia solar assim concentrada é, então, transmitida por certa distância por meio da reflexão interna total. As condições ideais para associar um espelho parabólico (superfície reflexiva coberta por prata ou alumínio) e a fibra ótica são estudadas pela equipe. A eficiência teórica do sistema de conversão obtido é analisada.

No estudo citado, o fluxo de energia obtido na outra extremidade da fibra ótica ilumina um “foto-anodo” colocado em um sistema “foto-eletroquímico” de produção de hidrogênio.

Chama a atenção, particularmente, neste estudo, o modelo matemático desenvolvido, associando o desempenho da fibra e do coletor parabólico:

O ângulo máximo $\tilde{E}$ de incidência para o qual ainda ocorre a reflexão interna total é determinado por:

$$A.N. = \sin q_i = \frac{1}{n_3} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (7)$$

em que

A.N.= número de abertura;

$\tilde{E}$ = ângulo de admissão (medido entre o eixo longitudinal da fibra e o raio crítico);

n_1 = índice de refração cerne ou miolo da fibra ótica;

n_2 = índice de refração da capa envoltória da fibra ótica; e

n_3 = índice de refração do meio externo.

Esta equação é mais completa do que a anterior, ao introduzir no problema o ângulo de abertura e o índice de refração do meio (JARAMILO et al., 1998).

Em seguida os autores apresentam uma típica transmissão espectral de fibra ótica com baixo OH^- . O radical OH^- , segunda afirmam, é inerente às fibras, e gera perdas por absorção vibracionais.

Esta fibra tem um baixo conteúdo de íons metálicos para evitar cumes de absorção como Cu^{+2} próximo a 0.800 un Fe^{+2} próximo a 1.100 un e Ni^{+2} em torno de 0.650 un. A entrada e a saída de potência de uma fibra ótica são calculadas por:

$$dB_{loss} = \frac{-10}{L} \log \left(\frac{Q_{out}}{Q_{in}} \right) \quad (8)$$

em que

DB = perda de decibéis por distância;

L = comprimento da massa ótica da fibra;

Q_{in} = potência que penetra na fibra; e

Q_{out} = potência que sai pela extremidade oposta da fibra.

LIANG et al. (1998) promoveram um interessante estudo de um conduto de luz flexível constituído por 19 fibras óticas, capaz de transmitir até 60 W de potência ótica, com 60% de eficiência. Uma flexível transmissão de energia solar por fibra ótica e o esquema de concentração utilizando uma única fibra, 2 e 7 cabos de fibra é relatado por estes pesquisadores, que construíram um “caminho de luz flexível” de fibra ótica, de 7 mm de diâmetro e de 3 m de comprimento.

Este guia, segundo informam, foi constituído por 19 fibras óticas. A seção de entrada de cada fibra ótica possuía 1,5 mm de diâmetro, e foi polida para formar uma coluna hexagonal, como mostrado na Figura 18. Quando são unidas as extremidades destas fibras polidas, um cabo ótico compacto é obtido, não deixando nenhum espaço morto entre as fibras óticas e, conseqüentemente, a energia solar concentrada é transmitida sem perdas extras. A Figura 19 mostra o esquema tridimensional da extremidade de saída da fibra ótica. As fibras óticas, externamente a esta reunião, são polidas apenas em 3 ou 4 lados.

Segundo os autores, o polimento das extremidades de entrada hexagonais das fibras óticas é um trabalho delicado. As 19 fibras óticas foram cuidadosamente polidas na extremidade de entrada e de saída. Após o polimento, cada fibra individual foi montada em uma cabeça mecânica que permitiu girar a fibra em até 60°, em seis etapas. Nenhum método de fixação mecânico foi utilizado, evitando assim danos à fibra. Só a pressão manual foi aplicada sobre a fibra ótica, polida em seguida por uma sucessão de etapas delicadas e materiais diferentes (líquido, diamante, lixa de papel etc.).

Segundo o relato dos autores, o sucesso no polimento de cada aresta de entrada de uma fibra ótica é essencial para assegurar a alta capacidade de transmissão da fibra ótica como um todo.

Em suas experiências, encontraram uma enorme diferença de transmissão, chegando a 30% (com arestas precariamente polidas) para mais que 60% (com arestas bem polidas). Um mau polimento da aresta, segundo analisam, espalhará a energia solar sem ordenamento no interior da fibra e, conseqüentemente, reduzirá drasticamente a eficiência da transmissão.

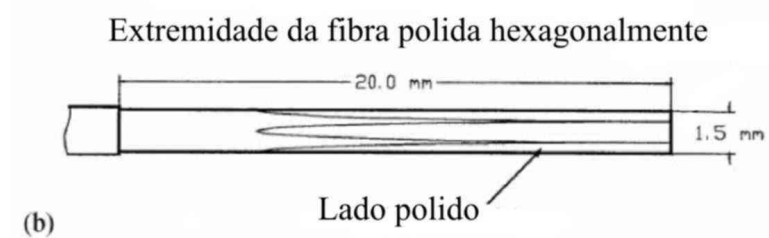
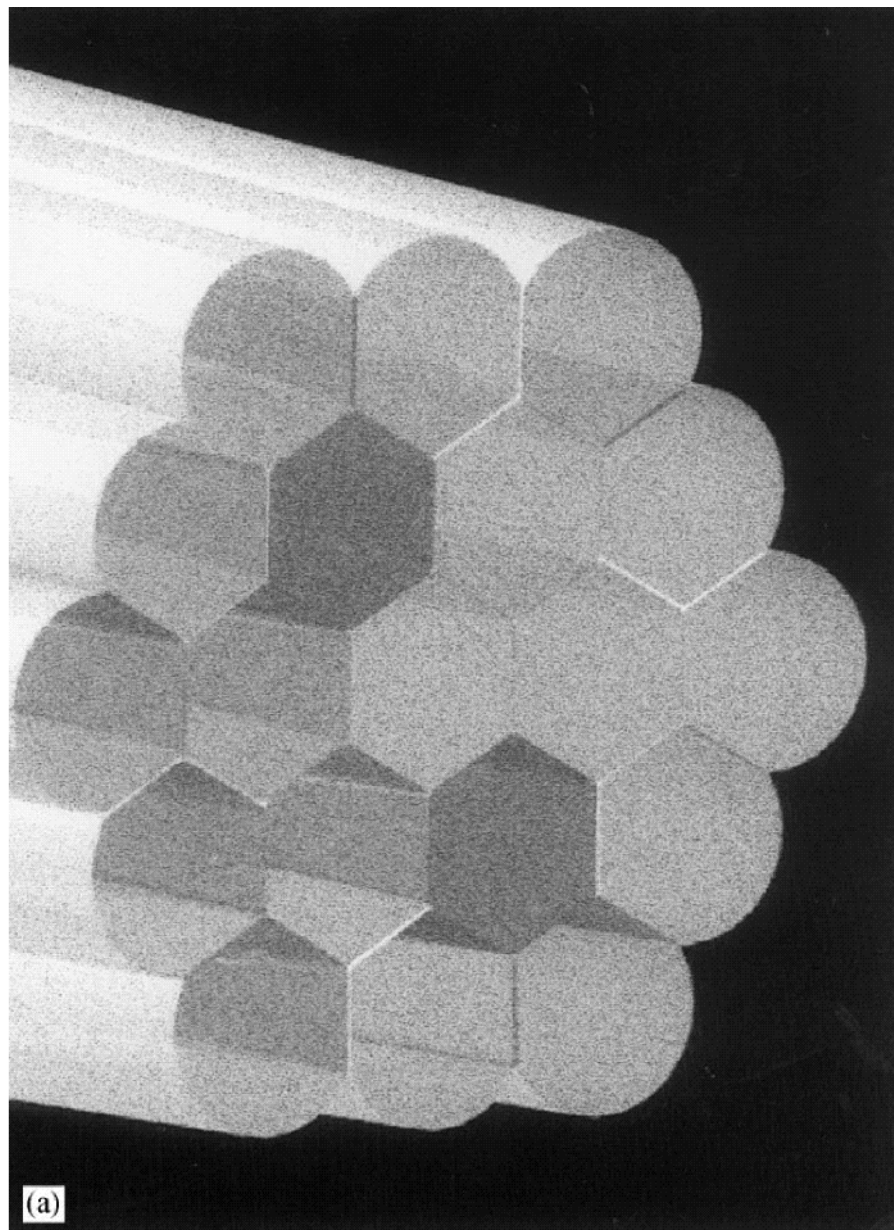


Figura 18 – Esquema tridimensional da extremidade de entrada de 19 fibras óticas. (b) As dimensões da coluna polida de entrada hexagonal.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira idealização do protótipo efetivo para testes, posteriormente modificada, está apresentada na Figura 19.

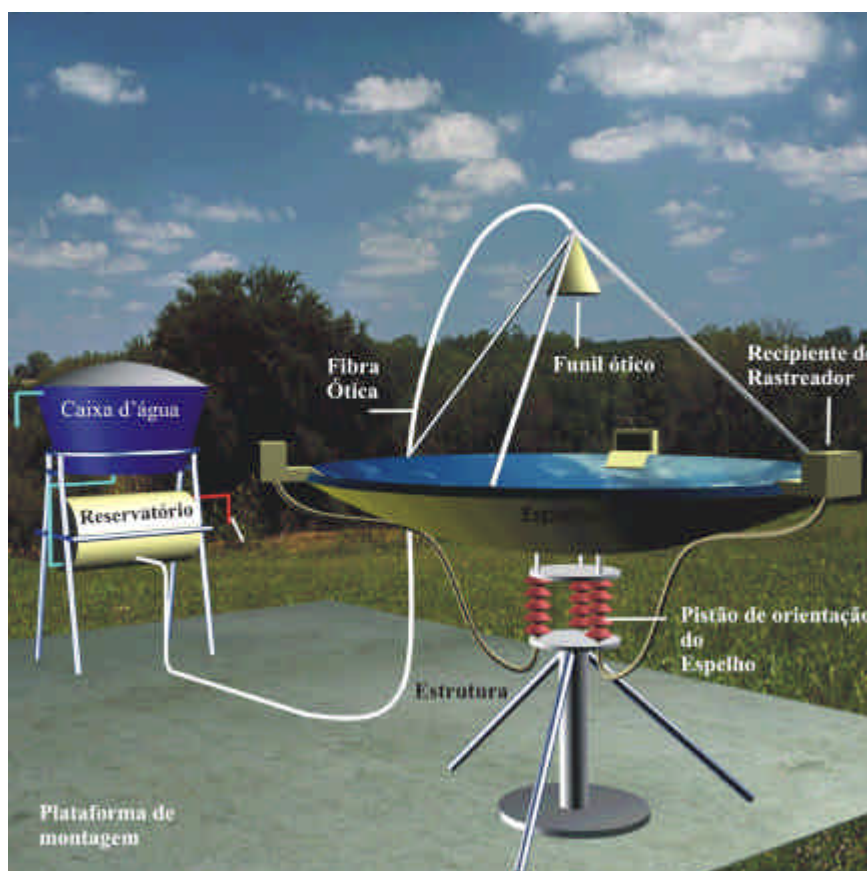


Figura 19 – Primeira idealização de um aquecedor solar de água. (ilustração do autor).

Alguns protótipos e testes físicos foram realizados, são eles:

- Espelhos parabólicos;
- Sistema de rastreamento baseado em dilatação;
- Sistema de rastreamento eletrônico;
- Feixe de fibras óticas comerciais;
- Concentrador parabólico composto; e
- Dispositivo de difusão luminosa.

A parte experimental do presente trabalho foi realizada em área cedida pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa, MG.

Foram construídos três protótipos de refletores parabólicos.

O primeiro foi desenhado em um programa de computador e, em seguida, retificado, impresso e transferido para uma chapa galvanizada, sendo montado artesanalmente.

O segundo protótipo foi construído com uma armação parabólica industrializada, não tendo sido, portanto, previamente calculado.

O terceiro protótipo do refletor foi executado acoplando-se à armação parabólica chapas de alumínio, em substituição às telas.

A fibra ótica testada corresponde a um cabo, de 2 m de comprimento, possui diâmetro de 0,6 cm, sendo composto por 19 fibras óticas de 1 mm de diâmetro cada.

Quanto aos rastreadores solares, foram construídos dois protótipos, um baseado em dilatação de líquido e um rastreador eletrônico.

Construiu-se ainda um concentrador parabólico composto, para ser acoplado à extremidade do cabo ótico.

Quanto aos dispositivos de utilização final, não foram montados protótipos significativos de aquecedores ou fornos solares, pois a fibra utilizada não transmitia o calor (infravermelho) necessário para tais experimentos.

3.1. Montagem dos Protótipos

3.1.1 Espelho Parabólico

O primeiro protótipo do espelho parabólico foi desenhado com precisão e, em seguida, retificado, utilizando-se o programa Auto CAD. (desenvolveu-se uma rotina de programação especial para desenhar a parábola).

O espelho resultante consiste em um refletor dividido em 36 pequenos módulos de tamanhos idênticos, como mostram as Figuras 20, 21 e 22. Estes módulos foram impressos em tamanho natural e suas medidas transferidas para chapas de alumínio (material reflexivo) que foram, em seguida, recortadas e unidas entre si e a uma estrutura de sustentação por meio de solda e arrebiteamento, tomando assim a configuração parabólica planejada.

Em razão do serviço muito artesanal, a precisão alcançada na construção deste primeiro espelho, como se pode aferir na Figura 23, deixou a desejar, não servindo aos propósitos experimentais.

O segundo protótipo de refletor foi montado sobre a armação parabólica industrializada. São as seguintes as especificações técnicas:

Diâmetro do anel de contorno: 1,68 m;

Distância focal: 0,65 m;

Subdivisão interna: 10 segmentos.

Inicialmente, a superfície refletora foi executada cobrindo-se a tela do parabolóide com massa plástica automotiva, em seguida polida e pintada com spray cromado automotivo. Como não foi possível fazer o devido polimento da superfície (as lixas utilizadas não proporcionaram a reflexão almejada, como mostra a Figura 24). Assim, este procedimento foi, também, abandonado.

O terceiro protótipo do refletor, como ilustrado na Figura 25, foi executado acoplando-se à armação parabólica chapas de alumínio. A construção mostrou-se satisfatória quanto ao poder de reflexão, embora tenha perdido significativamente este poder após um curto período de exposição às condições meteorológicas de Viçosa, MG, como mostra a Figura 26.

Calculou-se a projeção plana da superfície do refletor, encontrando-se o valor de 22.153 cm^2 .

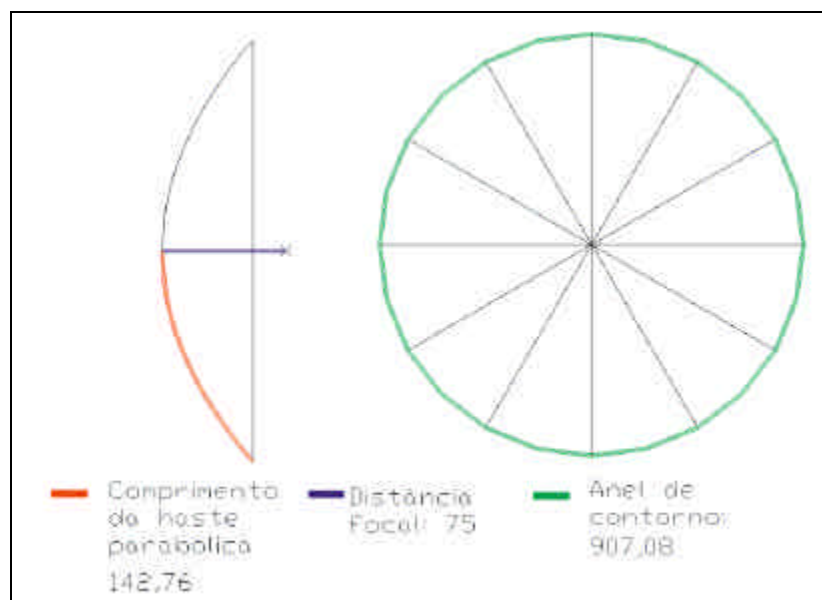


Figura 20 – Dimensões de projeto.

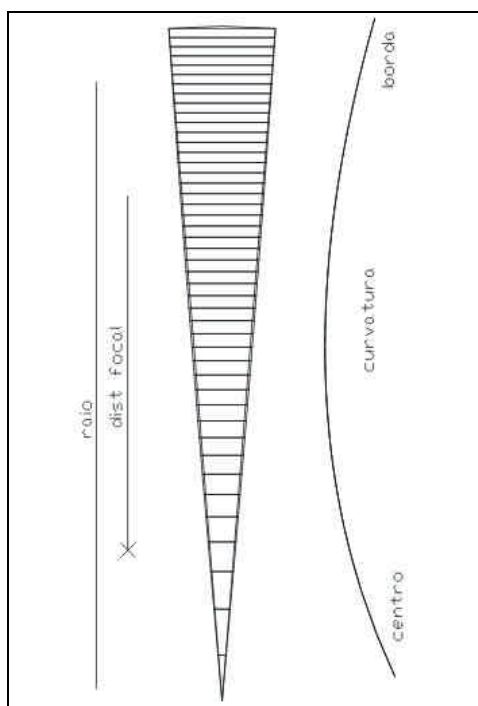


Figura 21 – Prancha preparada para impressão.

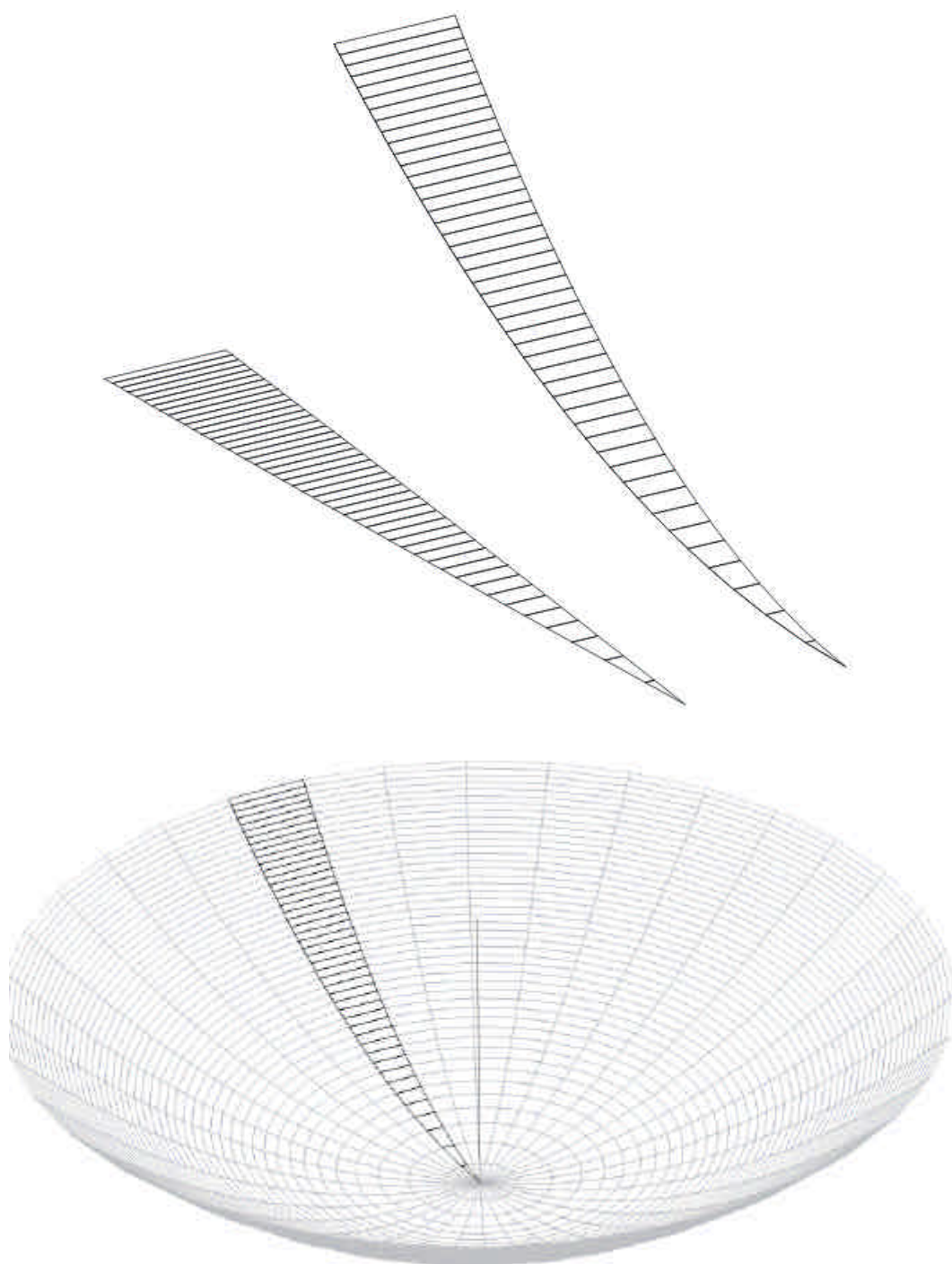


Figura 22 – Processo de retificação da parábola projetada.



Figura 23 – Teste de confecção do espelho parabólico, conforme procedimento descrito na metodologia.



Figura 24 – Espelhamento cobrindo-se a superfície com massa plástica, em seguida polida e pintada com tinta reflexiva.

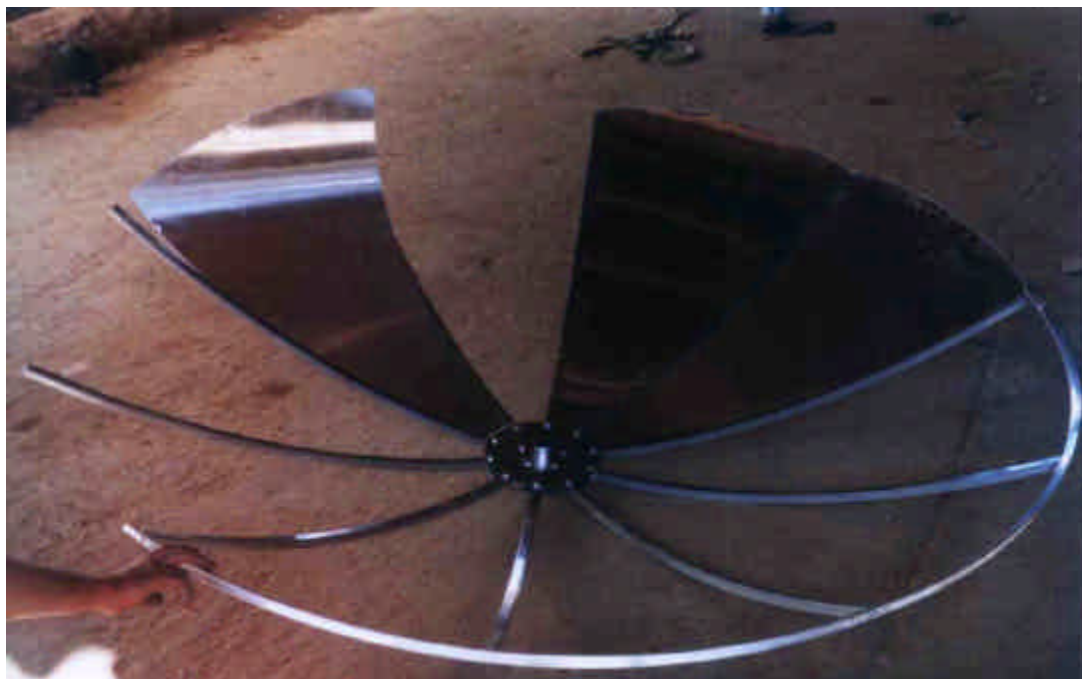


Figura 25 – Montagem do refletor em chapas de alumínio conformadas à armação parabólica.



Figura 26 – Superfície do refletor após seis meses de exposição às condições meteorológicas de Viçosa (agosto de 2003 a fevereiro de 2004).

Mediu-se o diâmetro aproximado da mancha focal, obtendo-se o valor de 20 cm, o que equivale a uma área de aproximadamente 314 cm².

O poder de concentração do espelho é dado, portanto, pelo cálculo:

$$C = A_e \cdot A_f^{-1} \quad (9)$$

em que

C = fator de concentração do espelho;

A_e = área da projeção plana da superfície do espelho;

A_f = área da mancha focal;

Substituindo-se, temos:

$$PC = 2210 \times 314^{-1} = 7,04$$

A Figura 27 mostra o refletor parabólico posicionado para medições.

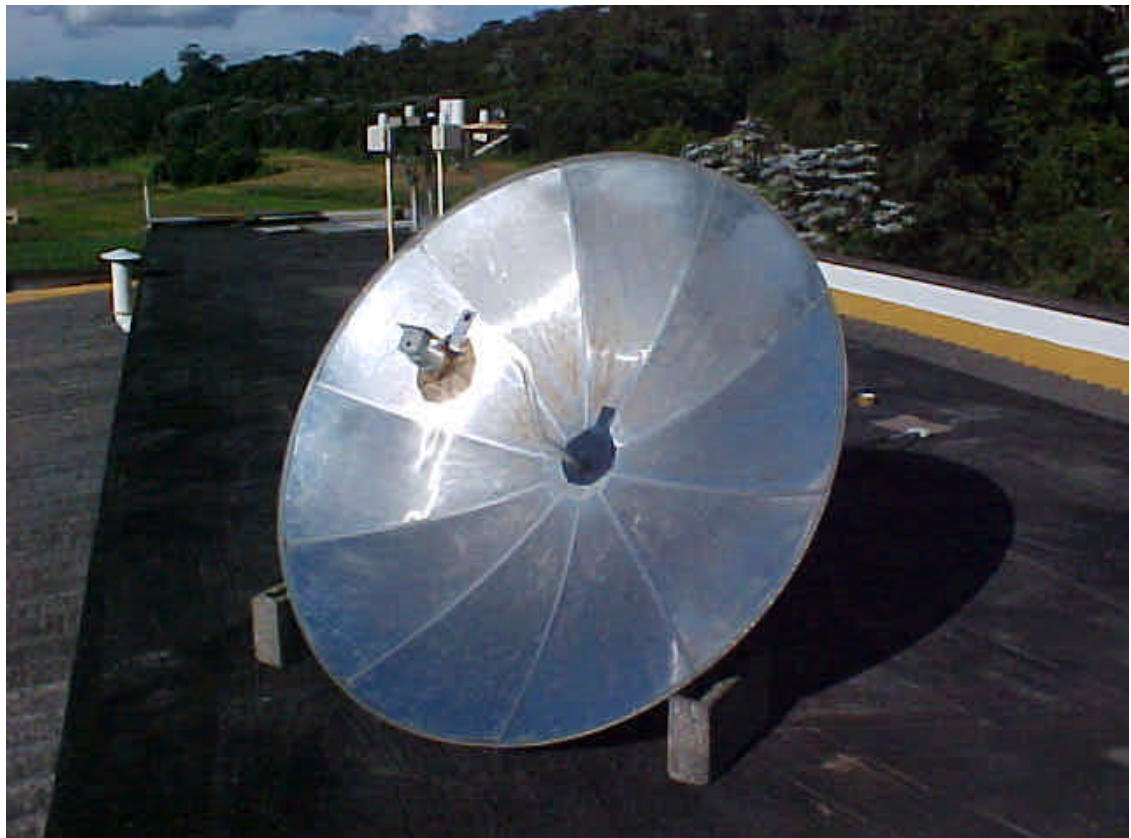


Figura 27 – Refletor parabólico posicionado para medições.

3.1.2. Sistema de Rastreamento Baseado em Dilatação

O primeiro sistema projetado e testado para rastrear o movimento do Sol, teve o seu funcionamento baseado nos seguintes princípios:

- A energia irradiada pelo sol aquecia desigualmente dois recipientes, em forma de paralelepípedos retângulos, transparentes, de aproximadamente 8x5x3 cm, contendo líquido com capacidade de sofrer boa dilatação.

- Foram dois os materiais dilatantes testados: álcool e éter, aos quais acrescentou-se pequena porção de tinta preta para dotar a mistura de uma boa capacidade de absorção da radiação solar.

- Ao sofrer dilatação, a mistura é forçada por um tubo em cuja extremidade foram afixados pequenos pistões hidráulicos, com a função de orientar o espelho na direção do sol. A relação entre os volumes dos pistões e dos paralelepípedos era de, pelo menos, 120 vezes, para haver uma movimentação significativa.

- Os paralelepípedos e pistões foram montados em um suporte, com eixo de rotação na direção leste-oeste, e devidamente isolados do meio, como mostra a Figura 28, de tal forma que a radiação direta provinda do Sol só poderia acionar um deles de cada vez.

- Quando o conjunto se alinha ao Sol, a estrutura de sombreamento dos prismas, impede que recebam mais energia, conforme ilustrado na Figura 29, cessando, assim, momentaneamente, o movimento dos pistões.

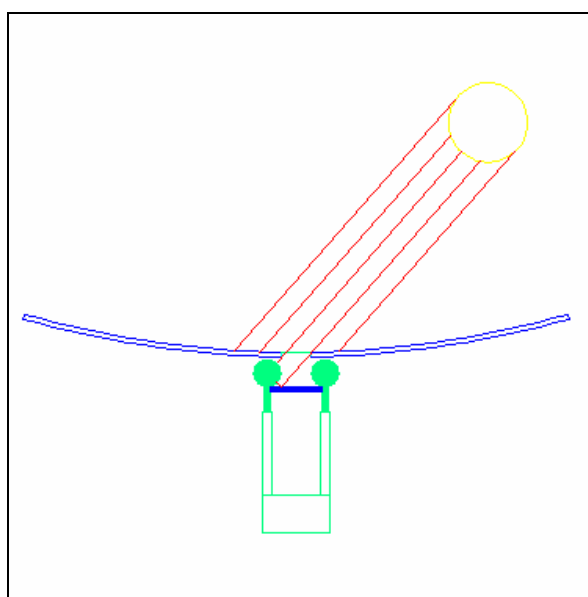


Figura 28 – Apenas um dos recipientes recebendo a radiação direta.

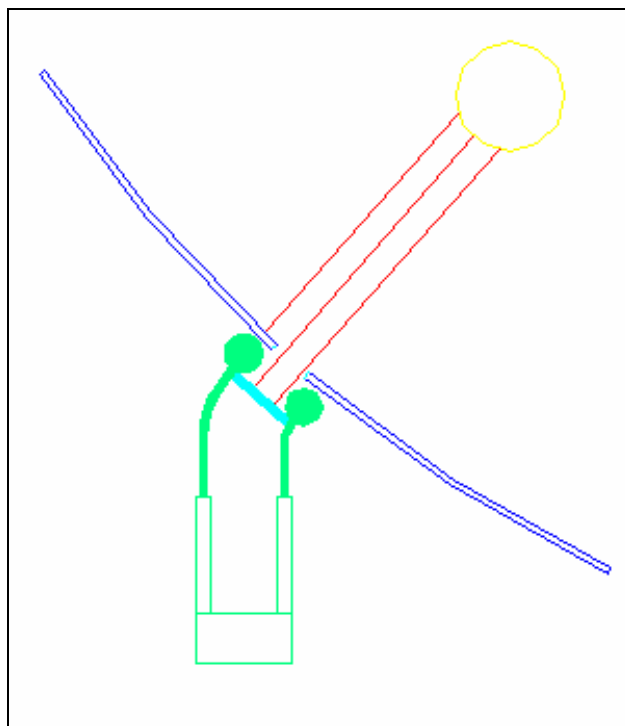


Figura 29 – O líquido se dilata e a orientação se completa.

Foram projetados e testados diversos modelos reduzidos de rastreadores utilizando este princípio: a construção destes modelos envolveu vários cuidados relativos ao isolamento térmico e ao tempo de dissipação da carga térmica recebida.

Para um pistão com volume de 5 ml e um recipiente de 600 ml obtivemos experimentalmente, um deslocamento de 35° em cerca de 5 minutos de exposição a uma lâmpada incandescente de 60 W, colocada a aproximadamente 50 cm de distância do prisma receptor. Testes mais precisos e detalhados não foram realizados, pois são grandes as dificuldades técnicas para se manter o sistema funcionando. A Figura 30 ilustra uma das primeiras montagens de um rastreador solar passivo com três dispositivos de dilatação (suficientes para uma orientação completa, não limitada ao eixo Leste-oeste).



Figura 30 – Montagem de um rastreador solar passivo.

3.1.3. Sistema de Rastreamento Eletrônico

Como o rastreamento termodinâmico mostrou-se inadequado, projetou-se e montou-se um rastreador eletrônico. O princípio de funcionamento foi inspirado no rastreador termodinâmico.

Dois dispositivos LDR (Resistores sensíveis à luz) foram colocados em substituição aos prismas com material dilatante. Projetou-se uma placa de circuito que, de acordo com a diferença entre as voltagens elétricas produzida por cada um dos sensores, aciona um motor de 12 V adaptado a uma redução mecânica, fazendo-o girar em um ou outro sentido conforme o potencial seja mais intenso em uma ou outra célula. Ao girar, o motor move a barra em que se encontram as células sensíveis à luz, sempre na direção do estímulo luminoso. Quando a barra se encontra perfeitamente orientada, não havendo diferença entre as voltagens provindas das duas células, o movimento cessa.

Este rastreador, embora tenha atendido às expectativas para as quais foi projetado e montado, apresenta as seguintes desvantagens:

- movimenta-se muito rapidamente, podendo causar danos ao sistema coletor;
- é facilmente perturbável pela radiação refletida em nuvens ou em objetos circundantes (pois trabalha com um certo limite de aceitação entre o estímulo provindo de uma ou outra célula); e
- Necessita de alimentação elétrica para o seu funcionamento.

Três fatores são importantes para testar a eficiência do rastreador solar: i) a precisão da orientação (que influenciará na qualidade da focalização obtida); ii) a velocidade da resposta ao estímulo luminoso (que influenciará na quantidade de energia recebida pelo sistema), e iii) o consumo de energia (que deve ser abatido na eficiência final do aparelho coletor).

Para testar a eficiência do rastreador, utilizou-se a equação:

$$E_r = \frac{N_r}{P}$$

em que

E_r = eficiência do rastreador;

N_r = número de horas em que o aparelho permanece satisfatoriamente orientado; e

P = período de luz direta (do nascer ao por do Sol, considerando-se a interferência do relevo).

3.1.4. Feixe de Fibras Óticas

Adquiriu-se para a realização do protótipo, um cabo ótico fabricado para a iluminação de piscinas, como ilustrado na Figura 31. Seu diâmetro é de 0,6 cm, sendo composto por 19 fibras óticas de 1 mm de diâmetro cada.



Figura 31 – Detalhe do cabo ótico de 2 m de comprimento.

3.1.5. Concentrador Parabólico Composto

ÁLVARES (1984) estudou os aspectos ótimos e térmicos necessários ao projeto de concentradores parabólicos compostos. Foram, a princípio, utilizadas as considerações óticas de seu trabalho para o desenvolvimento do que chamamos de “funil ótico”.

Mas, em vista do baixo desempenho alcançado, e do exíguo diâmetro das fibras, perseguiu-se a idéia de construir um concentrador composto de vidro ou plástico, pois como KHATRI et al. (1993) relatou em suas conclusões, os módulos preenchidos por plástico e vidro obtiveram uma performance consideravelmente superior aos preenchidos com ar.

Construímos um módulo de duplo estágio, utilizando-se a ilustração b da Figura 15. Embora o tenhamos construído maciço, vale lembrar que, para o caso dos CP'S ocos, superfícies tratadas com material reflexivo melhoram o rendimento.

A produção desta peça, talvez pelas dimensões reduzidas, foi ainda mais complexa que a montagem do concentrador parabólico. Tentou-se o serviço de torneiros mecânicos, protéticos e oculistas, mas não se conseguiu reproduzir a curvatura parabólica com o grau de precisão requerido.

Por meio do fatiamento computacional do sólido, no entanto, foi possível reduzi-lo a lâminas da espessura de folhas de papel. Estas fatias circulares, com o centro devidamente marcado, foram separadas no computador e impressas em papel espesso, sendo, em seguida, recortadas e coladas entre si, formando um sólido de papel. Com a devida compactação do volume resultante, obteve-se a dimensão requerida para o protótipo. Acabamentos em resina odontológica e massa plástica foram testados.

O trabalho artesanal, embora não muito preciso, pareceu satisfatório. O problema foi o preenchimento transparente, com um índice de refração adequado. A resina se mostrou muito fosca, com baixíssima capacidade de transmissão luminosa. Não houve meios de utilizar materiais alternativos, como plástico e vidro.

3.1.6. Dispositivo de Utilização Final

Para a difusão luminosa, ou seja, para a aplicação do sistema proposto em iluminação, existem muitos e eficientes dispositivos no mercado. Desta forma, o

procedimento para a iluminação mostrou-se o mais simples de ser experimentado: bastando adaptar a terminação da fibra a uma luminária adequada.

Para o aquecimento de água e para a cocção de alimentos, idealizaram-se dispositivos finais que não chegaram a ser construídos, devido alto preço dos componentes e serviços envolvidos. Apresentou-se o desenho destes dispositivos na categoria de sugestões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aparelho refletor referido no item 3.1.1. (Figura 26) proporciona uma concentração de aproximadamente sete sóis, suficiente para a utilização direta como fogão solar. O problema para a aplicação com fibras óticas é o exagerado ângulo com que os raios chegam ao foco, muito superiores aos ângulos de aceitação da maioria das fibras. Isto implica que nem toda a superfície da parábola é enxergada pelas fibras óticas colocadas no foco do espelho. Não sendo conhecido nenhum dispositivo ótico, como lentes ou CPC's, capaz de solucionar satisfatoriamente este problema, nem diminuir a imprecisão da mancha resultante.

Como a mancha focal resultante não era muito precisa em termos de fluxo de potência, havendo regiões mais e menos claras, isto poderia causar danos aos cabos óticos, ou provocar uma subutilização das suas propriedades.

Sobre os rastreadores termodinâmicos, pode-se fazer as seguintes considerações sobre a sua utilização:

a) sua precisão de orientação e tempo de resposta ao estímulo luminoso mostrou-se muito baixa para que ele possa ser utilizado na concentração da luz solar na exígua extremidade das fibras óticas, que exigem sistemas mais sensíveis;

b) Os ajustes para períodos relativamente longos, superiores a 3 horas, e grandes variações de temperatura, são complexos.

A literatura sobre o assunto é vasta, e envolve experiências de sucesso desde a utilização de rastreadores baseados em dilatação de gases refrigerantes (e não líquidos)

para orientação de painéis fotovoltaicos e motores termodinâmicos baseados em dilatação de líquidos provocados pelo Sol.

Obteve-se, para o rastreador eletrônico, em testes de curta duração sob condições de céu limpo, um Er de aproximadamente 0,3, resultado considerado muito ineficiente para um modelo efetivo de testes. O sistema pode, no entanto, ser devidamente aperfeiçoado, introduzindo-se um *feedback* para a variação dos limites aceitáveis de diferença entre as voltagens providas dos sensores de luz e modificações na placa de circuito.

Um rastreador com motor de passo, como os utilizados em astronomia para seguir objetos celestes, inclusive o Sol, teria um Er próximo de 1, mas com o inconveniente de consumir muita energia (estes motores giram a altas velocidades e têm reduções mais complexas, para que pequenas folgas e variações mecânicas não diminuam a precisão de seu funcionamento).

Quanto aos resultados obtidos com a fibra ótica, transparente à parte visível do espectro solar, sem transmitir o infravermelho, sua eficiência para o aquecimento, até mesmo de pequenos volumes de água, mostrou-se limitada. Porém, concentrando-se a energia do Sol com uma lente fotográfica em uma de suas extremidades, conseguiu-se experimentalmente queimar folhas de papel na outra extremidade. Uma ilustração da extremidade do cabo ótico está mostrada na Figura 32. Comparando-se esta ilustração com a figura 20, podemos perceber que grande parte da energia se perde nos vãos entre as extremidades da fibra. Esforços foram feitos para a obtenção experimental deste valor.



Figura 32 – Extremidade do cabo ótico.

A obtenção gráfica mostrou-se a mais adequada para esta finalidade, permitindo-se com um certo grau de facilidade, identificar os espaços cheios e os espaços cegos. A Figura 33 mostra a sobreposição computacional de circunferências à imagem da extremidade do cabo ótico.

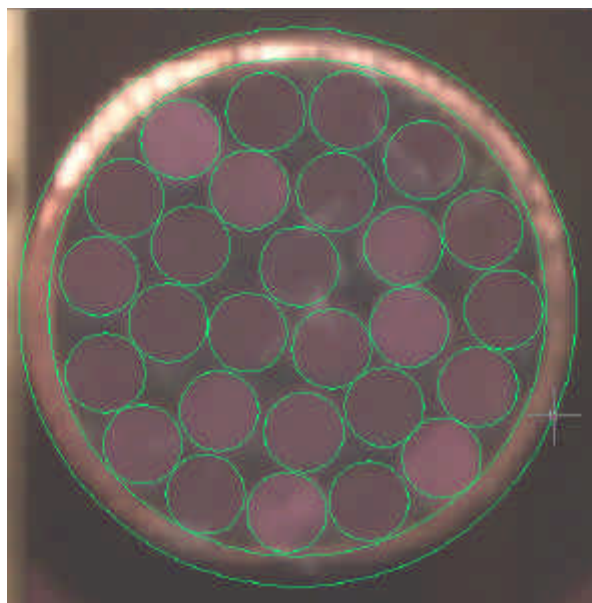


Figura 33 – As fibras compõem apenas 60% da área da extremidade do cabo ótico.

Medindo-se, por esse procedimento, a área das fibras óticas, e dividindo-se este valor pela área do anel de contorno da extremidade do cabo ótico, como ilustrado, obteve-se uma relação de aproximadamente 0,6. Em outras palavras, as fibras ocupam tão somente 60% da área da extremidade do cabo ótico.

Este valor tem um significado muito expressivo, e de implicações negativas para o desempenho.

Concentrando-se toda a energia provida do coletor solar no pequeno diâmetro do cabo ótico (uma tarefa difícil para os melhores concentradores), ainda assim, apenas 60% desta energia adentraria na massa ótica das fibras, o restante se perderia nos espaços vazios que compõe a terminação do feixe.

Foram feitas tentativas de polimento da extremidade das fibras óticas, que resultaram em certa diminuição do seu poder de transmissão. Cortes a 45° com um estilete afiado, no entanto, revelaram melhoria na capacidade transmissiva, o que se explica pelo conseqüente aumento de área na extremidade da fibra que este tipo de corte proporciona.

4.1. Cálculo de Eficiência do Coletor

Para obter-se experimentalmente a eficiência do coletor, dispende-se de um protótipo efetivo, utilizar-se-iam os dados de irradiância global no local do experimento, durante o período de realização do mesmo. De posse destes dados (potência fornecida a uma área em um certo tempo), e conhecendo-se ainda a área do espelho utilizada para a captação da radiação, poder-se-ia calcular facilmente a energia disponível ao coletor (em joules). A fração desta energia efetivamente aproveitada para mudar a temperatura da água no interior do reservatório revelaria, portanto, com as devidas considerações termodinâmicas, a eficiência do coletor.

A Figura 34 ilustra um modelo para cálculo de eficiência (sistema hipotético).

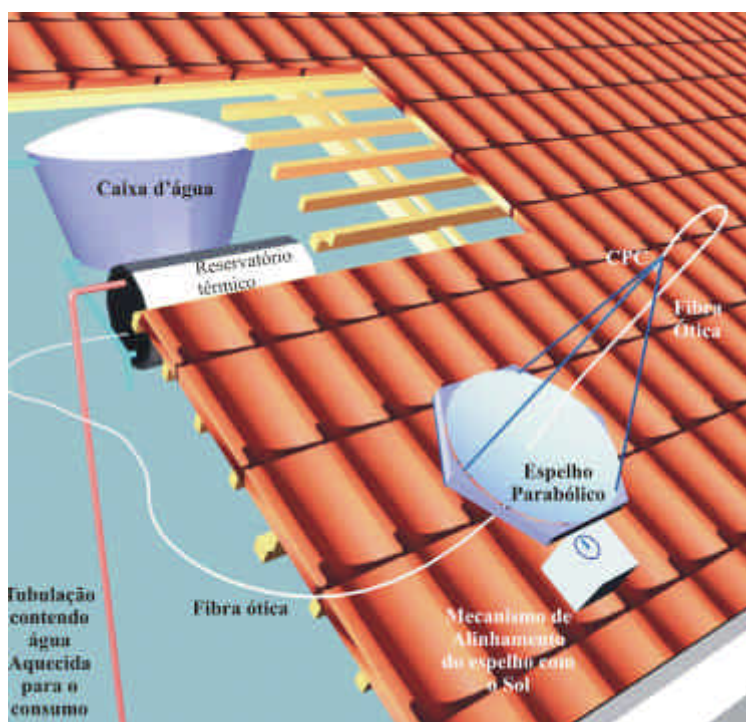


Figura 34 – Modelo para cálculo de eficiência.

Considerando-se que o sistema ótico proposto, um concentrador parabólico, implica no baixíssimo aproveitamento da radiação difusa (inferior até mesmo aos coletores planos e fixos) na etapa A, comentada abaixo, perder-se-á cerca de 15% do valor aferido pelo instrumento, pois, segundo VIANELLO e ALVES (2000), em dias de céu limpo, a radiação difusa contribui apenas com, aproximadamente, 15% do total da radiação solar que chega à superfície.

As etapas B e C podem ser reunidos em uma única etapa, que representa a eficiência do espelho englobando todas os seus determinantes físicos e geométricos. Este dado é fornecido por JARAMILO et al. (1998), para quem a eficiência de reflexão do espelho coletor foi adotada como sendo de 88,95%.

Já as etapas D e E, fazem variar enormemente a eficiência conforme o dispositivo de alinhamento utilizado. Considerar-se-á um sistema de rastreamento solar passivo, como o sistema de dilatação estudado, ou um dispositivo de relojoaria que utilize a energia do próprio Sol para o seu funcionamento. Este gasto não influirá, portanto, na eficiência final do aparelho. As perdas se devem, exclusivamente, à imprecisão do alinhamento. Mas como a área focal pode ser multiplicada pela presença de CPC's acoplados à extremidade das fibras óticas, podendo até mesmo significar algum ganho extra de energia difusa, e como os sistemas de relojoaria são suficientemente precisos e seguros para a aplicação requerida, as perdas serão consideradas nulas.

As perdas da etapa F foi calculada experimentalmente (Figura 33) e representa, como demonstrado, enormes perdas, da ordem de 40%. A utilização de CPC's e a transformação das extremidades cilíndricas em prismas hexagonais (Figura 18), como sugerido por LIANG et al. (1998), poderiam reduzir estas perdas para cerca de 10%. Adotaremos, portanto, este último valor, sugerindo o polimento e o uso de CPC's de duplo estágio, de vidro ou plástico, acoplados à extremidade do cabo ótico, como uma quase obrigatoriedade para atingir-se uma eficiência mínima satisfatória, posto que perdas da ordem de 40% nesta etapa praticamente inviabilizariam o sistema.

As etapas F, G e H refletem a eficiência da fibra ótica que, afinal, não é 100% transparente, nem transmite o espectro eletromagnético em sua completude. A eficiência de transmissão da fibra será adotada como sendo de 0,78. Este dado foi verificado experimentalmente por FEUERMAN et al (2001), para uma fibra de 20 m composta por material de índice de refração $n_1 = 1,45$.

A energia que aflora na outra extremidade da fibra pode ser diretamente utilizada no dispositivo final de conversão, para a aplicação desejada.

Considerando-se como 100% a radiação solar disponível no local de instalação do aparelho; os fatores que afetarão a eficiência do sistema coletor, estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo da eficiência do coletor

Etapas	Explicação	Potência/Potência Disponível
A	Fração desta energia cuja focalização não se faz possível pelo dispositivo ótico proposto (só é possível focaliza os raios que chegam paralelos ao eixo do espelho).	A eficiência, após estas perdas, será igual a 85%.
B	Imperfeições geométricas do espelho, (também influem na focalização dos raios).	
C	Absorção da radiação pela superfície do espelho (será tanto maior quanto mais impurezas a superfície reflexiva contiver).	Eficiência igual a $85\% \times 88,9\% / 100 = 75,5\%$
D	Erros de alinhamento do aparelho em relação ao Sol (influem na focalização).	
E	Gasto de energia para alimentar o dispositivo orientador.	Eficiência = 75,5%
F	Radiação perdida nos espaços cegos entre as extremidades das fibras óticas, no caso de se utilizar um feixe de fibras com terminações hexagonais, e não circulares, e no caso de se utilizar um CPC acoplado à extremidade do cabo ótico.	Eficiência = $75,5\% \times 0,9 = 67,95\%$
G	Radiação refletida pela extremidade da fibra ótica.	
H	Faixa do espectro para o qual a fibra ótica é opaca, não apresentando transmissividade.	
I	Atenuação interna pela massa ótica da fibra (a atenuação aumenta com o envelhecimento do material, sendo diretamente proporcional á dimensão linear do cabo ótico).	Eficiência = $67,95\% \times 0,78 = 53\%$.

A estas perdas soma-se a ineficiência dos dispositivos finais a que a energia se destina (cozimento de alimentos, aquecimento de água, iluminação). Para o caso da aplicação em aquecimento de água, podemos identificar as seguintes perdas, em ordem de importância:

- Perdas térmicas pelas paredes do reservatório (deve ser isolado termicamente do exterior);
- Calor específico do reservatório (parte da energia será perdida para aquecer material do reservatório e não a água).
- Perdas pela tubulação que sai do reservatório ao ponto de consumo.
- Energia irradiada pelo boiler e pelo líquido aquecido, que volta para o meio externo pelo mesmo cabo ótico pelo qual fluiu para o interior do reservatório, sendo proporcional à área da extremidade da fibra ótica em relação à área superficial interna do reservatório. (praticamente desprezível para a maioria dos cabos práticos).

A título de ilustração, realizaram-se os cálculos seguintes (Tabela 4) por meio de dados reais de radiação solar obtidos por um piranômetro Eppley, para as condições de verão da cidade de Viçosa-MG, no período de 21 de dezembro de 2000 a 3 de fevereiro de ano de 2001. O instrumento mencionado informa a chamada irradiância global (soma das irradiância direta e difusa, medida em W/m^2) incidentes no local estudado, na data mencionada. Os dados representam, portanto, a integração da radiação global provinda de toda a abóbada celeste (diurna e noturna).

Tabela 4 – Estimativa de desempenho do coletor para condições de Verão em Viçosa-MG

Data da coleta de Dados	Radiação Global (W/m^2 dia)	Radiação Direta (W/m^2 dia)	Litros de água aquecidos ^{1/}
21/12	29853780	25375713	270
22/12	25513500	21686475	231
23/12	21045300	17888505	191
24/12	25120860	21352731	228
25/12	24748500	21036225	224
26/12	24704520	20998842	224
27/12	21881400	18599190	198
28/12	14591820	12403047	132
29/12	21204600	18023910	192
30/12	12792660	10873761	116
31/12	16795620	14276277	152
1/1	8267700	7027545	75
2/1	14889840	12656364	135
3/1	4636260	3940821	42
4/1	20345160	17293386	184
5/1	27129180	23059803	246
6/1	29892240	25408404	271
7/1	29160240	24786204	264
8/1	23429880	19915398	212
9/1	11903880	10118298	108
10/1	14527560	12348426	132
11/1	26072340	22161489	236
12/1	19534680	16604478	177
13/1	20697180	17592603	188
14/1	22612380	19220523	205
15/1	20808240	17687004	189
16/1	20736180	17625753	188
17/1	25915920	22028532	235
18/1	22534500	19154325	204
19/1	28428540	24164259	258

Continua...

Tabela 4, Cont.

Data da coleta de Dados	Radiação Global (W/m²dia)	Radiação Direta (W/m²dia)	Litros de água aquecidos^{1/}
20/1	23786520	20218542	216
21/1	18912000	16075200	171
22/1	20971560	17825826	190
23/1	23864220	20284587	216
24/1	20808840	17687514	189
25/1	25505340	21679539	231
26/1	26860860	22831731	243
27/1	24399600	20739660	221
28/1	14036340	11930889	127
29/1	23458560	19939776	213
30/1	24343620	20692077	221
31/1	26507400	22531290	240
1/2	26425320	22461522	239
2/2	23781720	20214462	215
3/2	22805640	19384794	207

^{1/} Considerando-se um coletor com 53% de eficiência.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1. Discussão das Hipóteses Assumidas

A Hipótese principal do trabalho, conforme enunciada no item 1.2.1, confirma-se, pois:

- Embora a eficiência calculada para o sistema (53 %) pareça modesta, ela supera a eficiência dos coletores solares largamente difundidos, lembrando-se ainda que os cálculos foram feitos para materiais de baixa eficiência relatados pela literatura;

- A diversidade e a facilidade de aplicações finais justificariam por si só o uso do sistema, uma vez que sua praticidade chega a rivalizar até mesmo com as vantagens oferecidas pela utilização da eletricidade. As únicas desvantagens parecem ser a inconstância da incidência solar, e o ainda alto custo dos cabos óticos, a maioria dos quais importados.

A hipótese complementar 1 se confirma para as regiões do globo de maior incidência da radiação direta e para os dias de céu limpo (lembrando-se que a nebulosidade é maior no verão), uma vez que o sistema proposto é muito ineficiente na utilização da radiação difusa.

A hipótese complementar 2, sobre o fato de o rastreamento solar passivo ser o ideal para a aplicação estudada, não se confirmou experimentalmente, pois a grande imprecisão e a demora da orientação diminuem o desempenho dos sistemas ótico, que necessitam de uma orientação mais rápida e precisa para o correto funcionamento.

A hipótese complementar 3, de que para a coleta da energia do Sol conseguir-se-iam melhores resultados se se utilizassem um refletor parabólico simples e de baixa precisão (economicamente viável) acoplado a um sistema de aperfeiçoamento do foco, em detrimento dos espelhos de grande precisão e de difícil construção e manutenção, não se confirmou experimentalmente, uma vez que os refletores ideais parecem ser os mini-discos parabólicos. Os refletores de grandes dimensões e foco pouco homogêneo podem danificar as fibras, pois estas não suportam concentrações muito intensas.

A hipótese complementar 4, de que para o traslado da energia coletada, obter-se-iam maiores eficiências se se utilizassem feixes de fibras óticas que incluíssem em seu patamar de transmissão, conforme a aplicação, o espectro visível e/ou o espectro térmico da radiação eletromagnética, em detrimento da transmissão da energia através de fluídos aquecidos e tubulações isoladas, ou do seu consumo no local de coleta, ou da conversão e posterior transmissão através da eletricidade, confirmou-se sem reservas.

A hipótese complementar 5, de que seria possível, por meio do sistema de coleta e transporte de potência aqui propostos, construir fornos solares, aquecedores solares, e sistemas de iluminação diurna eficientes, entre outras aplicações, embora não tenha sido experimentalmente comprovada pois não foi possível construir o protótipo efetivo para testes, confirmou-se pela utilização do modelo matemático.

Concluimos ser possível a construção de aparelhos altamente eficientes, utilizando-se fibra ótica para o traslado da potência, refletores parabólicos menores e mais precisos para a captação da energia solar e sistemas de orientação eletrônicos, de baixo consumo e grande precisão.

Calculou-se uma eficiência de 53,0%, para o transporte da energia por um cabeamento ótico de 20 m de comprimento.

Destaca-se a grande versatilidade na utilização final da energia, superior até mesmo à maleabilidade oferecida pela energia elétrica, uma vez que a transmissão é mais simples, oferece menor risco e pode ser utilizada para gerar até mesmo eletricidade.

Destacam-se, também, as conseqüências ambientais da forma de utilização da energia proposta, e a possível conseqüência social se, como aconteceu com outras tecnologias, abaixando-se os custos principalmente dos cabos óticos, o sistema se tornar acessível ao usuário doméstico.

5.2. Recomendação de um Protótipo Efetivo

Propõe-se, neste item, um protótipo efetivo para testes, composto por 10 mini-espelhos parabólicos, fibras óticas do tipo IRQQ, rastreador eletrônico e possíveis dispositivos de utilização final.

As justificativas óticas e geométricas para a montagem sugerida encontram-se adiante na Figura 35 que apresenta, sem distorções, as proporções reais entre a distância focal e a abertura parabólica para o emprego das fibras IR1 E IRQQ. Destacamos, também, o chamado espelho de Gauss, pois para um ângulo de abertura de 10° (em verde, no centro inferior do gráfico) não há necessidade de se recorrer a uma formação parabólica, podendo-se utilizar uma curvatura perfeitamente esférica.

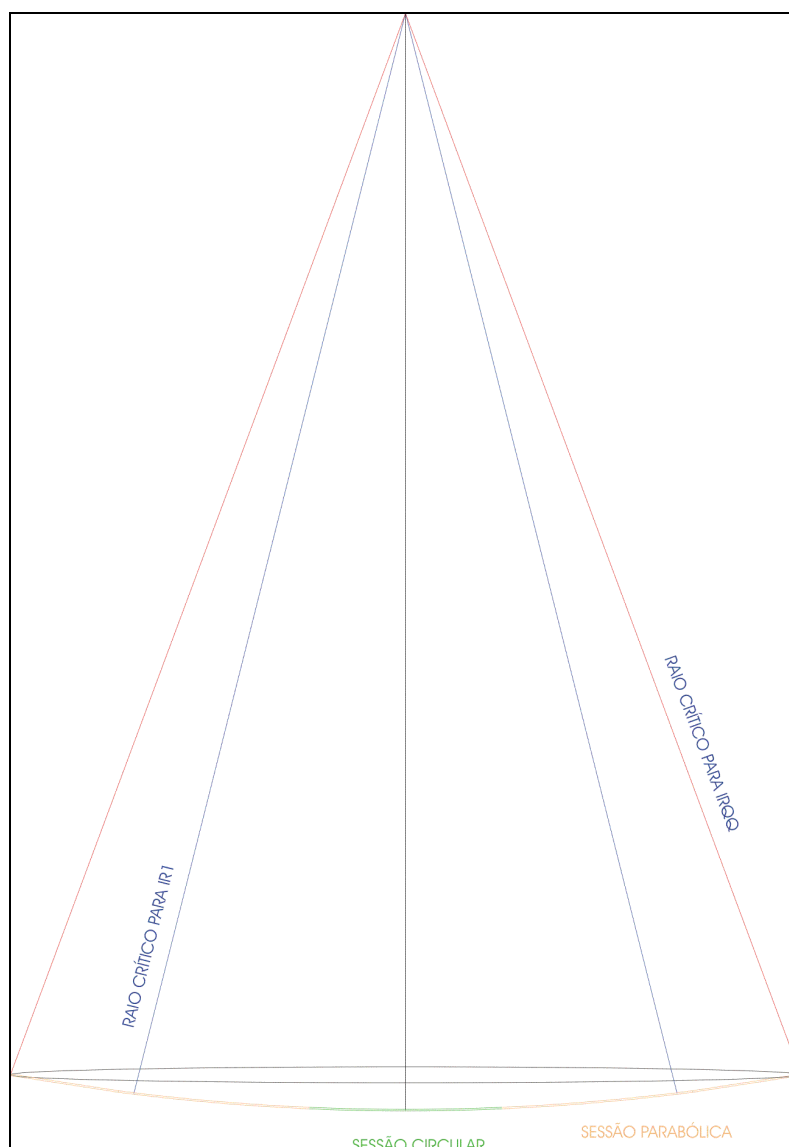


Figura 35 – Relações entre o espelho parabólico e as fibras ótica do tipo IR1 E IRQQ.

Ou seja, a fibra tipo IR1, embora por uma sobreposição dos gráficos fornecidos pelo fabricante, transmita cerca de 10% a mais em todas as bandas do espectro para as quais tem uma transparência significativa, apresenta um ângulo de aceitação muito inferior ao da fibra IRQQ.

A consequência deste comportamento pode ser assim enunciada: a fibra do tipo IR1 aceitará um menor ângulo do raio luminoso advindo do concentrador parabólico. Já a fibra do tipo IRQQ pode ser utilizada com concentradores parabólicos de aberturas maiores, compensando, desta forma, até certo ponto, o fato de transmitir menos energia nas diversas faixas do espectro solar.

Em termos numéricos, como o fluxo de calor depende da área do espelho efetivamente enxergada pelo núcleo da fibra ótica, pode-se chegar à seguinte conclusão, ilustrada na Figura 36.

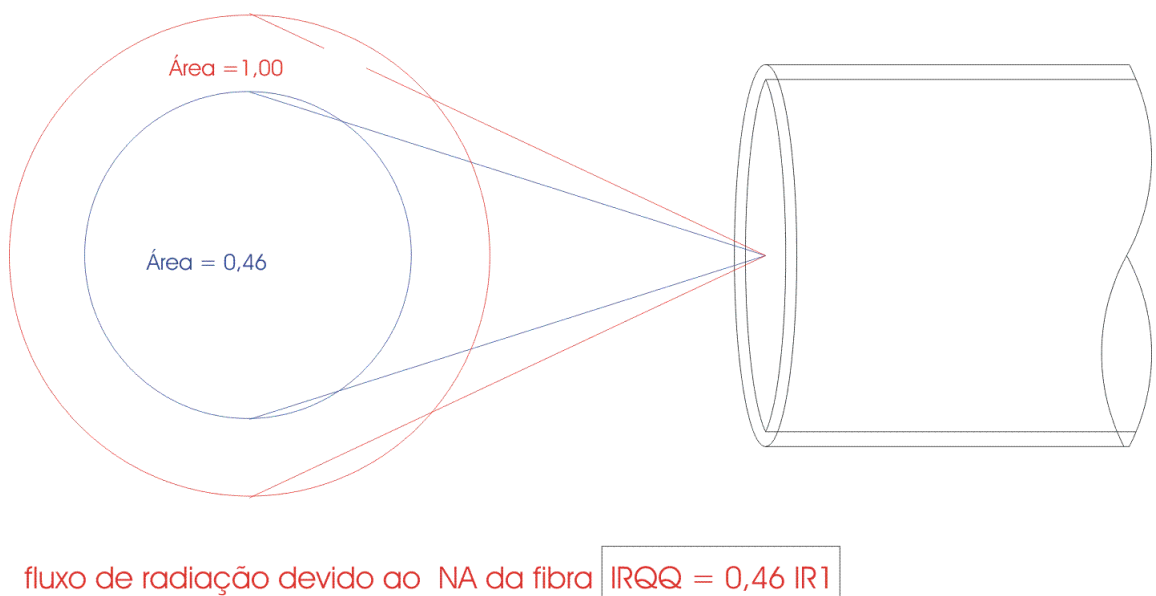


Figura 36 – Cálculos do fluxo de radiação admitida pelas fibras do tipo IR1 e IRQQ.

5.2.1. Concentrador Parabólico

- Raio sugerido: 17,85 cm;
- Distância focal: 50 cm;
- Superfície Reflexiva: 1.000 cm²; e
- Material reflexivo: mylar ou espelho comum.

Esta conformação, ilustrada na Figura 37, proporcionará um alto desempenho do concentrador. A razão para se adotar uma modulação, é a versatilidade fornecida para aumentar ou diminuir a potência, de acordo com as necessidades individuais. Uma alternativa excelente para a construção de um protótipo para este espelho, bem como para protótipos de CPC's e lentes, são os já conhecidos e disponíveis serviços de prototipagem virtual (confeção tridimensional de peças, diretamente de sua representação digital no computador, por meio de máquinas que utilizam uma técnica de deposição de camadas de pó por ação de laser).

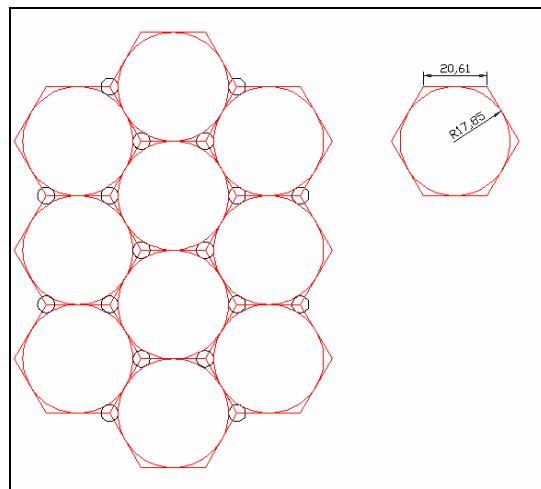


Figura 37 – Dimensões de um coletor e montagem dos espelhos em formação compacta.

A Figura 38 ilustra a perspectiva de uma possível montagem dos espelhos, bem como da localização do dispositivo rastreador (em vermelho). Já a Figura 39 mostra um detalhe do espelho e do suporte sugerido.

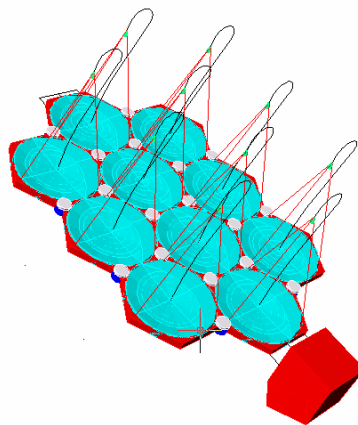


Figura 38 – Perspectiva de possível montagem dos espelhos e da localização para o dispositivo rastreador (em vermelho).



Figura 39 – Detalhe mostrando o espelho, os apoios e suportes, a fibra ótica e o concentrador parabólico composto (CPC).

5.2.2. Fibra Ótica

Tipo IRQQ (especialmente desenvolvida para alta transmissividade à fração infravermelha do espectro, com um adequado número de abertura); o material do núcleo é um vidro de quartzo anidrido. O material do envoltório é “quartzo dopado,” e as especificações técnicas desta fibra são:

Tabela 2 – Especificações técnicas da fibra IRQQ

Numero de abertura NA ($\lambda = 366 \text{ nm}$):	0.25
Angulo efetivo de abertura 2α ($\lambda = 366 \text{ nm}$):	$\geq 26^\circ$
Diâmetro da fibra (μm):	70
Comprimento Onda (mm):	≤ 10000

Fonte: WWW.schott.com.

5.2.3. Possíveis Dispositivos de Utilização Final

Para o aquecimento de água e para a cocção de alimentos, idealizaram-se dispositivos finais que não chegaram a ser construídos, não só pelo alto preço dos componentes e serviços envolvidos, como também pelo fato de a fibra utilizada não ser transparente ao chamado espectro térmico.

No que se refere ao aquecimento de água, externamente à carcaça do aparelho coletor, colocar-se-ia um reservatório de água para armazenamento da energia. Utilizar-se-ia um aparelho padrão, no interior do qual dispor-se-ia um corpo metálico enegrecido para absorver a radiação e transferi-la, por condução, à água. Uma das extremidades da fibra terminaria neste reservatório, sendo necessário fazer a adaptação da mesma à sua estrutura.

As paredes interiores do reservatório seriam enegrecidas para absorção da radiação transportada pela fibra ótica, termicamente isoladas do exterior (estrutura de uma garrafa térmica) e teriam as faces espelhadas para evitar perdas por radiação, bem como seria feito o vácuo ou colocado material isolante entre as camadas interna e externa, minimizando, assim, as perdas por condução.

Um formato esférico de reservatório, figura geométrica que possui a menor relação superfície/volume, diminuiria as perdas para o ambiente (não considerando aqui a dificuldade técnica e econômica de construção de um reservatório esférico).

No que se refere ao fogão solar, também idealizou-se um dispositivo final de utilização. Mostrado na Figura 40. A cápsula interior seria enegrecida para absorção da radiação transportada pela fibra ótica, cuja extremidade terminaria entre esta cápsula e o espelho (parte central da ilustração), que por sua vez funcionaria não só como um homogeneizador de fluxo, como evitaria perdas por radiação. A estrutura de isolamento térmico foi ilustrada em azul. O vácuo entre as camadas do espelho minimizaria as perdas por condução. A extremidade da fibra deve terminar entre o espelho e a cápsula.

Sugere-se, por fim, um interruptor ótico. Este dispositivo foi mencionado por CIAMBERLINI et al (2003), mas seu funcionamento e componentes não foram descritos. A montagem proposta abaixo visa suprir esta lacuna para futuros experimentos (Figura 41). Assim, todos os raios que partem do foco de um espelho elíptico e encontram a superfície deste espelho, refletem-se, passando pelo outro foco. Dispondo-se, portanto, as extremidades das fibras óticas nos pontos focais deste espelho, consegue-se, ao girá-lo no eixo indicado, direcionar a luz para diferentes utilizações finais.

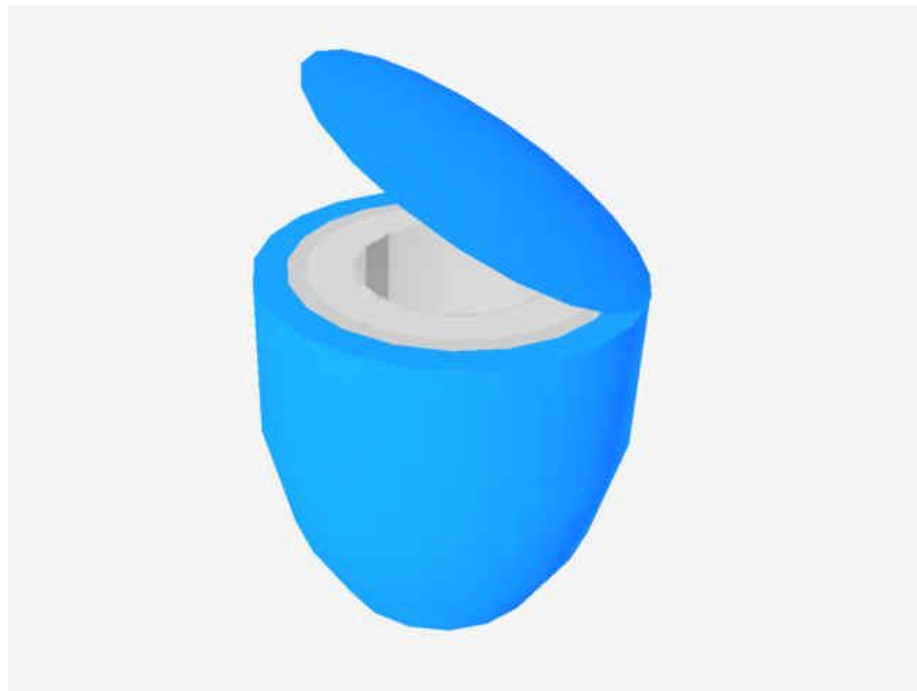


Figura 40 – Forno solar.

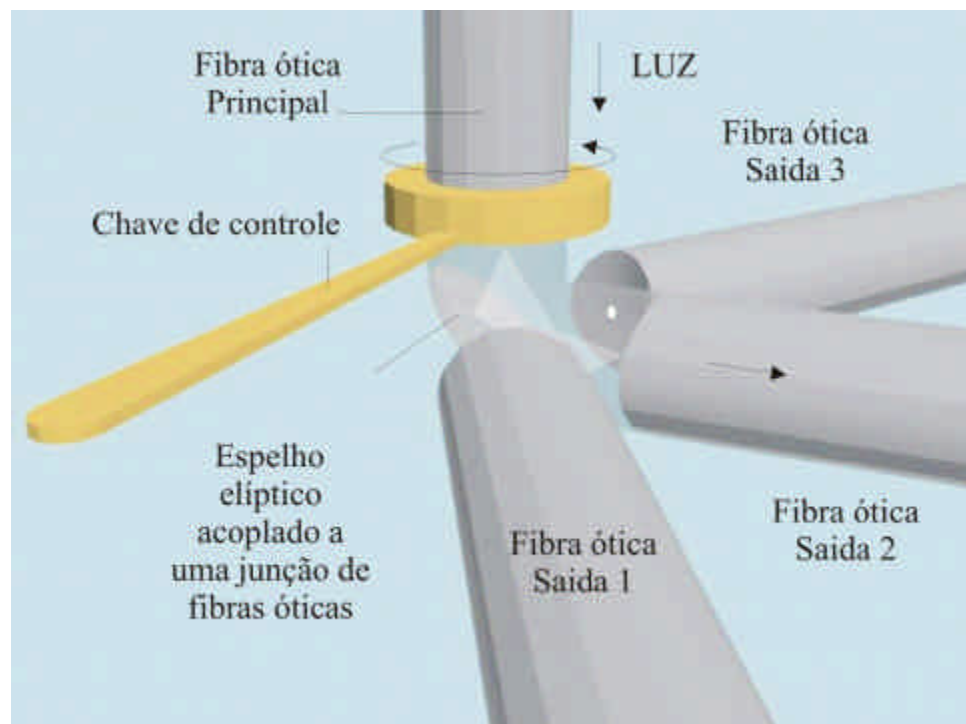


Figura 41 – interruptor ótico (ilustração do autor).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES, S. G. **Aspectos óticos e térmicos necessários ao Projeto de Concentradores Parabólicos Compostos**. Viçosa-MG: UFV, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola/ Universidade Federal de Viçosa, 1984.

BEZERRA, A. M. **Aplicações térmicas da energia solar**. 3. ed., UFPb: Edição Editora Universitária, 1998.

BROOKS, F. A. **An Introduction to physical microclimatology**. Davis: University of California, 1959.

CARIOU J. M. J.; DUGAS, M.; MARTIN, L. Transport of solar energy with optical fibers. **Solar Energy**, v. 29, n. 3, 1987.

CIAMBERLINI, C.; FRANCINI, F.; LONGOBARDIG PATTELLI, M.; SANSONI, P. Solar system for exploration of the whole collected energy. **Optics an lasers in Engineering**, v. 39, p. 233-249, 2003.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar energy – thermal process**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

FEUERMANN, D; GORDON, J. M.; HULEIHIL, M. Light leakage in optical fibers: experimental results, modeling and the consequences for solar concentrators. **Solar Energy**, v. 72, n. 3, p. 195-2004, 2002

JARAMILLO, O. A.; ARRIAGA, R. G.; SEBASTIAN, P. J.; FERNÁNDEZ, A. M.; DEL RÍO, J. A. Application of fiber optics in the hydrogen production by photoelectrolysis. **Inst. J. Hydrogen Energy**, v. 23, n. 11, p. 985-993, 1998.

JESUZ, J. C. S.; OLIVEIRA FILHO, D. **Sistema de rastreamento automático para painéis fotovoltaicos**. In: Anais do 1º Seminário Energia na Agricultura, v. 1, n. 3-79 a 3-87, 2000.

KHATRI, N.; BROWN, M.; GERNER, F. Using fiber optics to tap the sun's power. **Int. Comm. Heat Mass transfer**, v. 20, p. 771-781, 1993.

KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of solar engineering**. Washington, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1978.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. PW Editores, 1997.

LIANG, D.; MONTEIRO, L. F.; TEIXEIRA, M.R.; MONTEIRO, M. L. F.; COLLARES PEREIRA, M. Fiber optic solar energy transmission and concentration. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 54, p. 323-331, 1998.

NIEKERK, W. M. K. V.; TOIT, C. G.; SCHEFFLER, T. B. Performance modeling of a parallel tube polymer absorber. **Solar Energy**, v. 58, p. 39-44, 1996.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Livraria Editora Ltda., 1981.

RICHARD, E. S; BORGMASSE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da termodinâmica**. Trad. de Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

SEYMORE, R. J. **Fiber optics ignition**. U.S. Patent No. 3,258,910, July 5, 1966.

SUNTAG, R. E.; BORGMASSE, C.; WYLEN, G. J. V. **Fundamentos da termodinâmica**. Trad. de Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.

SWET, C. J. **Fiber optical solar collector**. U.S. Patent No. 3,780,722, Dec 25, 1973.

VAN NIEKERK, W M. K.; TOIT, C.G.; SCHEFFLER, T. B. Performance modeling of a parallel tube polymer absorber. **Solar Energy**, v. 58, p. 39-44, 1996.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 1991.

VIEIRA, M. A. **Estudo de sistemas de aquecimento de água por energia solar**. Viçosa: UFV, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola/Universidade Federal de Viçosa, 1984.