

*Alfredinho, incentivador
e amigo, com um abraço
Alfredo
16/05/85*

ALFREDO DE SOUZA MENDES

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA - UFPR

Utilização de Coletor Solar Parabólico na Secagem da Madeira

Dissertação submetida a consideração da Comissão Examinadora como requisito parcial para a obtenção do Título de "Mestre em Ciências M.Sc." no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

*LTH
D
SFC
1985*

CURITIBA

1985

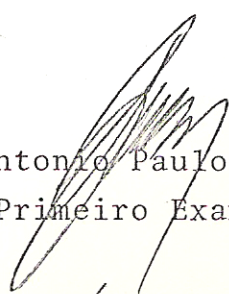


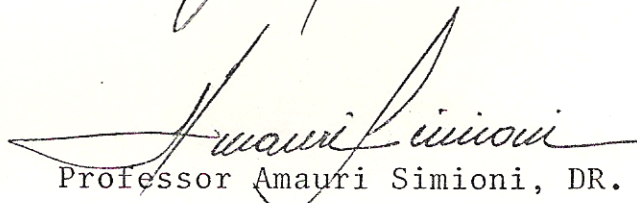
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

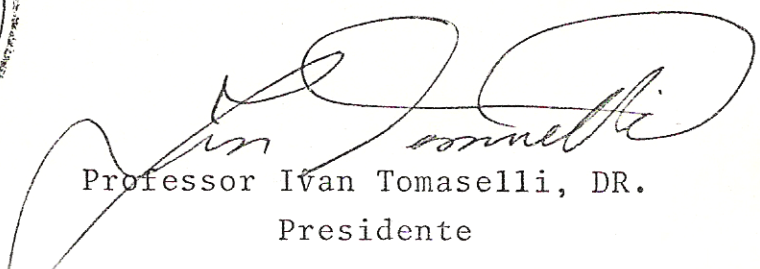
P A R E C E R

Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato ALFREDO DE SOUZA MENDES, sob o título "UTILIZAÇÃO DE COLETOR SOLAR PARABÓLICO NA SECAGEM DA MADEIRA" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais. Observação: O critério de avaliação da Dissertação e defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas APROVADA ou NÃO APROVADA.

Curitiba, 21 de fevereiro de 1985.


Professor Antonio Paulo Mendes Galvão, DR.
Primeiro Examinador


Professor Amauri Simioni, DR.
Segundo Examinador


Professor Ivan Tomaselli, DR.
Presidente



Orientador:

Ivan Tomaselli

Às pessoas que profundamente
me marcaram pelo amor e dedica
ção.

Meus pais Nilor e Ruth
Minha esposa Vanda Lucia
Minhas Filhas Thais e Lorena

AGRADECIMENTOS

Prof. Ivan Tomaselli, não apenas pela orientação, mas a vivência dinâmica, incentivo e amizade sempre presente.

Prof. Sidon e Prof. Moreschi, naturalmente, pelo apoio e disponibilidade.

Ao Prof. William, responsável direto na elaboração que diz respeito ao programa de computação.

Ao Laboratório de Produtos Florestais, através do Departamento de Economia do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal que possibilitou a realização deste trabalho, além do total apoio financeiro.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, através do Centro de Pesquisas de Produtos Florestais, que apoiou financeiramente e incentivou na pessoa de Manoel Sobral Filho, o término deste trabalho.

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pela concessão da Bolsa de Estudo.

EMBRAPA, na pessoa do Dr. Paulo Galvão pelo incentivo e apoio financeiro inicial.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de Concentração de Tecnologia de Produtos Florestais que possibilitou o embasamento técnico e científico.

Adelar, como valeu o seu apoio, paciência e ami-

zade para a conclusão final deste trabalho.

Leonidas, Ademir, Herrera, Aristides, Vitor, Joaquim, porque vivemos, respiramos e comungamos a construção do coletor por mais de 2 anos, com alegrias, com problemas, com linguagem do dia a dia. Décio e Ricardo, o apoio técnico e coleta dos dados de vocês foi incomensurável.

Binder e Reis, vocês foram muito eficientes ao desenharem e cobrirem os meus gráficos e desenhos.

Lêa e a equipe da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, é muito bom pedir um trabalho e recebê-lo dias depois, a eficiência foi óbvia.

À equipe de Energia Solar do Ministério das Minas e Energia, pela doação de publicações, além disso pelo apoio, entre outros aspectos.

Marcelo, pela ajuda na correção de partes deste trabalho.

Naturalmente, muitos professores contribuíram para este resultado, para minha formação científica: Prof. Nadir, Prof. Silvio, Prof. Henrique, Profa. Aracely, Prof. Ronaldo, entre outros.

Manoel Sobral Filho, Harry van der Slooten, pelo tempo que dispuseram para ler, escutar, sugerir ou discutir partes do trabalho.

Gilberto, que tão prontamente entendeu e ajudou na interpretação e obtenção dos dados meteorológicos.

BIOGRAFIA

Alfredo de Souza Mendes nasceu no Rio de Janeiro em 27 de abril de 1950.

Em 1975 graduou-se em Bacharel em Química pela Universidade de Brasília.

Ingressou no Laboratório de Produtos Florestais - Brasília (LPF) em maio de 1976, atuando na área de Secagem e Preservação da Madeira.

No ano de 1979 foi cedido a FAO (Food Agricultural Organization) por 3 meses, posteriormente retornando a suas atividades de Pesquisa no LPF.

Em 1981 iniciou seu Mestrado em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, concentrando-se na área de Tecnologia da Madeira e concluindo os requisitos para o grau de M.Sc em dezembro de 1982.

Em 1983 foi contratado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq como Pesquisador Assistente do Centro de Pesquisas de Produtos Florestais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

Aos amigos, João Carlos, Rejane, Nazarê, Aurea, Barbosa e Maria Lúcia, que direta e indiretamente colaboraram.

Vanda Lucia, houve uma impressão datilográfica carinhosa nestas páginas.

Obrigado.

SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS.....	xii
	LISTA DE QUADROS.....	xiv
	LISTA DE TABELAS.....	xv
	RESUMO.....	xvi
1.	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2.	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	4
2.1	A IMPORTÂNCIA DE UMA SECAGEM APROPRIADA.....	4
2.2	ASPECTOS FÍSICOS DA SECAGEM.....	4
2.2.1	A água na madeira.....	4
2.2.2	Fatores que influenciam a secagem da madeira.	6
2.2.2.1	Fatores inerentes à madeira.....	6
2.2.2.2	Fatores inerentes ao ambiente.....	7
2.3	MÉTODOS DE SECAGEM DA MADEIRA.....	10
2.4	SECAGEM SOLAR.....	10
2.4.1	Considerações gerais.....	10
2.4.2	Tipos de secadores solares.....	11
2.4.2.1	Secadores tipo estufa.....	11
2.4.2.2	Secadores com coletor solar externo.....	14
2.4.2.2.1	Secadores com coletor externo para aquecimen- to de ar.....	15
2.4.2.2.2	Secadores com coletor externo para aquecimen- to de água.....	16
3.	<u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	20

3.1	ASPECTOS GERAIS.....	20
3.2	CONSTRUÇÃO DO COLETOR.....	20
3.2.1	Estrutura do coletor.....	20
3.2.2	Construção da superfície parabólica.....	21
3.2.3	Instalação do tubo absorvedor.....	24
3.3	SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR.....	26
3.4	CONSTRUÇÃO DO SECADOR.....	29
3.4.1	Estrutura do secador.....	30
3.4.2	Sistema de ventilação.....	30
3.4.3	Sistema de aquecimento.....	31
3.4.4	Sistema de renovação do ar.....	34
3.4.5	Sistema de medição da temperatura e umidade relativa do ar.....	34
3.5	ACOPLAMENTO DO COLETOR SOLAR AO SECADOR.....	35
3.6	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA EM TERMOS DE TRANSFORMAÇÃO DA RADIAÇÃO RECEBI DA EM ENERGIA TÉRMICA DESTINADA À SECAGEM... DA EM ENERGIA TÉRMICA DESTINADA À SECAGEM...	36
4.	<u>RESULTADOS</u>	42
4.1	OPERACIONALIDADE DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	42
4.1.1	Coletor solar.....	42
4.1.2	Dispositivo de rastreamento solar.....	44
4.1.3	Acoplamento do coletor.....	46
4.1.4	Eficiência do sistema.....	47
4.2	COMPORTAMENTO DO SECADOR.....	52
5.	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	59
	SUMMARY.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	ANEXOS 1 - CIRCUITO GERAL DA UNIDADE DE RAS TREAMENTO.....	74

2 - PROGRAMA DE COMPUTAÇÃO UTILIZADO PARA A OBTENÇÃO DO PERFIL PARABÓ- LICO.....	75
3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ESPU- MA DE POLIURETANO.....	76
4 - POTÊNCIA TÉRMICA MÉDIA RETIRADA DO COLETOR.....	77
5 - ESTIMATIVA TEÓRICA DA POTÊNCIA SO- LAR INCIDENTE POR UNIDADE DE ÁREA DO COLETOR.....	

LISTA DE FIGURAS

1	PRINCÍPIO FÍSICO DO FUNCIONAMENTO DO COLETOR PARABÓLICO.....	18
2	VISTA LATERAL DO COLETOR PARABÓLICO.....	22
3	CORTE LONGITUDINAL DO COLETOR SOLAR.....	23
4	VISTA SUPERIOR DO COLETOR PARABÓLICO.....	25
5	MIRA SOLAR.....	28
6a	VISTA SUPERIOR DO SECADOR.....	32
6b	CORTE AB.....	33
7a	VISTA SUPERIOR DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR...	37
7b	VISTA EM CORTE DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR...	38
8	LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES.....	40
9	FOTOGRAFIA DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR SOLAR PARABÓLICO.....	43
10	GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA REINSTALADO MOSTRANDO AS VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR NUM DIA DE CÉU PERIODICAMENTE INCOBERTO; EVIDENCIANDO A PERDA DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO COLETOR NOS PERÍODOS DE SOL INCOBERTO.....	45
11	GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA INSTALADO MOSTRANDO AS VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DA INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NUM DIA DE CÉU DESCOBERTO.....	48

12	GRÁFICO DO SISTEMA INSTALADO MOSTRANDO AS VARI- RIAÇÕES DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EVIDENCIANDO A CONSTÂNCIA DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	49
13	DIAGRAMA ILUSTRANDO O BALANÇO ENERGÉTICO EX- PRESSO EM PORCENTAGEM PARA O SISTEMA CONSTRUI- DO.....	53
14	CURVA REDUZIDA DO PERFIL PARABÓLICO PLOTADA POR COMPUTADOR.....	75

LISTA DE QUADROS

1a	BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA CONSTRUÍDO.....	50
1b	RESUMO DOS RESULTADOS.....	50
2	INTERVALO DE TEMPO PARA O AQUECIMENTO DO SECA- DOR ATÉ A TEMPERATURA MÁXIMA, APÓS LIGADO O AQUECIMENTO.....	56
3	VALORES PARA: TEMPERATURA DO BULBO SECO E ÚMI- DO, DEPRESSÃO PSICOMÉTRICA, UMIDADE RELATIVA DO AR E DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA PARA AS CONDIÇÕES MÁXIMAS DE SECAGEM OFERECIDAS PELO SISTEMA INS- TALADO.....	57
4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ESPUMA DE POLIURETA- NO.....	76
5	RESUMO DA POTÊNCIA TÉRMICA OBTIDA DO COLETOR...	83

LISTA DE TABELAS

1	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (K) DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....	78
2	VALORES DE Q_0 PARA O DIA 24/02/1984.....	85

RESUMO

O presente trabalho objetivou conceber, projetar e construir um coletor solar parabólico como fonte geradora de energia térmica para a secagem convencional da madeira, acoplado a uma câmara de secagem, e avaliar sua eficiência.

Neste sentido, foram planejados e construídos protótipos de um coletor solar parabólico de foco linear, com uma superfície de captação solar em aço inoxidável polido de 2m^2 , provido de um sistema de rastreamento solar fotoelétrico e um secador convencional com controle semi-automático para temperatura, e com uma capacidade de $0,3\text{ m}^3$ de madeira. Todo material empregado foi adquirido no comércio local e todas as etapas envolvidas na construção do sistema foram explicadas detalhadamente.

Os testes realizados com o equipamento evidenciaram, tecnicamente, poucas perspectivas à utilização do sistema nas regiões menos favorecidas com radiação solar direta, como por exemplo em Curitiba. No entanto melhores resultados devem ser obtidos em outros locais de maior insolação.

As condições máximas de temperatura e depressão psicométrica foram atingidas nos dias de céu descoberto e corresponderam a $58,5^\circ\text{C}$ e $17,5^\circ\text{C}$, respectivamente, as quais

conferiu um teor de umidade de equilíbrio de 6%.

A eficiência térmica, de 16,3% determinada para o coletor ficou abaixo da eficiência característica do modelo. No entanto, foram evidenciados os itens que deverão ser aprimorados, para maximizar a eficiência do sistema.

1. INTRODUÇÃO

Com a deflagração da crise energética em 1973, gerada pelo aumento do preço do barril de petróleo em cerca de 1250%¹, o mundo industrializado ocidental se viu ameaçado devido à forte dependência existente para com o petróleo e seus derivados.

Como consequência lógica, investidas na procura de novas fontes energéticas, assim como no aprimoramento tecnológico da industrialização destas fontes, passaram a ter caráter prioritário para as instituições de pesquisa. Entre elas, a utilização da energia solar, até então considerada anti-econômica para certas utilizações, passou a ser reativada.

O Brasil, como todo país tropical, é extremamente favorecido do ponto de vista de radiação solar incidente em seu território, apresentando valores superiores a 2500 h/ano de insolação e uma potência média radiante de 1000W/m²⁹.

No campo da industrialização da madeira, a secagem consome cerca de 40 a 70% do montante energético de seu processamento primário. Este consumo excessivo requerido pela secagem da madeira, associado ao alto custo dos secadores tradicionais, serviu como estímulo ao desenvolvimento de secadores solares.

A maioria dos secadores solares destinados à secagem da madeira baseiam-se no princípio do efeito estufa. Normalmente são compartimentos que podem ser modulados com paredes de uma ou mais camadas de material transparente. Entretanto

to, estes secadores não se encontram suficientemente desenvolvidos de maneira a permitir um controle total sobre as condições de secagem. Modelos mais evoluídos de secadores solares apresentam os coletores situados fora da câmara para o aquecimento de ar ou água. Estes secadores permitem um melhor controle sobre as condições de secagem, embora com custos mais elevados.

Somente no final da década de 70 surgiram as primeiras pesquisas envolvendo o uso da energia solar como fonte térmica para a secagem convencional¹¹. Embora os custos para um secador acionado totalmente a energia solar sejam elevados, as inovações realizadas nos sistemas de captação da energia solar, com a utilização de concentradores solares e o uso de água para a transferência de calor para o interior da câmara, poderão proporcionar secagens mais viáveis no futuro.

No campo da utilização da energia solar, prevê-se num prazo de vinte anos, instalações ambiciosas. Logo, há necessidade de desenvolver-se coletores solares ou sistemas acionados a base de energia solar, a fim de que testes de campo levem a modelos otimizados, visando não só a implantação de tais sistemas como também o desenvolvimento de tecnologia própria.

O presente trabalho tem como objetivo:

1. Conceber, projetar e construir um coletor parabólico de foco linear, com material de fácil aquisição no mercado e com potência aproximada de 1000W/h.

2. Conceber, projetar e desenvolver um sistema de rastreamento solar simples a ser acoplado ao coletor.

3. Conceber, projetar e desenvolver o protótipo de um secador convencional com capacidade para $0,3 \text{ m}^3$ de madeira, a ser acoplado ao coletor.

4. Conceber, projetar e desenvolver um sistema semi-automático para controle d temperatura do secador.

5. Determinar a eficiência do sistema em termos de energia destinada à secagem da madeira em relação à intensidade de radiação recebida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A IMPORTÂNCIA DE UMA SECAGEM APROPRIADA

A remoção da água da madeira, quando conduzida de forma apropriada, oferece muitas vantagens na sua utilização, no seu processo e industrialização.

À medida que a madeira perde umidade, suas propriedades físicas e mecânicas sofrem alterações^{4,2}. Observa-se na madeira seca, um aumento nos valores de suas propriedades de resistência mecânica, isolamento térmico, elétrico e acústico, melhor tratabilidade, melhor trababilidade no acabamento de suas superfícies, aplicação de tintas e vernizes, favorece a colagem e a fixação de pregos e parafusos. A madeira seca apresenta-se com maior estabilidade dimensional, maior resistência contra o apodrecimento causado por fungos e proteção contra alguns insetos xilófagos^{4,6,26}.

2.2. ASPECTOS FÍSICOS DA SECAGEM

2.2.1. A ÁGUA NA MADEIRA

A água ocorre na madeira de duas formas distintas^{26,58,42} que são classificadas em:

a) Água livre ou de capilaridade: ocorre nos lúmens das células e nos espaços intercelulares, retida no interior da madeira pela ação de forças capilares^{58,62}.

b) Água de impregnação: ocorre nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças elétricas po

lares, sendo que entre 0% (valor teórico) e 6% de umidade, encontra-se adsorvida nas cadeias de celulose e hemicelulose, por forças de valência primária monocelular (van der Wall e pontes de hidrogênio) ^{20, 62} e, entre 6% até o ponto de saturação das fibras, impregnando os espaços submicroscópicos, adsorvida em camadas polimoleculares, ligadas por forças elétricas polares ⁶².

O teor de umidade que a madeira apresenta quando as paredes celulares estão saturadas de água, porém com seus lúmens e espaços intercelulares vazios, é denominado de ponto de saturação das fibras (PSF) ⁵⁸.

O PSF é de grande importância prática na secagem, pois, a teores de umidade abaixo deste ponto, manifestam-se variações dimensionais da madeira, bem como os defeitos decorrentes da inevitável contração, tais como, rachaduras, encanoamentos, torceduras ⁴⁶.

A madeira, por ser um material higroscópico, tende a entrar em equilíbrio com as condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar às quais está exposta. Quando estas condições climáticas permanecem constantes, o teor de umidade atingido pela madeira é denominado teor de umidade de equilíbrio. No sentido de alcançar este equilíbrio, a madeira pode ganhar (sorção) ou perder (dessorção) umidade ²⁶.

No processo de secagem (dessorção) a primeira água a ser removida da madeira é a água livre ou de capilaridade. O movimento de transferência de água livre do interior da madeira até a superfície segue as leis de capilaridade de Poiseuille ^{41, 55}. Este movimento ocorre acima do PSF e é fa-

vorecido pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontuações⁵².

O movimento da água abaixo do ponto de saturação das fibras tem sido explicado por diferentes pesquisadores como sendo um processo de difusão^{26, 52, 62}. Entretanto, não se trata de um fenômeno simples, uma vez que a difusão da água a nível de parede celular ocorre através de um gradiente de umidade e simultaneamente com a difusão da água a nível de cavidade celular a qual ocorre através de um gradiente de vapor.

2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A SECAGEM DA MADEIRA

A secagem da madeira tem início com a evaporação da umidade superficial, seguida pela transferência da umidade interna para a superfície da madeira⁶⁶. Este comportamento pode ser acelerado ou retardado por fatores inerentes à madeira ou ao ambiente em que ela se encontra.

2.2.2.1. FATORES INERENTES À MADEIRA

1) Estrutura Anatômica - A madeira, em sua natureza perpendicular apresenta uma desigualdade na perda de água das três diferentes direções anatômicas.

Acima de 45% de umidade, os movimentos capilares perpendicular e paralelo à grã são pouco diferenciados entre si²⁰. Abaixo do ponto de saturação das fibras, a velocidade de difusão é diversificada ao longo das principais direções da madeira²⁰. A difusão longitudinal é significativamente maior que a tangencial ou radial e varia com a umidade, enquanto o movi

mento de umidade na direção radial é cerca de 20% a 50% maior que na direção tangencial⁴⁶.

- 2) Peso Específico - O tempo de secagem normalmente é diretamente proporcional ao peso específico^{46, 62}, sendo que o tempo de evaporação da umidade superficial é diretamente proporcional ao peso específico e, no caso da difusão da umidade do interior até a superfície, é proporcional a raiz quadrada do mesmo¹⁹.
- 3) Teor de Umidade - O tempo de secagem aumenta à medida que aumenta a diferença entre o teor de umidade inicial e final da madeira^{19, 62}.
- 4) Espessura da Madeira - A secagem da madeira é um processo direcionado de fora para dentro conseqüentemente, o tempo necessário para secar um material espesso será maior que para um mesmo material mais fino. Para uma mesma espécie, com duas diferentes espessuras, sob as mesmas condições de secagem, o tempo de secagem é correlacionado aproximadamente de acordo com a fórmula abaixo⁴⁶:

$$t_2 = t_1 \frac{c_2^{1,25}}{c_1}$$

Onde: t_1 = tempo em horas para a secagem da peça com espessura c_1 (m.m)

t_2 = tempo em horas para a secagem da peça com espessura c_2 (m.m)

2.2.2.2. FATORES INERENTES AO AMBIENTE

- 1) Temperatura - Normalmente, quanto maior a temperatura menor

o tempo de secagem

O movimento capilar é favorecido pelo aumento da temperatura. A altura que um líquido atinge no capilar é dada pela equação abaixo²⁶.

$$H = \frac{2\beta}{r \left(d + \frac{8\eta V}{r^4 \pi} \right)}$$

Onde: H = altura da coluna de água (cm)

η = coeficiente de viscosidade (g/cm²)

V = volume de escape (cm³/s)

r = raio do capilar (cm)

d = densidade do líquido (g/cm³)

β = tensão superficial da água (g/cm)

Com o aumento da temperatura, o coeficiente de viscosidade diminui mais que a tensão superficial da água, aumentando o valor de H na equação acima, o que favorece a condução da umidade²⁶.

Como foi visto no item 2.2.1 entre 6% até o P.S.F., as moléculas de água encontram-se ligadas por forças elétricas polares. A primeira camada de água encontra-se presa a grupos hidroxílicos por ligações mais fortes que nas camadas seguintes das moléculas de celulose da madeira.

Por esta razão, maior quantidade de energia é necessária para remover uma mesma quantidade de água de madeira que se encontra com baixo teor de umidade do que com alto teor de umidade²³.

Com o aumento da temperatura, a difusão da umidade na madeira também é facilitada, uma vez que ocorre o aumento da energia cinética das moléculas de água.

Aumentando-se a temperatura dentro do secador, a umidade relativa do ar diminui, conferindo ao ar aquecido maior capacidade de absorção de umidade.

- 2.) Circulação do Ar - A circulação do ar aquecido através da pilha de madeira tem por finalidade transferir energia à superfície da madeira. Parte desta energia penetra sob forma de calor sensível, aquecendo-a, e a parte restante (calor latente) é utilizada na transformação da água em vapor o qual migra para a superfície e é absorvido pelo ar circulante²³.

Com o aumento da velocidade de circulação do ar, o processo descrito acima é acelerado e, conseqüentemente, o tempo de secagem é reduzido. Porém, velocidades muito elevadas no início da secagem provocam uma rápida secagem na superfície, interferindo prejudicialmente na remoção da umidade da madeira, além de onerarem o processo. Geralmente, na secagem convencional, a velocidade de circulação do ar mais econômica é em torno de 2 m/s^{20} .

A uniformidade de circulação do ar ao longo da pilha confere à madeira uma secagem homogênea.

- 3.) Umidade Relativa do Ar - A umidade relativa do ar é a razão entre a quantidade de vapor d'água contida em certo volume de ar e a quantidade máxima de vapor d'água que este mesmo volume, à mesma temperatura, poderia absorver²⁰.

A secagem da madeira decorre da contínua evaporação da umidade de sua superfície. O ar circulante é responsável por este processo, uma vez que atua continuamente, absorvendo e

arrastando a umidade da superfície da madeira. O maior ou menor poder de absorção da umidade pelo ar depende de sua umidade relativa. Assim, ambiente com baixa umidade relativa terá maior poder de absorção de umidade que outro com alta umidade relativa.

2.3. MÉTODOS DE SECAGEM DA MADEIRA

Atualmente, os métodos conhecidos para a secagem da madeira são: secagem ao ar livre, secagem a baixa temperatura, compreendendo os pré-secadores e desumificadores, secagem convencional, secagem a alta temperatura, secagem a vácuo, secagem a alta frequência, secagem por prensagem e secagem química. Normalmente, o emprego dos métodos artificiais faz-se em combinação com secagem ao ar. Entretanto, os métodos tradicionalmente mais utilizados têm sido a secagem ao ar livre e a secagem convencional em estufa^{1,7,41}, os quais são regidos pelos mesmos princípios físicos observados no item 2.2.⁸.

A secagem solar da madeira tem sido apontada como sendo intermediária entre a secagem ao ar, onde o controle dos fatores de secagem são totalmente dependentes das condições climáticas e a secagem convencional, que permite uma manipulação relativamente sofisticada da temperatura, umidade relativa do ar e circulação do ar⁸.

2.4. SECAGEM SOLAR

2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização da energia solar direta aplicada à

secagem da madeira foi sugerida pela primeira vez em 1955¹⁴. Porém, as pesquisas iniciaram-se efetivamente no final da década de 50 nos Estados Unidos³ e na Índia^{48, 53}.

Nestes 25 anos, cerca de 40 modelos de secadores construídos encontram-se distribuídos em vários países^{12, 72}; Alemanha, África do Sul, Austrália, Brasil, Estados Unidos, Filipinas, França, Ghana, Guiana Francesa, Índia, Indonésia, Japão, Madagascar, Paquistão, Porto Rico, Formosa, Tanzânia e Uganda. Entretanto, observa-se que, nos últimos 5 a 10 anos, as pesquisas e testes relacionados com a secagem da madeira através da energia solar foram intensificadas⁵⁶. Este fato é atribuído ao constante aumento dos preços dos combustíveis fósseis associado ao alto consumo energético requerido pela secagem da madeira.

2.4.2. TIPOS DE SECADORES SOLARES

Os secadores solares podem ser divididos em dois grupos principais, de acordo com a forma de captação da energia solar, e subdivididos em função das alterações quanto à circulação do ar, umidificação e sistema de controle¹⁷.

2.4.2.1. SECADORES TIPO ESTUFA

Os secadores deste grupo, conhecidos como "Green-house", têm sido exaustivamente pesquisados e apresentam o maior número de modelos^{4, 16, 21, 22, 32, 33, 34, 35, 39, 41, 43, 45, 52, 54, 60, 61, 63, 66, 68, 70, 73}.

Baseiam-se nas propriedades da transmissão seletiva

dos materiais transparentes, que permitem a passagem de ondas curtas (componente maior da radiação solar) através de sua superfície e obstruem as ondas longas de baixa temperatura refletidas pelos coletores usuais ou pelo material a ser seco contido em seu interior¹⁸.

Estes secadores são normalmente compartimentos modulados ou não, parcialmente revestidos com paredes simples ou duplas de material transparente (vidro, vidro reforçado com poliéster, filme de poliéster, fluoreto de polivinil, polietileno ou cloreto de polivinil). Interiormente podem conter uma placa absorvedora enegrecida entre o teto e a pilha de madeira, ou um material absorvedor de calor contornando lateralmente parte da pilha.

Podem apresentar circulação artificial com tiragem natural, circulação artificial, circulação e umidificação artificiais com tiragem controlada.

A capacidade destes secadores varia aproximadamente de 1 m^3 ^{5, 14, 22, 52} a 22 m^3 ^{11, 27}. Porém, a maioria dos secadores do tipo "Green-house" apresentam uma capacidade média entre 2 a 5 m^3 ^{6, 33, 45, 53, 60, 66, 70}.

Tem sido reportado que estes secadores sofrem limitações no tamanho, uma vez que a superfície disponível para captação da energia solar não aumenta na mesma proporção da capacidade volumétrica interna, com o aumento do tamanho do secador¹⁷. O aumento da capacidade do secador deve ser feito preferencialmente aumentando-se o comprimento ao invés de modificar a largura ou a altura⁸.

O comportamento do decurso da secagem e da quali-

dade final da madeira seca nos secadores solares é dependente de variáveis, tais como, latitude e clima da região, espécie de madeira, tipo do secador e qualidade do material e da energia, de forma que uma definição específica dos caracteres da secagem através dos secadores "Green-house" deve basear-se nas considerações individuais de cada modelo de secador⁵. Entretanto, alguns parâmetros são característicos e coincidentes nos vários modelos dos secadores estudados.

O tempo de secagem propiciado pela estufa solar tem sido cerca de 2 a 3 vezes menor quando comparado com o tempo de secagem ao ar livre^{8, 132, 133, 154, 166, 173}. Porém, a uma latitude de 48°N, no verão, registrou-se um tempo de secagem em estufa solar 9 vezes menor que o tempo de secagem ao ar livre. O autor atribuiu este fato ao maior número de horas de insolação durante o verão em latitudes altas que em latitudes tropicais⁶.

Com relação à qualidade da madeira em termos de teor de umidade final e defeitos como rachaduras de topo, rachaduras superficiais, encanoamento e torcedura, a literatura é unânime em afirmar que a madeira conduzida na secagem solar, apresenta menores teores de umidade final e menores índices de defeitos, quando comparada com a madeira seca ao ar livre¹¹.

Os secadores convencionais consomem de 2 a 2,5 vezes mais a energia necessária para evaporar a água da madeira, enquanto os secadores solares do tipo "Green-house" consomem cerca de 6 vezes mais⁵⁹.

Estudos conduzidos num secador "Green-house" indi

caram que somente cerca de 16% da energia solar incidente no secador é utilizada na evaporação da água da madeira. O restante desta energia é atribuído a perdas por convecção (29%), perdas por reflexão e transmissão solar (17%), perdas na renovação do ar (14%), perdas através do piso (11%) e perdas pela radiação de ondas longas (13%)⁶⁹.

A maior limitação dos secadores que se baseiam no princípio estufa é atribuída à sua deficiência no isolamento e na armazenagem da energia térmica. Como resultado, as flutuações no ganho da energia solar durante o dia provocam flutuações da temperatura no interior do secador e na madeira, as quais, associadas à elevada umidade relativa do ar, causam problemas no controle da qualidade da madeira¹⁷.

Somente em latitudes muito favoráveis, onde o clima oferece uma regular radiação solar e com baixas umidades relativas, é que estes secadores aparecem como alternativa para a secagem convencional¹⁷.

O uso otimizado da secagem solar aparece como sendo uma combinação entre uma secagem total no secador solar para algumas espécies, ou uma secagem parcial no secador solar (pré-secagem), seguida por uma secagem convencional²⁴.

2.4.2.2. SECADORES COM COLETOR SOLAR EXTERNO

A característica principal destes secadores é que o sistema de captação solar é separado da câmara de secagem, permitindo maior flexibilidade no tamanho, desenho e no uso de materiais para sua fabricação.

O sistema de captação da energia solar pode ser es

pecífico para o aquecimento de ar ou para o aquecimento de água. No último caso, o ar é aquecido indiretamente através de trocadores de calor situados no interior do secador.

Estes secadores, quando comparados com os do grupo anterior, apresentam maior grau de isolamento térmico, melhor controle do processo de secagem, são mais efetivos sob condições favoráveis de secagem e possibilitam maiores taxas de secagem. Por outro lado, são de construção mais complexa e apresentam custos mais elevados^{17, 32}.

2.4.2.2.1. SECADORES COM COLETOR EXTERNO PARA AQUECIMENTO DE AR

Até o momento, poucos são os modelos desenvolvidos de secadores com coletores externos para o aquecimento do ar^{7, 32, 47, 56, 57}.

O sistema de captação solar, por ser independente do secador, possibilita a armazenagem da energia térmica. Com isto, as flutuações da temperatura durante o dia e as perdas de energia durante os períodos sem insolação podem ser reduzidas.

Um experimento neste sentido foi desenvolvido em New South Wales, no qual utilizaram-se blocos de pedra embaixo do secador. As pedras absorvem a energia do ar insuflado pelo coletor e a liberam nos períodos em que a temperatura do coletor passa a ser inferior à temperatura da estufa⁴⁷.

Em um modelo mais recente, as pedras foram substituídas por cilindros ocos de alumínio, enegrecidos, instalados no interior do próprio coletor solar⁷.

O alto grau de isolamento térmico apresentado por

estes secadores faz com que a carga de madeira atue como fonte armazenadora de energia. Experimentos registram que a energia armazenada numa carga de 2,4 m³ de carvalho foi de 3.100 KJ/°C, do início até o fim da secagem⁵⁶.

O controle da temperatura nestes secadores de baixo custo não é facilmente conseguido, porém o controle da umidade relativa permite uma redução gradual, minimizando os defeitos e reduzindo o tempo de secagem⁵⁶.

Os modelos testados têm mostrado que a secagem tem sido mais rápida, atingindo menores teores de umidade e com menos defeitos que na secagem ao ar livre^{7,56}.

2 4.2.2.2. SECADORES COM COLETOR EXTERNO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Embora os custos para um secador acionado totalmente a energia solar sejam proibitivos, outras modalidades de captação dessa energia podem ser economicamente razoáveis à secagem de madeira, atuando como fonte auxiliar nos secadores convencionais⁷¹.

Alguns secadores do tipo estufa apresentam coletores adicionais para aquecimento da água, porém o sistema limita-se a aquecer a água destinada ao controle da umidificação^{8,27}.

Até o início de 1977, nenhuma informação encontrava-se disponível sobre qualquer pesquisa que empregasse a energia solar como fonte térmica para a secagem convencional¹¹. O primeiro secador baseado no aquecimento de água, via coletor externo, data de 1977³⁷.

As pesquisas nesta área são recentes e os poucos dados obtidos são provenientes de um secador com capacidade para $13,25 \text{ m}^3$, alimentado por um coletor solar plano com 227 m^2 de área, que aquece 18.120 litros de água contida num reservatório termicamente isolado. Este secador industrial supre 44% do consumo energético exigido para a secagem de madeira, sendo que a energia restante é fornecida através da queima direta de gás natural³¹.

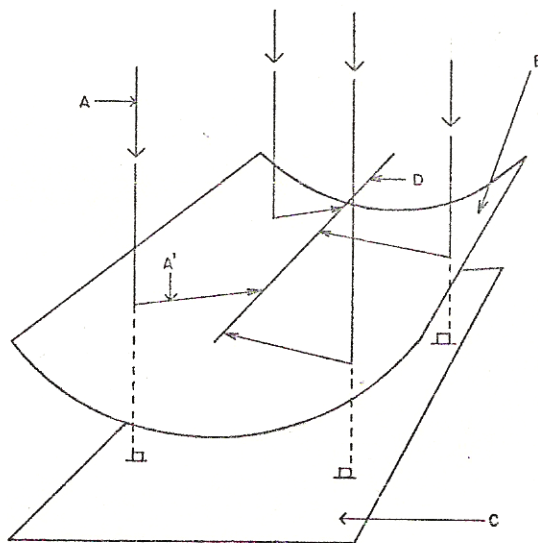
Nestes secadores, a temperatura, umidificação, ventilação e renovação do ar são de acordo com os controles padrões de um secador convencional, sendo que o suprimento energético, solar ou gás natural, é automaticamente acionado, dependendo da demanda de energia pelo secador e da temperatura da água do tanque de armazenamento.

Quanto ao sistema de aquecimento da água, estes são relativamente mais complexos e despendiosos do que os sistemas de aquecimento de ar, porém, permitem um armazenamento de calor mais simples³¹.

Os sistemas de queima de resíduos para suprir a energia necessária na secagem da madeira são onerosos quando associados ao alto custo dos filtros para evitar poluição. As inovações nos sistemas de captação da energia solar podem tornar tal utilização mais prática, incluindo coletores concentradores e a utilização da água para a transferência de calor³⁰.

O coletor solar parabólico de foco linear é um tipo de coletor para aquecimento de água e baseia-se no princípio de que todo raio luminoso incidente numa superfície parabólica refletora, perpendicularmente ao seu plano diretriz é refletido passando pela linha focal, conforme Figura 1.

FIGURA 1 = PRINCÍPIO FÍSICO DO FUNCIONAMENTO DO COLETOR SOLAR PARABÓLICO; A) RAIOS LUMINOSOS INCIDENTES. A') RAIOS LUMINOSOS REFLETIDOS. B) SUPERFÍCIE PARABÓLICA REFLETORA. C) PLANO DIRETRIZ. D) LINHA FOCAL.



que menos absorve calor e, conseqüentemente, diminui as variações da temperatura responsáveis pelas deformações dimensionais que ocorrem na estrutura.

O quadro foi acoplado à base de sustentação através de dois pontos rotativos, um em cada extremidade da base, conferindo a superfície refletora o movimento de rotação necessário para a operação de rastreamento do sol. Objetivando diminuir o esforço do motor fixado em uma das extremidades da base, para movimentar o sistema, o eixo imaginário que une os dois pontos rotativos foi coincidente com o centro de gravidade do quadro contendo a superfície parabólica refletora (Figura 2 e 3).

A base de sustentação da superfície parabólica foi construída de maneira a lhe permitir uma regulagem na inclinação, possibilitando o ajuste perpendicular da incidência dos raios luminosos ao plano diretriz imaginário da superfície parabólica (Figura 2 e 3).

3.2.2 CONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE PARABÓLICA

Por razões práticas e melhor adaptabilidade utilizou-se para a superfície parabólica do coletor concentrador solar uma chapa padrão de aço inoxidável polida medindo 2x1, com espessura de 0,4 mm.

Para a obtenção desta superfície, inicialmente plotou-se em papel vegetal, através de computador, a parábola de equação $y = -\frac{x^2}{40}$ (veja programa utilizado e a curva correspondente no Anexo 2). Com um pantógrafo, a curva parabólica foi ampliada e transposta para um molde em folha de alumínio, de

Entretanto, por mais rigorosa que seja a construção da superfície parabólica, dificilmente serão eliminados todos os desvios óticos. Isto gera, na prática, uma região focal fortemente iluminada que muito se aproxima da forma cilíndrica, ao invés de uma linha focal teórica.

Ao longo desta região focal, é colocado um tubo enegrecido pelo qual circula o fluido a ser aquecido. Para minimizar as perdas térmicas por convecção, o tubo refletor é envolto numa camisa de vidro contendo alto vácuo.

A eficiência na captação dos raios solares apresentada por estes concentradores depende sobremaneira do tipo de construção e da qualidade dos materiais empregados. Quanto maior for a reflexibilidade da superfície parabólica, a absortividade do tubo absorvedor e a transmissividade da camisa de vidro, maior será a eficiência do sistema.

No entanto, parte da energia é perdida por erros de fabricação do perfil parabólico da superfície refletora, pelo sistema de rastreamento solar e pela camisa de vidro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ASPECTOS GERAIS

Como mencionado no capítulo 1, entre os objetivos desta pesquisa inclui-se a concepção, o projeto e a implementação da construção do coletor solar parabólico, de um sistema de rastreamento e de uma câmara de secagem compatível com o secador e com o sistema desenvolvido. Neste capítulo inclui-se detalhes das diversas fases do desenvolvimento, bem como da metodologia utilizada para avaliação do equipamento construído.

3.2. CONSTRUÇÃO DO COLETOR

A construção do coletor levou em consideração o princípio óptico mencionado na revisão bibliográfica e ilustrada na Figura 1. Por motivos práticos, econômicos e de adaptabilidade foi dada preferência aos materiais acessíveis no mercado local, optando-se construir a estrutura do coletor em ferro e a superfície refletora em aço inoxidável.

3.2.1. ESTRUTURA DO COLETOR

A estrutura do coletor, construída em metalon de secção transversal de 4x4 cm, dividiu-se em duas partes: um quadro para suporte da superfície parabólica destinada à captação da energia solar e uma base de sustentação para este sistema (Figura 2). Toda a parte metálica, exceto a superfície refletora, recebeu um banho anticorrosivo e depois uma pintura final com tinta duco branca. Esta cor foi escolhida por ser a

FIGURA 2 = VISTA LATERAL DO COLETOR PARABÓLICO; A) QUADRO DE SUPORTE DA SUPERFÍCIE PARABÓLICA; B) BASE DE SUSTENTAÇÃO; C) BARRA DE FERRO DE PERFIL PARABÓLICO; D) SUPERFÍCIE PARABÓLICA; E) PONTO ROTATIVO; F) SUPORTE DO PONTO ROTATIVO; G) SUPORTE DO TUBO ABSORVEDOR; H) MANGA DE FIXAÇÃO DO TUBO ABSORVEDOR; I) TUBO ABSORVEDOR; J) CAMISA DE VIDRO; K) PÉ DE APOIO DA BASE; L) PARAFUSO DE REGULAGEM DA INCLINAÇÃO DO COLETOR; M) SUPORTE DO MOTOR; N) MICRO-SUITES.

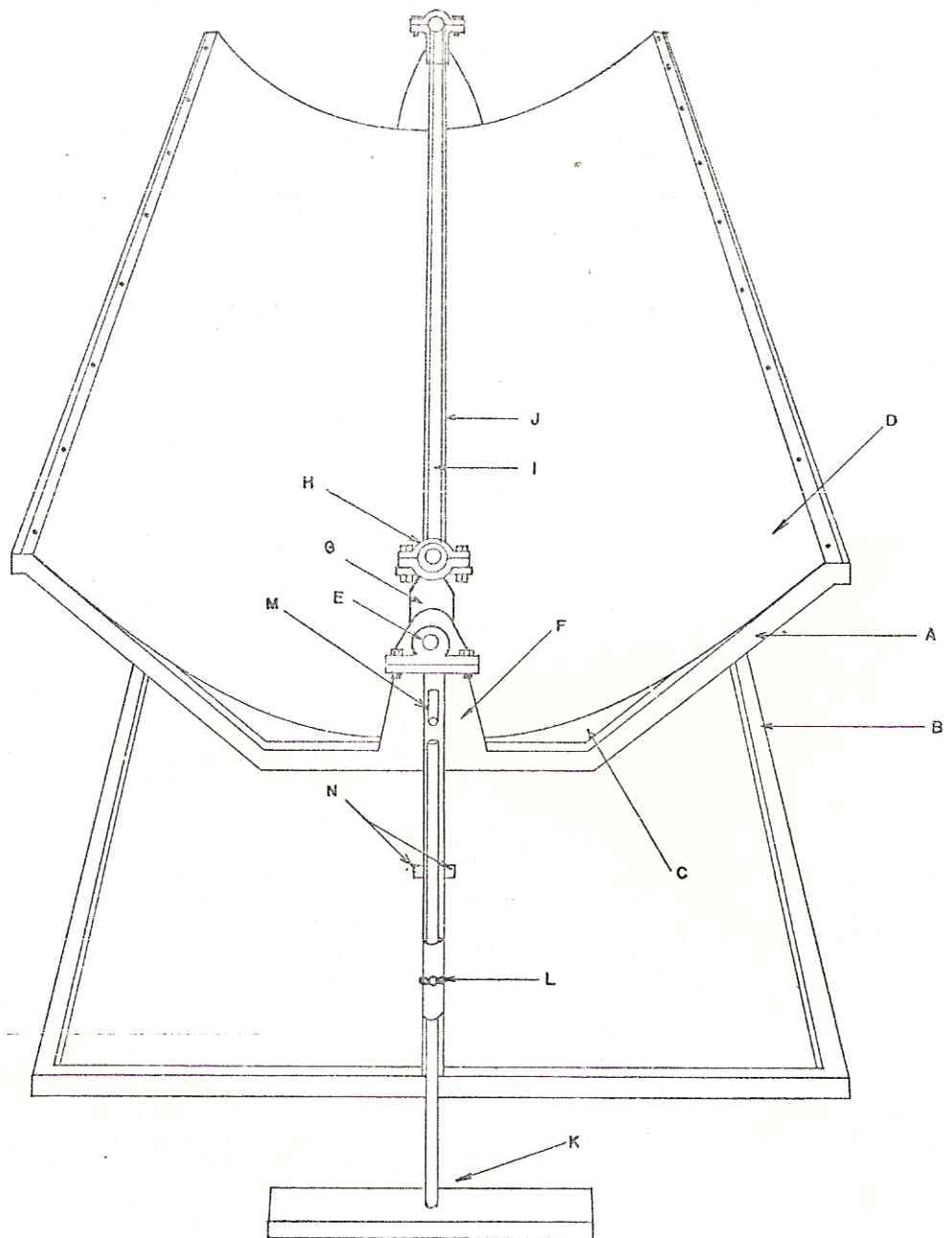
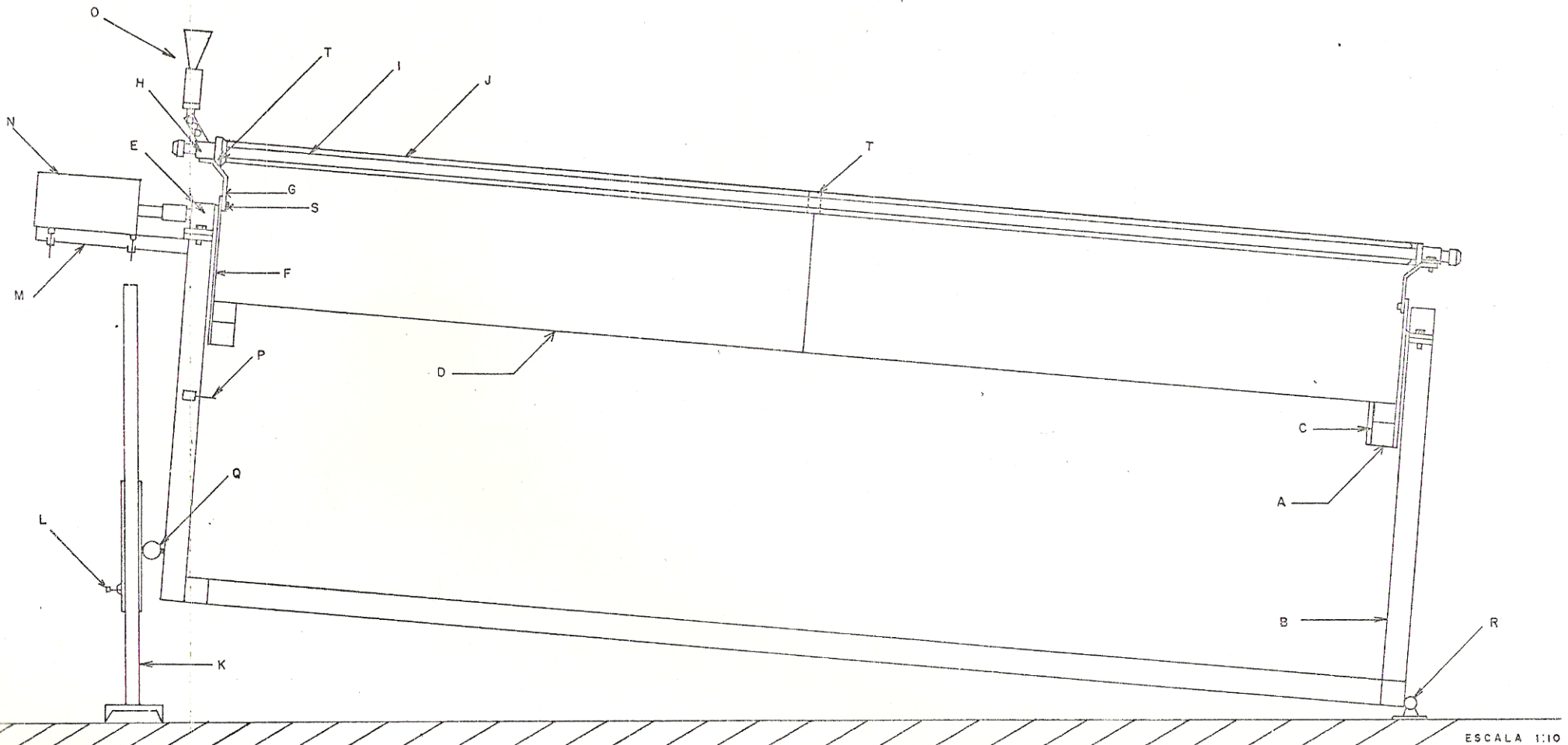


FIGURA 3 = CORTE LONGITUDINAL DO COLETOR SOLAR; A) QUADRO DE SUPORTE DA SUPERFÍCIE PARABÓLICA; B) BASE DE SUSTENTAÇÃO; C) PERFIL PARABÓLICO; D) SUPERFÍCIE PARABÓLICA; E) PONTO ROTATIVO; F) SUPORTE DO PONTO ROTATIVO; G) SUPORTE DO TUBO ABSORVEDOR; H) MANGA DE FIXAÇÃO DO TUBO ABSORVEDOR; I) TUBO ABSORVEDOR; J) CAMISA DE VIDRO; / K) PÉ DE APOIO DA BASE; L) PARAFUSO DE REGULAGEM DA INCLINAÇÃO DO COLETOR; M) SUPORTE DO MOTOR; N) MOTOR; O) MIRA SOLAR; P) MICRO-SUITE; Q) ARTICULAÇÃO; R) PONTO MÓVEL; S) PARAFUSO PARA REGULAGEM DO TUBO COLETOR; T) BORRACHA DE SILICONE.



maneira que o perfil reproduzido compreendesse a largura padrão da folha de aço inoxidável.

O perfil da curva contida no molde foi riscado em duas chapas de ferro idênticas, com 4 mm de espessura. Em seguida, procedeu-se o corte das chapas, seguindo-se rigorosamente o perfil traçado.

Nas laterais menores do quadro, soldaram-se as chapas de ferro perfilada e, a esta estrutura, fixou-se a chapa de aço inoxidável, através de rebites ao longo das laterais maiores do quadro (Figura 3 e 4).

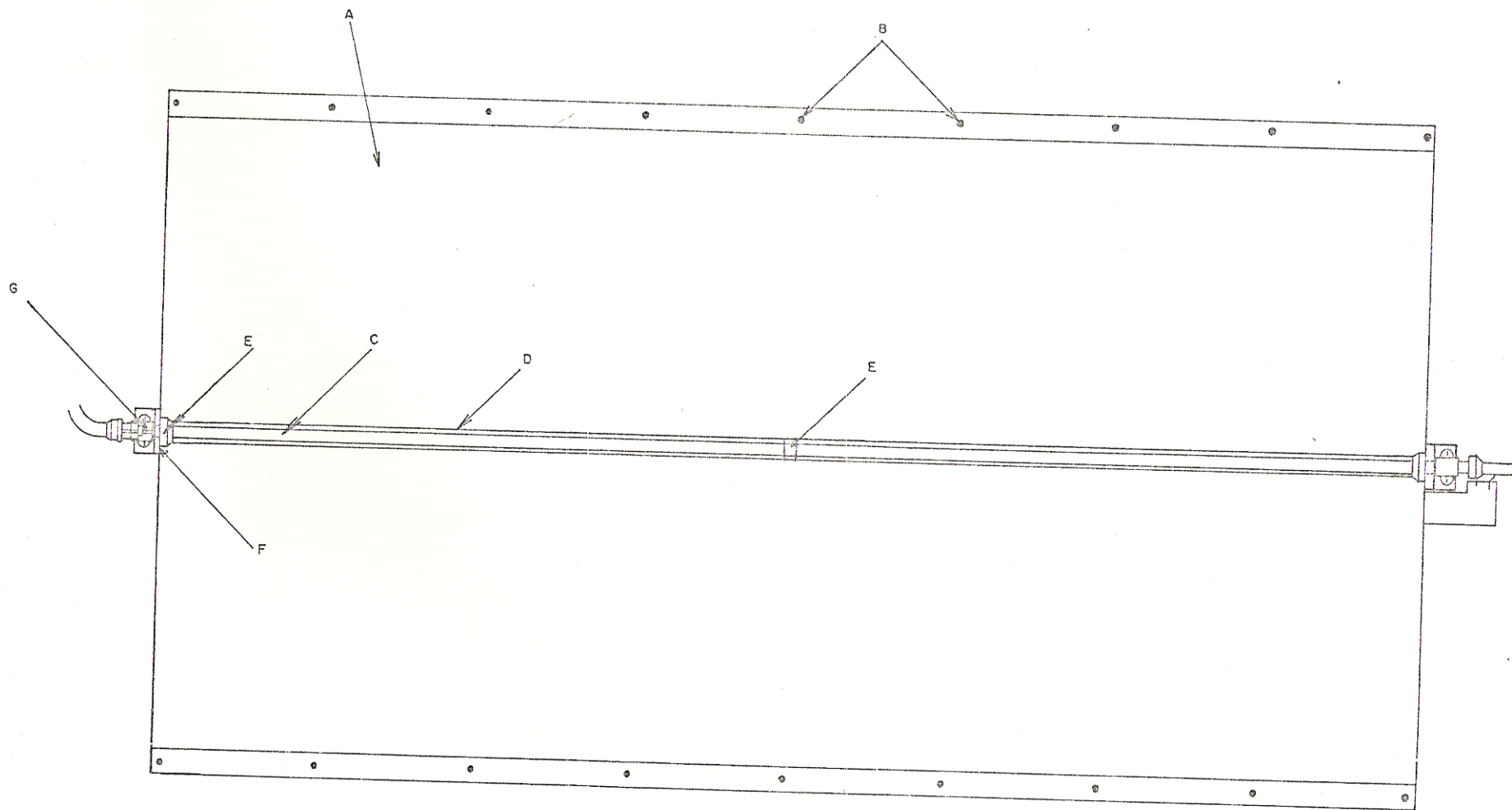
3.2.3. INSTALAÇÃO DO TUBO ABSORVEDOR

A concepção básica considerou a necessidade de um tubo que pudesse absorver o máximo de raios solares incidentes e que tivesse o mínimo de perdas por radiação. Para isto foi utilizado como tubo absorvedor um cano de cobre de 3,4 cm de diâmetro, pintado com tinta de cor preta fosca, à base de silicone e fuligem de óleos derivados de petróleo. De acordo com o fabricante, a tinta suporta temperaturas superiores a 400°C.

Na parte superior de cada um dos suportes dos pontos rotativos, foi fixado uma peça metálica regulável (suporte do tubo absorvedor), para a fixação do tubo absorvedor (Figuras 2, 3 e 4)..

Revestindo o tubo absorvedor, foi colocada uma camisa de vidro constituída de dois tubos cilíndricos de vidro, de 5 cm de diâmetro, com 1 m de comprimento cada, unidos longitudinalmente entre si por uma bucha de borracha de silicone, de

FIGURA 4 = VISTA SUPERIOR DO COLETOR PARABÓLICO: A) SUPERFÍCIE PARABÓLICA; B) REBITES; C) TUBO ABSORVEDOR; D) CAMISA DE VIDRO; E) BORRACHAS DE SILICONE; F) SUPORTE DO TUBO COLETOR; G) MANGA DE FIXAÇÃO DO TUBO ABSORVEDOR.



ESCALA 1:10

1,5 cm de espessura. A vedação nos extremos foi obtida utilizando-se também buchas de silicone (Figura 3). Para aliviar a expansão do ar contido entre o tubo absorvedor e o cilindro de vidro, fez-se um furo de 3 mm de diâmetro nas borrachas dos extremos para que atuassem como suspiros. Este sistema, ao ser aquecido, produz um vácuo parcial pela expulsão do ar, reduzindo a perda de calor do tubo absorvedor para o meio ambiente.

3.3. SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

O sistema de rastreamento objetivou ter a capacidade de movimentar o coletor com precisão, de fácil operacionalidade e de baixo custo. A base do sistema de rastreamento solar foi fundamentado no mecanismo utilizado pelo Laboratório de Produtos florestais de Brasília no controle de temperatura e umidade relativa do ar em ambientes fechados³⁸

Para que o processo de rastreamento seja realizado com êxito, é necessário que a calha parabólica se encontre localizada longitudinalmente na direção norte-sul.

O mecanismo desenvolvido e responsável pelo rastreamento do sol é constituído de uma mira solar, dois micro-suites e um motor de força de baixa rotação ligados a uma caixa de comando que contém o circuito eletrônico (Anexo 1).

A mira solar encontra-se fixada na parte superior da manga de sustentação do suporte do tubo absorvedor, perpendicularmente ao plano diretriz da superfície parabólica refletindo os raios incidentes em sua superfície para a região focal.

É constituída de uma peça em alumínio composta de duas partes: uma

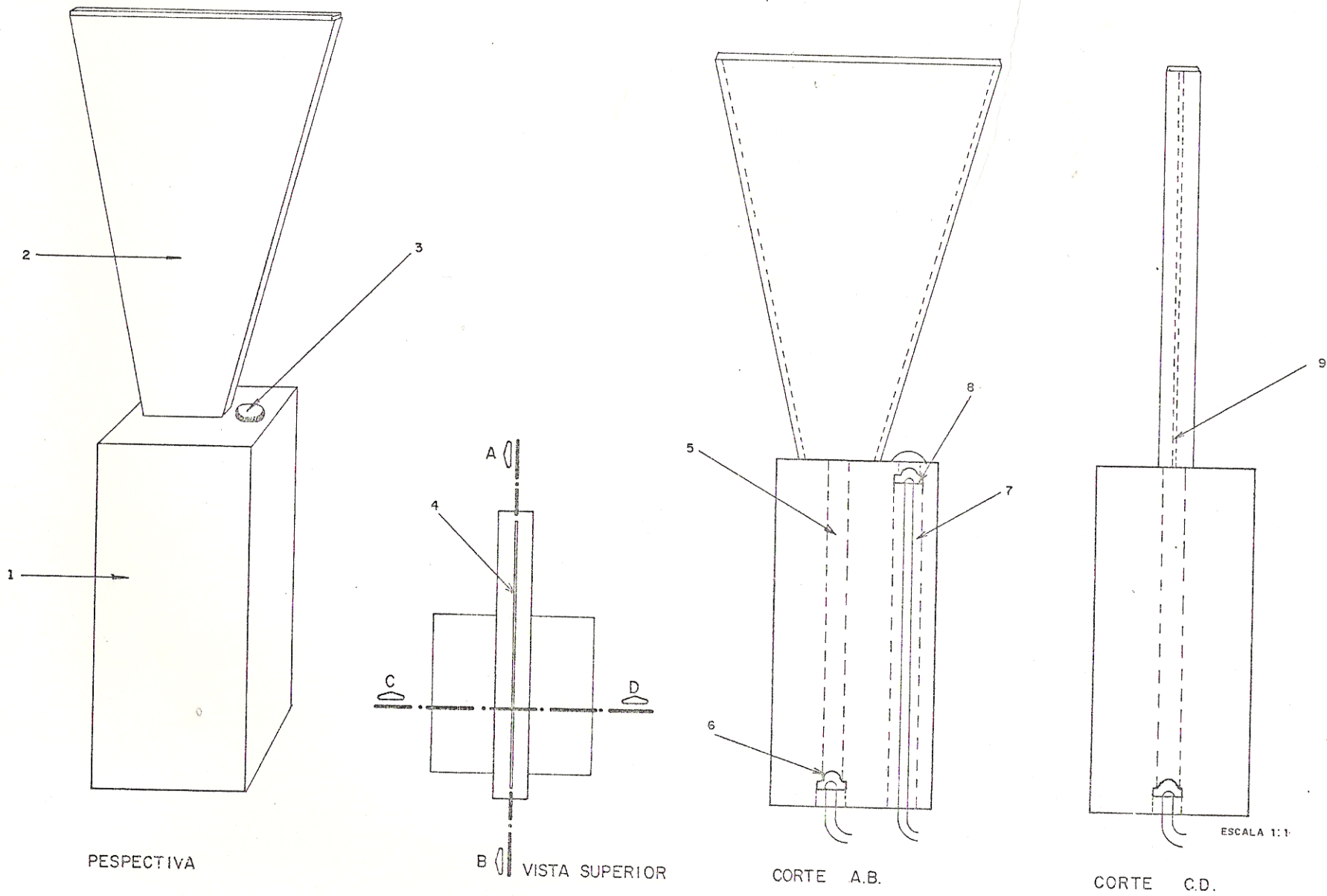
base para acomodação de dois fotossensores e uma peça em V contendo uma fenda de 0,7 mm (Figura 5).

O primeiro fotossensor localizado na parte superior da base, opera como detector de luminosidade, desligando todo o sistema de rastreamento na ausência de luz, ou acionando-o na presença de luz. Este é coberto com um filtro de acrílico difrator de luz em forma de calota que, além de proteger o fotossensor contra a umidade e poeira do ar, aciona o sistema de rastreamento quando a luminosidade do dia for apropriada à captação da energia pelo coletor.

O segundo fotossensor, localizado na parte inferior da base, sob a peça que contém a fenda, é responsável pela operação de rastreamento do sol.

Com o nascer do sol, o fotossensor de luminosidade liga o sistema de rastreamento. A superfície parabólica passa então a girar, acionada pelo motor, até atingir uma posição em que os raios solares penetrem na fenda, iluminando e sensibilizando o fotossensor de rastreamento. Neste ponto, o motor pára e a superfície parabólica permanece imóvel, enquanto os raios solares incidem no fotossensor de rastreamento. Com o movimento do sol, o feixe luminoso incidente no fotossensor de rastreamento é interrompido, uma vez que os raios passam a não incidirem mais perpendicularmente à fenda, dessensibilizando o fotossensor rastreador. O motor é novamente acionado. A superfície parabólica passa a girar até que o feixe luminoso incidente na fenda da mira sensibilize novamente o fotossensor de rastreamento. Com isto, a calha parabólica acompanha o movimento do sol, mantendo sempre a região focal fortemente iluminada

FIGURA 5 = MIRA SOLAR: 1) BASE DE ACOMODAÇÃO DOS FOTOSSENSORES; 2) PEÇA EM V; 3) FILTRO DE ACRÍLICO; 4 e 9) FENDA; 5) ORIFÍCIO DO FOTOS
 SENSOR RASTREADOR; 6) FOTOSSENSOR RASTREADOR; 7) ORIFÍCIO DO FOTOSSENSOR DETETOR DE LUMINOSIDADE; 8) FOTOSSENSOR DE LUMINOSIDADE.



sobre o tubo absorvedor. Com o céu limpo, isento de nuvens, tal mecanismo é acionado em média a cada 10 minutos.

A inversão do sentido de rotação do motor é obtida através da atuação dos micro-suites. A necessidade desta inversão está associada ao retorno do coletor à posição original no início do novo dia ou à presença de nuvens que permitam uma luminosidade, mas ao mesmo tempo interrompam a incidência de luz do fotossensor rastreador. Esta inversão faz-se pelo contato mecânico da lateral menor do quadro com os dois micro-suites situados à direita e à esquerda do pé da base do coletor, respectivamente (Figura 2 e 3).

Quando o coletor atinge o seu curso máximo para a esquerda (poente), seja por estar no fim do dia ou pela presença de nuvens, o quadro toca e aciona o micro-suite da esquerda, o qual envia um sinal elétrico à caixa de comando para que o sentido de rotação do motor seja invertido. Feito isto, o quadro passa a girar para a direita (nascente) até tocar no micro-suite da direita onde obtem-se a nova inversão.

No caso da interrupção do fotossensor causada por nuvens, o tempo que o coletor leva para tocar os dois micro-suites e voltar à posição inicial é de 1 minuto. Quando trata-se de insuficiência de luminosidade (durante a noite), o coletor permanece imóvel até que nasça um novo dia e o detector de luminosidade acione o mecanismo para o rastreamento.

3.4. CONSTRUÇÃO DO SECADOR

A concepção construtiva do secador visou basicamente reproduzir as características fundamentais inerentes aos se

cadores convencionais, quais sejam: alto grau de isolamento térmico, circulação do ar uniforme, sistema de aquecimento do ar através de trocadores de calor, controle da umidade relativa do ar e da temperatura de secagem.

3.4.1. ESTRUTURA DO SECADOR

O secador consiste numa caixa cúbica de 1,1 m de aresta, com paredes duplas construídas em compensado de 1,5 m de espessura à base de resina fenol-formaldeído, apresentando um volume disponível à secagem da madeira de 0,48 m³ (Figura 6A e 6B). As paredes foram isoladas entre si com uma camada de espuma de poliuretano de 3 cm de espessura, cujas características físicas encontram-se no anexo 3.

Na parte externa superior do secador, foi fixado um reservatório de água com capacidade para 11 litros, isolado termicamente por todos os lados, com uma camada de poliuretano de 10 cm. O reservatório dispõe de quatro perfurações de 2 cm de diâmetro, as quais, aos pares, permitem, respectivamente, a circulação de água através do trocador de calor e o movimento de convecção criado entre o coletor e o reservatório.

O secador foi assentado sobre quatro rodízios para facilitar seu acoplamento ao coletor parabólico.

3.4.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO

A circulação do ar no interior da câmara foi obtida colocando-se uma hélice de 30 cm de diâmetro na parte central superior interna, ligada por um eixo ao motor de 1/4 Hp e

850 RPM, situado fora da câmara, de acordo com a Figura 6b.

Para forçar a circulação do ar por entre a pilha de madeira, foi fixado horizontalmente um anteparo em folha de alumínio de 63x98 cm, abaixo da hélice e um outro, do mesmo material, verticalmente, passando pelo plano de rotação da hélice, fechando o espaço existente entre a hélice e as paredes da frente e fundo (Figura 6b)

3.4.2. SISTEMA DE AQUECIMENTO

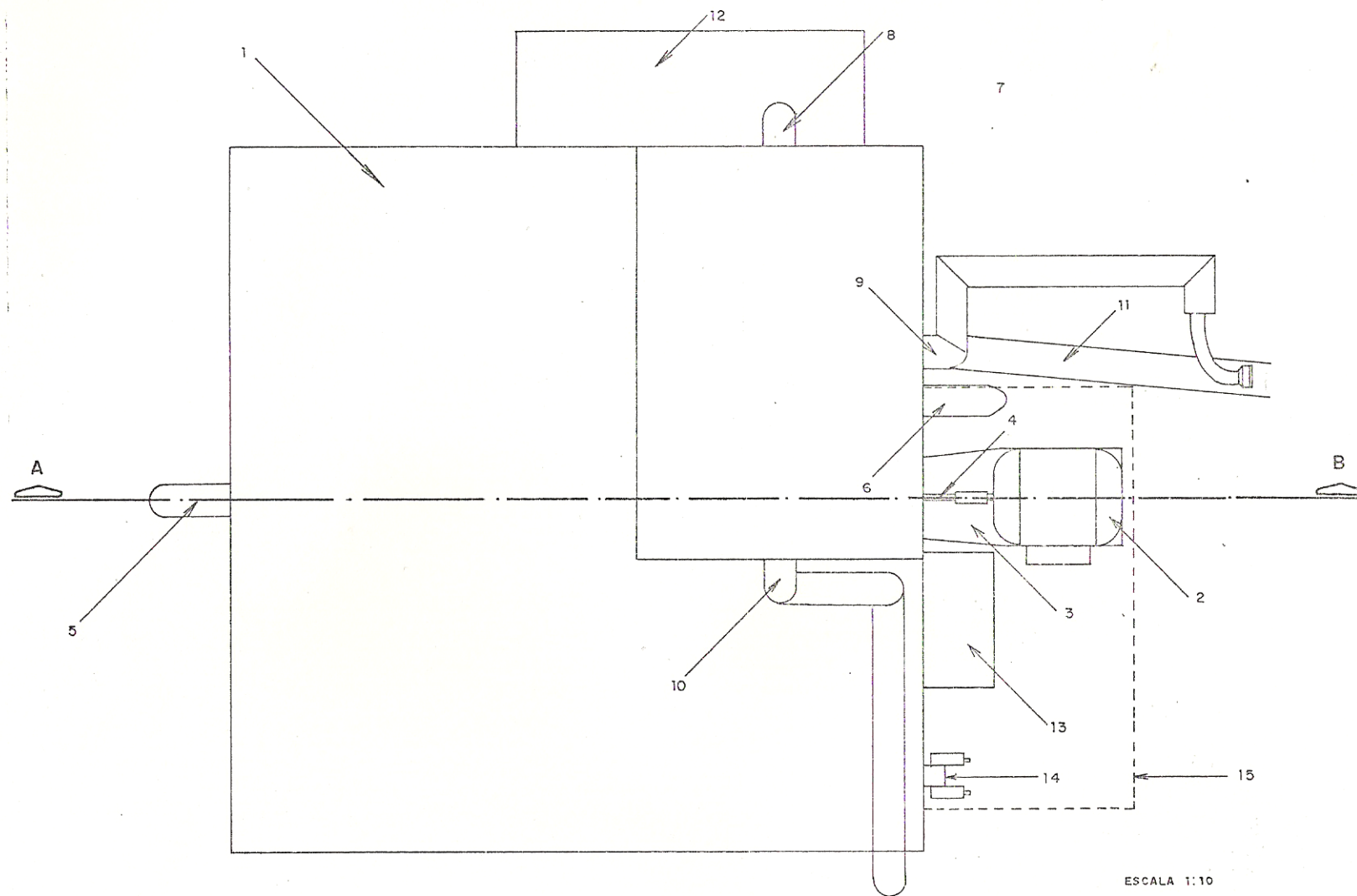
Como trocador de calor, utilizou-se um cano de cobre aletado de 2 mm de espessura, 2,67 m de comprimento e 1,2 cm de diâmetro interno, contendo 38 aletas em cobre de 7,5 mm de largura para cada 10 cm de cano, totalizando uma superfície disponível para troca térmica de 2,5 m²

O cano aletado foi seccionado em três partes iguais, que foram novamente unidas entre si soldando-se dois tubos em U. Com isto, obteve-se uma serpentina em forma de S alongado, onde os segmentos aletados, paralelos entre si, distaram 3 cm um do outro.

O trocador de calor foi fixado horizontalmente no interior da câmara entre a lateral direita do anteparo em alumínio e a parede adjacente (Figura 6b).

A alimentação do trocador foi obtida circulando-se, em seu interior, a água aquecida pelo coletor solar, através de uma micro moto-bomba, situada entre a saída da tubulação superior do reservatório e a entrada do trocador. A água que circula no trocador retorna ao reservatório por uma tubulação que o une à extremidade do trocador (Figura 6a).

FIGURA 6a= VISTA SUPERIOR DO SECADOR: 1) SECADOR; 2) MOTOR; 3) SUPORTE DO MOTOR; 4) EIXO DO MOTOR; 5) REGISTRO DE TIRAGEM DE ENTRADA DE AR; 6) REGISTRO DE TIRAGEM DE SAÍDA DE AR; 7) RESERVATÓRIO DE ÁGUA; 8) TUBULAÇÃO CONTENDO O MICRO-MOTO BOMBA QUE LIGA O RESERVATÓRIO A ENTRADA DO TROCADOR DE CALOR; 9) TUBULAÇÃO LIGANDO A PARTE SUPERIOR DO RESERVATÓRIO AO EXTREMO SUPERIOR DO TUBO ABSORVEDOR; 10) TUBULAÇÃO LIGANDO A SAÍDA DO TROCADOR DE CALOR À PARTE INFERIOR DO RESERVATÓRIO; 11) TUBULAÇÃO LIGANDO O EXTREMO INFERIOR DO TUBO ABSORVEDOR À PARTE INFERIOR DO RESERVATÓRIO; 12) COBERTURA DE PROTEÇÃO DA MICRO-MOTO BOMBA E DAS LIGAÇÕES ELÉTRICAS; 13) TERMOSTATOS; 14) DIJUNTORES; 15) COBERTURA DE PROTEÇÃO.



ESCALA 1:10

FIGURA 6b = CORTE AB : 1) COMPENSADO; 2) ESPUMA DE POLIURETANO; 3) COMPENSADO; 4) HÉLICE DO VENTILADOR; 5) ANTEPARO HORIZONTAL; 6) ANTEPARO VERTICAL; 7) EIXO DO MOTOR; 8) SUPORTE DO MOTOR; 9) MOTOR; 10) TROCADOR DE CALOR; 11) REGISTRO DE TIRAGEM DE ENTRADA DE AR; 12) VENTILINHA DE CONTROLE; 13) REGISTRO / DE TIRAGEM DE SAÍDA DE AR; 14) LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES E SENSORES DOS TERMOSTATOS; 15) RECIPIENTE COM ÁGUA PARA UMIDECER O TERMOPAR ÚMIDO; 16) RODÍZIO; 17) RESERVATÓRIO DE ÁGUA; 18) ESPUMA DE POLIURETANO; 19) SAÍDA SUPERIOR DO RESERVATÓRIO PARA O TROCADOR DE CALOR; 20) SAÍDA SUPERIOR DA CAIXA PARA O TUBO ABSORVEDOR; 21) SAÍDA INFERIOR DA CAIXA PARA O TUBO ABSORVEDOR.

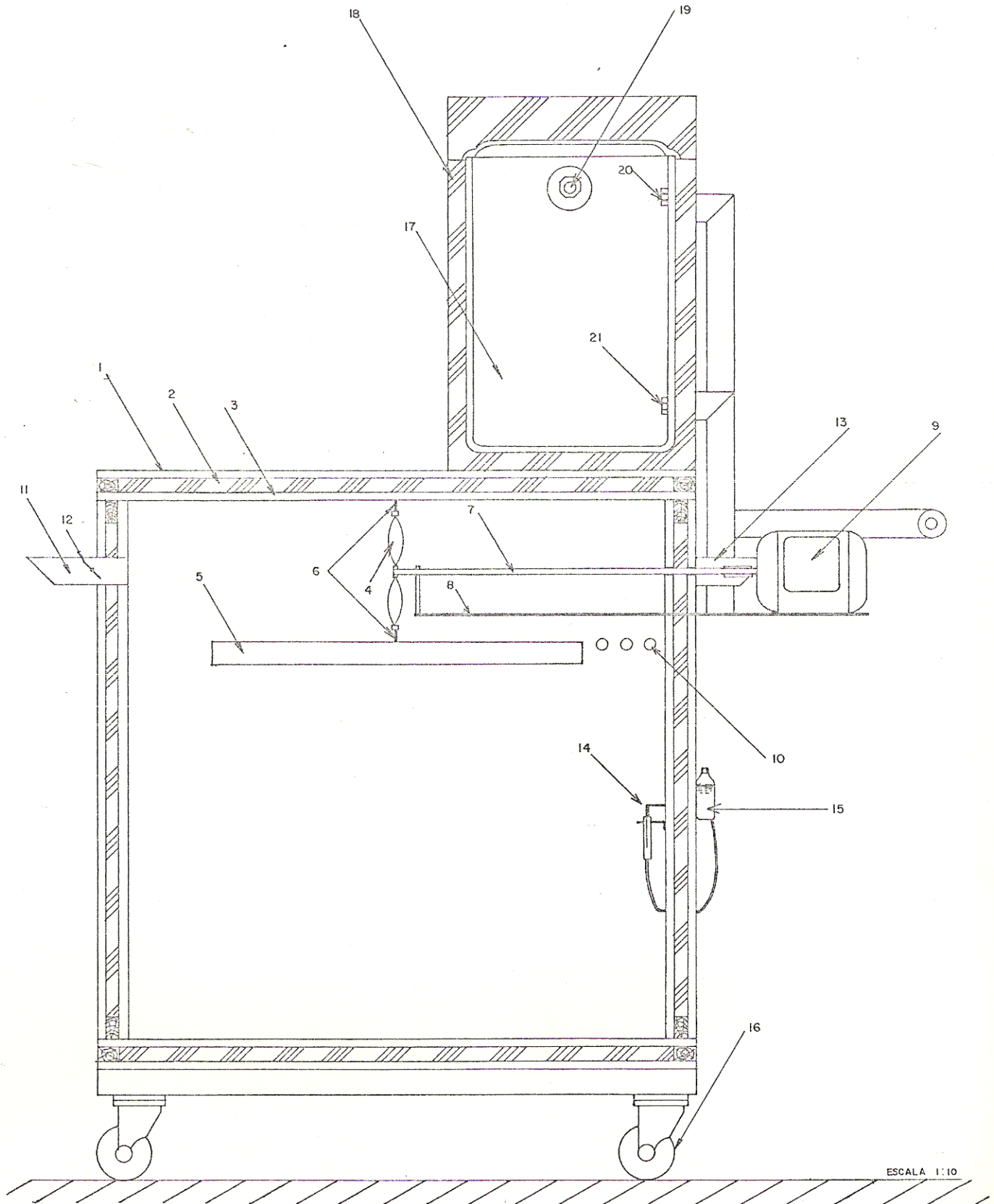
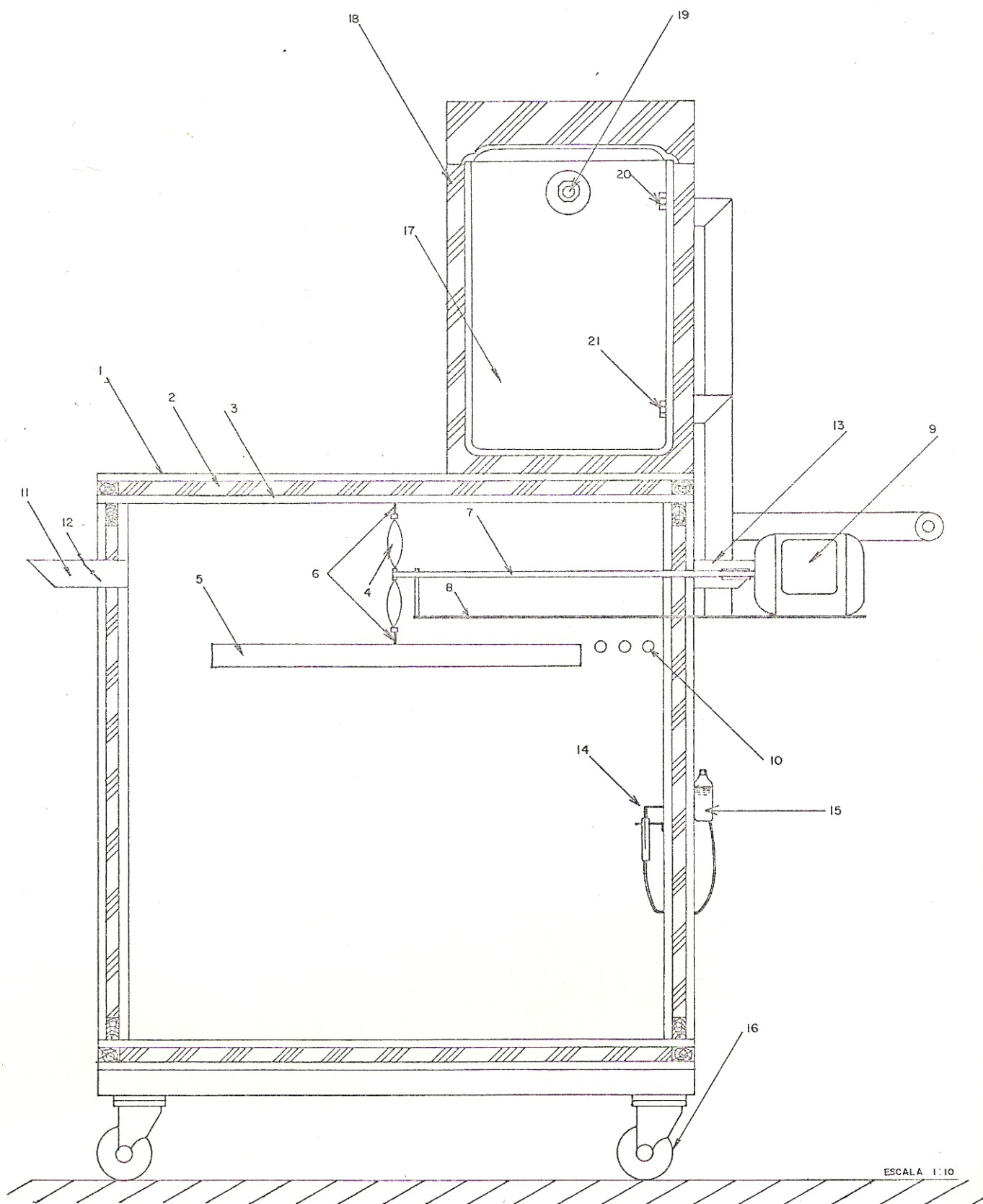


FIGURA 6b = CORTE AB : 1) COMPENSADO; 2) ESPUMA DE POLIURETANO; 3) COMPENSADO; 4) HÉLICE DO VENTILADOR; 5) ANTEPARO HORIZONTAL; 6) ANTEPARO VERTICAL; 7) EIXO DO MOTOR; 8) SUPORTE DO MOTOR; 9) MOTOR; 10) TROCADOR DE CALOR; 11) REGISTRO DE TIRAGEM DE ENTRADA DE AR; 12) VENTONINHA DE CONTROLE; 13) REGISTRO / DE TIRAGEM DE SAÍDA DE AR; 14) LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES E SENSORES DOS TERMOSTATOS; 15) RECIPIENTE COM ÁGUA PARA UMIDECER O TERMOPAR ÚMIDO; 16) RODÍZIO; 17) RESERVATÓRIO DE ÁGUA; 18) ESPUMA DE POLIURETANO; 19) SAÍDA SUPERIOR DO RESERVATÓRIO PARA O TROCADOR DE CALOR; 20) SAÍDA SUPERIOR DA CAIXA PARA O TUBO ABSORVEDOR; 21) SAÍDA INFERIOR DA CAIXA PARA O TUBO ABSORVEDOR.



3.4.4. SISTEMA DE RENOVAÇÃO DO AR

O sistema de renovação do ar do secador consistiu na colocação de dois registros de tiragem cilíndricos de plástico, com 5 cm de diâmetro, localizados nas regiões de alta pressão e baixa pressão do ventilador. O registro de tiragem de saída de ar foi fixado na parede lateral direita (região de alta pressão) e o registro de tiragem de entrada do ar no extremo oposto (região de baixa pressão), ambas na mesma altura da hélice do ventilador.

A regulagem da abertura do registro de tiragem foi conseguida através da instalação de uma ventoinha em cada registro de tiragem, manualmente controlável (Figura 6.a e 6b).

3.4.5. SISTEMA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Na parede direita do secador, pelo seu lado interno central, foram instalados dois termopares de ferro-constant, sendo que um deles foi envolto numa fina camada de algodão mantida constantemente umedecida (Figura 6b). Os termopares foram conectados a um registrador capacitado a plotar graficamente as variações de temperatura em função do tempo, para ambos termopares simultaneamente.

O valor da temperatura no interior do secador foi obtido pela leitura direta da temperatura indicada pelo termopar seco. O valor da umidade relativa do ar foi fornecido pela tabela hipsométrica, tendo como valores indicativos, a tempera

tura do termopar seco e a sua diferença com a temperatura do termopar úmido (diferença psicométrica).

O controle da temperatura no interior do secador foi obtido utilizando-se dois termostatos. O primeiro foi colocado junto ao termopar seco e o segundo no interior do reservatório de água. O primeiro termostato mantém em funcionamento a micro moto-bomba, enquanto a temperatura no interior do secador estiver abaixo daquela ajustada no termostato (temperatura de secagem), e desliga-a em situação contrária. O segundo termostato, ajustado na mesma temperatura do primeiro, desliga o ventilador e a micro moto-bomba simultaneamente, quando a temperatura da água cai abaixo daquela ajustada no termostato do reservatório. Este termostato pode estar também ligado a uma fonte alternativa de energia (elétrica, por exemplo). Neste caso, quando a temperatura da água do reservatório cai, como acima, face à insuficiência de captação de energia solar, a fonte alternativa passa a entrar em funcionamento.

O controle desenvolvido para o ajuste da umidade relativa do ar no interior do secador foi manual, abrindo-se ou fechando-se os registros de tiragem de renovação de ar para diminuir ou aumentar a umidade relativa, respectivamente. No caso de se desejar uma umidificação intensa, aciona-se o sistema de umidificação, que pode ser facilmente instalado ligando-se uma mangueira com registro do reservatório ao interior da câmara.

3.5. ACOPLAMENTO DO COLETOR SOLAR AO SECADOR

O coletor solar foi acoplado ao secador através de duas mangueiras flexíveis de 2 cm de diâmetro. A primeira liga a tubulação da saída inferior do reservatório de água ao extre-

no mais baixo do tubo absorvedor e a segunda une a tubulação da saída superior do reservatório ao extremo mais alto do tubo absorvedor. Ambas, sendo flexíveis, possibilitam o movimento do coletor durante o rastreamento solar (Figura 7a e 7b).

Com esta modalidade de acoplamento, obteve-se, no circuito hidráulico formado entre o reservatório e o coletor, um movimento de convecção da água quando o tubo absorvedor é aquecido. A água aquecida no absorvedor retorna ao reservatório pela tubulação superior e cede espaço à água mais fria que é alimentada pela tubulação inferior do reservatório.

As mangueiras flexíveis foram isoladas termicamente enrolando-as com fita de amianto, até formar uma camada de 1,5 cm de espessura.

Todas as tubulações hidráulicas rígidas que fazem as ligações do reservatório com o trocador de calor e com o coletor foram construídas em cobre, com 2 cm de diâmetro e termicamente isoladas por um revestimento em espuma de poliuretano de 1,5 cm de espessura, protegido externamente por um cano de polivinil acetato (PVC).

3.6. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA EM TERMOS DE TRANSFORMAÇÃO DA RADIAÇÃO RECEBIDA EM ENERGIA TÉRMICA DESTINADA A SECAGEM

A eficiência do sistema construído foi avaliada através da relação entre a energia acumulada para a secagem da madeira e a energia incidente na superfície refletora³⁶.

Para a obtenção dos valores das temperaturas necessárias

FIGURA 7a= VISTA SUPERIOR DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR: 1) MANGUEIRA FLEXÍVEL UNINDO A EXTREMIDADE INFERIOR DO TUBO ABSORVEDOR A SAÍDA INFERIOR DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA; 2) MANGUEIRA FLEXÍVEL UNINDO A EXTREMIDADE SUPERIOR DO TUBO ABSORVEDOR A SAÍDA SUPERIOR DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA.

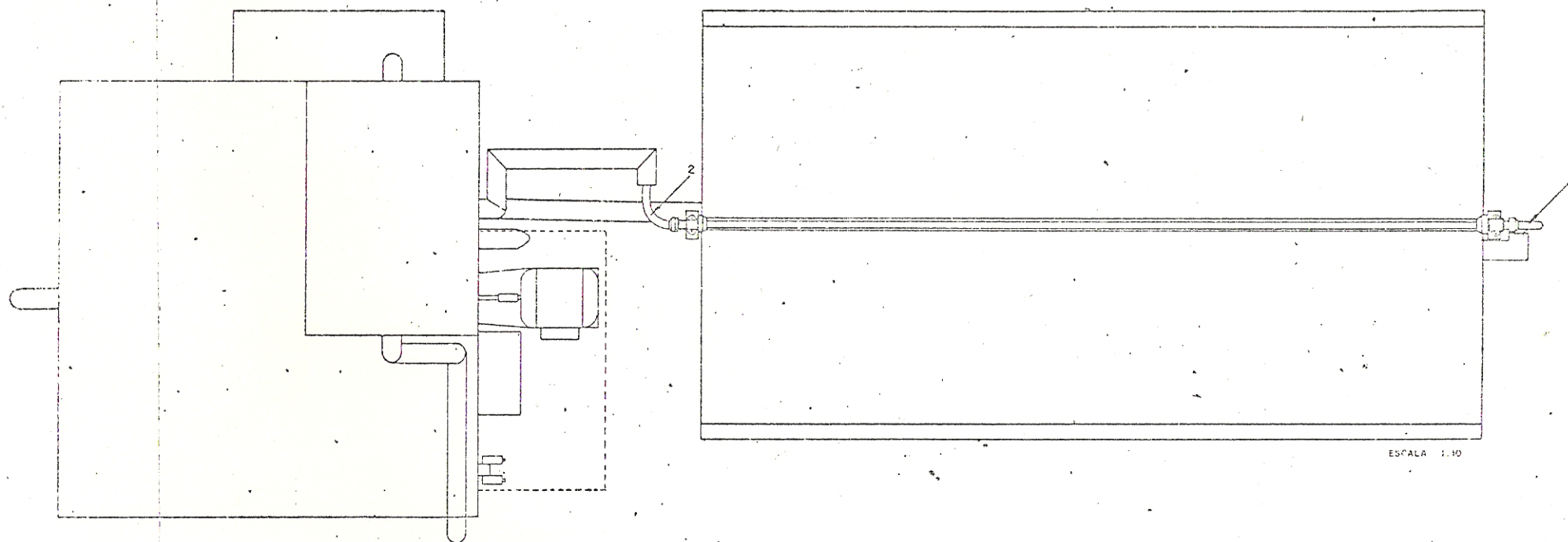
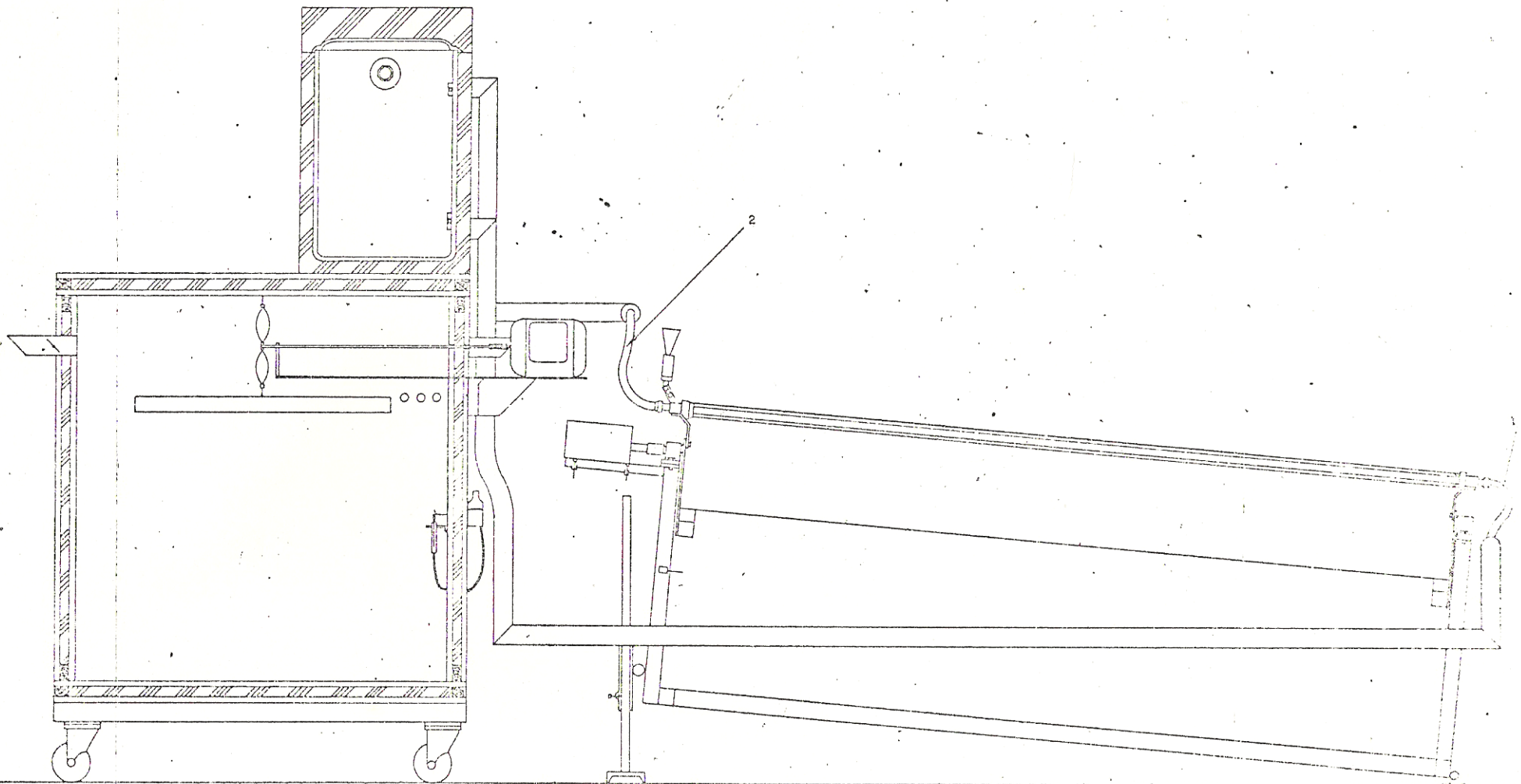


FIGURA 7b = VISTA EM CORTE DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR: 1 e 2) MANGUEIRA FLEXÍVEL ACOPLANDO O COLETOR AO SECADOR.



aos cálculos para a determinação da eficiência do sistema, bem como seu comportamento em termos de funcionamento, utilizaram-se 6 termopares de ferro-constantan ligados a um registrador gráfico.

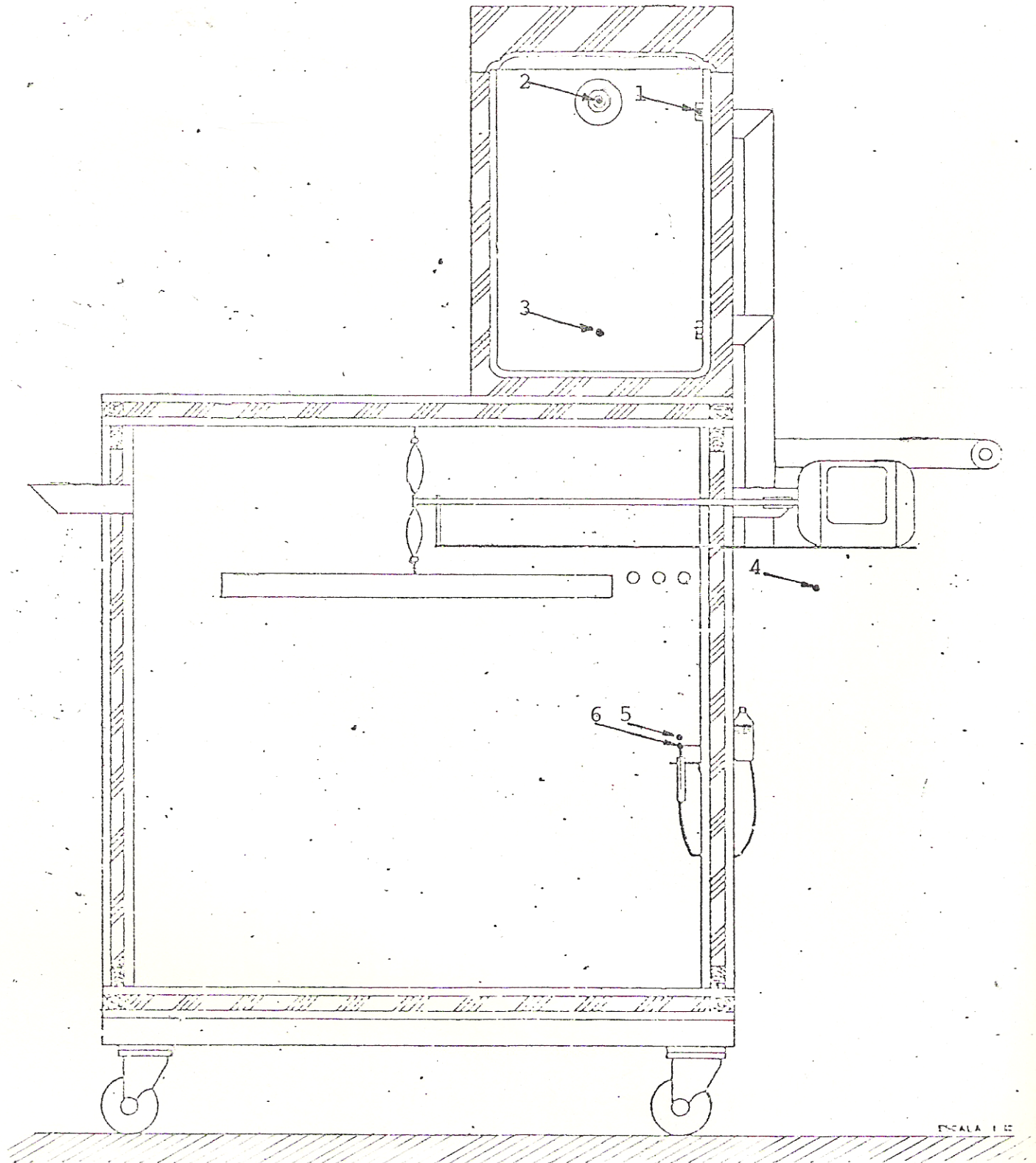
Inicialmente, procedeu-se à aferição dos termopares quanto à temperatura de registro. Os termopares foram imersos em uma cuba com gelo, juntamente com um termômetro de mercúrio, cujas leituras definiram como 0°C, o limite inferior de registro. A cuba contendo os termopares foi aquecida até a fervura lentamente. A água ferveu a 96,5°C, conforme indicado pelo termômetro de mercúrio. As temperaturas dos termopares registradas apresentaram unanimemente um comportamento linear entre 0° e 96°C.

A Figura 8 mostra a localização dos termopares instalados no sistema. O primeiro termopar foi instalado na entrada superior do reservatório que recebe a água aquecida pelo coletor, registrando a temperatura da água na saída do coletor. O segundo, na saída do reservatório que o liga com a entrada do trocador de calor, registrando a temperatura da água na entrada do trocador. O terceiro, na saída do trocador de calor. O quarto foi fixado fora da câmara sob o suporte de fixação do motor, registrando a temperatura ambiente e os dois últimos, registrando a temperatura do bulbo seco e do bulbo úmido, conforme mencionado no item 3.4.5.

As horas de insolação foram fornecidas pelo heliógrafo instalado a 10 metros do secador.

O equipamento foi colocado em funcionamento mantendo-se

Figura 8 - LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES: 1) ENTRADA SUPERIOR DO COLETOR NO RESERVATÓRIO; 2) SAÍDA DO RESERVATÓRIO PARA O TROCADOR; 3) SAÍDA DO TROCADOR DE CALOR DE CALOR; 4) TERMOPAR DE REGISTRO DA TEMPERATURA AMBIENTE; 5) TERMÔMETRO DE BULBO SECO; 6) TERMÔMETRO DE BULBO ÚMIDO.



inicialmente ligado. somente o sistema de rastreamento solar, para que a água aquecida pelo coletor pudesse ser armazenada no reservatório com o mínimo de perda.

Tanto o ventilador como a micro-moto-bomba foram simultaneamente ligados, após a temperatura de saída do coletor ter sido estabelecido em $96,5^{\circ}\text{C}$. Estabeleceram-se, respectivamente, as condições máximas e mínimas de temperatura e umidade relativa do ar no interior do secador, proporcionado pelo sistema no dia.

A energia fornecida ao sistema pelo coletor foi obtida através do somatório da energia acumulada no reservatório, da energia dissipada entre o coletor e o reservatório e aquela dissipada pelo reservatório, ambas no intervalo de tempo em que o ventilador e a micro-moto-bomba permaneceram desligados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. OPERACIONALIDADE DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Na Figura 9 é mostrada a câmara e o coletor acoplado em operação.

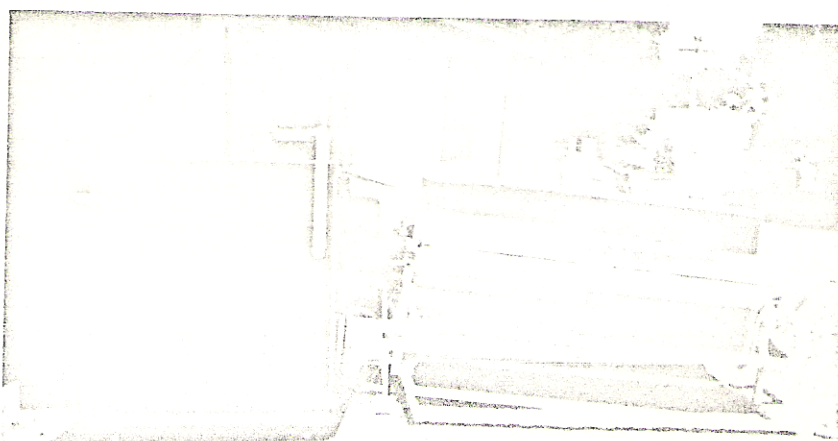
Tendo em vista que a operacionalidade do sistema desenvolvido depende sobremaneira do desempenho individual de seus constituintes, quais sejam, do coletor solar, do mecanismo de rastreamento, do secador e de seu acoplamento ao coletor, o presente capítulo discutirá cada constituinte separadamente.

4.1.1.1. COLETOR SOLAR

O coletor solar parabólico construído não apresentou qualquer dificuldade quanto ao seu funcionamento. A localização do eixo imaginário de rotação, passando pelo centro de gravidade do quadro contendo a superfície parabólica, permitiu o movimento de rastreamento dentro do limite de força do motor redutor. A existência de parafusos de regulagem do absorvedor possibilitou um ajuste preciso do mesmo na região focal da superfície parabólica pré-orientada para o norte verdadeiro.

Com relação à construção da calha refletora parabólica, observou-se que a região iluminada excedeu em média 4 mm o diâmetro do absorvedor, implicando em perda de eficiência na captação de radiação solar. Este espalhamento da região focal provavelmente ocorreu devido à fixação da calha refletora ao quadro do coletor ter sido feita através de rebites. Constatou-se pequenas ondulações na chapa refletora, nas proximidades dos pontos

Figura 9 - FOTOGRAFIA DO SECADOR ACOPLADO AO COLETOR SOLAR PARABÓLICO:



de fixação dos rebites, as quais fugiam à equação do perfil parabólico. Estas ondulações foram também aumentadas com a expansão linear da chapa produzida pelo aumento de sua temperatura, devido à incidência da radiação solar sobre a mesma.

O coletor solar foi mantido ao ar livre, sem qualquer proteção ou manutenção, durante 1 ano, para que fossem detectados os pontos de fragilidade do mesmo. Durante este período, somente os parafusos de regulagem do absorvedor e da inclinação do coletor apresentaram corrosão superficial.

4.1.2. DISPOSITIVO DE RASTREAMENTO SOLAR

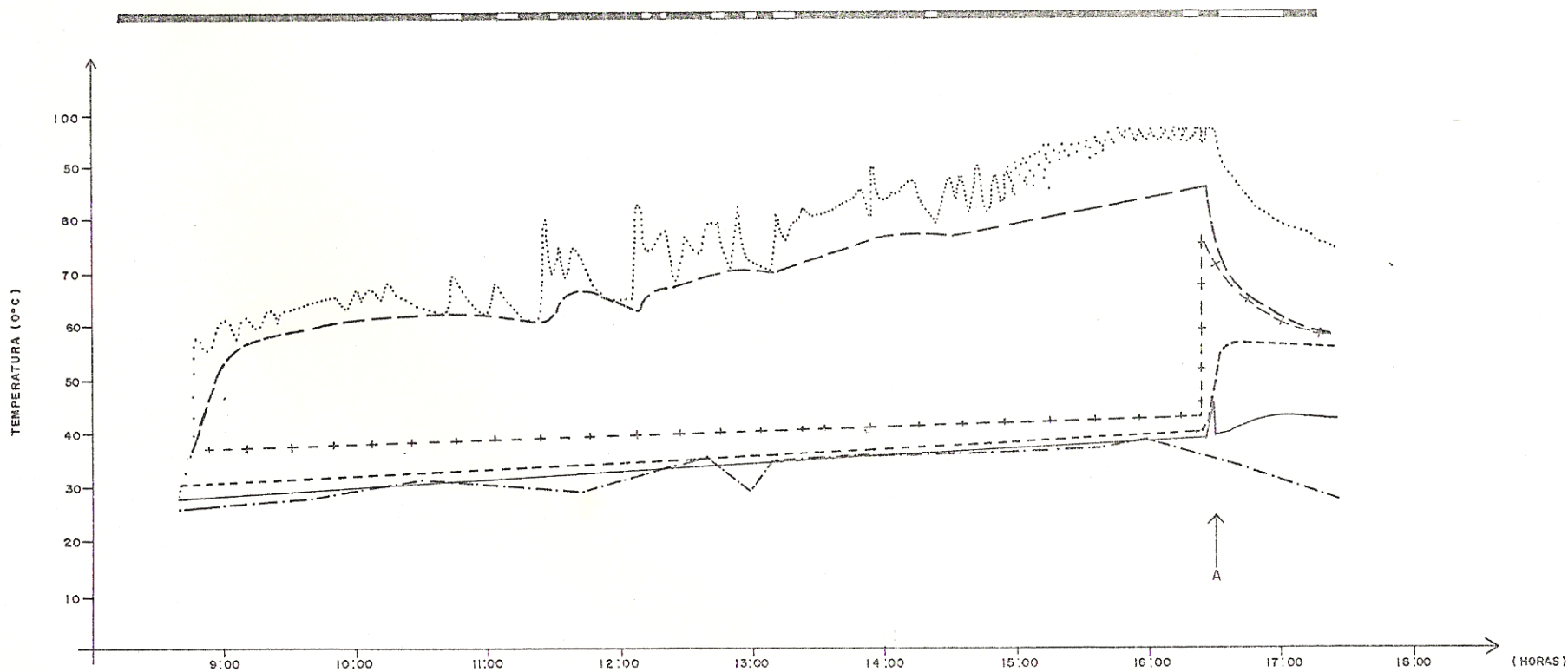
Como previsto inicialmente, desenvolveu-se um dispositivo de rastreamento solar responsável pela orientação constante do coletor parabólico na posição de maior captação de luz. O rastreamento solar operou de forma satisfatória, uma vez que o mesmo acompanhou o sol em toda sua trajetória, mantendo a região focal constantemente envolvendo o tubo absorvedor do coletor nos períodos de insolação direta. Este comportamento pode ser observado através do gráfico da Figura 10, que mostra as variações das temperaturas dos diversos pontos medidos em função do tempo, no qual a debilidade no fornecimento de energia pelo coletor é evidenciada pela diminuição da temperatura da água na saída do coletor, a ponto de igualar-se com a temperatura da água na entrada do trocador (região mais quente do reservatório) nos períodos em que o sol manteve-se incoberto por nuvens.

As outras variações observadas na temperatura da água na saída do coletor são explicadas pelo movimento de

FIGURA 10 - GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA INSTALADO MOSTRANDO AS VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DA INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR, NUM DIA DE CÉU PERIODICAMENTE INCOBERTO VIDENCIANDO A PERDA DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO COLETOR NOS PERÍODOS DE SOL INCOBERTO. (21 / 02 / 84)

CONVENÇÕES

- TEMPERATURA AMBIENTE
- - - TEMPERATURA DO BULBO SECO
- TEMPERATURA DO BULBO UMIDO
- + - TEMPERATURA DA ÁGUA NA SAÍDA DO TROCADOR
- - - TEMPERATURA DA ÁGUA NA ENTRADA DO TROCADOR
- TEMPERATURA DA ÁGUA NA SAÍDA DO COLETOR
- ▨ SOL DESCOBERTO
- ▨ SOL INCOBERTO POR NUVENS
- A=VENTILADOR E MICRO BOMBA LIGADOS



convecção irregular da água criado pelo sistema. A água no interior do tubo absorvedor é aquecida até a fervura. A expansão da água fervida atinge rapidamente a entrada do reservatório e cede lugar à água fria procedente do fundo do reservatório. A velocidade do movimento de convecção neste ponto, bem como a temperatura da água na saída do coletor, é máxima. Até que um novo volume de água seja aquecido à fervura, a velocidade do movimento de convecção da água e sua temperatura passam por um mínimo. Os testes de temperatura conduzidos no interior do absorvedor, na ausência de água e da camisa de vidro, registraram o valor de 290°C, atingido num intervalo de 20 minutos, entre 12:00 e 13:00 horas, em dias de céu descoberto.

A incidência de ventos fortes sobre a superfície parabólica provocou oscilações na mesma devido à folga existente no eixo do motor redutor, responsável pelo movimento de giro do coletor, o que comprometeu sobremaneira a operação de rastreamento.

4.1.3. ACOPLAMENTO DO COLETOR

As mangueiras flexíveis que conectaram o coletor ao secador tiveram suas secções transversais reduzidas face ao inevitável aquecimento das mesmas produzido durante a passagem da água quente pelo circuito.

Nas dobras maiores da mangueira, observou-se o acúmulo de pequenas bolhas, provavelmente produzidas pelo superaquecimento da água no tubo absorvedor. O menisco formado pelas bolhas associado a redução da secção transversal das mangueiras conferiram um retardamento no movimento natural de convecção da

água, o que conseqüentemente contribuiu para uma menor eficiência do sistema.

4.1.4. EFICIÊNCIA DO SISTEMA

Os dados sucessivos para os cálculos da potência térmica do coletor foram obtidos através do gráfico da Figura 11, correspondente ao melhor dia e que possibilitou a estimativa da energia global incidente na superfície da Terra, devido ao céu ter permanecido descoberto e com os menores índices de nebulosidade durante todo o período de funcionamento do equipamento. O gráfico mostra a variação da temperatura ambiente, da água na saída do coletor entrando no reservatório, da água na entrada e na saída do trocador de calor, dos termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido, em função do tempo em que o equipamento foi mantido ligado e do brilho solar neste período, como também o momento em que o ventilador e a micro-moto-bomba foram ligados simultaneamente.

Os cálculos inerentes a este item foram obtidos com base na Figura 11, e encontram-se no Anexo 4, cujos valores foram condensados nos quadros 1a e 1b.

Os valores para eficiência dos coletores concentradores parabólicos de foco linear, encontrados na literatura, ficam entre 30 a 60%¹. O valor de 16,3%, encontrado para a eficiência do coletor desenvolvido neste trabalho, evidencia que existem pontos na construção do mesmo que conduziram às perdas de calor. Estes pontos se correlacionaram muito provavelmente com: 1) baixa refletividade da chapa de aço inoxidável e a conseqüente perda de radiação refletida na região focal e perda de

FIGURA 11= GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA INSTALADO MOSTRANDO AS VARIÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DA INCIDENCIA DA RADIAÇÃO SOLAR, NUM DIA DE CÉU DESCOBERTO. (24 / 02 / 84)

CONVENÇÕES

- +---+---+ TEMPERATURA AMBIENTE
- +---+---+ TEMPERATURA DO BULBO SECO
- +---+---+ TEMPERATURA DO BULBO UMIDO
- +---+---+ TEMPERATURA DA ÁGUA NA SAÍDA DO TROCADOR
- +---+---+ TEMPERATURA DA ÁGUA NA ENTRADA DO TROCADOR
- +---+---+ TEMPERATURA DA ÁGUA NA SAÍDA DO COLETOR
- ===== SOL DESCOBERTO
- ===== SOL INCOBERTO POR NUVENS
- A = VENTILADOR E MICRO BOMBA LIGADOS

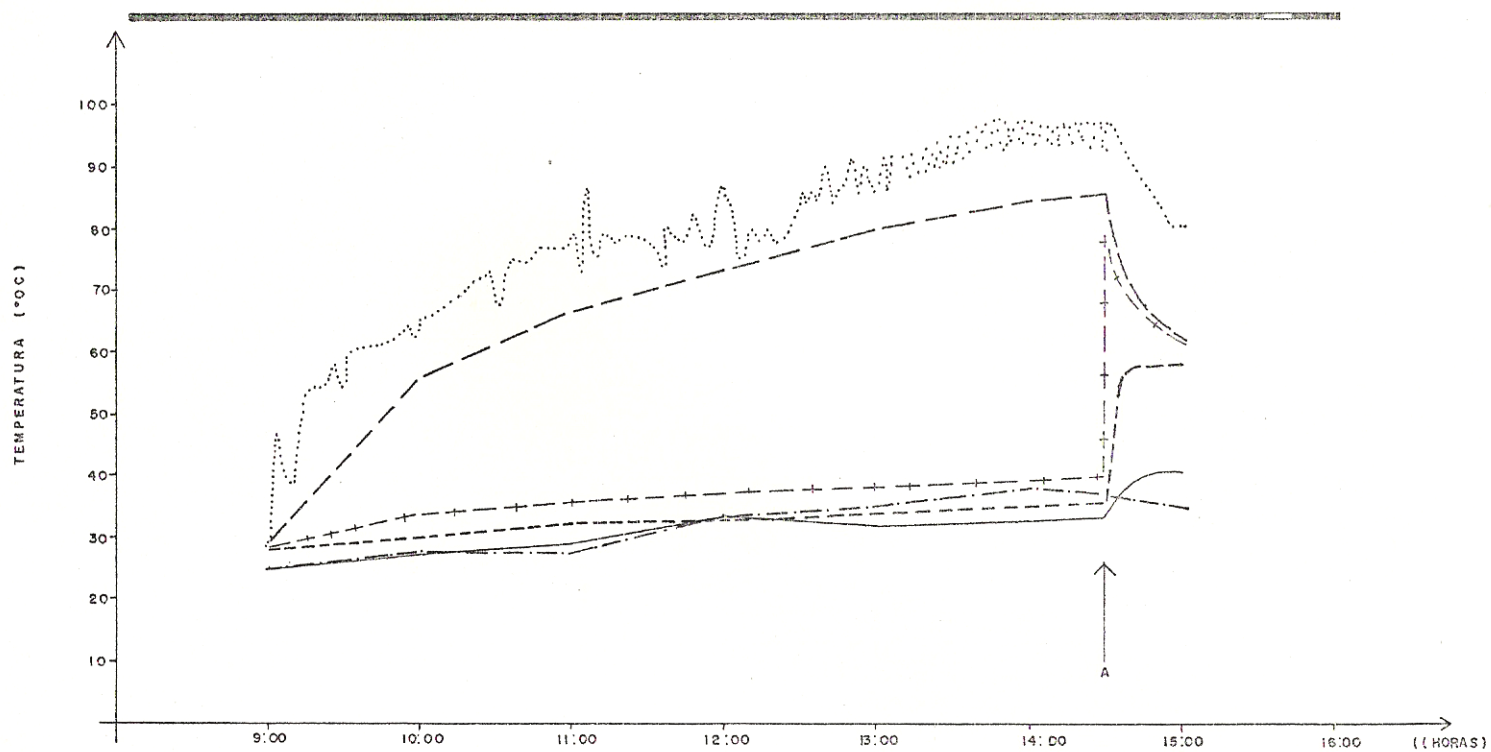
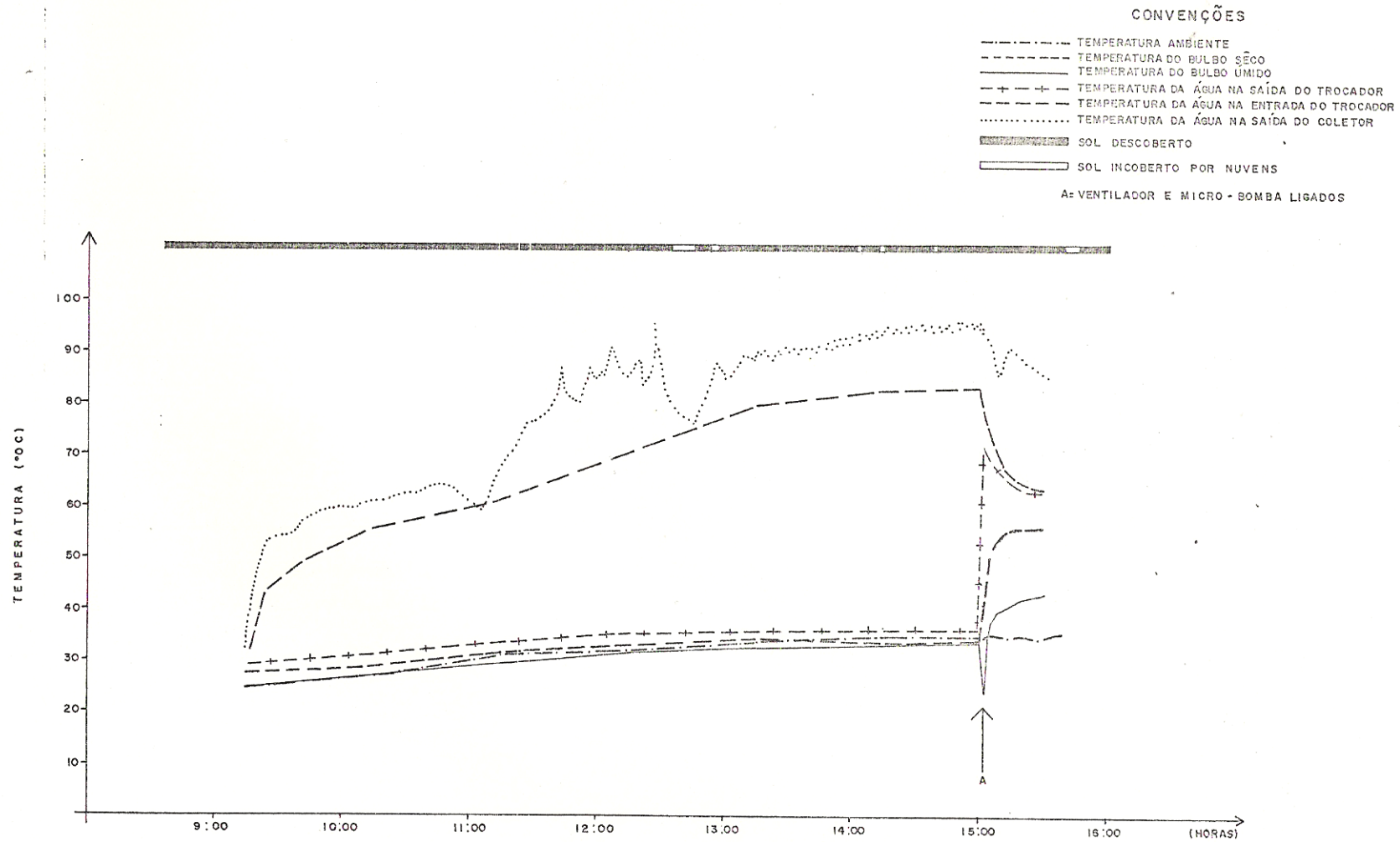


FIGURA 12 = GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA INSTALADO MOSTRANDO AS VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EVIDENCIANDO A CONSTANCIA DO FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO (20/02/84)



Quadro 1a - Balanço energético do sistema construído.

Itens	Sub-itens	Valor Kcal/h
Energia dissipada pela tubulação entre o cole tor e o reservatório	-Através do isolamento de espuma de poliuretano.	8,9
	-Através do isolamento de fita de amianto	37,0
	Sub-total I	45,9
Energia média dissipa- da pelas paredes do re servatório	-Laterais menores	27,6
	-Laterais maiores	41,4
	-Tampa	31,5
	Sub-total II	100,5
Energia acumulada	- Reservatório	129,9
	Sub-total III	129,9
Energia incidente esti mada	- Superfície parabólica	1.697,0
	Sub-total IV	1.697,0

Quadro 1b - Resumo dos resultados

Itens	Cálculos	Valor
Energia dissipada	Sub-totais I+II	146,4Kcal/h
Energia acumulada	Sub-total III	129,9Kcal/h
Energia retirada do co letor	Sub-totais I+II+III	276,3Kcal/h
Energia incidente	Sub-total IV	1.697,0Kcal/h
Eficiência do coletor	$\frac{\text{Sub-totais I+II+III}}{\text{Sub-total IV}} \times 100$	16,3%
Eficiência do sistema	$\frac{\text{Sub-total III}}{\text{Sub-total IV}} \times 100$	7,7%
Eficiência do secador	$\frac{\text{Sub-total III}}{\text{Sub-totais I+II+III}}$	47%

energia térmica pelo absorvedor. Embora não tenha sido determinada a refletividade da chapa de aço inoxidável, observou-se que a mesma apresentava uma refletividade inferior à dos objetos do mesmo material, isto deve-se provavelmente à má qualidade do polimento aplicado na chapa comercial; 2) outro fator que contribuiu para a perda de eficiência do coletor foi a perda da energia por reflexão ao longo da linha focal, por ter sido o diâmetro do tubo absorvedor cerca de 4 mm inferior ao diâmetro formado pela região iluminada. Estima-se que se a energia refletida fosse distribuída uniformemente por toda a região focal, esta perda seria equivalente a aproximadamente 27% da energia refletida pela superfície; 3) parte da energia refletida foi absorvida pela camisa de vidro, a qual, por não conter vácuo, perdeu também energia para o meio ambiente; 4) o rastreamento no movimento de convecção da água, devido a formação de menisco nas dobras da mangueira flexível de acoplamento; 5) a condição ajustada para a realização dos testes de eficiência do sistema impediu qualquer transferência de calor para o interior da câmara proveniente do coletor. Consequentemente este fato favoreceu a máxima troca de energia do sistema para o ambiente.

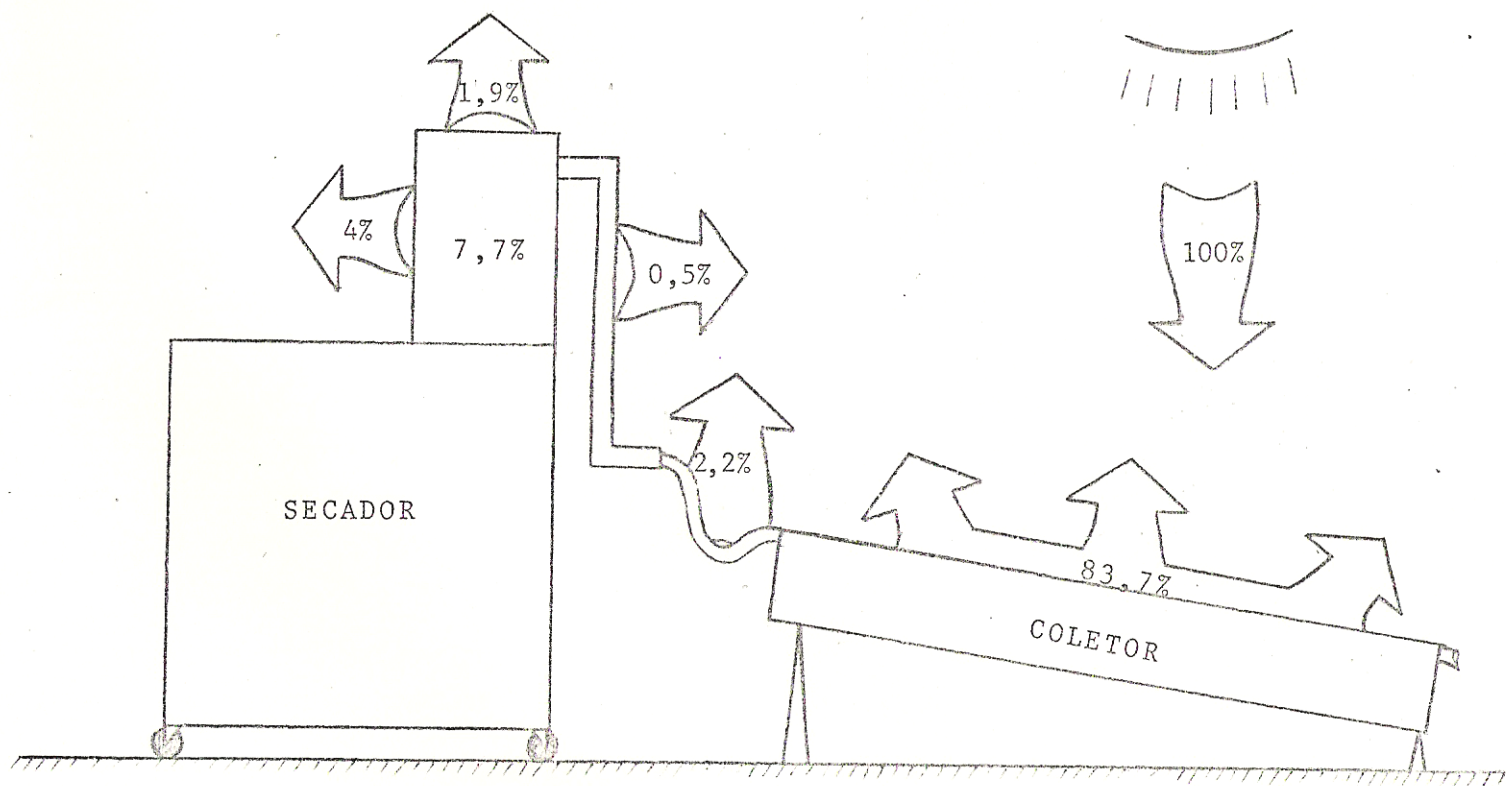
Um outro aspecto de extrema importância a ser considerado é a forma teórica utilizada para estimar a energia incidente sobre o coletor (ver Anexo 5). É muito provável que o valor obtido esteja sobrestimando a quantidade real de energia que incide sobre o coletor durante o período. O ideal seria a utilização de um heliógrafo, equipamento este não disponível quando do desenvolvimento do presente estudo. Observa-se

que a energia incidente foi menor do que aquela aqui adotada (baseado em cálculos teóricos), o valor do rendimento do sistema apresentado nos quadros 1a e 1b encontram-se subestimado.

De toda a energia térmica retirada do coletor, 47% pôde ser acumulada para alimentar o secador. Este valor, no entanto, foi obtido sob as condições de funcionamento do equipamento que mais favoreceu as trocas térmicas com o ambiente, haja visto que 41,2% da perda térmica do reservatório se deu por sua tampa como pode-se ver no anexo 4. Parte desta energia poderia ser conduzida para o interior do secador nas condições normais de funcionamento. Grande também foi a troca térmica com o meio ambiente, através da mangueira flexível, correspondendo a 80,6% de toda perda de energia do percurso entre o coletor e o reservatório. Entretanto, este ponto depende do funcionamento do resto do sistema, uma vez que a diferença entre a temperatura no interior da tubulação e a externa sempre será grande em dias de sol. Do ponto de vista da construção, este fato é indicativo de que o isolamento e a articulação devem ser aprimorados.

Esta baixa eficiência do coletor construído, associada às perdas térmicas, conferiu a todo sistema uma eficiência de 7,7%. Este valor, no entanto, não deve ser considerado como definitivo, pois o próprio trabalho evidencia pontos que devem ser aprimorados. Na Figura 13 é mostrado esquematicamente os pontos de perdas e acúmulo de energia do montante energético recebido pelo coletor expresso em percentual.

Figura 13.- DIAGRAMA ILUSTRANDO O BALANÇO ENERGÉTICO EXPRESSO EM PERCENTAGEM PARA O SISTEMA CONSTRUÍDO.



4.2. COMPORTAMENTO DO SECADOR

Os testes ininterruptos de secagem, previstos com o secador carregado de madeira, não foram realizados em decorrência da inconstância de dias com incidência direta de radiação solar em Curitiba nos anos de 1982 e 1983. Testes da operacionalidade completa do secador, bem como de sua viabilidade econômica, ficam na dependência de estudos complementares, preferencialmente conduzidos em regiões ensolaradas.

Quanto à construção do secador, no que diz respeito ao grau de isolamento térmico, a eficiência do trocador de calor e ao comportamento da temperatura e umidade relativa do ar em seu interior, há evidência que o sistema permite uma secagem totalmente controlada, com uma temperatura de secagem variando entre 30 e 58°C. Esta faixa de temperatura pode ser aumentada significativamente, tendo em vista que estes coletores podem atingir temperaturas de 250°C²⁹, necessitando porém de sistema pressurizado.

Como foram obtidos diversos gráficos durante os meses de janeiro e fevereiro de 1984, e os mesmos evidenciaram um comportamento regular do sistema instalado, utilizaram-se somente três gráficos para a demonstração destes resultados, considerados representativos de dias de céu descoberto e periodicamente incoberto.

Assim, os gráficos das Figuras 10, 11, 12 contêm as variações das condições no interior do secador antes e após ser acionado o sistema de aquecimento (circulação da água do reservatório pela micro-moto bomba através do trocador de calor e do ventilador).

O isolamento térmico das paredes do secador mostrou-se eficiente, uma vez que nenhum acúmulo significativo de energia foi detectado no seu interior durante o tempo em que somente o rastreamento solar foi mantido em funcionamento. Observou-se neste período que a temperatura no interior do secador, fornecida pelo bulbo seco, permaneceu entre 1 e 5°C acima da temperatura ambiente, enquanto que a temperatura na superfície superior externa do secador elevou-se acima de 45°C.

A eficiência do trocador de calor instalado no secador pôde ser avaliada no momento em que foi ligado o sistema de aquecimento. O Quadro 2 mostra o intervalo de tempo requerido para que se atingisse a temperatura máxima no interior do secador, a partir do momento em que o aquecimento foi ligado para os três gráficos apresentados, bem como as temperaturas iniciais e finais no interior do secador.

Comparando-se estes resultados com os valores máximos obtidos por Santini⁵² em seu secador tipo estufa, observa-se que a temperatura máxima atingida no interior deste secador foi 21,5°C menor. No entanto, neste sistema a temperatura é mantida constante com possibilidades de ser aumentada inclusive acima de 100°C, além do sistema permitir um completo controle da mesma, o que não é facilmente conseguido nos secadores do tipo estufa, face as flutuações apresentadas na temperatura no interior da câmara durante o dia e a noite.

O tempo médio necessário para que o secador atingisse sua temperatura máxima no dia foi de 10 minutos. Este valor evidencia a eficiência do sistema utilizado, uma vez que, para secagem convencional, os períodos de aquecimento normalmente

Quadro 2 - Intervalo de tempo para aquecimento do secador até a temperatura máxima, após ligado o aquecimento.

Itens	Temperatura Inicial (0°C)	Intervalo de Tempo (min)	Temperatura Final (0°C)
Dados do dia 21/02 (Figura 10)	40	10	57
Dados do dia 24/02 (Figura 11)	36	12	58,5
Dados do dia 20/02 (Figura 12)	34	08	54,5

recomendados ultrapassam 2 horas para madeira de 2,5 cm de espessura.

Como foi visto no capítulo 3, o controle da umidade relativa do ar tem um papel importante no decurso da secagem, e seu valor pode ser determinado conhecendo-se a temperatura de secagem e a temperatura do termômetro de bulbo úmido, através de tabelas psicométricas. Da mesma forma, sabendo-se a temperatura de secagem e a depressão do bulbo úmido, o teor de umidade de equilíbrio, ao qual a madeira está sujeita, fica determinado. Este valor é imprescindível para a execução de um programa de secagem orientado pelo potencial de secagem.

O Quadro 3 mostra as condições de secagem máxima conseguidas com o equipamento, para os gráficos representados nas Figuras 10, 11 e 12.

Os valores para os teores de umidade de equilíbrio

Quadro 3 - Valores para: temperatura do bulbo seco e úmido, depressão psicométrica, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio obtidos para as condições máximas de secagem oferecidas pelo sistema instalado.

Itens	Temperatura do bulbo seco (°C)	Temperatura do bulbo úmido (°C)	Depressão Psicométrica (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Teor de umidade de equilíbrio (%)
Dados do dia 20/02 (Figura 12)	56	43	13	46	7
Dados do dia 21/02 (Figura 10)	56	42	14	42	6,5
Dados do dia 24/02 (Figura 11)	58,5	42	16,5	39	6,0

apresentados no Quadro 3 evidenciam que o sistema construído possibilita secar a madeira a teores de umidade entre 6 e 7%, mesmo em dias de céu periodicamente incoberto por nuvens. Estes valores encontram-se abaixo de qualquer exigência quanto ao teor de umidade que a madeira deve apresentar quando em uso, sem comprometer sua estabilidade dimensional¹³. É inferior também ao valor do teor de umidade mínimo exigido para a madeira destinada à exportação.

Qualquer condição de temperatura e umidade relativa do ar, que confira teores de umidade de equilíbrio superiores a 7%, pode ser obtida utilizando-se um sistema simples de umidificação de fácil instalação, reduzindo-se a temperatura de secagem, ou mantendo-se a saída e a entrada de ar fechadas se conveniente for.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos com a construção do protótipo do coletor solar parabólico e do secador para madeira, bem como os testes realizados, evidenciaram as seguintes conclusões:

- 1) - As condições de máxima temperatura e depressão psicométrica atingida no interior do secador foram de 58,5°C e 16,5°C, respectivamente, o que corresponde a uma umidade de equilíbrio de 6%. Este teor de umidade de equilíbrio é considerado suficientemente baixo para a maioria dos secadores.
- 2) - Considerando-se que o fornecimento ou suprimento de calor para o interior do secador, é controlável, qualquer condição de secagem entre a máxima e a mínima mencionada no item 1, pode ser obtida facilmente.
- 3) - O tempo médio de 10 minutos requerido pelo trocador de calor para elevar a temperatura no interior do secador à condição máxima, evidencia a eficiência do trocador instalado, uma vez que, na secagem convencional, recomenda-se aquecer a carga de madeira lentamente.
- 4) - O coletor solar parabólico construído apresentou uma eficiência cerca de 50% da mínima encontrada na literatura para esta categoria de coletores. Este resultado pôde ser atribuído às perdas de refletividade pela superfície parabólica nas proximidades dos rebites, à má qualidade do polimento apresentado pela chapa de aço

inoxidável comercial utilizada, ao diâmetro reduzido do tubo absorvedor e a ausência de alto-vácuo na camisa de vidro e ao acoplamento não apropriado.

- 5) - O sistema de rastreamento solar desenvolvido manteve a região focal constantemente envolvendo o tubo absorvedor do coletor durante todo o período em que a radiação solar direta esteve presente, conferindo ao coletor às condições ótimas de captação de energia solar. No entanto, a eficiência do coletor, torna-se nula quando a radiação solar direta é encoberta por nuvens.
- 6) - A temperatura de 290°C registrada no interior do tubo absorvedor na ausência de água e da camisa de vidro evidencia que com um dimensionamento apropriado do equipamento o tempo de aquecimento do sistema pode ser reduzido, bem como maiores quantidades de energia podem ser acumuladas.
- 7) - A sistemática utilizada para os testes de eficiência do sistema e do secador foi a que mais favoreceu as perdas de energia térmica para o ambiente, contribuindo para a baixa eficiência apresentada pelo sistema.
- 8) - O isolamento térmico aplicado às paredes do secador manteve a temperatura em seu interior entre 1 e 5°C acima da temperatura ambiente, durante a fase estacionária de aquecimento, enquanto que a temperatura registrada em sua superfície externa excedeu a 45°C.
- 9) - O sistema de isolamento térmico da tubulação flexível que liga o absorvedor ao reservatório, foi responsável por 80,6% de toda a perda térmica registrada neste trecho.

- 10) - As variações imprevisíveis das condições climáticas encontradas na cidade de Curitiba, não favorecem a qualquer experimento que necessite de dias contínuos da radiação solar direta. Entretanto, a tecnologia do emprego de coletores solares parabólicos como fonte geradora de energia térmica, apresenta perspectivas promissoras às regiões brasileiras favorecidas com período contínuo maior de radiação solar direta.

Para a continuidade de pesquisa visando o aprimoramento deste sistema, recomenda-se:

- 1) - Avaliar os custos para a construção e implantação em escala industrial, a partir de protótipos que operem dentro da faixa de rendimento compatível do sistema. Este estudo deve ser precedido de levantamento das regiões brasileiras que com base em dados estatísticos indiquem elevada e contínua radiação solar direta.
- 2) - Elevar a refletividade da chapa de aço inoxidável através de polimento aprimorado ou substituí-la por materiais mais refletivos de alta durabilidade.
- 3) - Fixar a superfície refletora parabólica ao quadro do coletor sem que se produza ondulações. Isto pode ser obtido através da fixação de uma peça perfilada em forma de L ao longo da lateral do quadro, de maneira que a parte menor funcione como garra da superfície refletora.
- 4) - Dimensionar melhor o diâmetro do tubo absorvedor, de maneira que toda região focal incida sobre o mesmo

- 5) - Aprimorar o grau de isolamento térmico das mangueiras flexíveis.
- 6) - Eliminar qualquer folga no sistema de rotação do coletor. Utilizar um motor redutor robusto que suporte a pressão provocada pelo vento.
- 7) - Maximizar o funcionamento periódico do sistema de rastreamento solar, reduzindo-se o intervalo de tempo no qual a superfície parabólica permanece parada entre duas posições consecutivas.
- 8) - Substituir o movimento de convecção natural da água por convecção forçada.
- 9) - Utilizar um piranômetro para uma estimativa precisa da energia solar incidente sobre o coletor

SUMMARY

This study was concerned to concept, to project and to built a parabolic solar collector as a generating source of termical energy to the conventional drying of wood, jointed to a drying camara and to evaluate its efficiency.

In this sense, prototypes of a solar collector and a conventional dry kiln were built. The collector with linear focus, was provided with a solar photoelectric tracking system. The dry kiln had semiautomatic control of temperature and a capacity to dry 0,3 m³ of wood. All the steps of the construction of the system are presented with details.

The tests made with the equipment pointed out few possibilities of utilizing this system in regions which are less favored with direct solar radiation for example in Curitiba nevertheless, better results must be obtained in other places with more insolation.

The maximum conditions of temperature re and psicometric depression were obtained during clear sky days with 58.5°C and 17.5°C respectively, conducting to equilibrium moisture content of 6%.

The termical efficiency obtained for the collector

was lower than the expected for this model nevertheless, it was detected the points that should be improved in order to maximize the efficiency of the equipment.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ALVARES, S.G. et alu. Aspectos térmicos necessários ao projeto de Concentradores Parabólicos Compostos. In: Anais do II Simpósio sobre Energia Solar. Academia de Ciências do Estado de São Paulo: -371, 1981 (Publicação ACIESP nº 28).
- 2 - ANGSTRON, A. Solar and terrestrial radiation. In: Quart. J. Roy. Soc. 50: 121-5, 1924.
- 3 - ANONIMO. Sun's rays harnessed to dry lumber. In: Southern Lumberman. 201 (2511), 1960. 32 pp.
- 4 - BOIS, P.J. Constructing and operating a small solar heated Lumber dryer. In: Nat. Woodlands Mag. 1(5): 5-10, 1978.
- 5 - CASIN, R.F. Solar dryer for Lumber. Laguna-Philippines. Forest Products Research Institute, 1967. (Technical Note 76).
- 6 - CASIN, R.F.; ORDINÁRIO, E.B. & TAMYO, G.Y. Solar drying of opitong, Narra, Red Lavan and Tangile. Forest Products Research Institute. University of the Philippines-Laguna. Wood Preservation Report 4(1), 1969. 15 pp.
- 7 - CHEN, P.Y.S. Design and tests of a 500 BF Solar Kiln. In: Forest Prod. J. 3(31): 33-37, 1981.

- 8 - CHUDNOFF, M.; MALDONADO, E.D. & GOYTIA, E. Solar drying of Tropical Hardwoods Institute of Tropical Forestry. Rio Piedras-Porto Rico, 1966. (Research Paper · ITF-2). 25 pp.
- 9 - COMETA, E. Energia Solar; Utilização e empregos práticos. São Paulo, Hemus, 1978. 128 pp.
- 10 - CUPPETT, D.G. & CRAFT, E.P. Low Temperature Forced - Air drying of Appalachian Hardwoods. U.S. Dept. Agriculture, Forest Service Res. NE-328, 1975. 10 pp.
- 11 - CUPPETT, D.G. Use of solar energy in drying Lumber. In: Proceedings of Pratical application of solar energy to wood processing. A Workshop at Virginia Polytechnic Institute and State University. Forest Products Research Society. Madison. WI: 62-64, 1977.
- 12 - FARINHAQUE, R. Energia Solar. Para Secagem de Madeira. In: Boletim Informativo, São Bento do Sul, 5(4): 6-11, 1981.
- 13 - GALVÃO, A.P.M. Estimativa da unidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. In: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Piracicaba. (11): 53-65, 1975.
- 14 - GHAI, M.L. Seasoning of Timber with Solar Energy. Madison, Univ. of Wisconsin Press, 1955.
- 15 - GOUGH, D.K. The design and operation of a Solar Timber Kiln. Fiji Timber-and their uses, Dept. of Forestry, 1977. (Suva nº 67). 17 pp.

- 16 - GOUGH, D.K. Timber seasoning in a solar kiln. In: Division V Conference of IUFRO. Wood Drying Working Party. Oxford, England: 97-105, 1980.
- 17 - HALL, G.S.; HOOKS, R.A. & PLUMRIDGE, R.J. The art of Timber Drying with Solar Kilns. Unido ID/WG. 338/1, 1981.
- 18 - HANSON, J.K. The radiation effectiveness of plastic films for Green-house. In: Jour. Appl. Meteor. 2(7): 793-7, 1963.
- 19 - HART, C.A. The drying of wood. Releigh, North Carolina Agriculture Extension Service, 1966. 24 pp.
- 20 - HILDEBRAND, R. Kiln drying of saw Timber. Maschinenbau Gimbh, 1970. 198 pp.
- 21 - HOCH, O.S. Solar kiln for Timber Seasoning. In: Timber Trade Review. 7(1): 29-32, 1978.
- 22 - JOHNSON, C.L. Wind - powered solar - heated Lumber dryer. In: Southern Lumberman, 203(2352): 41-44, 1961.
- 23 - JOHNSON, J.A. The removal of water from wood. Practical application of Solar Energy to wood Processing. In: A workshop at Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg. Virginia, Forest Products Research Society. Madison WI., 1977.
- 24 - KLAMECKI, B.E. Utilizing Solar Energy in the Forest Products. In: Forest Prod. J. 28(1): 14-20, 1977.
- 25 - KININMONTH, J.A.; MILLER, W. & RILEY, S. Energy Consumption in wood drying. Wood drying paper presented at the IUFRO Division V Conference. Oxford - England - Forest

Research Institute. New Zeland Forest Service, 1980.

- 26 - KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ Jr, W.A. Principles of wood science and technology. New York, Springer V.I., 1968. 592 pp.
- 27 - KUMAR, S. Utilization of Solar Energy in India. In: Forest Prod. J. 31(9): 10-12, 1981.
- 28 - LIMA, L. de R. Elementos de Engenharia Química. Universidade do Paraná. Instituto de Pesquisas Químicas, 1961. (monografia didatica nº 3). 287 pp.
- 29 - LIMA, W. de. O desenvolvimento tecnológico dos coletores de energia solar. In: Anais do II Simpósio sobre Energia Solar. Academia de Ciências do Estado de São Paulo: 15-36, 1981 (Publicação ACIESP nº 28).
- 30 - LITTLE, R.L. New energy for old kilns. In: Wood & Wood Prod. 83(3): 69-70, 1978.
- 31 - LITTLE, R.L. Ongoing Research...Solar heated water dries Lumber. In: Forest Prod. J. 29(2): 52-53, 1979. (TN-386).
- 32 - LUMLEY, T.G. & CHOONG, E.T. Technical and Economic Characteristics of Solar Kiln designs. In: Forest Prod. J. 29(7): 49-56 (5935), 1979.
- 33 - MALDONADO, E.D. Solar radiation used to dry Mahogany Lumber in Porto Rico. Tropical Forest Notes. Institute of Tropical Forestry, Rio Piedras, Puerto Rico, 1961. 5 pp.
- 34 - MALDONADO, E.D. & PECK, E.C. Drying by solar radiation in Puerto Rico. In: Forest Prod. J. 12(10): 487-488, 1962.

- 35 - MARTAWIJAYA, A.; KADIR, K. & SALIHI, R. Solar drying of Jeungjing (Albizia falcata Back) and Rubber wood (Hevea brasiliensis Muell Arg.). Forest Products Research Inst. Bogor. Indonesia. 1976. (Report nº 60). 12 pp.
- 36 - MARTINS, J.M. & GOLDEMBERG, J. Descrição e operação de um Laboratório de Testes de Coletores Solares. In: Anais do II Simpósio sobre Energia Solar. Academia de Ciências do Estado de São Paulo: 371, 1981 (Publicação ACIESP nº 28).
- 37 - McCORMICK, P.O. & ROBERTSON, S.J. Solar industrial process heat for kiln Lumber. A workshop at Virginia Polytechnic Institute and State University Blackburg. Madison, Forest Products Research Society, 1977.
- 38 - MENDES, A.de S.; SOUZA, M.R. de & TOMASELLI, I. Estudo da utilização de um sistema fotossensível no controle da temperatura e da umidade relativa do ar. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais, 1983. (DE-Série técnica nº 7).
- 39 - MUELLER, L.A. Solar Lumber drying in the Central Rocky Mountain Region. In: Forest Prod. J. 1(18): 19-24, 1968.
- 40 - NIRENBERG, M. Atividades solarimétricas do Instituto Nacional de Meteorologia. In: Anais do II Simpósio sobre Energia Solar. Academia de Ciências do Estado de São Paulo: 112-131. 1981 (Publicação ACIESP nº 28).
- 41 - OLIVEIRA, L.C. de S.; SKAAR, C. & WENGERT, E.M. Solar and air Lumber drying during winter in Virginia. In: Forest Prod. J. 32(1): 37-44, 1982.

- 42 - PANSHIN, A.J. & ZEEUW, C. de. Textbook of wood Technology. Fourth Edition. MacGraw - Hill, 1980. (series in Forest Researchs). 722 pp.
43. - PECK, E.C. Drying 4/4 red dak by solar heat. In: Forest Prod. J. 12(3): 103-107, 1962.
- 44 - PEREIRA, A.R. et alu. Radiação solar diária sem considerar os efeitos da atmosfera. Caderno de Ciências da Terra: (10). IG-USP, 1971.
- 45 - PLUMPTRE, R.A. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the Equador in Uganda. In: Commonwealth Forestry Review 46(4): 208-409, 1967.
- 46 - RASNUSSEN, E.F. Dry Kiln - Operator's Manual Agriculture Handbook nº 188. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin. Forest Service, U.S. Departament of Agriculture, 1980. 197 pp.
- 47 - READ, W.R.W.; CHODA, A. & COOPER, P.I. A solar timber kiln in "The Sun in the Service of Mankind" International Congress, Paris. Commonwealth of Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. 28(1), 1973. 10 pp.
- 48 - REHMAN, M.A. & CHAWLA, O.P. Seasoning of Timber using Solar Energy. In: Indian Forest Bulletin. (229), 1961.
- 49 - ROBERTSON, S.J. & MERRIFIELD, D.V. Solar heated lumber dry kiln. Lockheed-Huntsville Research and Engineering Center. In: Proceedings of Solar Industry Heating Procen Conference. Huntsville, 51-61, 1978. (Seri/TP-49-065).

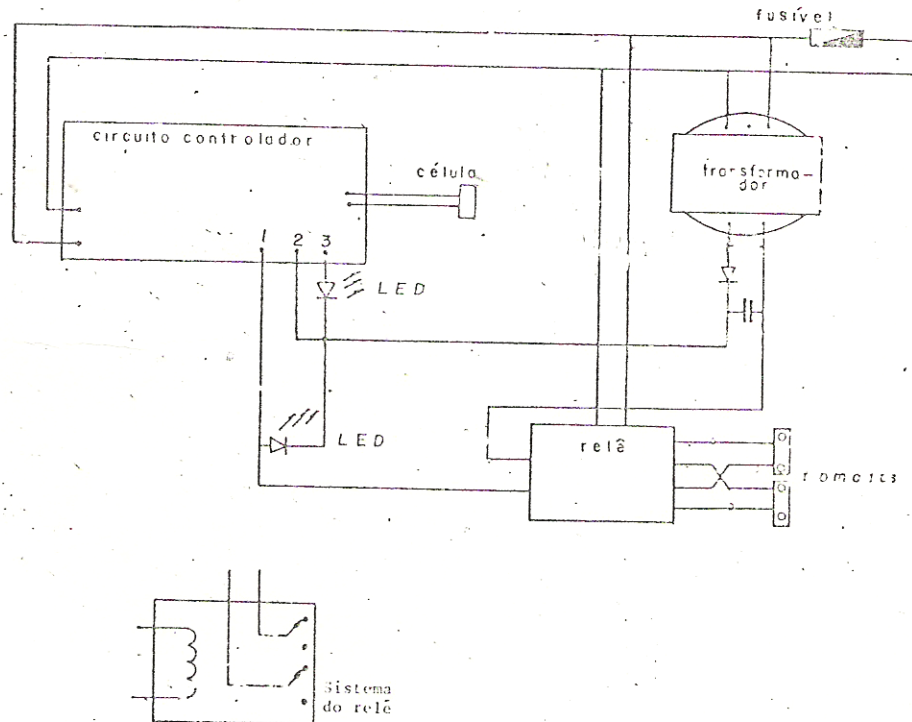
- 50 - ROSEN, H.N. Drying process for the year 2000. In: Proceedings XVII IUFRO World Congress, Division 5, Japão: 183-196, 1981.
- 51 - RYLEY, T. Solar timber kiln. Australian Forest Industries Jnl. (Jan): 25-6, 1980.
- 52 - SANTINI, E.J. Secagem de Madeira Serrada em Estufa Solar e sua Comparação com os Métodos Convencionais. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, 1981. 185 pp.
- 53 - SHARMA, S.N.; NATH, P. & BALI, B.I. A Solar Timber Seasoning Kiln. Jour of Timb. Dev. Assoc. of India: 17(2), 1972.
- 54 - SHARMA, S.N. Solar Timber Drying. In: Seminar on Industrial Application os Solar Energy. Madras Proceeding, 1975. 6 pp.
- 55 - SIAU, J.F. Flow in wood. Syracuse wood Science Series, 1. Syracuse University Press, 1971. 131 pp.
- 56 - SIMPSON, W.T. & TSCHERNITZ, J.L. Solar dry kiln for tropical latitudes. In: Forest. Prod. J. 34(5): 25-34, 1984.
- 57 - SINGH, Y. Studies on a solar timber seasoning kiln. Indian Plywood Industries Research Institute Jnl. 6(1):42-4, 1976.
- 58 - SKAAR, C. Water in wood. Syracuse University Press, 1971. 218 pp.
- 59 - SKAAR, C. Energy requirements for drying lumber. In: Pratical application of solar energy to wood processing. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg.

- VA. Forest Products Research Society, Madison WI, 1977.
85 pp.
- 60 - SUDAN/I.P.T. Estudos sobre métodos de Secagem de Madeiras da Amazônia. Belém, SUDAM, 1981. 77 pp.
- 61 - SUN, Z.L. Experiment on air seasoning and kiln drying of an important hardwood. In: Bulletin of Taiwan Forest Research Institute, 1966. 140 pp.
- 62 - TOMASELLI, I. Secagem de Madeira. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1979. 25 pp.
- 63 - TROXELL, H.E. & MUELLER, L.A. Solar lumber drying in Central Rocky Mountain Region. In: Forest Prod. J. 18(1): 19-24, 1968.
- 64 - TSCHERNITZ, J.A. & SIMPSON, W.T. Solar-Heating, Forced-Air, dryer for tropical latitudes. Madison. Forest Products Laboratory, US Department of Agriculture, WI 53705 Solar Energy, v. 22: 563-6, 1979.
- 65 - UNESCO/IHP. Working group 6. Predicting effects of Power Plant once - Through cooling on aquatic system, 1981.~
- 66 - VITAL, B.R. & COLLOM, J.L. Secador solar para madeira. Univ. Federal de Viçosa. Viçosa-MG. Imprensa Universitária, 1974.
- 67 - WELFORD, W. The optics of nonimaging concentrators. In: Academic Press Inc. New York, 200, 1978.
- 68 - WENGERT, E.M. Improvements in solar dry kiln design. In: USDA. Forest Services Res., 1961 (Note.F.P.L. 0212). 10 pp.

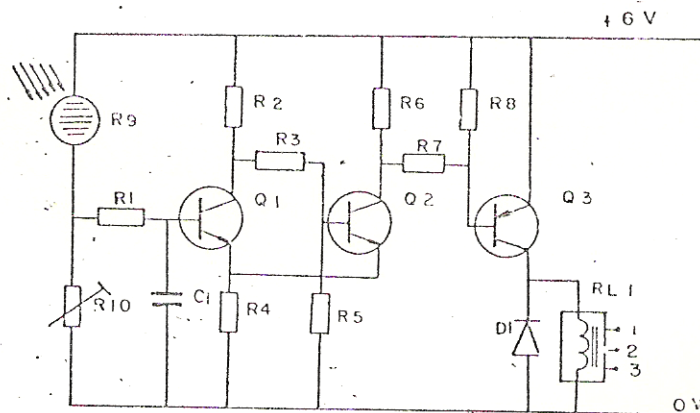
- 69 - WENGERT, E.M. Improvements in solar dry kiln design. In:
U.S.D.A. Forest Serv. Forest Products Lab. Madison, 1971.
(Note FPL-0228). 10 pp.
- 70 - WENGERT, E.M. Solar heated lumber dryer for the small
business. Virginia Cooperative Extension Service. 1980.
(M.T. n^o 20C). 16 pp.
- 71 - WENGERT, G. Solar energy for drying wood. In: Southern
Lbrman 233(2890): 13, 1976.
- 72 - WHALEY, S.R. Solar kiln drying. In: Extension Review/Winter,
1982.
- 73 - YANG, K.C. Solar kiln performance at a high latitude,
48^oN. In: Forest Prod. J. 30(3): 37-40, 1980.

ANEXO 1 - Circuito Geral da Unidade de Rastreamento*

1. Sistema Geral de Montagem**



2. Esquema do Circuito Controlador



R1 = 3K3	R9 = L.D.R. (célula)	RL1 relê 6V, 300
R2 = 2K7	R10 = 150 K	ohm
R3 = 2K7	C1 = 15 uF x 30V (capacitor)	
R4 = 820 ohm	Q1 = BC 548 (transistor)	
R5 = 18 K	Q2 = BC 548, (transistor)	
R6 = 2K7	Q3 = BC 558 (transistor)	
R7 = 680 ohm	D1 = BY127 (diodo)	
R8 = 470 ohm		

* Referência ³⁸

** O circuito eletrônico referente a inversão de rotação do motor não foi cedido pela firma contratada. (Digisystem Curitiba).

ANEXO 2

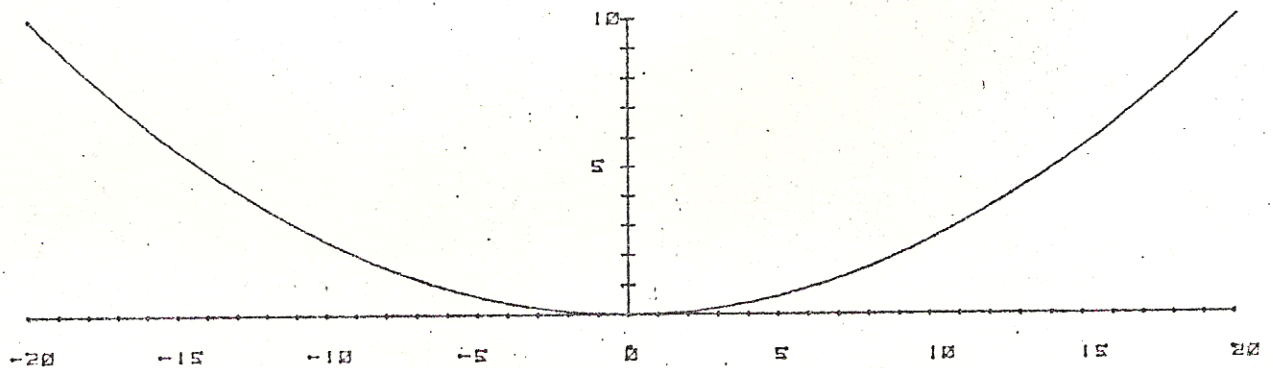
Programa de Computação utilizado para a Obtenção da Curva do Perfil Parabólico.

```

10 REM PROG. STD. P/ "PLOTTER" DE Y=F(X)
20 DIM E(250,2)
30 REM ENTRADA DE DADOS-----
40 DISP "MENOR VALOR X, MAIOR VALOR X"
50 INPUT X9,X8
60 REM PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DO "PLOTTER"-----
70 DISP "XMIN, XMAX, YMIN, YMAX DOS EIXOS"
80 INPUT X1,X2,Y1,Y2
90 X0=1
100 Y0=1
110 SCALE X1-2*X0,X2+X0,Y1-2*Y0,Y2+Y0
120 XAXIS 0,50,X1,X2
130 YAXIS 0,Y0,Y1,Y2
140 FOR I=X1 TO X2 STEP 5
150 PLOT I-0.9,Y1-1.5*Y0,-1
160 LABEL (*,2.5,1.7,0,0.5)I
170 NEXT I
180 FOR J=5 TO Y2 STEP 5
190 PLOT -1.7*X0,J-Y0/8,-1
200 LABEL (*,2.5,1.7,0,0.5)J
210 NEXT J
220 FOR X=X8 TO X9+X0/8 STEP X0/10
230 PLOT X,X^2/40
240 NEXT X
250 PEN
260 END

```

Figura 14 - Curva reduzida do perfil parabólico plotada por computador



ANEXO 3

Características Físicas* da Espuma de Poliuretano

Quadro 4 - Características Físicas da Espuma de Poliuretano

ITENS	VALORES
Tempo de Creme	30 a 40 s
Tempo de Fixação	90 a 110 s
Tempo de Crescimento	140 a 160 s
Tempo de Pega Livre	160 a 190 s
Densidade	30 Kg/m ³
Resistência a Compressão (10% de flexão)	1,96 a 2,3 Kg/cm ²
Células Fechadas	93 a 95%
Fator K de Condutibilidade de Térmica	0,015 $\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^{\circ}\text{C}}$
Resistência à Chama (ASTM) 1692/68	Alto extingüível

* - Dados fornecidos pelo fabricante.

ANEXO 4

Potência Térmica Média retirada do Coletor.

1. Símbolos e abreviações:

r_m = raio médio (mm)

r_1 = raio interno da tubulação (mm)

r_2 = raio externo da tubulação (mm)

r_3 = raio externo do revestimento (mm)

t_1 = temperatura interna (°C)

t_2 = temperatura externa (°C)

R = resistência térmica $\frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$

R_T = resistência térmica total $\frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$

q = quantidade de calor transmitida (Kcal/mh)

K_1 = condutividade térmica do cobre $\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$

K_2 = condutividade térmica do amianto $\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$

K_3 = condutividade térmica da espuma de poliuretano $\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$

R_1 = resistência térmica do cano de cobre $\frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$

R_2 = resistência térmica da camada de espuma $\frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$

R_3 = resistência térmica da camada de amianto $\frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$

L = espessura da camada de isolamento térmico (cm)

A = área da superfície isolada (cm²)

m = massa (g)

- Tf = temperatura final (°C)
 Ti = temperatura inicial
 Q = calor acumulado por hora (Kcal/h)
 T = tempo
 c = calor específico (cal/g°C)

2. Cálculo da energia dissipada através da tubulação superior que liga o coletor ao reservatório de água.

- Constituição da tubulação = 50 cm de mangueira em plástico de 2 cm de diâmetro isolada com uma camada de 1 cm de fita de amianto e 122 cm de cano de cobre de 2 cm de diâmetro com 1,5 mm de espessura, isolado com espuma de poliuretano de 1,5 cm de espessura.
- Tabela 1 - Condutividade térmica (K) dos materiais empregados.

	Temperatura (°C)	K = $\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$
Cobre	93,3	326
Amianto	93,0	0,164
Espuma de Poliuretano	-	0,015

c) Equações utilizadas (28).

$$a) \quad r_m = \frac{r_2 - r_1}{2,303 \log \frac{r_2}{r_1}}$$

$$b) R = \frac{2,303 \log \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot K \cdot l} \quad \text{ou} \quad R = \frac{r_2 - r_1}{2\pi \cdot K \cdot r_m}$$

$$c) RT = R_1 + R_2$$

$$d) q = \frac{\Delta t}{RT}$$

2.1. Cálculo da energia dissipada por hora no trecho isolado por espuma de poliuretano.

a) Dados

$$r_1 = 10 \text{ mm}$$

$$r_2 = 11 \text{ mm}$$

$$r_3 = 26 \text{ mm}$$

$$t_1 = 30^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 96,5^\circ\text{C}$$

$$K_1 = 326 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$K_3 = 0,015 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$$

b) Cálculo do raio médio da tubulação de cobre (r_m)

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{2,303 \log \frac{r_2}{r_1}} = \frac{11 - 10}{2,303 \log \frac{11}{10}} = 10,49 \text{ mm}$$

c) Cálculo do raio médio da camada isolante de espuma (r_m)

$$r_m = \frac{r_3 - r_2}{2,303 \log \frac{r_3}{r_2}} = \frac{26 - 11}{2,303 \log \frac{26}{11}} = 17,43 \text{ mm}$$

d) Cálculo da resistência térmica do cano de cobre (R_1)

$$R_1 = \frac{r_2 - r_1}{2\pi \cdot K_1 \cdot l \cdot r_m} = \frac{11 - 10}{2\pi \cdot 326 \cdot l \cdot 10,49} = 4,65 \times 10^{-5} \frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

e) Cálculo da resistência térmica da camada isolante da espuma de poliuretano (R_2)

$$R_2 = \frac{r_3 - r_2}{2\pi \cdot K_3 \cdot l \cdot r_m^2} = \frac{26 - 11}{2\pi \cdot 0,015 \cdot 1 \cdot 17,43} = 9,12 \frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

f) Cálculo da resistência térmica total (RT)

$$RT = R_1 + R_2 = 4,65 \times 10^{-5} + 9,12 = 9,12 \frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

A resistência térmica do cano de cobre foi desprezada por ser mínima.

g) Cálculo do calor transmitido (q)

$$q = \frac{t_2 - t_1}{RT} = \frac{96,5 - 30}{9,12} = 7,3 \text{ Kcal/mh}$$

h) Energia dissipada por hora no trecho isolado por espuma de poliuretano.

$$q \times \text{comprimento da parte isolada} = 7,3 \frac{\text{Kcal}}{\text{mh}} \times 1,22 \text{ m} = 8,9 \text{ Kcal/h}$$

2.2. Cálculo da energia dissipada no trecho isolado por fita de amianto.

a) Dados

$$r_1 = 10 \text{ mm}$$

$$r_3 = 25 \text{ mm}$$

$$K_2 = 0,164 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$$

A resistência térmica da espuma da mangueira plástica foi desprezada, por ser mínima.

b) Cálculo do raio médio da camada isolante de amianto (rm_3)

$$rm_3 = \frac{r_3 - r_1}{2,303 \log \frac{r_3}{r_1}} = \frac{25 - 10}{2,303 \log \frac{25}{10}} = 16,37 \text{ mm}$$

c) Cálculo da resistência térmica total da camada isolante de amianto (RT)

$$RT = \frac{r_3 - r_1}{2\pi \cdot K_2 \cdot l \cdot rm_3} = \frac{25 - 10}{2\pi \cdot 0,164 \cdot 1 \cdot 16,37} = 0,9 \frac{\text{mh}^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

d) Cálculo do calor transmitido (q)

$$q = \frac{t_2 - t_1}{RT} = \frac{96,5 - 30}{0,9} = 73,9$$

e) Energia dissipada por hora no trecho isolado por fita de amianto

$$q \times \text{comprimento da parte isolada} = 73,9 \frac{\text{Kcal}}{\text{m/h}} \times 0,5 \text{ m} = 37 \text{ Kcal/h}$$

3. Cálculo da energia média dissipada por hora pelas paredes do reservatório.

a) Dados:

Medidas internas do reservatório = 30x20x24 cm

L = 12 cm

$t_1^* = 56^\circ\text{C}$

$t_2 = 33^\circ\text{C}$

$K_3 = 0,015 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$

*: temperatura média da água do reservatório às 12:00 h.

Fornecido pela Figura 11.

b) Fôrmla empregada

$$q = \frac{K_3 \cdot A \cdot (t_1 - t_2)}{L}$$

3.1. Energia média dissipada por hora pelas duas laterais menores do reservatório de água (q_1)

$$q_1 = \frac{0,015 \cdot 20 \cdot 24 \cdot (56 - 33) \cdot 2}{12} = 27,6 \text{ Kcal/h}$$

3.2. Energia média dissipada por hora pelas duas laterais maiores do reservatório de água (q_2)

$$q_2 = \frac{0,015 \cdot 30 \cdot 24 \cdot (56 - 33) \cdot 2}{12} = 41,4 \text{ Kcal/h}$$

3.3. Energia média dissipada por hora pela parte superior do reservatório de água (q_3)

$t_1 = 75^\circ\text{C}$ (temperatura média da parte superior incluindo a primeira hora de funcionamento)

$$q_3 = \frac{0,015 \cdot 30 \cdot 20 \cdot (75 - 33)}{12} = 31,5 \text{ Kcal/h}$$

3.4. Energia média total dissipada por hora pelas paredes do reservatório (q_T)

$$q_T = q_1 + q_2 + q_3 = 27,6 + 41,4 + 31,5 = 100,5 \text{ Kcal/h}$$

4. Cálculo da energia média acumulada na água do reservatório

a) Dados: (gráfico da Figura 12)

$$m_{\text{água}} = 14000 \text{ g}$$

$$t_{f_{\text{água}}} = 80^\circ\text{C}$$

$$t_{i_{\text{água}}} = 29^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$$

$$T = 5,5\text{h}$$

b) Fórmula empregada

$$Q = m.c. (t_f - t_i)/T$$

4.1. Energia acumulada na água do reservatório.

$$Q = \frac{14000 \cdot 1 \cdot (80-29)}{5,5} = 129,9 \text{ Kcal/h}$$

Quadro 5 - Resumo da Potência Térmica Obtida do Coletor

ITEM	SIGNIFICADO	Kcal/h
2.1.h	Energia dissipada entre o coletor e o reservatório através da tubulação isolada com espuma de poliuretano	8,9
2.2.e	Energia dissipada entre o coletor e o reservatório através da mangueira flexível isolada com fita de amianto	37,0
3.1.	Energia média dissipada pelas paredes laterais menores	27,6
3.2	Energia média dissipada pelas paredes laterais maiores	41,4
3.3	Energia média dissipada pela tampa	31,5
4.1	Energia média acumulada na água do reservatório	129,9
TOTAL		276,3

ANEXO 5

Estimativa teórica da Potência Solar Incidente por Unidade de Área do Coletor.

A estimativa do fluxo de radiação solar global (soma da radiação direta e da difusa) que atinge uma superfície horizontal pode ser obtida pela equação $Q = Q_0 \left(a + \frac{bn}{N} \right)$, onde: Q é a radiação global expressa em $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$; Q_0 é o fluxo de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre (valor determinado astronômicamente e que depende da latitude geográfica e da declinação solar); n é o número de horas de brilho solar, medido pelo heliôgrafo; N é o número máximo de horas de duração do brilho solar, determinado em função da latitude e da declinação solar e, a e b são constantes empíricas determinadas para cada localidade².

Para valores mensais, esta estimativa fornece uma aproximação menor ou igual a 15% do valor real da radiação global⁶⁵.

Os valores das constantes a e b , utilizados nos cálculos a seguir, foram obtidos da literatura⁴⁰ os quais para a cidade de Curitiba foram 0,23 e 0,56, respectivamente para o dia 24/02/1984.

O valor de N , poderia ter sido obtido em tabelas⁴⁴ entretanto, como durante todo o período do dia em que foi realizada a coleta dos dados houve brilho solar, a relação $\frac{n}{N}$ torna-se igual a 1.

O valor de Q_0 para o dia 24/02/1984 foi determinado através da integração dos valores da Tabela 2, obtidos de de-

terminações teóricas para a latitude de 25°S.

Tabela 2 - Valores de Q_0 para o dia 24/02/1984

Hora (t_i)	Intervalo (i)	Valor de Q_0 -25°S (cal cm ² /min) $f(t_i)$
09:00	1	1,41
09:30	2	1,57
10:00	3	1,70
10:30	4	1,81
11:00	5	1,88
11:30	6	1,93
12:00	7	1,94
12:30	8	1,93
13:00	9	1,88
13:30	10	1,81
14:00	11	1,70
14:30	12	1,57

Adaptada de ⁴⁴

$$Q_0 = \int_{9:00}^{14:30} f(t) dt \approx \sum_{i=1}^{12} f(t_i) \Delta t_i = 589.2 \text{ cal/cm}^2 \text{ em 5,5 horas.}$$

onde $Q_0 = 1,79 \text{ cal/cm}^2 \text{min.}$

Estimando-se a radiação global solar média Q , incidente em Curitiba no dia 24/02/1984, tem-se

$$Q = Q_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) = 1.79 (0,23 + 0,56.1) = 1,41 \text{ cal/cm}^2 \text{min}$$

Assim, o valor estimado para a radiação média que in

cidou na superfície de área A ($A = 20000 \text{ cm}^2$) do coletor, por hora fica determinado por:

$$Q = 1,41.20000 \times 60 = 1697 \text{ Kcal/h.}$$