

MARIA JULITA GUERRA FERREIRA

INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Energia, da Universidade de
São Paulo, para obtenção de
título de Mestre em Energia.

Orientador:
Adnei Melges de Andrade

620.92

F383i

D-PIPGE/USP

e.2

São Paulo

1993



AGRADECIMENTOS

Pelo senso de justiça, essa parte da dissertação deveria ser o seu capítulo mais longo, mas temo que a memória vá me trair mais uma vez.

Alguns nomes jamais serão esquecidos, mas não sei se o seu registro nesse trabalho seria, para essas pessoas, um motivo de orgulho ou um constrangimento.

Por esses motivos (e que por isso não me queiram mal), agradeço a todos: amigos, colegas, companheiros de trabalho, familiares, professores, brasileiros e brasileiras, sonhadores de todas as nacionalidades, tribos, raças, etnias, credos e ideologias.

Para que não pensem que desperdiçaram o seu tempo em vão, é preciso que saibam que a esse trabalho foi dedicado um esforço sincero.

As idéias aqui expostas são de minha total responsabilidade, assim como as tentativas, às vezes frustradas, de uma irreverência casual.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas
Lista de Figuras

RESUMO
ABSTRACT

INTRODUÇÃO.....	01
1. ENERGIA SOLAR.....	03
1.1. O que é a energia solar.....	04
1.2. Formas de utilização.....	10
1.2.1. Energia solar fototérmica.....	10
1.2.2. Arquitetura bioclimática.....	15
1.2.3. Termoeletricidade e outras aplicações.....	19
1.2.4. Energia solar fotovoltaica.....	22
2. CONVERSÃO FOTOVOLTAICA DA ENERGIA SOLAR.....	24
2.1. Conversão fotovoltaica.....	25
2.2. Breve histórico.....	37
2.2.1. No mundo.....	37
2.2.2. No Brasil.....	49
3. DADOS SOLARIMÉTRICOS E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	57
3.1. Características da rede de obtenção de dados no Brasil.....	58
3.2. Dados e estimativas utilizadas.....	66
3.3. Desempenho energético de um módulo fotovoltaico nas diferentes regiões do país.....	71
3.3.1. Comparação com valores internacionais.....	76
4. DESENVOLVIMENTO DO MERCADO NO BRASIL.....	78
4.1. Algumas reflexões sobre a inserção de novas tecnologias.....	79
4.2. Tipos de aplicação feitas no mundo.....	83
4.2.1. Geração centralizada.....	83
4.2.2. Usos extensivos.....	85
4.2.3. Usos localizados.....	86
4.3. Usuários e possíveis usuários no Brasil.....	88
4.3.1. As Companhias de Energia.....	89
4.3.2. A experiência da CESP.....	92
4.3.3. Possíveis usuários.....	102
4.4. Motivações para expansão do número de projetos.....	106
4.4.1. Motivações econômicas.....	106
4.4.2. Outras motivações.....	112
5. CONCLUSÕES.....	114
RELAÇÃO de ANEXOS.....	117
Anexo A.....	118
Anexo B.....	128
Anexo C.....	139
Anexo D.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Potência instalada de células solares em veículos espaciais.....	46
Tabela 2	- Evolução e projeção de preços das células solares (US\$/Wp), para quantidades de dezenas de kWp.....	47
Tabela 3	- Localização das 20 estações da Rede Solarimétrica Nacional.....	59
Tabela 4	- Número de heliógrafos e actinógrafos existentes em cada Estado.....	64
Tabela 5	- Médias anuais para valores de radiação solar máxima, média e mínima em cada região.....	68
Tabela 6	- Médias regionais para valores de insolação máxima, média e mínima previstas por ano.....	70
Tabela 7	- Dados solarimétricos médios para a região Norte.....	71
Tabela 8	- Energia disponível e valores obtidos para a energia útil fornecida por um módulo fotovoltaico, nas diferentes regiões do país.....	73
Tabela 9	- Tempo de amortização energética e relação entre a energia consumida na fabricação de um módulo e a energia por ele fornecida em 20 anos de vida útil.....	73
Tabela 10	- Principais centrais fotovoltaicas interligadas com a rede.....	84
Tabela 11	- Postos de Saúde do Vale do Ribeira.....	94
Tabela 12	- Necessidades energéticas da Estação Ecológica Juréia-Itatins.....	100
Tabela 13	- Estimativas sobre a economicidade de módulos fotovoltaicos comerciais, um exemplo.....	128
Tabela 14	- Características do módulo fotovoltaico HM 37C/12.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura esquemática do Sol.....	06
Figura 2 - Esquema da relação geométrica entre o Sol e a Terra.....	06
Figura 3 - Distribuição espectral da radiação solar.....	07
Figura 4 - Variação da radiação solar extraterrestre, durante os meses do ano.....	08
Figura 5 - Esquema de coletores solares planos.....	11
Figura 6 - Esquema de aprisionamento da radiação infravermelha, efeito estufa.....	12
Figura 7 - Bandas de energia de um semicondutor, à temperatura de 0 K.....	25
Figura 8 - Bandas de energia e populações de portadores, a uma temperatura finita.....	26
Figura 9 - Representação cristalina de materiais <i>n</i> e <i>p</i>	28
Figura 10 - Representação das bandas energéticas nos semicondutores <i>n</i> (E_D) e <i>p</i> (E_R).....	29
Figura 11 - Efeito fotovoltaico numa junção <i>p-n</i>	32
Figura 12 - Esquema simplificado do método Czochralski.....	34
Figura 13 - Representação logarítmica dos eventos-chave no desenvolvimento das células solares.....	39
Figura 14 - Valores teóricos de máxima eficiência de conversão solar em função dos valores energéticos da banda proibida (E_G) para alguns semicondutores.....	41
Figura 15 - Esquema das primeiras células solares de Silício.....	43
Figura 16 - Distribuição geográfica da Rede Solarimétrica Nacional.....	60
Figura 17 - Característica das regiões brasileiras em termos de radiação incidente.....	69
Figura 18 - Tempo de amortização energética de um módulo para diferentes valores de energia disponível.....	74
Figura 19 - Postos de Saúde do Vale do Ribeira.....	96
Figura 20 - Representação das localidades beneficiadas com o projeto "Estação Ecológica Juréia-Itatins".....	101

Figura 21 - Evolução dos preços mundiais do Wp em módulos fotovoltaicos.....	107
Figura 22 - Evolução da eficiência de conversão de células de Silício produzidas em laboratório.....	108
Figura 23 - Variação do custo do kW médio para diferentes valores de eficiência de conversão.....	111

RESUMO

A energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, pode ser aproveitada como fonte de calor (aspecto fototérmico) e como fonte de luz.

A energia solar fototérmica pode ser usada para o aquecimento de fluídos, através de coletores planos. Estudos anteriores^(04,05), desenvolvidos no Brasil, indicam que a adoção dessa solução para o aquecimento de água seria muito vantajosa para as companhias de energia.

A arquitetura bioclimática é outro tipo de aplicação da energia solar, e possibilita a adoção de soluções arquitetônicas e urbanísticas adaptadas às condições específicas de cada lugar.

Chama-se energia solar fotovoltaica à energia elétrica obtida por conversão da luz (fótons) proveniente do Sol. Essa conversão é feita pelas células solares que compõem os módulos fotovoltaicos. Atualmente, as indústrias fotovoltaicas em todo o mundo adotam o Silício como matéria prima, mas continuam em andamento pesquisas sobre outros materiais, que possibilitem a redução dos custos de produção e eficiências de conversão satisfatórias.

A quantidade de radiação incidente no Brasil é um fator muito animador para o aproveitamento da energia solar. Também são animadores a recente redução de preços que os módulos fotovoltaicos vem experimentando, e o crescimento dos valores obtidos para a eficiência de conversão, especialmente para as células de Silício monocristalino.

Isso leva a crer na possibilidade de solução de alguns problemas localizados de infra-estrutura no país, com o auxílio dessa tecnologia. Exemplos desse enfoque serão apresentados neste trabalho.

ABSTRACT

The energy produced by the Sun, inexhaustible in the world's scale of time, can be availed of as a source of heat (photothermal aspect) and light.

The photothermal solar energy can be used to heat fluids, by means of flat plate collectors. Former studies undertaken in Brazil^(04,05), show that the adoption of this solution to heat water would be very advantageous for the Power Companies.

The bioclimatic architecture is another kind of solar energy application, and allows the adoption of architectonic and urbanistic solutions adapted to the specific conditions of each place.

Photovoltaic solar energy is known as the electrical energy obtained by conversion of the light (photons) coming from the Sun. This conversion is effected by solar cells that compose the photovoltaic modules. Nowadays, the photovoltaic industries in the world adopt silicon as raw material, but continue in its research for other materials, which permit the reduction of production costs and satisfactory conversion efficiencies.

The amount of solar falling radiation on Brazil is an encouraging factor for its utilization. The recent reduction of photovoltaic module prices and the increase of values obtained for conversion efficiencies, especially for single crystal silicon cells, are also encouraging.

All this lead one to believe in the possibility of solving some localized infrastructure problems in the country, with the aid of this technology. Exemples of this will be shown in this work.

INTRODUÇÃO

É notável, frente à situação anterior de quase total desinteresse pelo assunto, o impulso que a geração de energia elétrica por conversão fotovoltaica de energia solar vem recebendo nos últimos 3 anos no país⁽¹³⁾.

Mesmo aos profissionais afetos ao tema da energia solar, um tanto desanimados com várias iniciativas descontínuas e malogradas e incansáveis na busca de formas para concretizarem seus projetos, o repentino interesse dos fabricantes internacionais^(*) pelo mercado brasileiro, a oferta de linhas de financiamento internacional e a redução do preço do W_p ^(**), guardadas as devidas proporções, representam aspectos de um quadro surpreendentemente positivo e esperado há muito.

As razões que levaram à construção desse cenário serão investigadas nessa dissertação, mas é claro que o uso da tecnologia fotovoltaica está se evidenciando pelas suas virtudes ambientais, entre outras.

O desenvolvimento desta tecnologia, com a obtenção de eficiências de 20% em células de Silício monocristalino e 17% em células de Silício policristalino⁽⁰¹⁾, por processos mais baratos de

(*) Verificável pelo número de eventos realizados no país nos últimos anos, com o suporte parcial de órgãos americanos e europeus.

(**) W_p é a unidade de potência utilizada quando se fala de células solares. 1 W_p corresponde a 1 W obtido em uma célula solar, sob a radiação incidente de 1000 W/m^2 , e em condições normais de temperatura e pressão.

fabricação, deverá ter uma série de implicações em termos de mercado para suas aplicações em todo o mundo.

Particularmente no Brasil, o desenvolvimento de um mercado interno parece estar próximo a se estabelecer, notadamente em usos semelhantes às aplicações pioneiras já implantadas.

Diante de tais argumentos e perspectivas, e da disponibilidade de bons índices de insolação no Brasil, crescem em importância as instituições de pesquisa básica dedicadas ao assunto.

Na qualidade de uma tecnologia nova, fez-se necessário apresentar, mesmo que de forma resumida, os fundamentos teóricos do fenômeno físico e descrever sucintamente o surgimento e o processo de produção atual de células solares.

É também proposta deste trabalho apresentar algumas das discussões inerentes ao uso desta tecnologia de geração para o Brasil, evidenciar suas qualidades e discutir suas limitações e a forma como vem se inserindo no panorama energético nacional.

Para finalizar o trabalho, discute-se a necessidade de uma nova conceituação para análise de viabilidade de tecnologias emergentes.

"Nasce o Sol e põe-se o Sol,
é o que diz Salomão.
E o que diz Galileu?"

B.Brecht

1. A ENERGIA SOLAR

Quando se fala de energia solar podemos lembrar que o Sol é a origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol.

É a partir do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita seu represamento e a conseqüente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os "ventos que moveram moinhos por muitos séculos"⁽⁰²⁾. Petróleo, Carvão e Gás Natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que originalmente obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar. As reações químicas complexas nas quais a matéria orgânica foi submetida a altas temperaturas e pressões, por longos períodos de tempo também utilizaram o Sol como fonte de energia. Ou seja, pode-se dizer que a energia dos combustíveis fósseis é solar em origem. É também por causa do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, é capaz de se desenvolver, fazer fotossíntese, e posteriormente ser transformada em álcool nas usinas.

Esses são apenas alguns exemplos da ação do Sol. O mais importante é que sua ação sobre a Terra facultou a existência da vida como a conhecemos, com base nos diversos agrupamentos combinados de Carbono e Hidrogênio.

Para melhor situar a questão, é importante descrever em linhas gerais o que é este tipo de energia, como chega à superfície da terra, e como são as suas diversas formas de utilização.

1.1. O que é a energia solar

O Sol tem estrutura e características que determinam a natureza da energia que ele irradia no espaço. É uma esfera de material gasoso extremamente aquecido, com $1,39 \times 10^6$ km de diâmetro, e está a cerca de $1,5 \times 10^8$ km da Terra⁽⁰³⁾. Como é visto da Terra, aparenta girar em torno do seu eixo a cada 4 semanas. Entretanto ele não gira como um corpo rígido; o seu equador demora cerca de 27 dias em uma rotação, enquanto os pólos levam cerca de 30 dias nesse movimento.

A temperatura efetiva de sua superfície é de aproximadamente 5762 K, e nas regiões próximas ao centro está estimada entre 8×10^6 K e 40×10^6 K. Sua densidade é de aproximadamente 80 a 100 vezes a densidade da água. O Sol é um reator de fusão em atividade contínua, e os gases que o compõem mantêm-se retidos pelas forças gravitacionais. A reação de fusão mais importante que ocorre em seu interior é a combinação de átomos de Hidrogênio em átomos de Hélio. A diferença de massa entre a soma dos prótons vindos dos átomos de Hidrogênio e o núcleo de Hélio é convertida em energia, e irradiada. Essa reação ocorre a temperaturas extremamente elevadas, da ordem de milhões de graus. Supõe-se que a radiação gerada no centro do Sol esteja na região espectral dos raios X e Gama, sendo que os comprimentos de onda das radiações aumentam com o decréscimo da temperatura, a maiores distâncias radiais. Estima-se que 90% da energia solar é gerada na região de 0 a 0,23 R (onde R é o raio do Sol), que contém 40% da massa do Sol. A 0,7 R do centro, a temperatura cai a cerca de $1,3 \times 10^5$ K e a densidade vai a $0,07 \text{ g/cm}^3$; nessa região o processo convectivo passa a ser importante e até 1,0 R esta região é conhecida como zona de

convecção. Nessa região a temperatura cai a cerca de 5000 K e a densidade a 10^{-8} g/cm³.

A superfície do Sol aparenta ser composta por grânulos (células convectivas irregulares), com diâmetros aproximados entre 1000 km e 3000 km, e tempo de vida de alguns minutos⁽⁰³⁾. A camada superior à zona de convecção é chamada de *fotosfera*. Nessa camada, os gases que a compõem estão fortemente ionizados e prontos para absorver e emitir um espectro contínuo de radiação. Externamente à *fotosfera* existe uma atmosfera quase transparente à radiação solar, que pode ser observada durante os eclipses solares totais ou por instrumentos que ocultem o disco solar. Acima da *fotosfera* estão a *camada de reversão* e a *cronosfera*. Ainda acima dessas situa-se a *corona*, com baixíssima densidade e altíssima temperatura (10^6 K).

Essa é, de forma simplificada a estrutura física do Sol, como se representa na Figura 1, e a partir dela pode-se fazer algumas observações que serão muito importantes sobre a natureza da radiação solar que incide sobre a superfície da Terra^(*). A radiação solar emitida é uma composição de emissões geradas em diversas camadas, a temperaturas diferentes. Porém, para efeitos práticos e para processos térmicos, trata-se o Sol como um corpo negro irradiando à temperatura de aproximadamente 5762 K. Para outros processos, nos quais os comprimentos de onda da radiação incidente são importantes, como processos fotoquímicos ou fotovoltaicos, é fundamental considerar a distribuição espectral dessa radiação.

(*) Na teoria de radiação emitida por um corpo negro, considera-se que o corpo emite a uma temperatura fixa.

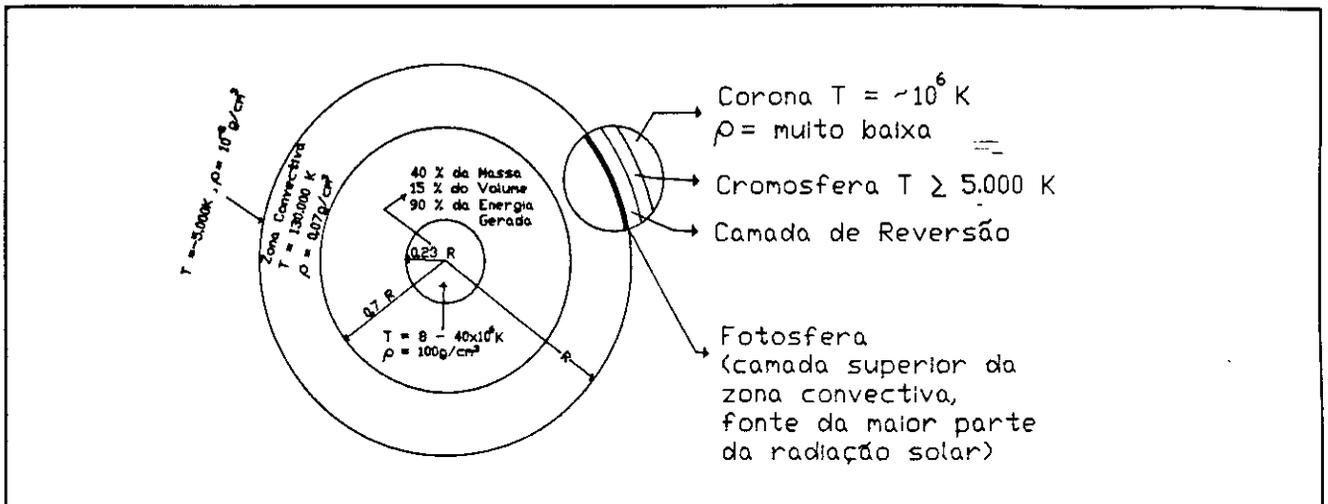


Figura 1 - Estrutura esquemática do Sol⁽⁰³⁾

A constante solar

A Figura 2 representa a geometria do arranjo Sol-Terra. A excentricidade da órbita terrestre é tal que a distância entre o Sol e a Terra varia cerca de 3% para mais ou para menos. À uma *unidade astronômica*, definida como a distância média entre o Sol e a Terra, o Sol é visto da Terra como um disco sob um ângulo de abertura de $32'$. A pequena variação relativa da distância entre os dois corpos celestes resulta no fato de que a radiação recebida no topo da atmosfera da Terra é aproximadamente constante. A *constante solar* H , é a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo, recebida em uma unidade de área na superfície perpendicular à radiação, no espaço, à uma unidade astronômica de distância do Sol.

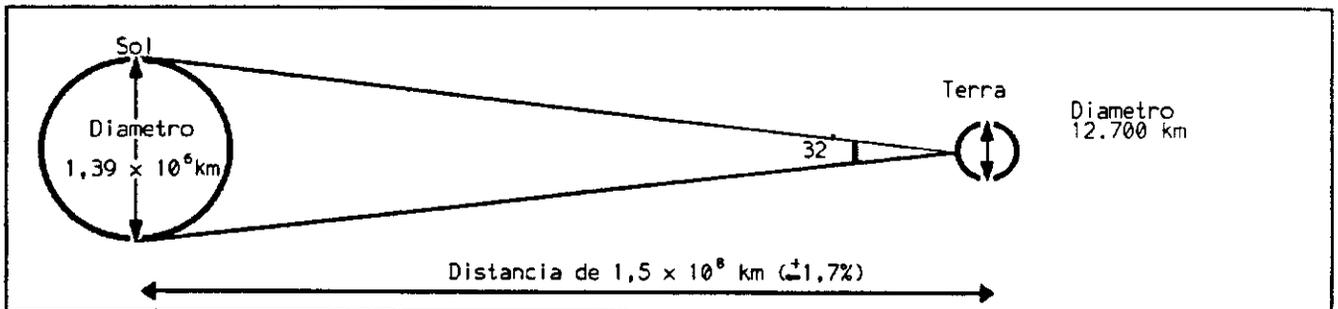


Figura 2 - Esquema da relação geométrica entre o Sol e a Terra.

As primeiras estimativas da constante solar foram feitas a partir de medidas obtidas à superfície da Terra, após atravessar a camada atmosférica e, portanto, após absorções e espalhamentos pelo caminho. Os estudos pioneiros de C.G. Abbot⁽⁰³⁾ chegaram ao valor de 1322 W/m^2 para a constante solar. Esses estudos foram revistos em 1954 por Johnson, a partir de medidas obtidas por foguetes, obtendo o valor de 1395 W/m^2 . Mais recentemente foram feitas medidas através de veículos espaciais e balões de medição atmosférica, que foram revistas e sumarizadas por Thekaekara e Drumond (1971), obtendo-se o valor mundialmente adotado de 1353 W/m^2 para a constante solar.

Essas viagens espaciais também serviram para se obter a curva distribuição espectral da radiação solar, à uma unidade astronômica. A curva padrão, representada na Figura 3, foi apresentada pela NASA em 1971.

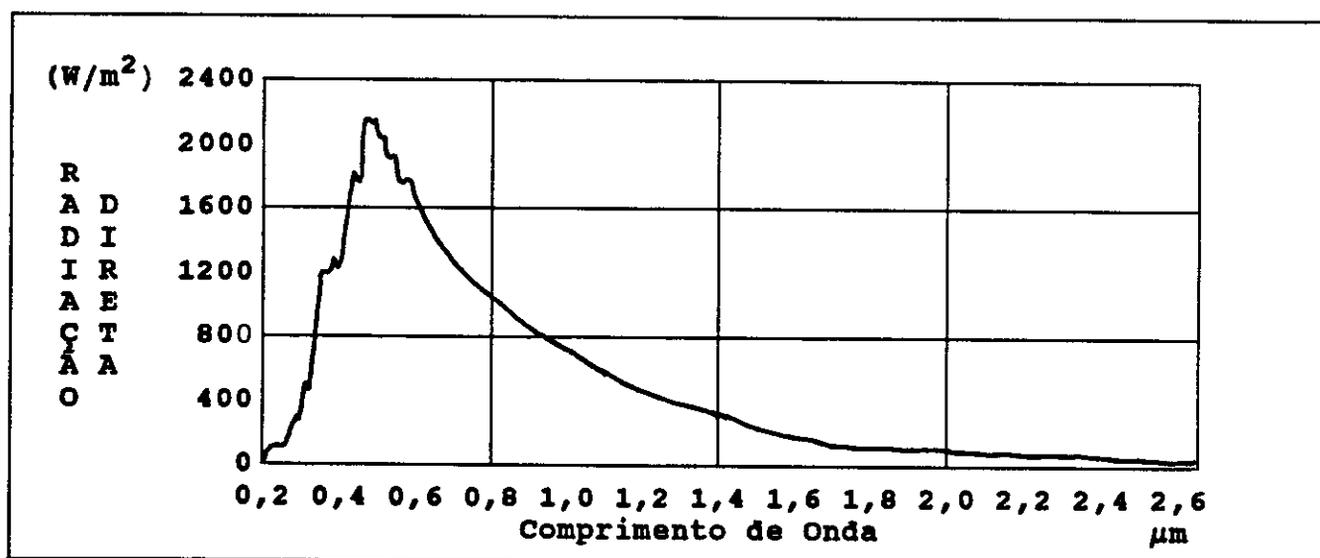


Figura 3 - A distribuição espectral da radiação solar, a uma unidade astronômica de distância e para uma radiação global de 1353 W/m^2 . (03)

A variação anual do fluxo da radiação solar, no topo da atmosfera, é de cerca de $\pm 3\%$ e a sua dependência com a época do ano está representada na Figura 4.

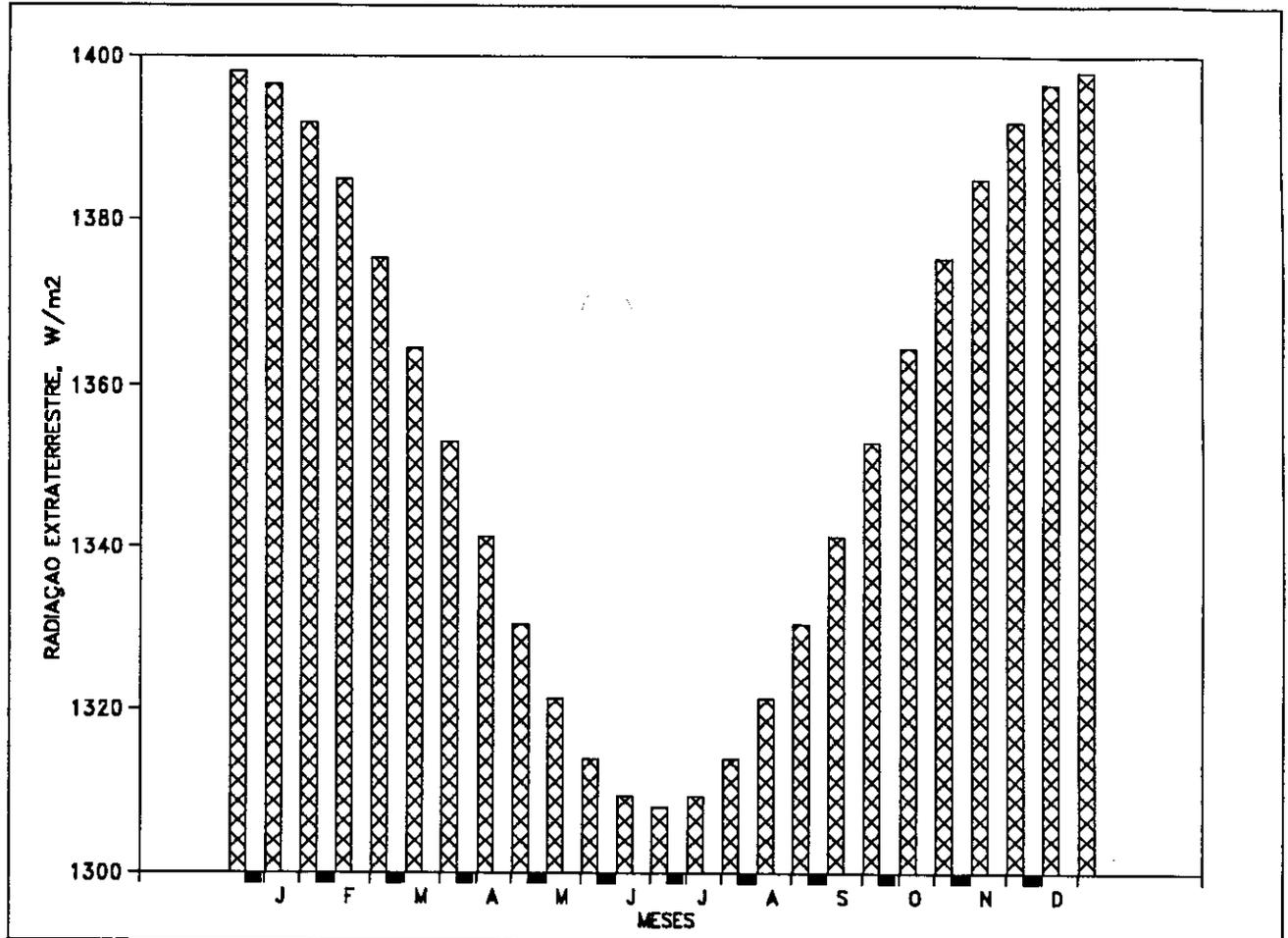


Figura 4 - Variação da radiação solar extraterrestre com os meses do ano.

A radiação incidente sobre uma unidade de área, na superfície da Terra tem duas componentes, a saber:

- . radiação solar direta, que é a componente da radiação proveniente do Sol e que não sofreu nenhuma mudança de direção em seu percurso;

. *radiação solar difusa*, que é a radiação recebida do Sol após haver sofrido mudança em sua direção original, em função de reflexões e espalhamentos causados pela camada atmosférica. =

A espessura da camada de ar, concentração de poeiras, impurezas e vapor d'água na atmosfera atenuam a componente direta da radiação solar a ser recebida em uma determinada superfície.

A conversão fotovoltaica utiliza as duas componentes da radiação solar incidente (radiação global), mas em alguns arranjos, que associam estruturas de concentração de raios solares com células solares como absorvedores, apenas a radiação direta é significativa.

Por razões geométricas, é recomendável que todos os equipamentos que pretendam captar a energia solar estejam orientados de forma perpendicular ao fluxo da radiação solar, obtendo-se assim o melhor aproveitamento possível.

1.2. Formas de utilização

Os equipamentos que passaremos a descrever utilizam essa energia dispersa com finalidades específicas. Significa dizer que, quando se pensa em usar a energia solar, a cada aplicação corresponde um equipamento específico e um arranjo que deve considerar as condições locais de radiação incidente, horas de Sol e sombramento.

1.2.1. Energia solar fototérmica

A energia solar fototérmica é utilizada de diversas formas na Natureza. Para o Homem, no entanto, a utilização dessa forma de energia implica em saber captá-la e armazená-la. Os equipamentos mais difundidos com o objetivo específico de utilizar a energia solar fototérmica são os coletores solares planos e os coletores solares concentradores.

Coletores Solares Planos

Os coletores solares planos são aquecedores de fluidos (líquidos ou gasosos) que utilizam as duas componentes da radiação solar, a componente direta e a radiação difusa, e são compostos por:

- a) superfície coletora, com pente de tubos;
- b) isolamento térmico.

A coletores solares planos, usados para aquecimento de água e esquematizados na Figura 5, é usual serem agregados reservatórios termicamente isolados (com ou sem suplementação energética secundária, quase sempre elétrica), compondo assim um sistema solar de aquecimento. Nesse caso, a superfície coletora é uma placa de metal,

ou outro bom condutor de calor, que no modelo mais difundido^(*), é percorrida por um pente de tubos, por onde passa o fluído.

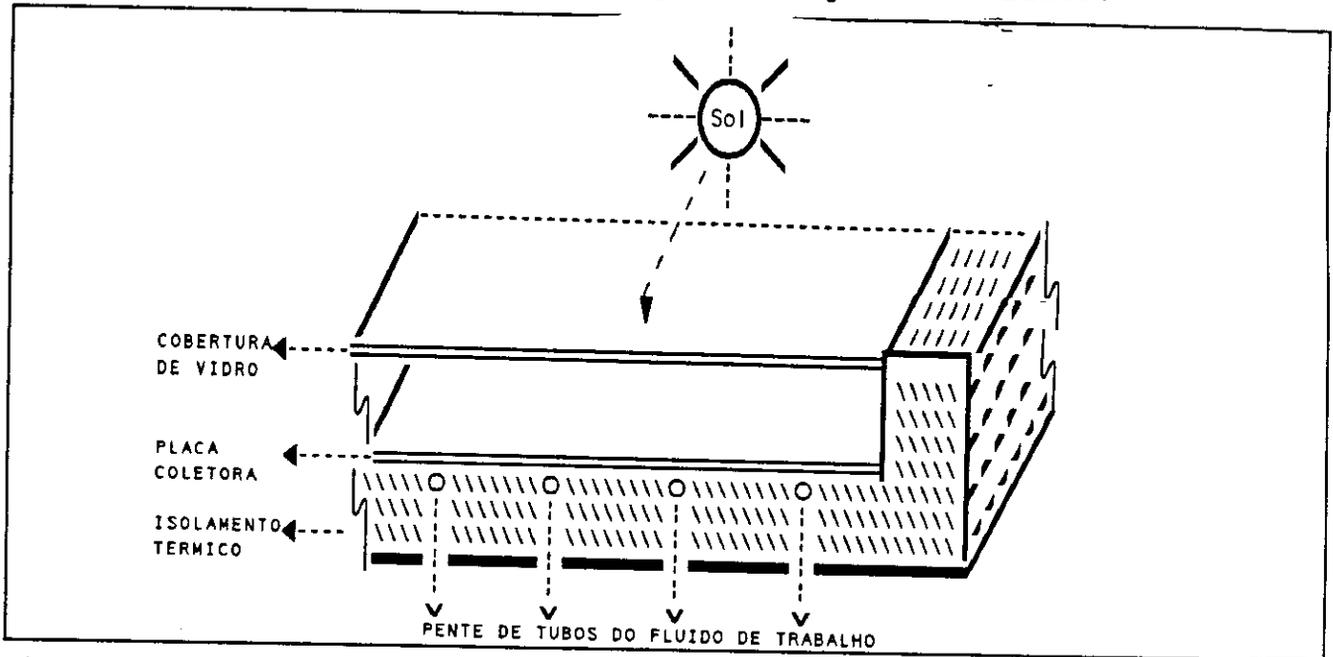


Figura 5 - Esquema de coletores solares planos.

A superfície coletora deve absorver a radiação visível e infravermelha e, para a maioria dos usos, é protegida por coberturas de vidro, em número de 1, 2 ou 3. A placa coletora deve receber um tratamento especial pois fica exposta ao tempo. Os coletores produzidos no Brasil, em geral, possuem apenas uma cobertura de vidro. A finalidade dessa cobertura é aproveitar o "efeito estufa", cujo esquema se apresenta na Figura 5, para melhorar o aquecimento do fluído e minimizar as perdas de calor (por convecção e radiação) na placa coletora. O mesmo princípio pode ser utilizado para aquecimento de gases, como para a secagem de grãos, em estufas, com a circulação forçada de ar quente.

(*) É possível se projetar as mais diversas formas de equipamentos para aquecer água a partir da energia solar incidente. Alguns protótipos, usando como superfície absorvedora o fundo enegrecido de reservatórios cuja superfície superior é transparente, também são muito usados, mas não foram produzidos ou comercializados pela indústria nacional de equipamentos solares.

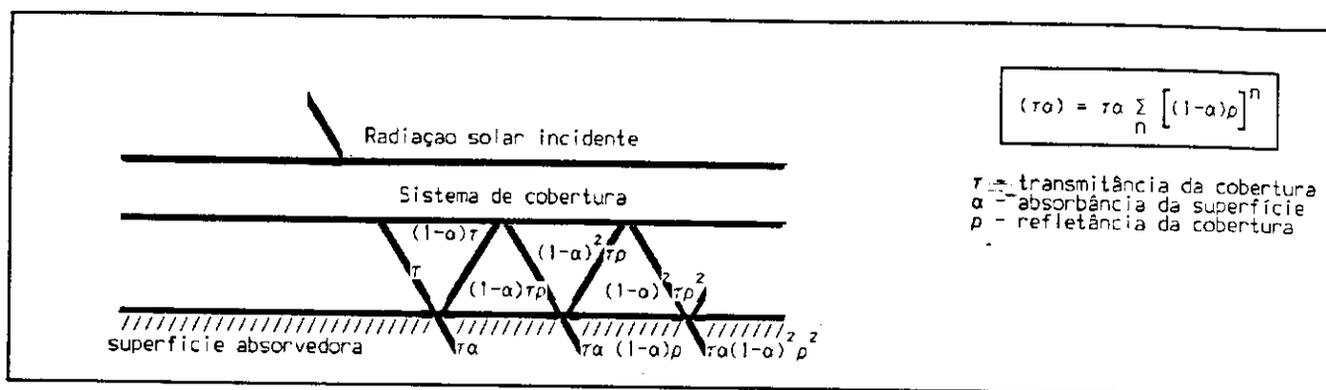


Figura 6 - Esquema de aprisionamento da radiação infravermelha, efeito estufa⁽⁰³⁾.

Atualmente tem sido desenvolvidos coletores de borrachas especiais, resistentes a altas temperaturas e de boa durabilidade. Também têm sido usados coletores compostos por tubos evacuados, em países onde as condições de insolação e radiação não são tão favoráveis.

A boa qualidade do reservatório (principalmente em relação ao isolamento termico) é muito importante para um bom desempenho do sistema. Trabalhos realizados pela UNICAMP⁽⁰⁴⁾ mostram que a água armazenada em reservatórios cilíndricos, onde a razão $h/d > 2,5$ (altura/diâmetro), leva mais que 80 horas para ter a sua temperatura reduzida a 50% da temperatura inicial.

Na verdade, quando se trabalha com calor, o fator isolamento é primordial pois este é facilmente transferido. Para prevenir a ocorrência de pouca insolação, os reservatórios dos sistemas solares comercializados para aquecimento de água dispõem de suplementação elétrica, que nada mais é que uma resistência elétrica pronta para entrar em ação quando a temperatura da água estiver abaixo de um valor pré-estabelecido. Logo, quanto melhor for o reservatório, tanto menos será preciso usar a energia elétrica. Em estudo encomendado pela CESP⁽⁰⁵⁾ verificou-se que sistemas de aquecimento com coletores planos

por vezes menos sofisticados são até mais eficientes, desde que possuam reservatórios mais bem isolados termicamente e tenham uma disposição geométrica mais apropriada.

Os coletores solares planos captam a radiação solar difusa e direta. Sua eficiência pode ser descrita pela equação (1), onde t representa o tempo de medição, e a energia térmica total do sistema é dada pela equação (2):

$$\eta = \frac{\sum t \quad Q_u / A_c}{\sum t \quad HR} \quad (1)$$

$$Q_T = Q_S + Q_l + Q_u = A_c \{ [HR (\tau\alpha)_b] + [HR (\tau\alpha)_d] \} \quad (2)$$

Q_d = componente difusa
 Q_b = componente direta
 Q_T = energia térmica total
 Q_l = calor perdido
 Q_S = calor estocado no coletor
 Q_u = calor útil
 H = radiação proveniente do sol
 R = fatores geométricos
 $\tau\alpha$ = perdas (transmitância, absorbância) absorção no vidro
 A_c = área de coleta

Coletores Solares Concentradores

Os coletores solares concentradores também aproveitam a energia solar fototérmica, mas utilizam preponderantemente a componente direta da radiação recebida do Sol pois, como diz seu nome, concentram os raios solares incidentes na área de coleta para uma área de absorção mais restrita. A razão entre as áreas é o fator de concentração, expresso na equação 3.

$$f_c = \frac{A_c}{A_a} \quad (3)$$

f_c = fator de concentração
 A_c = área de coleta
 A_a = área do absorvedor

Para usos que necessitam de temperaturas mais elevadas, a baixa densidade da energia incidente é compensada através desses arranjos geométricos para concentração. Coletores concentradores utilizam espelhos ou lentes para direcionar, a uma área absorvedora menor, a luz incidente numa área extensa. Nesses casos, como a intensidade de radiação é maior e as temperaturas atingidas são mais elevadas, obtem-se maior eficiência na conversão para energia útil. Os modelos projetados para atingirem temperaturas ainda mais elevadas, usualmente são dotados de um sistema de acompanhamento do Sol.

Os coletores concentradores são mais eficientes que os coletores planos, em altas temperaturas, já que a área para perda de calor é menor que a área de coleta (nos coletores planos as duas áreas são idênticas). A energia útil recebida pelo coletor, expressa na equação (4), é:

$$Q_u = \eta_o HR A_c - U_c (T_c - T_a) A_a \quad (4)$$

η_o = eficiência ótica

U_c = coeficiente de condutância térmica do coletor

T_c = temperatura do coletor

T_a = temperatura ambiente

E a eficiência instantânea do coletor será:

$$\eta_c = Q_u / HR A_a \quad (5)$$

$$\eta_c = \eta_o - U_c (T_c - T_a) / HR f_c \quad (6)$$

A concentração ótica, através de arranjos de espelhos ou lentes, pode não ser atrativa em função do custo das estruturas mecânicas de suporte que devem ser resistentes às severas condições ambientais (vento, chuva, etc) e atender a razoáveis necessidades de precisão.

1.2.2. Arquitetura bioclimática

Chama-se de arquitetura bioclimática o campo de estudos que visa harmonizar habitabilidade das construções ao clima e características locais, pensando no homem que habitará ou trabalhará nelas, tirando partido da energia solar através de correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada. Pode-se considerar também que este tipo de proposta arquitetônica não tem como elemento diferenciador a preocupação com o homem (outras também tem), e sim o fato de prover as edificações de condições adequadas de habitabilidade, conforto e uso, utilizando para isto a energia que pode ser diretamente obtida das condições climáticas locais (e não condições artificiais). Para tanto, estuda e desenvolve não só características arquitetônicas adequadas, mas também equipamentos e sistemas que são necessários ao uso das edificações (aquecimento de água e ar, circulação de água e ar, controle de iluminação, integração de sistemas de cocção com aquecimento de água e de ar, conservação de alimentos, etc.). Deste modo observa-se que a "arquitetura bioclimática" tem uma concepção mais ampla do que seja uma "edificação"; não é só o "edifício", mas também seu entorno próximo, os equipamentos que serão inseridos no mesmo, o clima onde está localizado e o homem que o utiliza.

No Brasil o interesse pela arquitetura bioclimática ressurgiu com ímpeto a partir da preocupação com Conservação de Energia. A possibilidade de economizar energia, nessa linha de concepção arquitetônica, não se restringe às características do projeto arquitetônico, mas também está presente na seleção de

materiais de construção adequados ao clima e que tenham conteúdo energético tão baixo quanto possível.

O projeto de construções adequadas às características climáticas locais não é novidade. Já na antiga Grécia aparece um arquiteto, Isomakus, personagem dos diálogos socráticos, que dizia sobre uma casa confortável: "A totalidade da casa deve estar de frente para o sul, e deve ter marquise,.... e será assoleada no inverno e sombreada no verão". No período romano, Vetrúvio, famoso arquiteto do Império, que viveu no primeiro século antes de Cristo, reconhece que as habitações devem ser diferentes para distintos países e climas: "Devemos começar tomando nota dos países e climas nos quais devemos construir, se quisermos que nossos projetos para eles estejam corretos. Um tipo de casa parece apropriado para o Egito, outro para a Espanha,....ainda um diferente para Roma, e assim seguindo para terras e países com características diversas". E, didaticamente explica: "Isto acontece porque uma parte da Terra está diretamente embaixo do curso do Sol, outra está longe, ao passo que outra está entre os dois anteriores,....É óbvio que os projetos para residências devem variar conforme a diversidade do clima"⁽⁰⁶⁾.

É interessante notar que tanto na época dos gregos quanto na dos romanos foram construídas cidades com estrutura urbanística de modo a que todos tivessem acesso a um condicionamento natural de suas residências. Um tipo de residência aquecida pelo sol, o Heliocaminus, teve até uma lei que assegurava seu direito ao sol. No Código de Justiniano, do século VI depois de Cristo, foi incorporada a seguinte lei: "Se um objeto é localizado em forma tal que tire os raios solares de um Heliocaminus, será afirmado que este objeto cria uma sombra num

lugar onde a radiação solar é absolutamente necessária. Isto viola o direito do Heliocaminus a ter Sol"⁽⁰⁶⁾.

A aplicação de técnicas de projeto que propiciem menor consumo de energia beneficia toda a sociedade, a médio e logo prazo, uma vez que os investimentos públicos para a produção ou geração de energia não precisarão ser tão intensivos. Além disso, não se deve esquecer que a produção de energia é, por sí, um processo que pode agredir e poluir o meio ambiente.

A arquitetura bioclimática situa-se, nesse quadro, como instrumento fundamental de trabalho dos planejadores energéticos. A urbanização mais ou menos desordenada de nossas cidades e a cultura consumista foram aos poucos modificando os ideais de conforto até chegar-se ao que, hoje em dia, se vê: construções envidraçadas como grandes caixas, em que se empilham dezenas de apartamentos. Uma caixa envidraçada é, em última análise, uma versão de estufa pois o vidro permite a passagem de praticamente todo o espectro solar e, depois, retém a saída das radiações na faixa do infravermelho, aquecendo o ambiente. Assim, a moderna arquitetura brasileira aceita passivamente a idéia de que as casas são objetos colocados num meio ambiente muito quente, dentro do qual se deve criar, artificialmente, uma temperatura agradável. As paredes são consideradas como limites entre o meio exterior, variável, e o interior habitável, onde queremos criar e preservar o conforto.

O advento da arquitetura moderna partiu da possibilidade, e tinha como sua proposição básica a construção em grande escala das edificações, à exemplo da produção industrial. Neste período surgiu o conceito da "máquina de morar". Esta possibilidade de produção de

edificação em uma escala de grande produção industrial impôs uma universalização de padrões arquitetônicos que, como consequência, desconhecia e desrespeitava todas as características bioclimáticas locais. Some-se a isto o florescimento e desenvolvimento da indústria de equipamentos de iluminação e conforto artificiais, bem como a participação crescente da energia nas atividades humanas básicas. Estes fatores caracterizam a produção arquitetônica a partir da revolução industrial, induzindo a padrões arquitetônicos que não consideram o clima e a energia como elementos componentes das edificações. O conceito de "arquitetura bioclimática" se contrapõe a este tipo de produção.

Lidando com uma gama diversificada de variáveis que abrangem dados climáticos, especificidades antropológicas e sócio-culturais, e variáveis econômicas, a arquitetura bioclimática caracteriza-se por ser um campo de estudos extremamente complexo, como complexos são os organismos mais evoluídos.

A antropologia, que estuda as estruturas e os processos da evolução cultural, identifica a proteção contra características climáticas adversas e outras perturbações provenientes do ambiente como uma das necessidades primárias do Homem.

Da radiação solar incidente, a arquitetura pode se utilizar da luz e do calor. A intenção do uso da luz solar, que implica em redução do consumo de energia para iluminação, condiciona o projeto arquitetônico quanto à sua orientação espacial, quanto às dimensões de abertura das janelas e transparência na cobertura das mesmas.

Já a intenção de aproveitamento do calor proveniente do sol implica na seleção do material adequado (isolante ou não conforme as

condições climáticas) para paredes, vedações e coberturas superiores, e orientação espacial, entre outras preocupações.

O efeito estufa se manifesta mais usualmente em ambientes nos quais a superfície de separação do meio externo é o vidro. O vidro bloqueia a passagem de grande parte das radiações na faixa do infravermelho, no entanto os materiais internos ao ambiente absorvem a luz em seus outros comprimentos de onda, e reemitem essa radiação na faixa do infravermelho, que não consegue sair do ambiente por não poder ultrapassar a barreira do vidro. Esse esquema torna-se uma verdadeira armadilha para essas radiações responsáveis pelo aquecimento dos ambientes.

1.2.3. Termoeletricidade e outras aplicações

A termoeletricidade foi descoberta em 1822 pelo físico Seebeck, e é conhecida pelo efeito que leva o seu nome ("efeito Seebeck"). Um termopar consiste em um conjunto de dois fios de metais diferentes com as extremidades unidas. Quando um desses pares é colocado em um ambiente quente e o outro em um ambiente mais frio, uma corrente elétrica flui nos fios. Metais diferentes possuem diferentes potenciais termoelétricos, assim as primeiras experiências foram direcionadas para encontrar as combinações que fornecessem as maiores correntes. Abram Ioffe⁽¹¹⁾ relatou experimentos em que foram obtidas eficiências da ordem de 4%, no ano de 1956, na antiga URSS.

Alguns materiais exóticos foram usados na tentativa de substituir os tradicionais termopares de Ferro-Constantan, Platina-Platina/Ródio e Platina-Platina/Irídio. Em ligas binárias pesquisou-se Telureto de Chumbo com Antimoniato de Zinco, obtendo-se uma eficiência

teórica de 10%. O Sulfeto de Samário é um composto exótico que permite a operação de termopares a temperaturas de até 1100°C . Foram igualmente testadas e estudadas ligas de três e quatro componentes na tentativa de obter-se eficiências mais elevadas.

O rendimento dos termopares depende da diferença de temperatura que pode ser mantida entre os terminais quente e frio, portanto para altas eficiências os materiais devem ser usados em temperaturas próximas às respectivas temperaturas de fusão. Para a conversão da energia solar em corrente elétrica através do efeito Seebeck é necessário conjugar-se coletores concentradores.

A Westinghouse Corporation⁽¹¹⁾ construiu um gerador solar termoelétrico para a NASA, composto de um coletor concentrador parabolóide de 2,0 m de diâmetro, focalizado em um arranjo de 32 termopares fornecendo 125 W a 4 V, e obteve uma eficiência de 3%. O custo estimado da energia gerada por esse sistema foi de US\$ 0,10/kWh.

Um trabalho na URSS, relatado por V.A.Baum⁽¹¹⁾, descreve um gerador solar termoelétrico composto de 840 termopares de Zinco/Antimônio-Constantan, aquecidos por um espelho parabólico de 2,0 m de diâmetro. A unidade tinha uma potência instalada de 18,9 W e operava em 21 V para uma eficiência de 3,4%.

O problema central de um gerador termoelétrico é encontrar materiais que combinem elevados potenciais termoelétricos com durabilidade para longos períodos de operação. Uma vida útil de 1 ano é um objetivo razoável para tais materiais em aplicações espaciais, o que está muito distante de períodos como 20 ou 40 anos de vida útil necessários para tornar um sistema econômico para aplicações em terra.

O efeito termoiônico também foi usado para converter calor, como o do Sol ou de outra fonte, em energia elétrica. Quando um metal ou outro elemento ou composto conveniente é aquecido até a incandescência no vácuo, este emite elétrons espontaneamente. Triodos engenhosamente concebidos podem separar esses elétrons e produzir uma corrente entre o catodo quente e o anodo frio. A adição de vapor nos tubos evacuados (como o de Césio), pode aumentar a eficiência do processo. Entretanto, o problema básico é que o processo requer temperaturas muito elevadas, entre 1100°C e 2600°C . Já que o anodo precisa estar junto ao catodo (a uma distancia milimétrica), é difícil manter uma grande diferença de temperatura. Já que a eficiência de Carnot aplica-se neste, como em todos os sistemas de conversão térmica, a eficiência depende diretamente da capacidade de um arranjo particular que rejeite calor a partir do anodo.

Em 1957 a General Electric produziu um conversor termoiônico de 1 W. Em 1960, a TRW Corp. construiu um sistema de 250 W, 28 V, com uma eficiência máxima de 15%. No mesmo ano a General Electric produziu um gerador aquecido via energia solar de 500 W, para a Força Aérea Americana, e em 1962 estava em operação uma unidade com 105 diodos aquecidos por um espelho de 4,9 m de diâmetro, em sua estação de pesquisa, em Phoenix, no Arizona⁽¹¹⁾. Em 1963, a Thermo-Electron Corp. de Waltham, Massachussetts, construiu um sistema de 5 diodos, aquecido via energia solar, para a NASA, que esperava-se tivesse 1 ano de vida útil. A vida útil dos conversores termoiônicos é limitada já que a temperatura deve ser tão elevada que o material do catodo, mesmo em se tratando de metais ultra-refratários como o Tungstênio e o Tântalo, lentamente se evapora e se deposita nas paredes do tubo evacuado. Mais

recentemente os conversores de Molibdênio, Cobre e Tântalo, com vapor de Césio, quando operando a 2200°C , podem produzir 20 W/cm^2 , com uma eficiência de 15%. O tempo de vida dessas unidades pode atingir 2 ou 3 anos, a esses níveis de potência.

O ciclo Stirling, inventado em 1816 por Robert Stirling, também desempenha um papel importante em equipamentos solares usados em aplicações espaciais. São basicamente equipamentos de aquecimento, com um regenerador, que minimiza a dissipação de calor entre os ciclos. Em 1958, os laboratórios N.V.Philips, em Eindhoven, Holanda, fizeram algumas montagens experimentais para as quais se obteve 40% de eficiência. Embora bons valores de eficiência tenham sido atingidos, a relativa morosidade da transferência de calor do terminal aquecido para a câmara de gás limita o desempenho dinâmico do equipamento. Também em 1958, a Divisão Allison, de General Motors, desenvolveu um engenho a ciclo Stirling (11).

A crise do petróleo de 1973 e a preocupação ambiental nos últimos anos fizeram renascer o interesse em energia solar, trazendo à tona a diversidade de estudos desenvolvidos em todo o mundo. Fica, no entanto, o registro dos esforços citados, e muitos outros não citados em virtude do caráter desse resumo histórico, que abriram fronteiras para o uso dessa fonte de energia, de inegável importância.

1.2.4. Energia solar fotovoltaica

Chama-se de energia solar fotovoltaica a energia elétrica obtida por conversão da energia solar através de células solares, produzidas a partir de materiais semicondutores. O desenvolvimento

desse campo de utilização da energia solar tem aberto novas perspectivas para a solução do problema energético em larga escala.

O principal empecilho à difusão dessa tecnologia tem sido, até o momento, a questão do custo. No entanto, atualmente a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos específicos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração estão se tornando mais reais, levando em conta fatores que eram anteriormente então ignorados, como a questão dos impactos ambientais. A análise dessa alternativa e a comparação com as opções existentes para o Brasil, tema básico deste trabalho, será mais desenvolvida nos capítulos seguintes.

"...você é aquele ou aquela
para quem Sol e Lua penduram-se
no céu..."

W.Whitman

2. CONVERSÃO FOTOVOLTAICA DA ENERGIA SOLAR

O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel à Academia de Ciências de Paris em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor produzido pela absorção de luz. Para que o efeito aconteça precisa-se de duas condições:

- . que a energia dos fótons seja igual ou superior ao valor da banda proibida (E_G) do material, condição para que ocorra absorção de fótons no material;
- . que exista no interior do semicondutor uma barreira de potencial capaz de separar os elétrons e lacunas fotogeradas.

Associadas às condições precedentes é necessário que existam boas propriedades de transporte no semicondutor para que os pares gerados possam atingir a região da barreira de potencial sem se recombinarem⁽⁰⁷⁾. Pode-se dizer que entre a energia luminosa incidente e a energia elétrica resultante não existe nenhuma forma intermediária de energia.

Para compreender os princípios de funcionamento de uma célula solar, é necessário entender as propriedades básicas dos materiais semicondutores, que são o suporte físico das mesmas. Assim, descreve-se a seguir resumidamente os rudimentos da conversão fotovoltaica e da tecnologia de fabricação de módulos fotovoltaicos.

2.1. Conversão fotovoltaica

Os semicondutores são materiais que conduzem a eletricidade menos que os condutores (metais em geral) e mais que os isolantes. Esta propriedade é consequência direta dos níveis de energia que podem ocupar os elétrons dos átomos que constituem o sólido. Quando estes átomos estão arranjados periodicamente, como em um cristal, ocorrem modificações nos níveis energéticos das camadas externas (para ajustar a presença tão próxima de outras camadas eletrônicas dos outros átomos), surgindo assim níveis ou "bandas" de energia permitida e "bandas proibidas", onde não se pode encontrar o elétron. Para o efeito fotovoltaico interessam as bandas permitidas e proibidas de maior energia, ou seja aquelas onde se encontram os elétrons menos ligados ao átomo. A Figura 7 representa essas bandas de energia em um semicondutor; as bandas de energia permitidas abaixo e acima da banda proibida chamam-se banda de valência e banda de condução respectivamente⁽⁰⁷⁾.

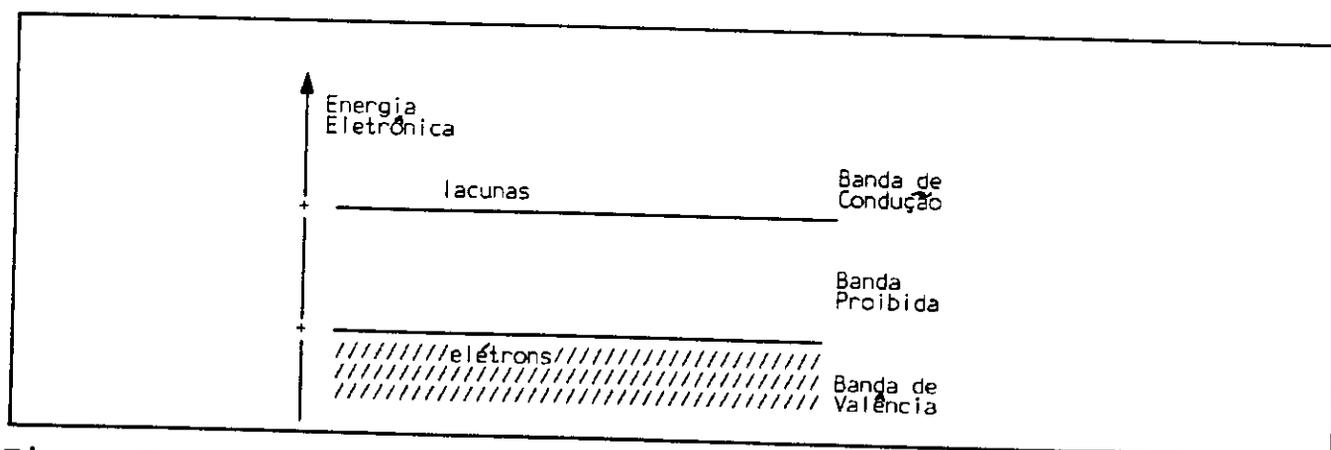


Figura 7 - Bandas de energia de semicondutor à temperatura de 0 K⁽⁰⁷⁾.

Em um semiconductor a zero grau absoluto, a banda de valência está completamente ocupada por elétrons, e a banda de condução está vazia. Isto ocorre porque o número de elétrons que existe no sólido é suficiente para preencher todos os estados permitidos, até o limite superior da banda de valência. Com o aumento da temperatura, devida à agitação térmica dos elétrons, é possível que alguns atinjam níveis de energia que lhes permita superar a banda proibida e alcançar a banda de condução. Neste caso, deixarão lacunas na banda de valência, e ambas as populações, de elétrons na banda de condução e de lacunas na banda de valência, aumentarão com a temperatura. Os poucos elétrons que se encontram na banda de condução e lacunas da camada de valência, como representado na Figura 8, tem papel fundamental nos fenômenos de condução elétrica.

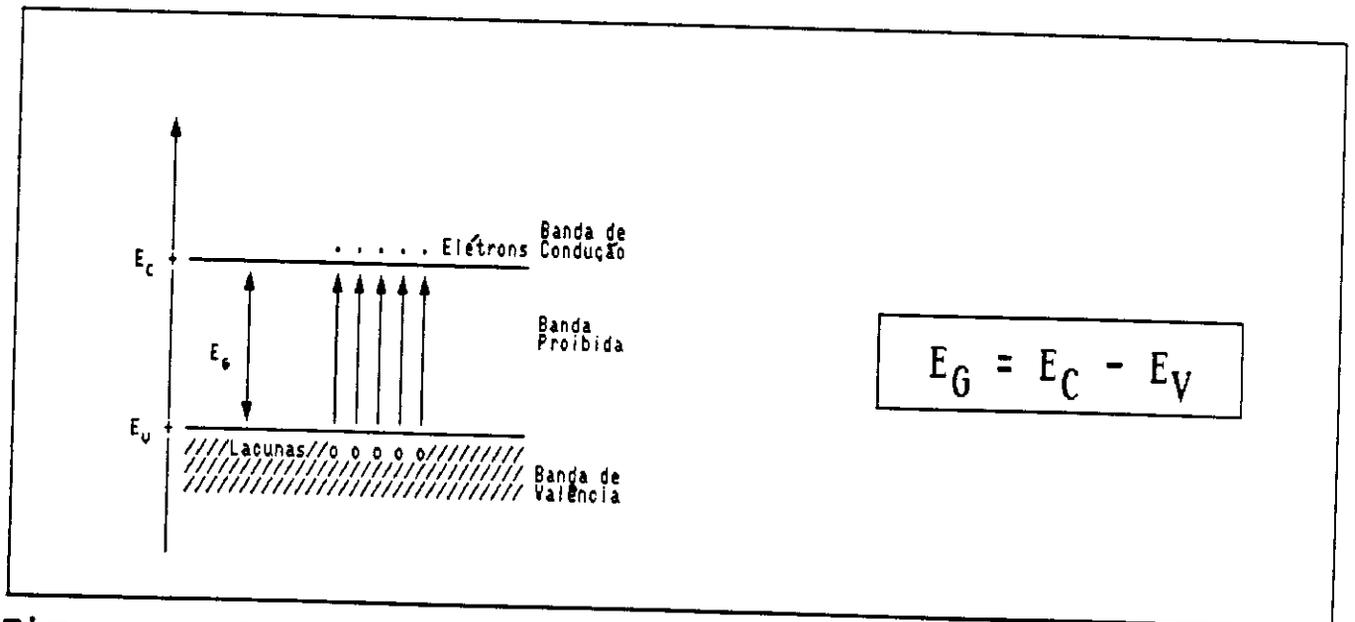


Figura 8 - Bandas de energia e populações de portadores a uma temperatura finita (07).

Quando este material é submetido a um campo elétrico externo, ocorrerá uma "migração de portadores" das bandas cheias, ou seja, as lacunas mudarão de lugar, a elas atribuído-se uma carga elétrica positiva. O mesmo ocorre aos elétrons da banda de condução, ou seja, também se moverão.

Pelo princípio de exclusão de Pauli, cada estado energético possível pode ser ocupado somente por dois portadores, com spins contrários. A estatística que relaciona os níveis de energia com a ocupação dos estados é a estatística de Fermi-Dirac, que leva em conta o princípio de exclusão de Pauli⁽⁰⁷⁾. A probabilidade de ocupação de um estado energético está relacionada com a chamada energia ou nível de Fermi. No nível de Fermi a probabilidade de ocupação do estado energético, se esse existir, é de 0,5^(*).

Em um semicondutor o nível de Fermi encontra-se em geral na banda proibida. Pode-se alterar a posição do nível de Fermi com relação às bandas de valência e condução, através de dopagem com átomos de outros elementos. No caso do Silício, semicondutor elementar da quarta coluna na Tabela Periódica de Mendeleev, o efeito é conseguido substituindo-se átomos de Si por átomos das colunas vizinhas (III e V).

Ao substituir, por exemplo, um átomo de Si por um de Fósforo, quatro elétrons da camada externa do Fósforo servem para estabelecer as ligações químicas com os átomos de Si vizinhos na rede cristalina. Porém, como o átomo de Fósforo tem cinco elétrons na camada de valência, o quinto fica fracamente ligado ao seu núcleo e

(*) Esta energia corresponde no sólido ao potencial eletroquímico, que deve ser constante no material em equilíbrio termodinâmico.

pode ser facilmente liberado através da absorção de uma pequena quantidade de energia. Do ponto de vista da estrutura das bandas, o átomo de Fósforo é chamado de "doador" por poder fornecer facilmente um elétron adicional na banda de condução. Um material com esse tipo de dopagem é chamado tipo *n*, por convenção, de "donor".

Se, ao contrário, a dopagem ocorrer com um átomo de Boro, com três elétrons na camada de valência, este será chamado átomo aceitador, pois restará a ligação incompleta com um átomo de Si, ou seja, uma lacuna ou carga positiva. Este é um material tipo *p*. Esta lacuna pode facilmente capturar um elétron de um átomo vizinho, bastando para isso a absorção de energia térmica da rede (fonons), ou também um fóton de pequena energia (ver, na Figura 9, as duas representações cristalinas).

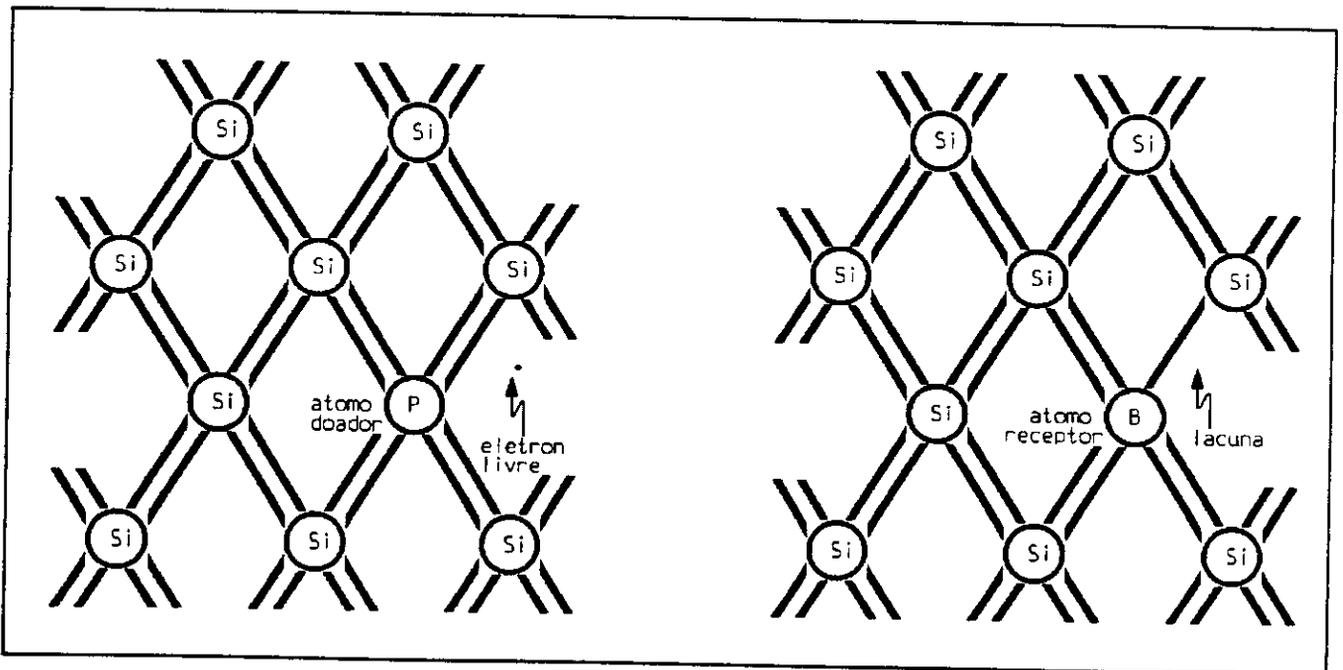


Figura 9 - Representação cristalina de materiais *n* e *p*.

Como, nos dois casos, a energia necessária para ionização dos átomos de dopante é pequena, à temperatura ambiente ambas as

estruturas estarão ionizadas. Para um cristal dopado com Fósforo é maior a possibilidade de se encontrar elétrons na banda de condução, e nesse caso, o nível de Fermi terá se aproximado de E_C . Quando a dopagem é com o Boro, acontece o contrário, o nível de Fermi se aproxima da banda de valência, como representado na Figura 10 (07).

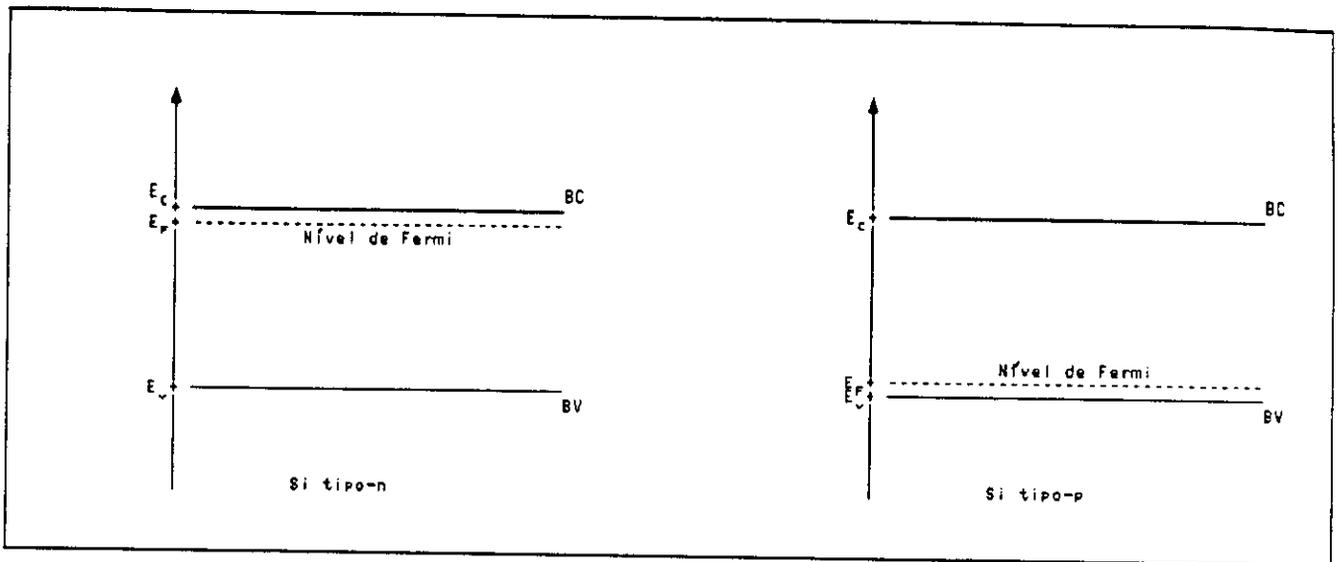


Figura 10 - Representação das bandas energéticas nos semicondutores n (E_D) e p (E_A).

Uma junção $p-n$ é definida como a região de interface entre um semicondutor tipo p e um do tipo n . Supondo a condição ideal, de que seja possível o contato íntimo entre os dois tipos de semicondutores, ocorrerá um desencontro entre os níveis de Fermi dos dois materiais.

Como existem mais elétrons livres no semicondutor tipo n , surge um gradiente de concentrações na interface. Já que os portadores podem mover-se livremente por todo o cristal, os elétrons do lado n migrarão para o lado p , de modo que a concentração eletrônica seja igual em todo o volume do material, enquanto as lacunas migrarão para o lado n . Cada elétron majoritário, assim como cada lacuna

majoritária, é resultante da ionização de um átomo de dopante, que não pode se locomover já que está preso à rede cristalina. Quando os elétrons começam a se difundir para o lado p , deixam atrás de si os doadores ionizados, e começa a surgir do lado n , próximo à junção, uma carga positiva (dos doadores fixos na rede). Do lado p , devido à difusão das lacunas, aparece uma carga negativa advinda dos aceitadores ionizados. Cria-se assim a chamada região de carga espacial, que gera um campo elétrico que tende a opor-se à difusão dos dois tipos de portadores. Ou seja, aparece uma barreira de potencial para elétrons e lacunas e se estabelece um equilíbrio dinâmico entre as correntes de portadores que, por difusão, conseguem atravessar a barreira e a de portadores que o campo elétrico arrasta em sentido contrário. Este equilíbrio corresponde exatamente à situação na qual os níveis de Fermi se igualam.

Quando, sobre a estrutura analisada se aplica uma tensão tal que o lado p é feito positivo com relação ao lado n (polarização direta), a barreira de potencial diminui. Nestas condições ocorre a ruptura do equilíbrio descrito anteriormente, e a corrente de difusão irá predominar sobre a que produz o campo elétrico da região de carga espacial⁽⁰⁷⁾. Circulará corrente pela estrutura, dada pela equação:

$$I = I_S \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \quad (7)$$

onde,

q = carga do elétron
 k = constante de Boltzmann
 V = tensão aplicada
 T = temperatura absoluta
 I_S = corrente de saturação

Se, ao contrário, for aplicada uma tensão inversa, o efeito será de aumentar a barreira de potencial. Menos portadores poderão passar por difusão, e o campo elétrico fará passar apenas os portadores que se encontram na região próxima à região de carga espacial. Nessa região há poucos portadores já que os que haviam, migraram ao fabricar-se a junção. Portanto, a tensão inversa fará circular apenas uma pequena corrente pelo dispositivo. Essa corrente residual é a corrente de saturação I_s .

Quando um feixe monocromático de luz solar(*) incide sobre um dispositivo como o proposto, os fótons são absorvidos a uma distância que depende do valor do coeficiente de absorção do material para radiações com essa energia. Cada fóton absorvido gera um par elétron-lacuna e os pares gerados difundem-se, podendo alcançar a junção. Se conseguem chegar até a região de forte campo elétrico sem se recombinarem, a ação do campo sobre os portadores faz com que os elétrons passem ao lado n e as lacunas fiquem do lado p . Nessas condições, os pares elétron-lacuna se transformam em portadores majoritários de cada lado da junção. O excesso de elétrons do lado n neutraliza parcialmente as cargas espaciais, e as lacunas do lado p fazem o mesmo com os receptores. Se a junção $p-n$ não está conectada eletricamente a um condutor externo, haverá uma acumulação de cargas até que se produza uma nova situação de equilíbrio dinâmico das correntes, como já descrita anteriormente. A acumulação de cargas em circuito aberto causa a diminuição da barreira de potencial na junção

(*) A luz solar é composta por radiações de diversos comprimentos de onda; para simplificar a compreensão fala-se em feixe monocromático, ou seja, composto por radiação com apenas um comprimento de onda.

e o surgimento de uma tensão nos terminais do dispositivo, que corresponderá à uma polarização direta. Ao diminuir a barreira, ocorre o aumento da corrente de difusão de portadores e a situação de circuito aberto corresponde a um equilíbrio da corrente fotogerada e da corrente de difusão, iguais e de sentido contrário.

Se um condutor for colocado entre os terminais do dispositivo, não poderá haver acumulação de carga, e haverá circulação de corrente. Como foi ligado um condutor metálico entre os terminais, a tensão entre eles será nula. Isto significa que a altura da barreira de potencial será a mesma que no equilíbrio, e a única corrente que circulará será a produzida pela passagem de portadores fotogerados. Em uma situação de carga elétrica qualquer entre os extremos, haverá uma certa tensão V no dispositivo (direta) e circulará uma certa corrente I (inversa). O efeito fotovoltaico está esquematizado na Figura 11.

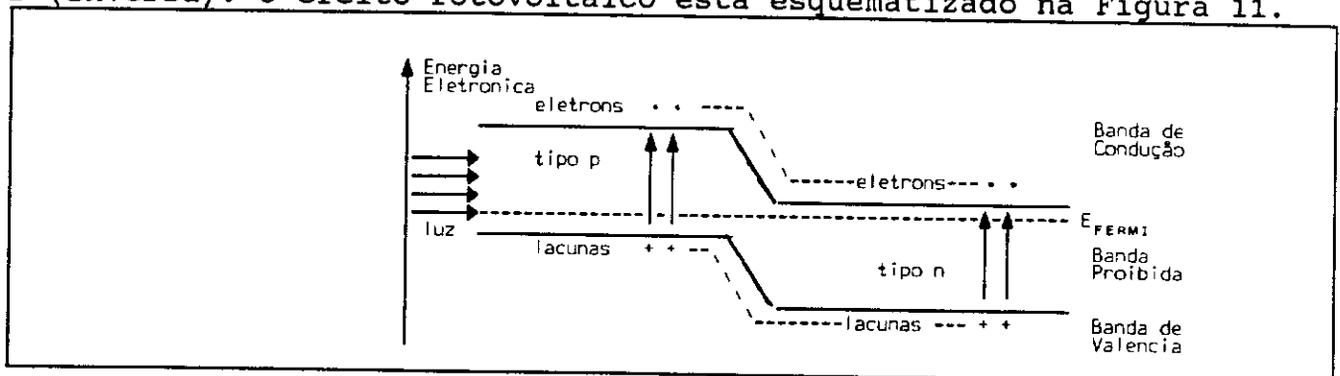


Figura 11 - Efeito fotovoltaico numa junção p-n. Representou-se a junção em equilíbrio. Pela ação da luz a altura da barreira de potencial tenderá a diminuir e aparecerá uma polarização direta. A corrente que circula devido à ação da luz tem um sentido inverso no dispositivo (07).

Módulos Fotovoltaicos

Os painéis ou módulos fotovoltaicos são equipamentos produzidos a partir de células solares, que são, essencialmente,

dispositivos semicondutores fotossensíveis que geram eletricidade quando expostos à luz.

As células solares podem ser produzidas a partir de diversos materiais. As células que compõem os módulos fabricados no Brasil são produzidas com lâminas de Silício monocristalino e semi-cristalino.

Existem muitas técnicas diferentes para produzir semicondutores de alta pureza, necessários para a fabricação das células solares de material monocristalino. Um método usado freqüentemente para preparar monocristais é o método Czochralski, ou técnica de "puxamento" de cristais, que é o método empregado pela indústria nacional. Essencialmente, o processo corresponde a mergulhar uma pequena "semente" de monocristal em uma massa de Silício fundido e a retirá-la lentamente de tal forma a obter a taxa desejada de solidificação. Como a semente encontra-se a uma temperatura inferior à da matéria fundida, o material solidifica-se em torno da semente conforme esta é afastada da superfície do Silício fundido. O puxamento ou crescimento do cristal, como é chamado, ocorre usualmente em uma atmosfera inerte. As taxas típicas de puxamento variam entre 10 e 0,1 cm/h, sendo que as taxas mais baixas possibilitam a produção de cristais mais perfeitos. Esse método é sensível a flutuações térmicas e mecânicas durante o processo de crescimento.

A Figura 12 representa o processo Czochralski adaptado para a produção de células solares, com a dopagem do material acontecendo durante o próprio processo de crescimento do cristal. Nesse caso a quantidade de material dopante deve ser dimensionada de modo a resultar na resistividade desejada para o cristal de Silício.

Para produzir junções $p-n$ usa-se o método da difusão gasosa, que consiste em aquecer uma amostra de cristal em uma atmosfera gasosa de elementos doadores ou receptores, a altas temperaturas, de tal forma que átomos de dopante se difundam na amostra. Esse é o método mais usado para produzir junções em cristais de Silício, para células solares(08).

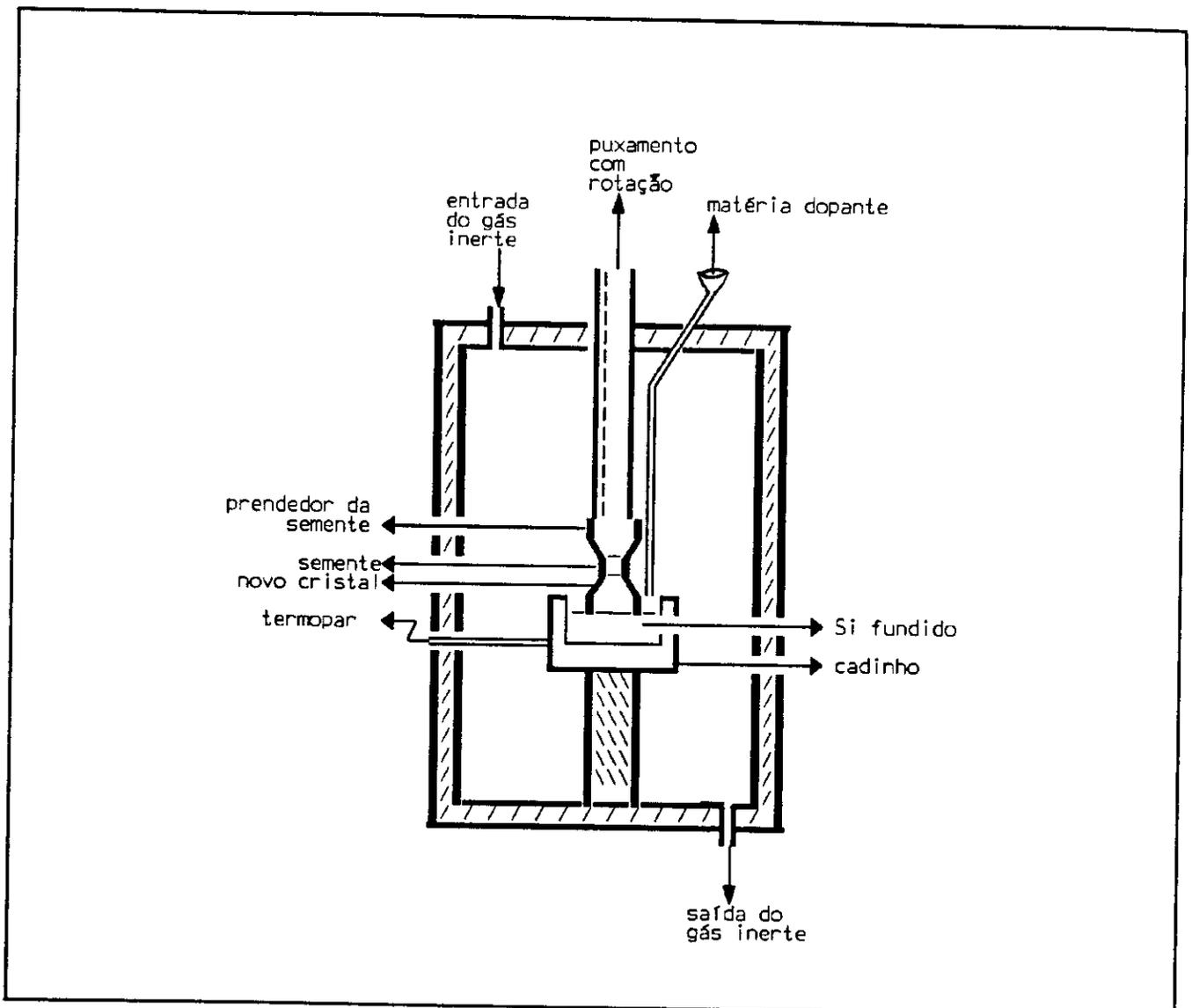


Figura 12 - Esquema Simplificado do Método Czochralski de puxamento de cristais.

Nos módulos, as células são hermeticamente encapsuladas com um filme fino de material plástico e resistente (normalmente é usado o EVA-Acetato de Vinil Etileno), formando um meio homogêneo e ópticamente contínuo, que, através de ciclos de pressão e temperatura, é transformado em um laminado perfeitamente aderente ao vidro e à cobertura posterior do módulo. A resistência a choques ou esforços mecânicos é assegurada pelas características semi-elásticas do EVA, que com a utilização de aditivos adequados, também proporciona boa resistência contra a degradação por ação dos raios ultra-violeta, garantindo vida útil prolongada, sob condições de intensa insolação.

A cobertura posterior dos módulos é feita por uma película de material plástico de cor branca^(*), resistente à água, raios ultra-violeta e agentes químicos, que assegura ao encapsulamento vedação perfeita contra poeira e umidade. Segundo o fabricante "as características óticas da cobertura branca e do encapsulamento transparente, proporcionam um acréscimo na energia luminosa captada pelas células, causado por reflexões internas, com máximo aproveitamento da radiação solar incidente".

Em um painel típico de 37 Wp utiliza-se uma cobertura frontal de vidro temperado transparente de 0,4 m² (1,00 m x 0,40 m) para proteção contra chuvas, ventos e impactos mecânicos, bem como vedação à penetração de poeira e umidade. A estrutura externa dos painéis é feita de perfis especiais de alumínio anodizado e a caixa

(*) A Heliodinâmica, única empresa nacional dedicada à fabricação de módulos e células fotovoltaicas, utiliza o Tedlar com essa finalidade.

dos terminais é de plástico de alto impacto, situada na face posterior de cada módulo.

Para a faixa atual de preço^(*) dos módulos fotovoltaicos (elevada se comparada com os preços da energia elétrica), os usos viáveis se restringem ao fornecimento de eletricidade para regiões onde não haja rede elétrica, mesmo assim para alimentar equipamentos que não necessitem de grande corrente e não consumam muita energia (ferro de passar roupa e alguns motores elétricos, por exemplo, exigiriam um número muito grande de módulos para alimentá-los).

Entretanto, os programas de interesse social que utilizam painéis fotovoltaicos vem sendo muito bem sucedidos, principalmente pelo fato desse tipo de equipamento não requerer praticamente nenhuma manutenção, podendo ser utilizado por comunidades onde o nível de instrução e conhecimento técnico seja baixo, o que ocorre em grande parte do país. Esta discussão será abordada com mais detalhes no capítulo 4 deste texto.

(*) Os módulos fotovoltaicos comercializados e produzidos pela indústria nacional custam cerca de US\$ 310 (módulos de 48 Wp), o que corresponde a US\$ 7000/kWp; dados do "Projeto Estação Ecológica Juréia-Itatins", CESP/93.

2.2. Breve histórico

Em 1839 foi observado pela primeira vez que a simples incidência da luz pode gerar uma tensão elétrica em uma estrutura de materiais apropriados. Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos das estruturas de estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial. Embora sejam eventos relativamente recentes, o desenvolvimento de tais artefatos para o uso da energia solar é de inegável importância.

A aplicabilidade das células solares como principal fonte de energia para uso em veículos espaciais é indiscutível, e a possibilidade de seu uso em aplicações terrestres massivas tem sido encarado com muita seriedade, principalmente em função dos problemas, de limitação das reservas existentes e agressões ambientais, associados às atuais fontes fósseis e à energia nuclear.

O desenvolvimento das pesquisas das células de filmes finos, e sua produção em escala industrial, é o próximo passo, e talvez o que vá definir as novas linhas de geração elétrica no mundo, para o próximo milênio(*).

2.2.1. No mundo

Os eventos-chave no desenvolvimento dos equipamentos de conversão da energia solar fotovoltaica podem ser visualizados através de uma representação logarítmica no tempo (Figura 13)⁽⁰⁹⁾. Torna-se imediatamente visível, a partir da densidade quase uniforme de datas

(*) Esta característica "potencialmente revolucionária" não é exclusiva da geração fotovoltaica. Existem outras tecnologias que, sendo desenvolvidas a escala comercial, teriam a mesma potencialidade, como é o caso da fusão a frio.

marcantes, que a freqüência de contribuições aumentou de maneira quase exponencial a partir de um passado recente. Isso corresponde à tendência geral de desenvolvimento da ciência e tecnologia durante esse período. Também é evidente a relativa escassez de eventos durante os últimos 30 anos, que se pode atribuir a um temporário nível de maturidade atingido no campo.

A descoberta dos fenômenos básicos por trás da operação das células solares deu-se após um intervalo de aproximadamente 100 anos, iniciado pela descoberta do Selênio, em 1817 por Berzelius, que foi também o primeiro a isolar o Silício elementar . A isso seguiu-se a descoberta do efeito fotovoltaico em células eletrolíticas por Becquerel, em 1839(*), e a descoberta da fotocondutividade no Selênio, em 1873, por Willoughby Smith. Este último evento deu origem a muitas outras descobertas, entre elas o conhecimento da sensibilidade espectral de fotocondutores de Selênio, a proposta de um medidor de níveis de luz, e a observação do efeito fotovoltaico em estruturas de estado sólido de Selênio, por Adams e Day, em 1876. Sete anos depois a primeira célula fotovoltaica de Selênio foi proposta por Fritts, que dois anos depois também tentou a primeira simulação do olho humano, resultado de uma combinação de células de Selênio e filtros de cor. Em 1904, a fotossensibilidade de estruturas de cobre e óxido de cobre foi observada por Hallwachs, e em 1914 o efeito fotovoltaico foi relacionado pela primeira vez com a existência de uma barreira de potencial.

(*) Ver no Anexo A a cópia do "**Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires**", de E.Becquerel, apresentado à Academia de Ciências de Paris, em 1839.

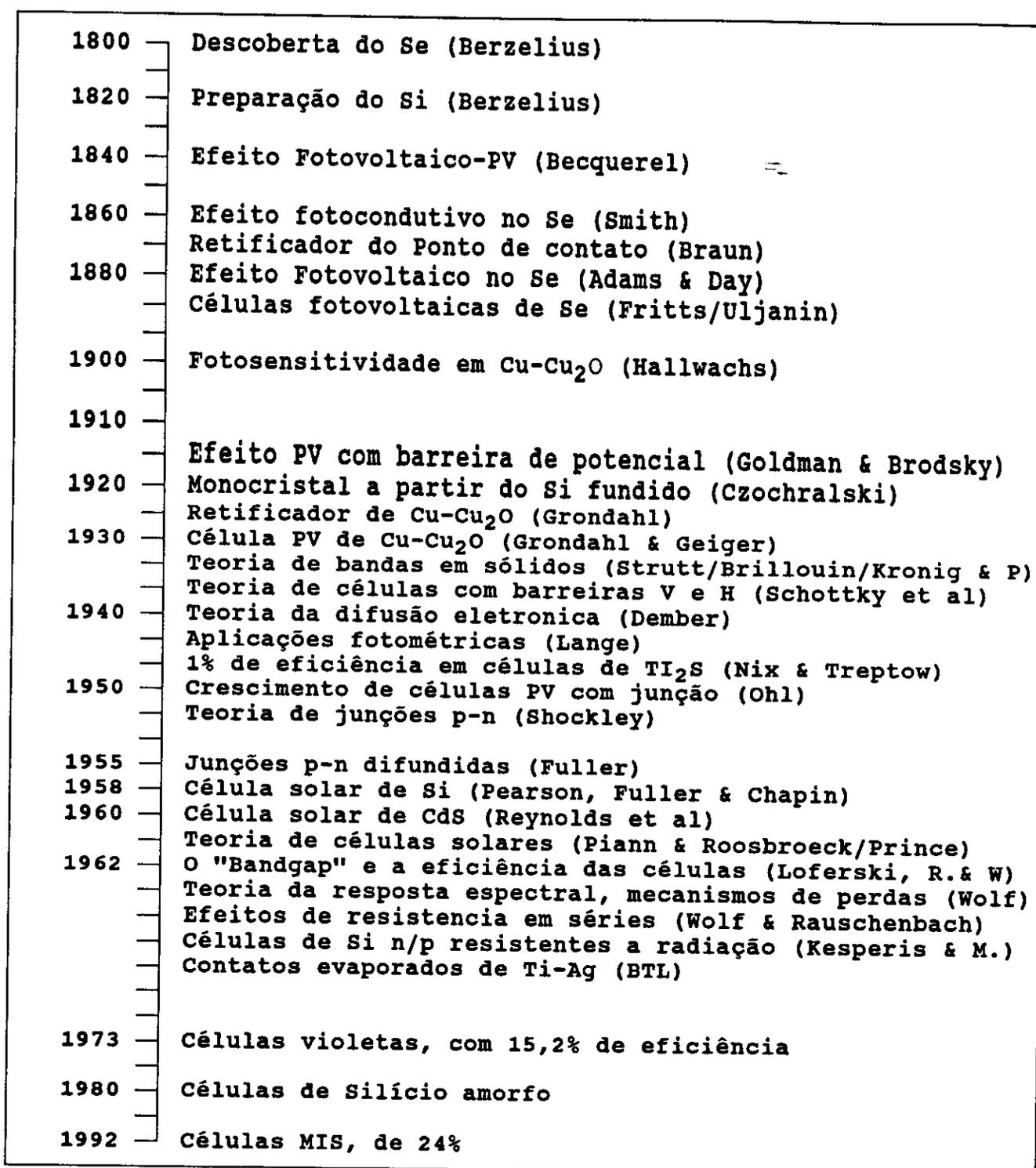


Figura 13 - Representação logarítmica dos eventos-chave no desenvolvimento das células solares⁽⁰⁹⁾.

Com essas descobertas estavam implantadas as bases para o futuro desenvolvimento da tecnologia de equipamentos fotovoltaicos. Entretanto, mais de uma década se passou antes de um novo período de atividade orquestrada se iniciar. O desenvolvimento do retificador de

Cobre/Óxido de Cobre levou a um novo interesse nessa estrutura para equipamentos fotovoltaicos. Conseqüentemente, suas características foram cuidadosamente exploradas e surgiram as primeiras teorias para explicar sua operação. Aplicações para o novo equipamento foram desenvolvidas, primeiramente em fotometria e sistemas de controle de luz, e foram iniciadas as linhas de produção. Na seqüência do desenvolvimento dos artefatos fotovoltaicos de Cobre/Óxido de Cobre, deu-se o aperfeiçoamento dos artefatos equivalentes de Selênio, que rapidamente excederam em desempenho os primeiros equipamentos em aproximadamente uma ordem de grandeza, resultando na substituição dos de Cobre/Óxido de Cobre. Eficiências de conversão de aproximadamente 1% foram finalmente atingidas com artefatos de Selênio, um valor que foi também atingido com artefatos de Sulfeto de Tálcio, desenvolvidos por volta de 1941.

Nos laboratórios da Bell, D.M.Chapin investigava, por volta de 1953, possíveis fontes de energia para sistemas de comunicação em localidades distantes, onde o uso da energia solar seria ideal. Ao mesmo tempo, C.S.Fuller⁽⁰⁹⁾ explorava vários procedimentos para formar junções *p-n* no Silício através da difusão de impurezas. Essas duas atividades, aparentemente desvinculadas, uniram-se quando G.L.Pearson, que estudava as junções *p-n* obtidas através do método de Fuller, observou que esses artefatos eram muito sensíveis à luz. Pearson tinha conhecimento dos esforços de Chapin⁽⁰⁹⁾, e juntos testaram o "diodo" de Pearson à luz do sol, observando uma eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica de 4%. O primeiro artefato testado por Chapin e Pearson foi obtido através da difusão de Lítio em Silício tipo *p*, uma célula solar "*n* sobre *p*". Infelizmente, o coeficiente de

difusão extremamente alto do Lítio tornou este dispositivo altamente instável em temperaturas ambientes.

Fuller continuou seus estudos e desenvolveu uma tecnologia de difusão de Boro, obtendo eficiências de até 6%. Em 1954 foi feita a demonstração da célula solar, despertando grande interesse da comunidade científica. A compreensão teórica das células solares seguia de perto os acontecimentos no campo prático. M. Prince publicou o primeiro tratamento analítico das mesmas em 1955⁽¹⁰⁾, onde reconhecia a relação fundamental entre os valores energéticos da banda proibida do semiconductor e a eficiência máxima teórica. Em julho de 1956, Loferski publicou seu trabalho em que analisava os melhores valores energéticos para a banda proibida (ver Figura 14). Loferski⁽¹⁰⁾ também mostrou que a eficiência varia em diferentes condições atmosféricas, e que para uso na superfície terrestre o Silício era o mais indicado.

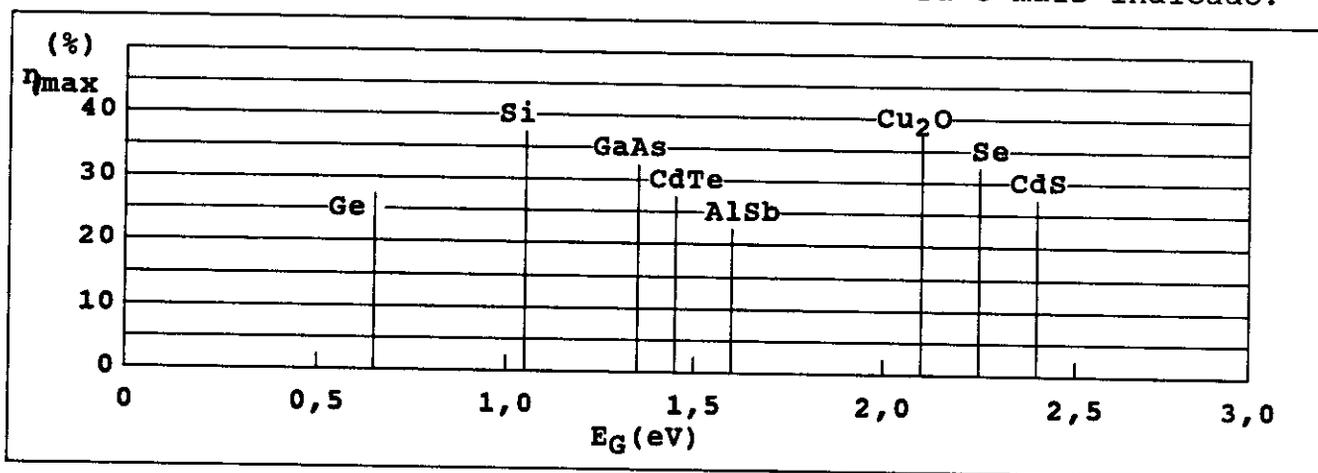


Figura 14 - Valores teóricos de máxima eficiência de conversão solar em função dos valores energéticos da banda proibida (E_G) para alguns semicondutores⁽¹⁰⁾.

Dois anos após ser atingida a eficiência de 6%, a indústria privada começou a produzir as células solares com a expectativa do desenvolvimento de mercados significativos. Melhorias no processo de fabricação, melhor entendimento da teoria de operação dos dispositivos

e, correspondentemente, melhoria no projeto dos mesmos (ver Figura 15), levaram a um crescimento gradual das eficiências que atingiram, em laboratório, 14% para luz solar incidente na superfície da Terra, em 1958(*). A partir desse ponto, o principal esforço de engenharia destinou-se a adaptar melhor as células a seus usos para sistemas de geração de energia no espaço, através da melhoria de sua confiabilidade e, em particular, sua resistência a radiação de partículas nucleares, e a reduzir seu custo de fabricação.

Quanto às células de outros materiais que não o Silício, seu desenvolvimento foi iniciado com artefatos de Cobre/Óxido de Cobre, que foram suplantados no devido tempo pelas células de Silício. Considerável esforço de desenvolvimento, em magnitude não muito menor que o dispendido nas células de Silício, foi feito na direção de células solares de Sulfeto de Cádmio, Telureto de Cádmio e Arseneto de Gálio, sendo que essas últimas mostraram-se mais favoráveis a operações a altas temperaturas. Os dispositivos de Sulfeto de Cádmio e Telureto de Cádmio eram promissores por seu potencial para fabricação em filmes finos a baixo custo⁽¹⁰⁾.

O desenvolvimento das células solares de Arseneto de Gálio foi retardado pelas dificuldades tecnológicas de processamento e pelo alto preço da matéria prima. Os dispositivos de Sulfeto de Cádmio prometiam eficiências iniciais como as das células de Silício

(*) Nas primeiras células solares a dopagem de Boro era mais densa na parte posterior das mesmas, de tal forma que os dois contatos podiam ser instalados nesta região, mas as perdas resistivas na camada tipo-p eram elevadas. Diminuir a espessura das células era o caminho para reduzir essas perdas, mas também reduzia a eficiência de absorção em pequenos comprimentos de onda. Essas questões foram melhor compreendidas em 1957, como descrito por Pearson, obtendo-se eficiências em torno de 10%.

monocristalino. Na condição de filmes finos suas eficiências eram mais baixas, mas não tanto para que fossem completamente desencorajantes. Essa eficiência marginal, combinada com problemas de confiabilidade, criou dificuldades à aceitação desses dispositivos para aplicações espaciais, apesar de sua comprovada resistência à radiação. A célula de telureto de Cádmio, finalmente, falhava em todos os três atributos: eficiência, confiabilidade e custo. Também foram feitos esforços com outros materiais e com variações das estruturas dos artefatos, tanto para células de silício como em outras células de outros semicondutores.

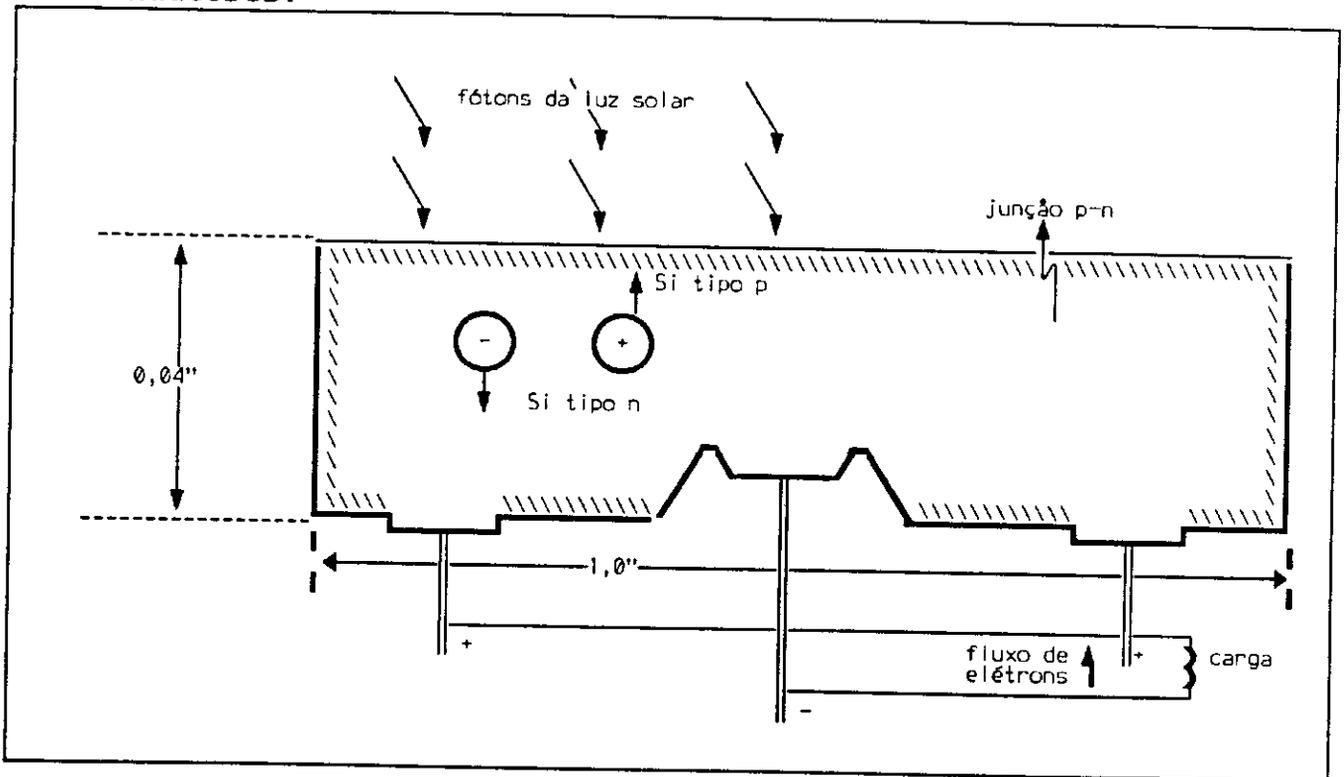


Figura 15 - Esquema das primeiras células solares de silício (10).

Quando as células solares de Silício apareceram em cena, estavam sendo pensadas para um grande mercado em aplicações terrestres, primeiro substituindo as células de Selênio de baixo desempenho comprovado, problemas de fadiga e limitada vida útil de

operação. Entretanto, era inegável que a resposta espectral das células de Selênio tornavam-nas idealmente convenientes para aplicações de medidas de iluminação para fotografia e em fotometria geral. O alto rendimento das células de Silício estava baseado na sua resposta espectral ampla. Com o objetivo de reduzi-la à "curva padrão de observação" são necessários filtros óticos, a adição dos quais torna as células de Silício quase imbatíveis. Também em outras aplicações as células de Silício apresentam muitas vantagens.

Os pesquisadores dos Laboratórios da Bell Telephone⁽¹⁰⁾ previram originalmente um brilhante futuro para estes dispositivos, como conversores terrestres de energia solar em corrente elétrica, e se dedicaram a provar o seu potencial nesse uso, através da instalação de células solares em uma estação repetidora e amplificadora de sinais para telefonia, na Geórgia. Essa estação cumpriu satisfatoriamente suas funções por mais de um ano. Entretanto, em função do custo original de instalação, o custo da energia gerada não era competitivo com o da energia convencional.

Observando-se essa situação com base nos conceitos modernos de gerenciamento de pesquisas, e com a informação potencialmente disponível em meados dos anos 50, o fato poderia sugerir que perdeu-se dinheiro no desenvolvimento da célula solar de Silício. Um estudo anterior de mercado teria mostrado que a aplicação terrestre dessas células na conversão da energia solar não seria competitiva em diversas aplicações, incluindo aquela testada pelos pesquisadores da Bell Telephone⁽¹¹⁾. Afinal, linhas de comunicação telefônica são instaladas preferencialmente em áreas razoavelmente populosas, onde as redes de distribuição de energia convencional são bem estruturadas.

As duas companhias de dispositivos semicondutores que abriram suas linhas de produção para células solares de Silício, em 1956, também não fizeram nenhuma pesquisa adicional de mercado antes de entrarem nessa nova aventura, e dirigiram-se ao mercado errado.

A grande ironia histórica das células de Silício foi que até aquele momento, ninguém havia previsto que, com o possível florescimento da era espacial, a célula solar seria o único artefato capaz de fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço, com o menor peso e custo (imbatível nesse uso até os dias atuais). Nos primeiros planos do programa espacial, os decisores aparentemente consideraram as células solares como uma curiosidade insignificante e irreal, e decidiram equipar seus veículos espaciais com baterias químicas que eram capazes de fornecer energia somente para poucas semanas. Portanto, não haviam razões para desenvolver esforços nas células solares com propósitos espaciais. Uns poucos pesquisadores da United States Army Signal Corps, de Fort Monmouth, entretanto, ousadamente incorporaram seis pequenos grupos das então comercialmente inviáveis células solares de Silício satélite Vanguard I, para energizar seus sistemas reserva de transmissão de 5 mW⁽¹¹⁾. Não consideraram as implicações de lidar com células de grande vida útil, e não proveram o transmissor de um sistema de desligamento. Por isso, o satélite emitiu sinais de rádio por cerca de 8 anos! Apenas parou por problemas gerados pela radiação.

Outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares, foi a necessidade de energia para satélites operando em faixas de altitude onde ficam expostos a níveis significativos de radiação nuclear, presentes nessas regiões. Já era conhecido o fato de

que o cinturão de Van Allen, por exemplo⁽¹¹⁾, contém um fluxo significativo de prótons de altas energias. Os estudos desenvolvidos na União Soviética chegaram a um novo tipo de célula que apresenta maior resistência à radiação ionizante. Nelas, o substrato de Silício (base) é dopado com Boro (tipo p) e o emissor é produzido por difusão de átomos de Fósforo (dopante tipo n). Nesse caso a camada n é fina o suficiente para permitir que a maior parte dos fótons da luz solar seja absorvida na base, tipo p. A partir desse princípio fabricaram as primeiras "células solares azuis". O primeiro satélite equipado com esse tipo de células foi o Telstar, lançado em 10 de julho, de 1962.

Então, as pesquisas dirigiram-se ao desenvolvimento das "células negras", com índice de reflexividade próximo a zero, e chegando a eficiências de 15% no espaço e até 19% na superfície.

O crescimento do número de dispositivos de Silício em aplicações espaciais pode ser evidenciado pelos seguintes números:

1958	108 células (0,5 W totais)
1962	154.000 células (5,4 kW totais)
1969	3.000.000 células (105 kW totais)

Tabela 1 - Potência instalada de células solares em veículos espaciais⁽¹¹⁾.

A crise energética de 1973 renovou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar viável economicamente essa forma de conversão de energia, seria necessário reduzir até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Enquanto as células solares usadas no espaço custavam cerca de US\$ 300,00/Wp, as células para aplicações terrestres precisam alcançar patamares de US\$ 2,00/Wp, "e este é o grande desafio para a indústria"⁽¹²⁾. Em 1978 a produção da indústria no mundo já

ultrapassava a marca de 1 MWp/ano⁽¹²⁾. As estimativas de preços por Wp em dólares de 1981, feitas pelo DOE-EUA, na época, estão na Tabela 2.

ANO	CÉLULAS (US\$/Wp)	SUB-SISTEMAS (US\$/Wp)	TOTAL (US\$/Wp)
1973	196,0	----	----
1978	16,8	19,8	36,6
1980	6,6	13,2	19,8
1981	3,2	10,5	13,7
1986	0,8	6,6	7,4
2000	0,13-0,27	----	----

Tabela 2 - Evolução e projeção de preços das células solares (US\$/Wp), para quantidades de dezenas de kWp⁽¹²⁾.

O objetivo das pesquisas americanas na década de 80 era fornecer de 1% a 5,5% de toda a energia elétrica consumida no ano 2000 nos Estados Unidos, através de conversão fotovoltaica.

Os anos 80 foram marcados pela disputa do mercado internacional, por parte das indústrias fotovoltaicas de todo o mundo. Aproximadamente US\$ 300 milhões de dólares de equipamentos fotovoltaicos foram vendidos nos Estados Unidos em 1988⁽¹³⁾. Segundo o Instituto de Pesquisas de Energia Solar, do Colorado, 30% dessas vendas foram de produtos de consumo, 60% de produtos industriais e 10% foram vendas efetuadas a governos. Durante o período entre 1980 e 1986, o mercado cresceu num ritmo anual médio de 40%. Em 1989 a CEE decidiu investir US\$ 30 milhões em equipamentos europeus de bombeamento de água acionados por módulos fotovoltaicos, para países europeus atingidos por estiagens. Segundo Scott Skalar, diretor-executivo da Solar Energy Industries Association dos Estados Unidos, este apoio "visava permitir aos fabricantes europeus de equipamentos fotovoltaicos suplantar seus concorrentes norte-americanos"⁽¹³⁾.

Em 1988, os governos do Japão e da Alemanha Ocidental investiram mais no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica que o dos Estados Unidos. Quanto ao volume de vendas, houve uma queda da participação da indústria norte-americana no mundo. Em 1983, os Estados Unidos dominavam cerca de 60% desse mercado. Em 1987 a porcentagem já havia decrescido até 35%. No decorrer deste mesmo período, a participação das empresas japonesas aumentou de 20% para cerca de 40%⁽¹³⁾.

Houve uma modificação também com relação ao tipo de empresas envolvidas no setor^(*). Nos Estados Unidos foram as empresas de petróleo que resolveram se diversificar em direção à energia solar, e que dominaram o setor. Já no Japão e em parte da CEE, as indústrias fotovoltaicas são oriundas de grupos poderosos nos setores eletrônico e de manufaturas⁽¹³⁾, como a Siemens, a Sanyo, a Fuji e a Hitachi. Esta concorrência pelo mercado é mais um fator que resulta em redução de preços do Wp.

As pesquisas mundiais em conversão fotovoltaica nos últimos anos, seguem diversas direções e são desenvolvidas por diversos atores, desde os tradicionais laboratórios de centros de pesquisa, até os departamentos de desenvolvimento tecnológico das indústrias. Procura-se melhorar a eficiência das já tradicionais células de Silício monocristalino, aprimorar os módulos de Silício policristalino e viabilizar a produção em escala industrial das chamadas "células solares de filmes finos", à base de Silício amorfo, que provavelmente revolucionarão a forma de gerar energia no próximo milênio.

(*) Posteriormente perderam o interesse no setor, muito em função da queda dos preços do petróleo que se seguiu.

2.2.2. No Brasil

A pesquisa sobre energia solar no Brasil, em sua quase totalidade, esteve restrita às universidades e centros de pesquisa, muitas vezes sendo conduzida dentro de programas de pesquisa em ciência aplicada. O breve histórico que se segue, tem menos a pretensão de ser uma síntese dos acontecimentos reais, e mais a tentativa de buscar um caminho para retratar a forma atual em que se inserem os estudos na área.

Esse relato inicia-se em 1952, com as primeiras tentativas de implantação de um centro de pesquisa no campo da energia solar, pelo CEMA-Centro de Mecânica Aplicada, do Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio, através de Teodoro Oniga. Nessa mesma época, o Dr. Jaime Santa Rosa apresentou, no X Congresso Brasileiro de Química, no Rio de Janeiro, um estudo sobre o assunto.

Em 1958, um grupo de pesquisadores do INT-Instituto Nacional de Tecnologia produziu uma pequena caldeira solar utilizando *superfícies seletivas*(*). Esse grupo também realizou o projeto de um refrigerador solar a ciclo de absorção intermitente, que foi apresentado em 1961, no Congresso Internacional de Novas Fontes de Energia, em Roma, sob patrocínio da UNESCO, e um projeto para secagem de xisto betuminoso em Tremembé. Foi por iniciativa daquele Instituto, e do Dr. Teodoro Oniga, que realizou-se o I Simpósio Brasileiro de

(*) Chama-se *superfície seletiva* a toda a superfície que, para ser usada na absorção da radiação solar, recebe um tratamento com a finalidade de aumentar a sua capacidade de absorção em comprimentos de onda da radiação incidente, e diminuir a emissividade no infra-vermelho, maximizando a eficiência do equipamento.

Energia Solar, no Rio de Janeiro, em 1958, sob o patrocínio do CNPq-Conselho Nacional de Pesquisas. Este talvez tenha sido o primeiro evento realizado no país sobre o assunto⁽¹⁴⁾.

Em 1959, pesquisadores do Departamento de Materiais do CTA-Centro Técnico da Aeronáutica, iniciaram a instalação de um forno solar para altas temperaturas, com concentrador parabólico de dupla reflexão⁽¹⁴⁾. Esse forno tinha 1,5 kW de potência, mas as pesquisas foram interrompidas em 1964, e o forno permaneceu abandonado por mais de 10 anos.

No final da década de 60, uma equipe de professores do ITA-Instituto Tecnológico da Aeronáutica, iniciou pesquisas em destiladores solares e pequenos concentradores para cocção. Em 1973, esse grupo recebeu recursos do FUNTEC-Fundo de Desenvolvimento Técnico Científico do BNDE-Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico, para um programa de pesquisas cuja ênfase principal era a secagem de alimentos e os motores solares. O grupo se dispersou em fins de 1974.

Em 1972, alguns professores da UFPb-Universidade Federal da Paraíba, iniciaram pesquisas em energia solar, desenvolvendo destiladores, aquecedores e secadores solares. Em 1973 criaram o LES-Laboratório de Energia Solar, e conseguiram financiamento da SUDENE-Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste, para a instalação de uma rede solarimétrica piloto no Estado da Paraíba e, posteriormente, do FUNTEC, para um projeto abrangendo diversas linhas de pesquisa. Em 1974, com financiamento do CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, obtiveram a transferência do forno solar do CTA para o LES.

O II Simpósio Brasileiro de Energia Solar foi promovido pela UFPb, em 1973, em João Pessoa, sob patrocínio do CNPq. A essa época, em plena crise energética mundial, o interesse pela conversão da energia solar levou outros grupos de pesquisadores no país a desenvolverem estudos sobre o assunto.

No Estado de São Paulo, a USP-Universidade de São Paulo e a UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, iniciaram seus estudos em superfícies seletivas, desenvolvimento de protótipos de concentradores, aperfeiçoamento de coletores planos, e na área da conversão fotovoltaica de energia solar.

O grupo do **Laboratório de Microeletrônica da USP**, ligado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, iniciou suas atividades em 1974 através do desenvolvimento de uma tese de mestrado em Células Solares de Silício⁽¹⁵⁾. Em 1981, iniciou o desenvolvimento de técnicas para fabricação de células de Silício monocristalino, a melhores preços⁽¹⁵⁾. Houveram pesquisas voltadas à redução da reflexão superficial de luz, e também na procura de materiais e processos mais baratos para a fabricação da grade coletora frontal e do contato metálico posterior das células. Foram obtidas células solares mais baratas com eficiência de conversão superior a 12,5%.

De 1983 a 1989, esse grupo de trabalho, ainda ativo, desenvolveu também atividades ligadas ao desenvolvimento de células de Silício policristalino e sua otimização, e investigou fenômenos de transporte em Silício amorfo.

Outros grupos de pesquisa no país também se dedicaram à tecnologia fotovoltaica, com destaque para:

. **Laboratório de Sensores do INPE**, Instituto de Pesquisas Espaciais, de São José dos Campos: iniciou suas atividades testando e qualificando células solares; seu interesse principal era o desenvolvimento de células solares para serem utilizadas em experimentos espaciais, principalmente no primeiro satélite brasileiro.

. **Laboratório de Conversão Fotovoltaica, da UNICAMP**: esse grupo, ligado ao Instituto de Física daquela universidade, vem trabalhando desde 1980 em materiais e processos fotovoltaicos; a ênfase do grupo está mais no entendimento do fenômeno físico de funcionamento das células solares do que em seus aspectos de engenharia; suas atividades, como as dos demais grupos de universidades, também sofreram uma diminuição em velocidade e em volume.

. **Laboratório de Microeletrônica e Células Solares, do IME**: o grupo, ligado da Departamento de Ciências dos Materiais, do Instituto Militar de Engenharia, no Rio de Janeiro, foi o único grupo a trabalhar, no país, em células solares de Sulfeto de Cádmio/Sulfeto de Cobre, a partir de 1981. O grupo do IME conseguiu eficiências de até 7% em células solares de Selênio.

. **Laboratório de Materiais e Interfaces, da COPPE**: o grupo do Departamento de Metalurgia e Ciências dos Materiais, da Universidade do Rio de Janeiro, iniciou suas atividades em 1970. As atividades em células solares iniciaram-se em 1982, com pesquisas em Silício amorfo. Também pesquisaram óxidos condutivos transparentes.

Os grupos mencionados envolvem de 10 a 20 pessoas, incluindo pesquisadores seniors, mestrandos e doutorandos. Existem em outras universidades, grupos de 3 a 5 pesquisadores, que também se dedicam a

estudos na área de conversão fotovoltaica, cujo campo de atuação é preferencialmente acadêmico.

Industrialização

Em 1979, começaram a ser produzidos módulos fotovoltaicos no Brasil pela Fone-Mat, a partir de células importadas. Sua produção cessou depois de alguns anos.

Em 1980 instalou-se no Brasil a única companhia de capital e tecnologia nacionais, iniciando suas atividades pelo desenvolvimento de sistemas solares térmicos. Entre 1983-1984, a Heliodinâmica S.A. começou a produzir substratos de Silício, células solares e sistemas fotovoltaicos. Seu capital está avaliado em cerca de US\$ 10 milhões, e fornece por volta de 100 empregos diretos. Sua produção anual é de cerca de 1,2 milhões de lâminas de Silício de 100 mm de diâmetro pelo método Czochralski. Também produzem anualmente cerca de 0,5 milhões de células quadradas (de 10 cm de lado) de Silício policristalino. A capacidade instalada da fábrica é de 1 MWp/ano em células solares e módulos fotovoltaicos.

Na época da implantação da Heliodinâmica, passou a vigorar no Brasil a chamada "lei da informática", com a finalidade de preservar o mercado interno a fornecedores nacionais de equipamentos e programas para computadores. Essa lei, cuja discussão levantou muita polêmica, pretendia oferecer um "prazo" às capacidades empresariais nacionais para se equipararem ao mercado internacional, suportando assim a concorrência com as grandes empresas mundiais, que cedo ou tarde também entrariam no mercado interno. Como praticamente todos os produtos da microeletrônica são feitos com Silício, os equipamentos

fotovoltaicos e a Heliodinâmica foram abarcados pela lei, e todo o mercado nacional fotovoltaico ficou, durante aproximadamente 10 anos, reservado à essa empresa. No entanto, essa aparente vantagem não foi capaz de garantir estabilidade financeira à essa empresa, por motivos que deverão ser discutidos posteriormente. Cabe ressaltar que, para o mercado interno, a Heliodinâmica fornecia sistemas fotovoltaicos a cerca de US\$ 20/Wp^(*), enquanto as informações conhecidas do mercado externo indicavam preços até 5 vezes menores.

Em meados dos anos 80, internamente já se considerava que haviam condições apropriadas para o desenvolvimento de um mercado brasileiro de geração fotovoltaica. As dimensões do país, tornando praticamente impossível o atendimento de todas as regiões por sistemas centralizados de geração de energia e dificultando as condições para sua distribuição, e a situação geográfica do território, favorecido por elevados índices de insolação, são fatores extremamente favoráveis à adoção de sistemas fotovoltaicos de geração de energia.

Com esse cenário em mente, foi elaborado em outubro de 1989 o PRO-SOLAR, um plano nacional voltado à intensificar o uso da energia solar. Foram chamados a participar da discussão os atores nacionais envolvidos com a questão fotovoltaica, a saber, os centros de pesquisa, as indústrias e as empresas de energia do país. Entre outros objetivos, o PRO-SOLAR pretendia preparar o "sistema tecnológico" brasileiro para o desenvolvimento do mercado de energia solar, previsto em todas as projeções mundiais.

(*) Esse preço foi obtido para o projeto de "Postos de Saúde do Vale do Ribeira", da CESP, cuja implantação teve início em 1985.

No início desta década (90) já se anunciavam as modificações econômicas que o país enfrentaria. Em particular, já estava claro a nível internacional que a "lei de informática" estava com seus dias contados. As indústrias fotovoltaicas de todo o mundo, interessadas no mercado nacional, iniciaram suas articulações visando sua entrada no mercado brasileiro.

Na mesma época, o governo alemão, através da GTZ(*), desenvolve o "Programa Eldorado", através do qual fornece financiamento na forma de equipamentos e assistência técnica, a projetos na área fotovoltaica e eólica. O programa está voltado a cinco países em desenvolvimento, selecionados segundo critérios do governo alemão, e para cada país foi designada uma indústria fornecedora. No caso do Brasil, foi designada a Siemens, da Alemanha.

Em novembro de 1990, promovido pelo Ministério de Minas e Energia e pela Comunidade Econômica Européia, realizou-se, no Centro de Treinamento da CAEEB-Companhia Auxiliar às Empresas Elétricas Brasileiras, o 1º Encontro Brasil-CEE sobre Tecnologias de Energia Solar. Naquele encontro as empresas européias de energia solar, com destaque para as empresas fotovoltaicas, explicitaram seu interesse em competir no mercado interno(**).

Em outubro de 1992 começaram a ser retiradas as barreiras alfandegárias à importação de equipamentos de informática. A Siemens Solar International ultima as suas instalações no Brasil, e passa a

(*) GTZ - Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit, Agência Alemã de Cooperação Técnica, do Ministério de Pesquisa e Tecnologia da Alemanha.

(**) Pode-se inferir a importância dada pela CEE ao mercado brasileiro e ao evento, examinando os anais desse Encontro e o número de experiências selecionadas, que foram ali apresentadas.

atuar inicialmente comercializando equipamentos produzidos em suas fábricas norte-americanas. A Solarex, dos Estados Unidos, através da BR Solar, também passa a disputar o mercado interno. Seu alvo preferencial são as empresas de telecomunicações e as empresas de energia. Os preços inicialmente praticados por estes novos fornecedores do mercado interno, no entanto, ainda estavam nas bases de US\$ 20/Wp, para sistemas.

Em setembro de 1992 realizou-se no Rio de Janeiro, sob patrocínio da Eletrobrás/CEPEL, o Workshop de Energia Fotovoltaica, com representantes das empresas do grupo Eletrobrás e de universidades. Nesse encontro foram discutidas as questões que vinham dificultando a penetração dessa tecnologia de geração. A questão de preço foi abordada e houve consenso sobre a necessidade de torná-los mais próximos aos das outras formas de geração.

Foram retomadas algumas propostas contidas no PRÓ-SOLAR, e constituído o GTEF-Grupo de Trabalho sobre Energia Fotovoltaica, que tem por objetivo intensificar o uso dessa alternativa, e estudar as opções mais adequadas para tal. Esse grupo de trabalho está atuante e espera-se que a conjugação das suas iniciativas com as tendências do mercado, que estão impelindo outras indústrias para o mercado nacional, definam o panorama que se instalará a partir de agora.

Pela presente revisão histórica pode-se observar a importância da ligação entre a pesquisa científica e tecnológica de ponta, e as indústrias do setor, apoiando ou mesmo implementando o seu desenvolvimento. Em contrapartida, a realidade da pesquisa brasileira leva a crer que o país ainda não reúne as condições para a absorção dessa tecnologia, e sua posterior adaptação às características locais.

"...bom viver graças ao calor do Sol,
benfeitor dessa região..."

G.Gil

3. DADOS SOLARIMÉTRICOS E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Dada a sua natureza não poluente e sua permanente disponibilidade, a radiação solar é, de fato, uma opção promissora para geração de energia. No entanto, sua baixa densidade de fluxo e sua variação temporal (ciclo diurno e noturno) fazem com que seu aproveitamento seja bastante difícil.

Para analisar a viabilidade de utilização de qualquer energético é importante conhecer a distribuição espacial de sua oferta. No caso da energia solar, o aspecto espacial cresce em importância, tanto pelas características apontadas, quanto por que diferentes situações geográficas determinam substanciais modificações na disponibilidade dessa radiação.

A avaliação da radiação incidente pode ser feita através de medidas diretas, ou com a utilização de valores derivados de outros dados meteorológicos existentes. Para o dimensionamento de sistemas de captação e conversão da energia solar também são importantes dados sobre:

- . insolação em um ano (número de horas diárias de brilho solar);
- . sazonalidade da incidência de energia;
- . temperaturas e suas variações diárias e sazonais.

No presente capítulo pretende-se relatar algumas características da Rede Solarimétrica Nacional e apresentar os dados fundamentais para usos fotovoltaicos, que são: a radiação solar global incidente e a insolação ao longo do ano. Também pretende-se avaliar o desempenho energético de um módulo especificado nas condições solarimétricas médias de cada região administrativa do país

3.1. Características da rede de obtenção de dados

Em 1978, por iniciativa do INEMET-Instituto Nacional de Meteorologia, foi instalado o Centro Nacional de Radiação Solar, a fim de estabelecer um controle de qualidade dos dados solarimétricos, mediante a verificação periódica do estado dos instrumentos que compõem a Rede Solarimétrica Nacional. Existente desde 1977, ela é composta de 20 estações instaladas rigorosamente de acordo com os critérios estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial. A localização geográfica dessas estações, listadas na Tabela 3, está representada na Figura 16.

Em 1986, houve uma tentativa, financiada pela FINEP⁽¹⁶⁾, de reequipar o Centro Nacional de Radiação Solar e a Rede Solarimétrica Nacional. O projeto contou, em janeiro de 1986 com cerca de US\$ 250 mil de recursos aplicados.

Do ponto de vista metodológico, o projeto visava suprir a contento os dados solarimétricos necessários à realização de qualquer projeto de energia solar em território nacional, uma vez que o Centro Nacional de Radiação Solar tem o objetivo de:

- . efetuar o controle operacional das estações componentes da Rede Solarimétrica Nacional;
- . arquivar, analisar e processar os dados solarimétricos coletados nas estações da Rede Solarimétrica Nacional;
- . operar um conjunto de equipamentos solarimétricos para a realização de medidas no campo da radiação solar global, direta, difusa e espectral;
- . realizar a calibração e intercomparação de equipamentos de medida de radiação solar;

- . testar o desempenho de instrumentos de medida de radiação solar e padronização de medidas;
- . realizar pesquisas no campo das aplicações da radiação solar;

N ^o	L	ESTAÇÃO	ESTADO	LAT. SUL	LOG. OESTE
82024	1	Boa Vista	RO	(N) 02°49'	60°39'
82191	2	Belém	PA	01°27'	48°28'
82280	3	São Luís	MA	02°32'	44°17'
82331	4	Manaus	AM	03°08'	60°01'
82397	5	Fortaleza	CE	03°46'	38°36'
82678	6	Floriano	PI	06°46'	43°02'
82765	7	Carolina	MA	07°20'	47°28'
82983	8	Petrolina	PE	09°23'	40°30'
82229	9	Salvador	BA	13°00'	38°31'
83288	10	Bom Jesus da Lapa	BA	13°16'	43°25'
83361	11	Cuiabá	MT	15°33'	56°07'
83377	12	Brasília	DF	15°47'	47°56'
83498	13	Caravelas	BA	17°44'	39°15'
83587	14	Belo Horizonte	MG	19°56'	43°56'
83612	15	Campo Grande	MS	20°27'	54°37'
83743	16	Rio de Janeiro	RJ	22°55'	43°10'
83781	17	São Paulo	SP	23°30'	46°37'
83826	18	Curitiba	PR	25°26'	49°16'
83967	19	Porto Alegre	RS	30°01'	51°13'
83826	20	Foz do Iguaçu	PR	25°33'	54°34'

Tabela 3 - Localização das 20 estações da Rede Solarimétrica Nacional, instaladas pelo INEMET, operando desde 1977.
L - Numeração para localização no mapa da Figura 16.

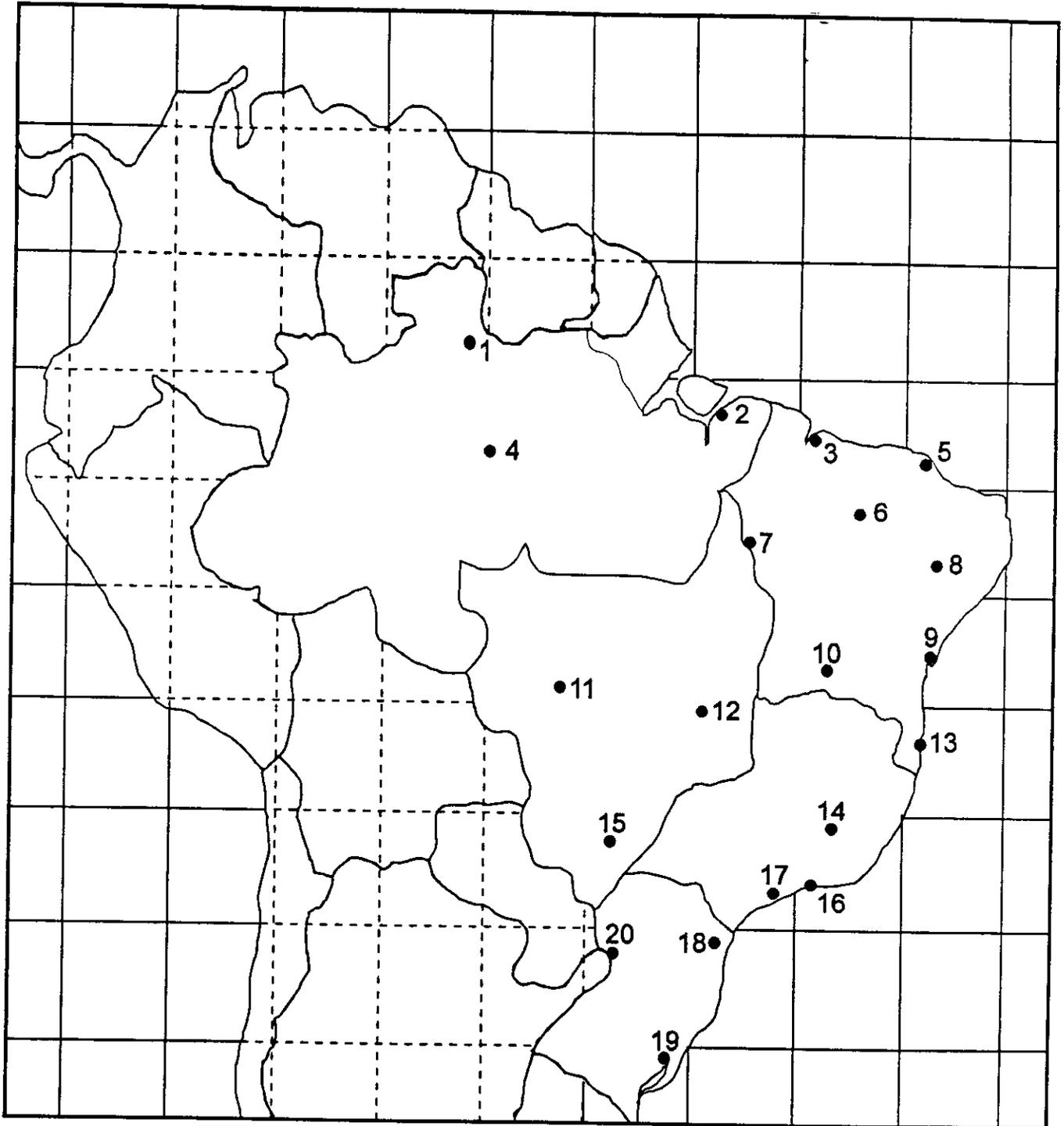


Figura 16 - Distribuição Geográfica da Rede Solarimétrica Nacional

. divulgar os dados solarimétricos coletados na Rede Solarimétrica Nacional e manter intercâmbio com instituições internacionais.

Os instrumentos que fornecem os valores de radiação medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre diversos comprimentos de onda. A radiação solar cobre toda a região do espectro visível, de 0,4 a 0,7 μm , e o infravermelho, de 0,7 a 5 μm . As medições padrão são a radiação global, a componente difusa no plano horizontal e a radiação direta normal. Normalmente, o sensor de radiação é uma termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, igualmente iluminadas e pintadas de preto e branco. Existem também instrumentos solarimétricos construídos à base de pares bimetalícos, onde a radiação é obtida através de correlação com a expansão diferencial do metal, causada pela diferença de temperatura entre as superfícies branca e preta dos metais. São os actinógrafos tipo Robitzch-Füess, onde a expansão do sensor movimenta uma pena que registra o valor instantâneo da radiação solar⁽¹⁷⁾. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20%

No caso da Rede Solarimétrica Nacional, as estações estão equipadas com piranômetros Eppley preto e branco modelo 8.48, faixa espectral de 0,3 a 3,0 μm . Para o registro da radiação solar foram acoplados totalizadores eletrônicos Hobeco, de fabricação nacional. As medidas de radiação global são realizadas três vezes ao dia (12:00, 18:00 e 24:00 TMG) e anotadas em formulários próprios que, ao fim de cada mês, são enviados juntamente com os dados de insolação para o Centro Nacional de Radiação Solar, em Brasília, para o processamento dos dados solarimétricos.

A aferição dos totalizadores é feita mensalmente pelos observadores meteorológicos nas próprias estações solarimétricas, através de testes de acuidade, cujos resultados são controlados por computador, obtendo-se maior confiabilidade nos dados coletados pela Rede Solarimétrica Nacional.

Os piranômetros são comparados periodicamente com os instrumentos padrão e na esfera integradora do Centro Nacional de Radiação Solar, a fim de garantir a qualidade das constantes de calibração dos equipamentos.

Através do projeto, também foram importados os seguintes equipamentos:

- . um radiômetro absoluto de cavidade Eppley, tipo Kendall, com unidade de controle;
- . um rastreador solar para radiômetro;
- . conjunto de filtros para medidas espectrais.

Além desses, destinados aos trabalhos de calibração de piranômetros, foram recebidos através do PNUD-Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento e da OEA-Organização dos Estados Americanos, um potenciômetro milivoltímetro, quatro piranômetros e um difusômetro, que foram incorporados ao Centro, em Brasília e na Rede Solarimétrica Nacional.

Também através do PNUD, o Centro recebeu uma leitora de fita de papel, que permite o processamento de dados solarimétricos diretamente recebidos pelo terminal de Telex. Como parte do programa, também são digitalizados por computador os diagramas de piranógrafos bi-metálicos instalados nas estações solarimétricas. Os valores

obtidos são utilizados nas estimativas da radiação solar quando não se dispõe de dados medidos com piranômetros.

Conforme recomendação da Organização Meteorológica Mundial, a partir de janeiro/81 as medidas de radiação solar estão sendo atualizadas em função da Referência Radiométrica Mundial (WRR).

Os dados provenientes da rede nacional podem ser obtidos através de solicitação ao Centro, em Brasília, porém muitos estados possuem redes próprias de dados solarimétricos. As informações levantadas recentemente dão conta de que boa parte das estações estão funcionando precariamente por falta de recursos para a manutenção adequada e por carência de pessoal técnico habilitado.

Além da rede, os outros instrumentos instalados nas diversas regiões do país, segundo levantamento do GTEF, são:

- . heliógrafos Campbell-Stokes, num total de 187 pelo Brasil, sendo que 69 estão instalados em estações no Nordeste;
- . 32 actinógrafos Robitzsch-Fuess, instalados no Nordeste.

Segundo informações fornecidas pelo INEMET à CHESF-Companhia Hidroelétrica do São Francisco, em 1985, os equipamentos existentes nos diversos estados, incluindo os equipamentos da Secretaria de Agricultura do Paraná, Fernando de Noronha, Secretaria de Agricultura do Rio Grande do Sul e da Secretaria de Agricultura de São Paulo, estão sintetizados na Tabela 4.

ESTADO	HELIÓGRAFO	ACTINÓGRAFO
ACRE	0	0
ALAGOAS	1	0
AMAPÁ	1	1
AMAZONAS	4	1
BAHIA	14	9
CEARÁ	5	5
DISTRITO FEDERAL	1	1
ESPÍRITO SANTO	4	0
GOIÁS	3	2
MARANHÃO	9	2
MATO GROSSO	6	2
MATO GROSSO DO SUL	9	1
MINAS GERAIS	21	10
PARÁ	8	5
PARAÍBA	5	3
PARANÁ	10	15
PERNAMBUCO	4	3
PIAUI	1	5
RIO DE JANEIRO	11	1
RIO GRANDE DO NORTE	2	3
RIO GRANDE DO SUL	14	37
RONDÔNIA	1	0
RORAIMA	1	0
SANTA CATARINA	5	2
SÃO PAULO	20	7
SERGIPE	1	2
TOCANTINS	1	1
TOTAL	162	118

Tabela 4 - Número de heliógrafos e actinógrafos existentes em cada Estado.

Mais recentemente, em função dos avanços mundiais no uso de satélites geo-estacionários, existe também a possibilidade de avaliar o potencial solarimétrico através de sensoriamento remoto. Essa alternativa reduziria bastante as necessidades de estações ao nível do solo, e diminuiria a dimensão do problema brasileiro de atualização e expansão da rede. Esse tipo de medição solarimétrica indireta baseia-se em modelos estatísticos que utilizam dados obtidos pela leitura da luminosidade do solo. Pesquisadores argentinos⁽¹⁸⁾ compararam os dados obtidos através do satélite GOES, entre 15° e 34° de latitude Sul e

40° e 67° de longitude Oeste, em território brasileiro, com medições realizadas por 9 estações equipadas com piranômetros Eppley e obtiveram um índice de correlação da ordem de 90% e desvio padrão entre 15 e 20%.

3.2. Dados e estimativas utilizadas

Um dos problemas básicos da utilização de dados solarimétricos obtidos pela rede solarimétrica é o fato da rede ser muito esparsa, cobrindo o território nacional de maneira inadequada. Além disso, como pode-se inferir do relato anterior, as interrupções no fornecimento de verbas e na operação dos instrumentos para medição(*) são constantes. Essa irregularidade afeta seriamente a confiabilidade dos dados e impede a obtenção de séries históricas que poderiam fornecer, através de tratamento estatístico, o erro associado a tais medidas.

Os valores da radiação solar incidente também podem ser obtidos através de aproximações teóricas baseadas em outros dados meteorológicos. Estudos visando a determinação da radiação solar incidente foram realizados por alguns pesquisadores⁽¹⁹⁾ utilizando equações de regressão, para pontos isolados do país.

Um estudo sobre a distribuição da radiação solar, em escala global foi elaborado por Budyko⁽²⁰⁾. Contudo, em virtude da baixa densidade de dados utilizados e pelo fato dos estudos estarem voltados para a determinação de configurações de larga escala, os produtos não apresentaram resolução adequada para escalas menores (500 km).

Em 1978, no entanto, uma equipe de pesquisadores do INPE realizou estudos sobre a distribuição da radiação solar no território

(*) A maioria dos instrumentos de medição solarimétrica não é fabricada no Brasil e, portanto, tanto estes como as peças de reposição devem, em caso de defeito ou quebra, ser importadas. Além das dificuldades normais de importação, existem dificuldades adicionais em se tratando de instituições ligadas a órgãos governamentais, como é o caso da Rede Solarimétrica Nacional e das redes estaduais. Isto termina por causar a deterioração dos equipamentos.

nacional⁽²¹⁾, baseados na formulação proposta por Bennett⁽²²⁾, e adaptada para o Hemisfério Sul, a saber:

$$\frac{Q_S}{Q_0} = a + \frac{b(n)}{N} + ch \quad (8)$$

onde,

Q_S = radiação solar incidente à superfície

Q_0 = radiação solar no topo da atmosfera

n = insolação observada

N = insolação prevista em função da latitude

h = altitude

a , b e c = parâmetros determinados a partir de dados observados.

Os valores para Q_0 foram calculados a partir da expressão:

$$Q_0 = \frac{1440}{\pi} F_0 \left(\frac{d}{D}\right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \sin \delta \sin H) \quad (9)$$

sendo,

F_0 = constante solar, 1353 W/m^2

D = unidade astronômica, $1,5 \times 10^8 \text{ km}$

d = distância Terra-Sol

H = duração da metade do dia, 12 horas ou $\pi/2$

ϕ = latitude local

δ = declinação do Sol

Os resultados obtidos permitiram a construção de mapas do Brasil (ver Anexo C), com valores das médias mensais da radiação incidente em langleys por dia (L_y)^(*).

É possível, a partir desses dados, obter uma série de informações. O cálculo dos valores máximo, médio e mínimo da radiação incidente anualmente em cada região do país, nos permite caracterizá-las do ponto de vista solarimétrico e investigar o desempenho energético da opção fotovoltaica nessas regiões. Essas médias foram obtidas através da identificação mês a mês das isolinhas^(**) que atravessam cada região. Os resultados dessas cálculos estão indicados

(*) $1,0 L_y = 1,0 \text{ cal/cm}^2 = 11,62 \times 10^{-3} \text{ kWh/m}^2$

(**) linhas com o mesmo valor de radiação.

no mapa da Figura 17. As informações, no entanto, não devem ser consideradas para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Para esse caso, o procedimento correto é pesquisar os dados, mês a mês, para a localidade onde serão instalados os sistemas. Os valores representados no mapa estão condensados na Tabela 5.

REGIÃO	MÁXIMA (kWh/m ² dia)	MÉDIA (kWh/m ² dia)	MÍNIMA (kWh/m ² dia)
NORTE	5,23	4,52	3,63
NORDESTE	5,81	5,07	3,92
CENTRO-OESTE	5,52	4,66	3,49
SUDESTE	5,52	4,60	3,20
SUL	5,81	4,12	2,62

Tabela 5 - Médias anuais para valores de radiação solar máxima, média e mínima em cada região.

As áreas assinaladas, dentro de cada região do país, foram identificadas como "áreas típicas" do ponto de vista solarimétrico. Isto significa que para essas áreas os valores das médias calculadas coincidem com os valores calculados para as isolinhas em todos os meses do ano, ou seja, essas áreas são representativas de suas regiões do ponto de vista da radiação solar incidente.

Também são importantes os dados de insolação em cada localidade em que se pretende utilizar a conversão fotovoltaica de energia.

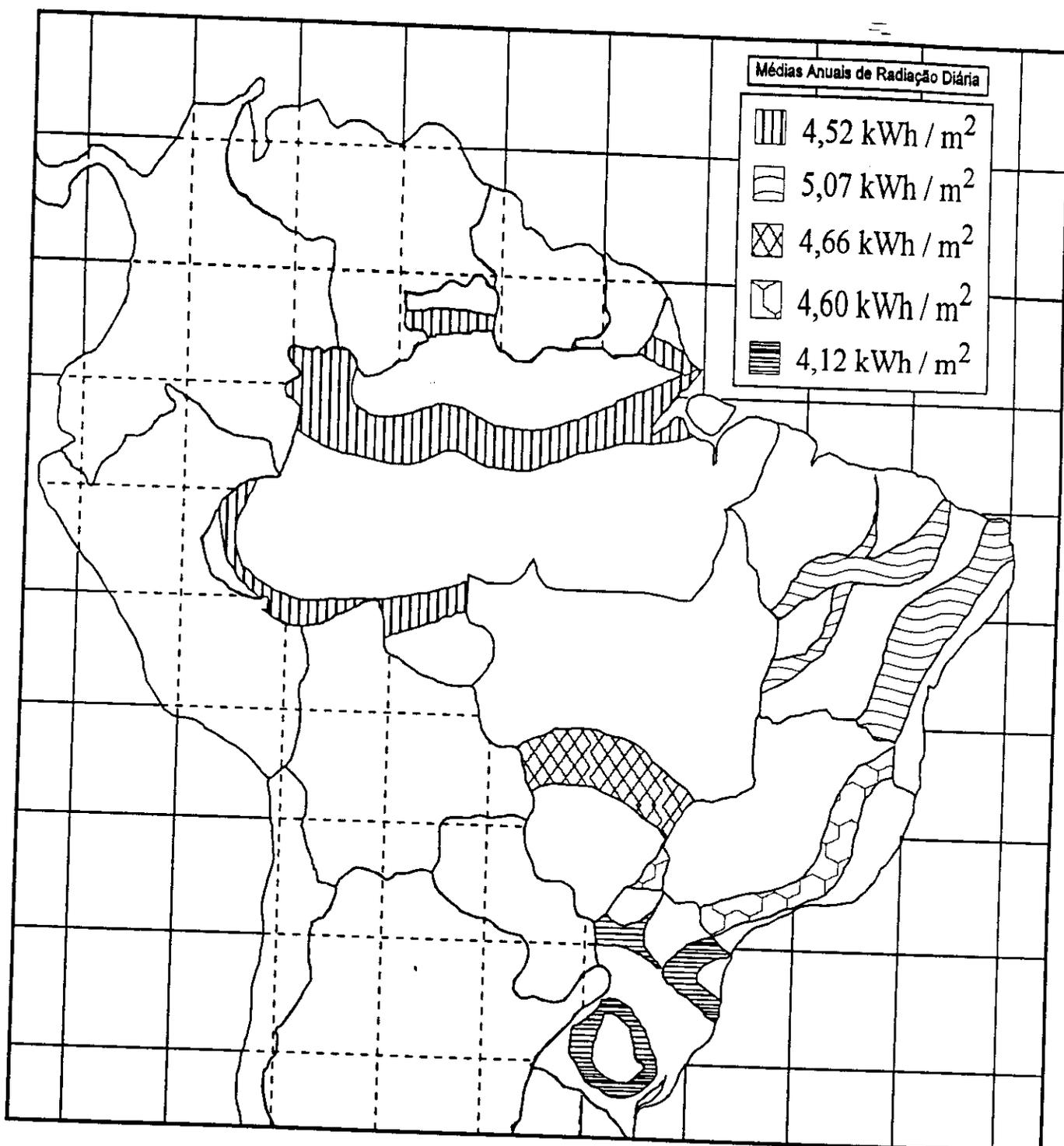


Figura 17 - Caracterização das Regiões Brasileiras em termos de Radiação Incidente

As áreas destacadas são áreas onde as médias regionais são válidas. As áreas em branco apresentam outros valores característicos de radiação, embora pertençam às respectivas regiões administrativas.

Para o caso da disponibilidade de horas de Sol, a formulação proposta lida com previsões teóricas para o topo da atmosfera (N). Isto não deve ser confundido com o número real de horas de Sol disponíveis (n), obtido por observação e medição direta, em séries históricas. A Tabela 6 sintetiza essas previsões teóricas apresentadas no Anexo D onde, por consequência, o valor máximo refere-se à disponibilidade de horas nas latitudes menores, o valor médio à latitude média e o valor mínimo à latitude máxima de cada região.

REGIÃO	MÁXIMA (h/dia)	MÉDIA (h/dia)	MÍNIMA (h/dia)
NORTE	12:21	12:07	11:52
NORDESTE	12:58	12:09	11:38
CENTRO-OESTE	12:43	12:06	11:32
SUDESTE	13:20	12:06	10:55
SUL	13:56	12:06	10:21

Tabela 6 - Médias regionais teóricas para valores de insolação máxima, média e mínima previstas por ano, no topo da atmosfera.

Essas estimativas permitem a avaliação da disponibilidade média de energia e a faixa de sensibilidade dessa média, para cada região do país.

3.3. Desempenho energético de um módulo fotovoltaico nas diferentes regiões do país.

Do ponto de vista de um planejamento energético racional, é necessário examinar se cada opção de geração de energia oferece um balanço positivo. No caso da geração fotovoltaica é necessário efetuar esse cálculo para cada localidade específica. Neste estudo será feita uma análise a partir do que foi estimado no Anexo B, onde chegou-se ao valor aproximado de 295 kWh para a energia consumida na produção de um módulo fotovoltaico de 37 Wp, e dos dados solarimétricos de cada região do país, expostos no item 3.2.

O propósito dessa estimativa é verificar o desempenho energético dos módulos para as diferentes condições solarimétricas de cada região administrativa do país. No entanto, a forma como se inseriu a atividade econômica e a infra-estrutura que ela requer, como o sistema de geração de energia, foi extremamente diferenciada em cada região. Por consequência, existem condições diferenciadas para a absorção de outras formas de geração de energia, ou mesmo para a expansão das opções atuais.

Os cálculos efetuados para a região Norte poderão explicitar a forma como foram obtidos os indicativos de desempenho energético nas outras regiões do país. Os dados solarimétricos médios para a região Norte, obtidos no item anterior, são:

	RADIAÇÃO	INSOLAÇÃO TEÓRICA
MÁXIMA	5,23 kWh/m ² dia	12:21 h/dia
MÉDIA	4,52 kWh/m ² dia	12:07 h/dia
MÍNIMA	3,63 kWh/m ² dia	11:52 h/dia

Tabela 7 - Dados solarimétricos médios para a região Norte.

Em condições normais, dispõe-se da radiação incidente, que é uma medida instantânea, e da disponibilidade de horas de brilho solar, para as quais existem boas séries históricas, como no caso do Estado de São Paulo⁽²³⁾. Neste exercício, a radiação estimada já contém o ajuste para dias chuvosos e nebulosos (n/N), como se observa na equação (8), explicitada no item anterior. Portanto, no caso em questão, a energia disponível é a própria radiação estimada, não sendo necessário incluir o dado de insolação prevista.

$$E_D = 4,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$$

Esse valor pode variar 17% para valores superiores e 21% para valores inferiores (faixa de variação explicitada na Tabela 7), sendo essa a sua faixa de sensibilidade. A área de cada módulo HM 37C/12, de 37 Wp nominais, é de $0,405 \text{ m}^2$, segundo dados do fabricante. Na região Norte, portanto, está disponível diariamente sobre um módulo fotovoltaico a seguinte quantidade média de energia:

$$E_M = E_D \times A = 1,8 \text{ kWh/dia}$$

Adotando o valor fornecido pelo fabricante de 9% para a eficiência de conversão, a energia média diária gerada por esse módulo, ou energia útil, será:

$$E_U = \eta \times E_M = 0,17 \text{ kWh/dia}$$

Ou seja, na região Norte, a energia consumida na fabricação do módulo em questão corresponde aproximadamente a 24% da energia que ele pode gerar durante os 20 anos de sua vida útil.

A exemplo do que foi feito para as região Norte do país, os cálculos para as outras regiões forneceram os resultados expressos na Tabela 8.

REGIÕES	E_D (*) (kWh/m ² .dia)	E_M (kWh/dia)	E_U (kWh/dia)
NORTE	4,52	1,83	0,165
NORDESTE	5,07	2,05	0,185
CENTRO-OESTE	4,66	1,89	0,170
SUDESTE	4,60	1,86	0,168
SUL	4,12	1,67	0,150

Tabela 8 - Energia disponível (por unidade de área e sobre o módulo) e valores obtidos para a energia útil fornecida por um módulo fotovoltaico, nas diferentes regiões do país.

Como já havia sido calculado que a energia consumida para a fabricação de um módulo fotovoltaico é de 295 kWh, é possível calcular o tempo de amortização da energia em cada região, como na Tabela 9.

REGIÕES	NORTE	NORDESTE	CENTRO-OESTE	SUDESTE	SUL
ENERGIA GERADA EM UM ANO (kWh/ano)	60,14	67,45	62,00	61,20	54,81
EN. CONSUMIDA/ EN. GERADA (%)	24,5	21,8	23,7	24,1	26,9
AMORTIZAÇÃO ENERGÉTICA (anos)	4,9	4,4	4,8	4,8	5,4

Tabela 9 - Tempo de amortização energética e relação entre a energia consumida na fabricação de um módulo fotovoltaico e a energia por ele fornecida em 20 anos de vida útil.

A Figura 18 apresenta a relação entre o tempo de amortização energética e a energia disponível.

(*) Como base de comparação, a máxima radiação incidente no topo da atmosfera é de 1,353 kW/m²; supondo que chegue ao solo 1,00 kW/m², ou seja 12,00 kWh/m² em um dia, e n/N de 0,8, a energia média disponível no caso será de 9,60 kWh/m².dia.

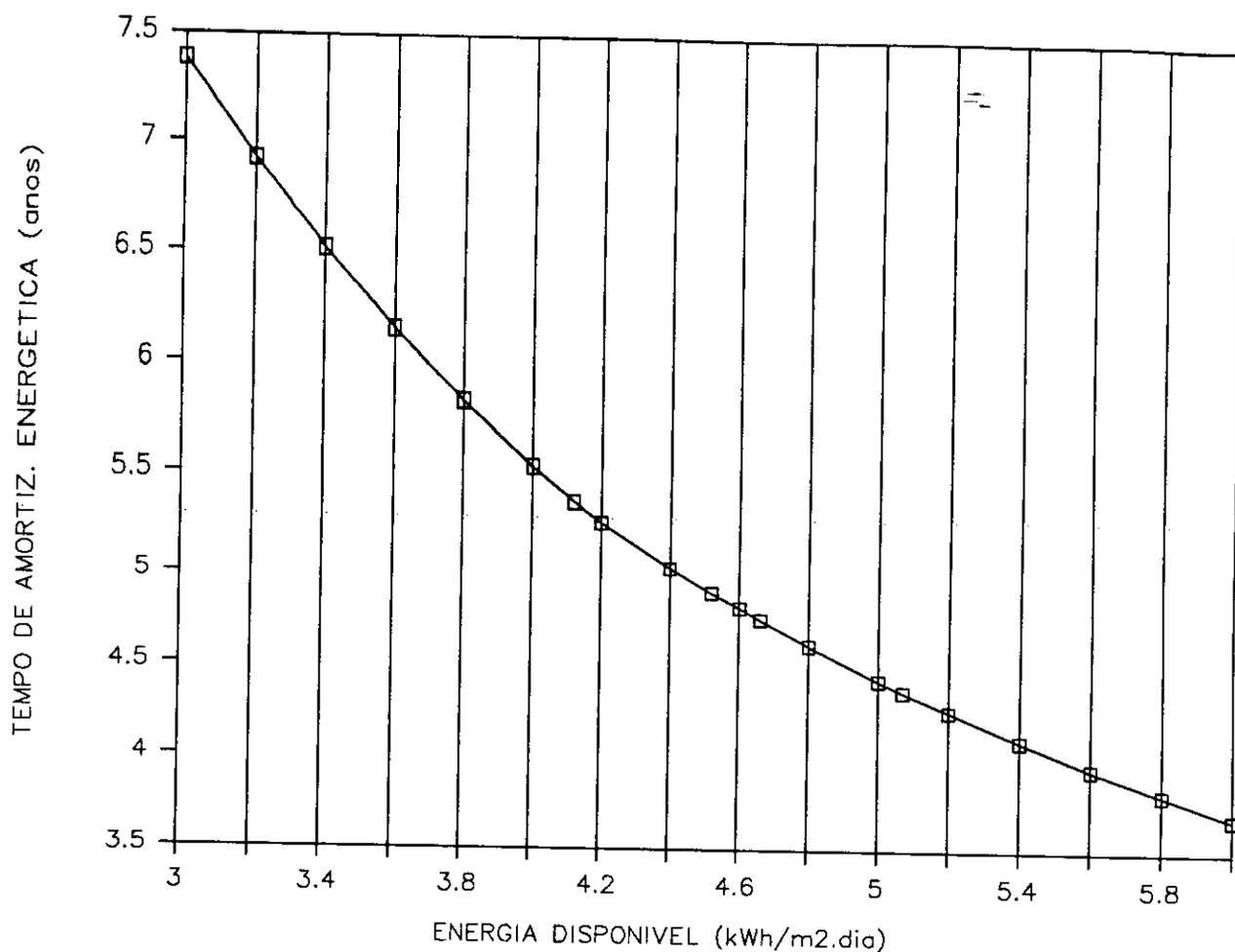


Figura 18 - Tempo de amortização energética do módulo fotovoltaico para diferentes valores de energia diária disponível.

A conclusão a que se chega é que, mesmo para as menos favoráveis condições solarimétricas disponíveis no país, a opção de geração de energia por conversão fotovoltaica apresenta um balanço energético bastante favorável.

Para completar, é importante lembrar que o uso da energia gerada por módulos fotovoltaicos requer que a ele se acoplem baterias(*), cujo conteúdo energético não fez parte deste exercício.

(*). Alguns usos também requerem necessariamente o uso de controladores de carga, como equipamento de proteção, o que não

Se, ao módulo fotovoltaico for acoplada uma bateria automotiva o problema se modifica. Neste caso, o módulo fotovoltaico funcionará apenas para alimentar a bateria e, portanto, a energia útil será aquela fornecida pela bateria diariamente.

Supondo que seja consumida diariamente 50% da energia armazenada na bateria, e que sejam necessários 4 módulos para carregar essa bateria de 100 Ah(*), 12 V nominais, o problema seria verificar se a energia consumida na fabricação de 4 módulos e 1 bateria automotiva é superior à energia por eles fornecida.

A energia consumida na fabricação da bateria pode ser obtida através de método análogo ao utilizado para os módulos fotovoltaicos. No caso das baterias automotivas já existe um valor calculado para o Coeficiente de Intensidade Energética (CIE), fornecido em kcal/Cr\$ e um preço em Cr\$, para a data de 1975⁽³¹⁾. Assim:

Preço : Cr\$ 84/un. (bateria automotiva, 13032)
C.I.E.: 437 kcal/Cr\$
vida útil : 5 anos

$$E_{bat} = P \times CIE = 36.708 \text{ kcal/un.} = 43 \text{ kWh/un.}$$

A energia consumida para fabricar um sistema com a configuração descrita, será, então:

$$E_{sist} = E_{bat} + 4 \cdot E_{mod} = 43 + 4 (295)$$

$$E_{sist} = 1221 \text{ kWh/sist.}$$

ou,

$$E_{sist}/\text{ano} = \frac{(43)}{5} + 4 \cdot \frac{(295)}{20}$$

será considerado neste caso, pois pretende-se uma estimativa apenas para geração.

(*) Essa configuração é bastante usada pelos fabricantes; para a região do Vale do Ribeira calcula-se que um módulo como o analisado fornece em média 10 a 12 Ah/dia com boa margem de segurança.

$$E_{\text{sist/ano}} = 68 \text{ kWh/ano}$$

A energia útil fornecida diariamente pelo sistema será a reposição da energia consumida, ou seja,

$$E_U = 0,5 \times 12 \text{ V} \times 100 \text{ Ah} = 600 \text{ Wh/dia}$$

$$E_U = 0,60 \text{ kWh/dia} = 219 \text{ kWh/ano}$$

Para esses valores, a razão En.Consumida/En.Gerada será de 31 % e o tempo de amortização energética do sistema será de 5,6 anos.

A conclusão é que tanto os módulos como os sistemas fotovoltaicos apresentam um balanço energético favorável. A inclusão de baterias tem o mérito adicional de tornar o sistema mais confiável, pois fornece energia ininterruptamente (quando bem projetado).

3.3.1. Comparação com valores internacionais

A referência citada no Anexo B⁽³⁰⁾ traz um cálculo semelhante, feito para as condições de radiação e de produção industrial da Alemanha. Segundo a referência, os módulos fotovoltaicos de células monocristalinas (de 14% de eficiência) consomem para sua fabricação 17,5 kWh/Wp.

Pela simples conversão dos valores contidos no artigo citado, um módulo de 37 Wp e com as dimensões do módulo analisado nesse exercício e 14% de eficiência(*), consumiria em sua produção 648 kWh, incluindo a grade de contato (não computada no exercício), e o

(*) Os módulos produzidos atualmente na Alemanha fazem melhor uso da área superficial, deixando muito pouco espaço sem ocupação. Isso faz com que a eficiência dos módulos possa ser considerada igual à eficiência das células que o compõem.

tempo para amortização energética, pelo gráfico contido nesse artigo, seria de 6,3 anos, com 1000 h/ano de operação.

Considerando as diferenças de disponibilidade de horas de sol nas latitudes brasileiras, com valores típicos para N de 12 horas e n/N de 0,4, o tempo de amortização energética cai para 3,6 anos o que, considerando as diferenças entre o processo de fabricação mais massivo (caso alemão) e o brasileiro, é equivalente aos tempos obtidos nesse exercício.

Resta considerar que as diferenças numéricas entre os valores de energia embutida e energia gerada para os dois países podem ser causadas pelas diferenças nas eficiências e nas quantidades de silício utilizadas em cada caso.

"Here comes the Sun, here comes the Sun
and I say: it's alright."

George Harisson

4. DESENVOLVIMENTO DO MERCADO NO BRASIL

Existem muitas vantagens no emprego de módulos fotovoltaicos para geração de energia. Devido às suas características próprias, pode-se utilizá-los em centrais de geração, o que seria o uso mais convencional, apenas substituindo as atuais formas de geração centralizada, e também podem ser empregados em usos localizados e específicos, prescindindo das redes de distribuição de energia e dos inconvenientes associados às mesmas. Em ambos os casos, a facilidade de instalação é um atrativo digno de nota por dois aspectos: os custos de engenharia civil, comparados com os mesmos custos em outras formas de geração de energia, são radicalmente reduzidos, e a resposta às necessidades energéticas percebidas pelas áreas de planejamento pode ser muito rápida.

Atualmente, em função das preocupações mundiais com as condições de habitabilidade do planeta, especialmente para o futuro, a geração fotovoltaica de energia solar tem sido lembrada pelo seu caráter não poluente. É fato que durante o processo de geração de energia por conversão fotovoltaica não ocorre praticamente nenhuma agressão ambiental no entorno das instalações, e o risco de acidentes é mínimo, o que não se pode dizer de nenhuma outra forma de geração de energia (exceção talvez feita à geração eólica).

Os exemplos mundiais de aplicação dessa tecnologia são relevantes neste estudo pois, como acontece em outras áreas, esses exemplos acabam por nortear, em um horizonte de longo tempo, as aplicações que serão priorizadas no Brasil.

No entanto, antes de focar o caso específico da tecnologia fotovoltaica, é importante discutir as bases existentes para receber esta ou qualquer outra nova tecnologia de geração de energia, nas condições atuais do país, sob pena de se incorrer no erro de que a solução dos problemas de países em desenvolvimento, como o Brasil, é meramente uma questão tecnológica.

4.1. Algumas reflexões sobre a inserção de novas tecnologias

A inserção de uma nova tecnologia levanta, em qualquer circunstância, uma série de questões, muito ligadas à forma como se organiza e produz o conhecimento (no caso conhecimento tecnológico) no país. A discussão dessas questões é necessária não apenas para diagnosticar a situação do "sistema tecnológico" do país, mas para avaliar a melhor forma de inserção e quais os reais benefícios que trará.

Tecnologia pode ser entendida como informação tecnológica incluindo o projeto e engenharia de produtos, o processo e rotinas de trabalho, e a organização da produção. A partir disso, pode-se definir o "sistema tecnológico" como o conjunto de entidades que produzem, coordenam e monitoram o fluxo da informação tecnológica.

A 2ª Guerra Mundial foi o marco a partir do qual a distância entre as economias desenvolvidas e "em desenvolvimento" se acentuou, com ênfase especial ao nível de industrialização. Nessa data, os governos dos países em desenvolvimento reconheceram que apenas as "forças de mercado" não seriam capazes de induzir internamente o surgimento de uma sociedade industrializada. A mudança no enfoque anterior, onde o desenvolvimento econômico era basicamente determinado

pelas forças econômicas domésticas, induziu vários países, em particular na América Latina, a adotarem políticas de industrialização na linha de substituição de importações. Essa também foi a gênese do parque industrial brasileiro, e com ele do "sistema tecnológico" nacional.

A idéia de uma "economia desenvolvimentista", no entanto, não foi capaz de resolver alguns problemas críticos do país, que aliás se agudizaram. Além do mais, a distância entre os chamados 1º e 3º mundos cresceu, particularmente a partir de 1980. Essa linha econômica foi criticada em suas bases já que a política traçada não foi capaz de atingir as metas previstas⁽²⁴⁾, embora tenha havido crescimento econômico e melhoria nos padrões de vida nos países em desenvolvimento^(*).

A crise do petróleo de 1973 foi um momento histórico no qual os sistemas tecnológicos de todos os países foram requisitadas. Pode-se descrevê-la como um desafio e uma oportunidade não apenas para os países em desenvolvimento⁽²⁵⁾, pois induziu o surgimento de um processo dinâmico de mudanças nos "sistemas energéticos" no mundo todo. Grandes avanços em tecnologias energéticas e muitas mudanças incrementais foram deflagradas a partir do aumento dos preços do petróleo. Entretanto, "os países em desenvolvimento não conseguiram

(*) Essa afirmativa está baseada na queda dos índices de *padão de vida* de um país, definidos pela ONU, que são: expectativa de vida ao nascer, quantidade *per capita* de calorias ingeridas diariamente, porcentagem de habitações com rede de água e esgoto, entre outros. Mesmo assim, observa-se nos países da América Latina, o crescimento do número de indivíduos abaixo do nível de pobreza absoluta, assim como a proliferação de doenças endêmicas, tidas anteriormente como erradicadas. Portanto, essa afirmativa deve ser relativizada.

extrair dessa oportunidade o que lhes permitiria aumentar o desempenho tecnológico de seus sistemas energéticos"(25).

Pode-se alinhar diversos motivos que levaram a essa "ineficiência"(*), mas talvez o núcleo da questão esteja na organização do sistema tecnológico nacional. O seu diagnóstico preciso não poderia se esgotar neste trabalho, nem é essa a pretensão, mas é importante assinalar as suas principais falhas.

Em um sistema tecnológico ideal, "os fabricantes do produto tecnológico devem estar no coração do processo de geração de tecnologia"(25). Não podem ser passivos receptores da informação tecnológica gerada em qualquer lugar. São o termômetro e os executores dos aperfeiçoamentos que a tecnologia deve atingir. Os centros de pesquisa nacionais devem, de acordo com diretrizes definidas pela sociedade, apoiar o movimento dos produtores. Não podem ser aliçados de nenhum processo tecnológico que se implante no país.

As penas para este alijamento são nossas velhas

Em um primeiro momento obriga à importação de processos e equipamentos, com evidentes implicações econômicas. No momento seguinte nos submete à falácia da "transferência tecnológica", (com implicações econômicas adicionais), já que para receber a informação tecnológica é necessário que se tenha um mínimo nível básico de conhecimento. Para algumas tecnologias atuais, quando os países em desenvolvimento tiverem atingido esse mínimo, a tecnologia em questão já estará ultrapassada e o país mais endividado.

(*) O PROALCOOL pode ser visto como uma das poucas iniciativas em países em desenvolvimento, vitoriosa e deflagrada a partir do sistema tecnológico brasileiro; no entanto, é inegável que outras alternativas energéticas poderiam ter se desenvolvido no mesmo período.

Talvez a parte mais delicada do processo ideal de geração tecnológica seja a ligação entre a tecnologia e as reais necessidades da população. Legar a responsabilidade pela definição de diretrizes de uma política científica e tecnológica aos representantes políticos, em países do 3º mundo, não parece ser a melhor solução, já que sua atuação quando requisitada, não tem sido das mais elogiáveis, entre outros motivos pelo grau de desinformação que os caracteriza.

Este talvez seja o principal obstáculo para a superação dos problemas enfrentados pelos países em desenvolvimento: como fazer para democratizar seus processos decisórios em todas as instâncias. Esta questão também é válida para a construção do sistema tecnológico ideal. Em especial, em países com um problema de divisão de renda tão agudo, que determina uma grande distância cultural entre os estratos sociais, é quase inevitável que as soluções propostas nos centros de planejamento estejam divorciadas das reais necessidades tecnológicas, em outras palavras, que o que se chama tecnologia em um estrato social não passe de ficção científica para outro.

Com esse panorama, a inserção de uma nova tecnologia pode ter um caráter libertador, resolvendo alguns problemas de infraestrutura e possibilitando o bem estar da população. Também pode se tornar uma armadilha, a exemplo das tantas outras já vividas, condicionando a geração de riquezas a uma tecnologia que o país não domina e obrigando-o a ser mercado cativo para equipamentos e processos considerados obsoletos em outras partes do mundo.

Mesmo assim, são os exemplos do mundo desenvolvido que permanecem orientando o que é feito nos países em desenvolvimento. Também devem ser observados no caso da tecnologia fotovoltaica.

4.2. Tipos de aplicação feitas no mundo

Pode-se imaginar a revolução que causará no mundo a disseminação dessa forma de geração de energia, observando as aplicações já existentes em países desenvolvidos.

Como foi visto no resumo histórico do item 2.2., a primeira aplicação terrestre em larga escala, das células solares, foi a energização de um sistema de telefonia nos Estados Unidos. Daquela data até hoje, muitas outras aplicações foram idealizadas e realizadas.

4.2.1. Geração centralizada

No campo da geração centralizada podem ser citadas as usinas fotovoltaicas implantadas nos Estados Unidos. A idéia básica desse tipo de aplicação é bastante *convencional*, pois reúne um grande número de módulos fotovoltaicos numa instalação, e ainda requer uma rede para a distribuição da energia gerada. No entanto, é para esse tipo de aplicação que pode-se associar sistemas concentradores de energia, como arranjos de espelhos ou lentes, aumentando assim a eficiência na conversão de energia (ver Tabela 10).

Dos sistemas de geração centralizada merece destaque aquele desenvolvido pela empresa Luz International Ltd., denominado Sistema Solar de Geração Elétrica-SEGS, térmico, que utiliza concentradores solares cilíndricos de foco linear. Os SEGS's vem sendo aperfeiçoados, obtendo-se uma significativa redução no custo da energia gerada, de US\$ 240/MWh na SEGS I para cerca de US\$ 120/MWh na SEGS VII. Está previsto um custo de US\$ 80/MWh para a instalação SEGS VIII(26).

LOCAL	PAÍS	P (kWp)	FINANCIAMENTO
Ilha de Pellworm	Alemanha	300	CEC
Ilha de Kythnos	Grécia	100	CEC
Whashington - DC	EUA	300	Governo dos EUA
Blytheville - Ark.	EUA	240	Governo dos EUA
Phoenix - Arizona	EUA	225	Governo dos EUA
Hesperia - Cal.	EUA	1000	Arco Solar I./Siemens S.I.
Sacramento - Cal.	EUA	2000	Arco Solar I./Siemens S.I.
Carissa Plains - Cal.	EUA	7500	Pacific Gas & Electric Co.
Saijo	Japão	1000	Governo do Japão
Ichicara	Japão	200	Governo do Japão
Isukuda	Japão	200	Governo do Japão

Tabela 10 - Principais centrais fotovoltaicas interligadas com a rede⁽²⁷⁾.

Porém, mesmo na geração centralizada de energia através de termoelétricas (a gás natural e demais derivados de petróleo), é possível empregar módulos fotovoltaicos para sanar problemas nas redes de distribuição. É o caso da *proteção catódica* contra corrosão de dutos. Em dutos, a corrente induzida pelo fluxo do fluido é um dos motivos principais de deterioração desse tipo de instalação. A forma usual de combater essa corrosão é fazer circular uma corrente elétrica, de sentido contrário e igual intensidade à da corrente induzida (normalmente de valores reduzidos). Para isso, é necessário uma forma de geração de energia que possa ser instalada ao longo do percurso dos dutos. É desejável que a demanda de manutenção seja mínima pois, em geral, os dutos atravessam grandes extensões, em regiões onde o acesso é difícil. A tecnologia fotovoltaica se adapta

perfeitamente a esse tipo de aplicação, com a vantagem de se poder dimensionar o número de módulos de acordo com corrente necessária.

Como exemplo, pode-se citar a proteção catódica do oleoduto de Farmington, Estado do Novo México, nos EUA, feita em 1980, com 4500 Wp de potência instalada. O oleoduto subterrâneo, que atravessa a reserva indígena Navajo, tem 10 milhas de extensão (16,09 km).

Os postes que sustentam linhas de transmissão de altas tensões também sofrem corrosão, e a proteção destes também pode ser feita através do uso de módulos fotovoltaicos.

Ainda em termos de geração centralizada de energia, a geração fotovoltaica encontra aplicação em plataformas marítimas de exploração de petróleo, com vantagens evidentes para os sistemas de segurança. Um exemplo desse tipo de aplicação foi feita pela ARCO Oil & Gas, de Houston, EUA, em 1980, em uma plataforma de extração de petróleo situada a 29°40' de latitude Norte e 94°10' de longitude Oeste, visando a sinalização para navegantes. Esse arranjo pequeno (20 Wp) é apenas um dos exemplos de aplicação feitos pela ARCO Oil & Gas, em suas plataformas do Golfo do México(*).

4.2.2. Usos extensivos

A exemplo da aplicação para proteção catódica de dutos, a energização de outros tipos de instalações, caracterizadas por suas grandes extensões, como estradas ou redes de telefonia e comunicação, é um tipo de aplicação que vem ganhando destaque nos países desenvolvidos, notadamente na Europa Ocidental.

(*) Fonte: "Photovoltaic Technology and System Design" (Siemens Solar Industries/1990), entre outras fontes de exemplos internacionais.

Um exemplo, na área de comunicações, é a instalação feita em novembro de 1979 no Mar Vermelho, Arábia Saudita, pela empresa italiana Telettra, de Milão, que liga Taif, na Arábia Saudita, com Porto Sudão, no Sudão (360 km). Essa instalação fornece 300 canais telefônicos e um canal de TV, e tem 6,5 kWp de potência instalada.

Na Suíça há exemplos de aplicação de módulos fotovoltaicos em postos de atendimento isolados e iluminação em estradas de rodagem. Outra aplicação semelhante é a sinalização da estrada de ferro de 107 milhas de extensão (172 km) que liga Kalamazoo, no Estado de Michigan, à Cidade de Michigan, no Estado de Indiana, com 297 Wp de potência.

4.2.3. Usos localizados

A aplicação da tecnologia fotovoltaica apresenta suas melhores soluções para o fornecimento de energia em sítios isolados e de difícil acesso, onde praticamente não existem outras fontes de energia. Nessas condições, a energia não tem preço e a assistência técnica para manutenção de equipamentos, reparos ou substituição, é quase sempre inviável. Para esse tipo de aplicação existem inúmeros exemplos, inclusive no Brasil, com soluções inventivas e bastante adaptáveis aos diversos níveis culturais das populações envolvidas.

Um uso que pode parecer excêntrico para a realidade brasileira, mas que já encontra adeptos em outras regiões do mundo, é a instalação de sistemas fotovoltaicos para suprir as necessidades energéticas de habitações de recreio. Companhias de energia da Alemanha e da Holanda, estão desenvolvendo programas de apoio a usuários que se interessem em instalar sistemas fotovoltaicos em suas residências de veraneio, possibilitando a venda da energia gerada nos

períodos de ociosidade dessas unidades à rede de distribuição, em troca do uso da rede nas épocas de ocupação, o que dispensa o uso de baterias para armazenamento de energia.

Para pontos distantes de sinalização (tais como bóias ou estações polares de sinalização), estações retransmissoras de microondas, postos avançados de fiscalização de fronteiras, sistemas portáteis de geração de energia para expedições de busca e salvamento, ou mesmo geração de energia para veículos espaciais, por outro lado, já é usual em todo o mundo pensar-se primeiro em sistemas fotovoltaicos. No entanto, para um país como o Brasil, em que os problemas de infra-estrutura básica ainda estão precariamente resolvidos, existem outras aplicações no mundo, que podem ser exemplos mais apropriados.

Bombeamento de água para consumo humano e para irrigação de culturas, são aplicações feitas em projetos já implantados no Nordeste. O que faz a relevância desse tipo de aplicação é a escassez das redes de distribuição de outros energéticos nas áreas rurais brasileiras. Para esses casos, a comparação econômica entre investimentos para extensão da rede de distribuição e aquisição de sistemas fotovoltaicos passa a ser um argumento positivo em favor da energia solar.

Porém, a despeito de uma análise econômica desfavorável, existem situações em que a opção fotovoltaica é a única possível. Nesses "nichos de mercado" surgiram as aplicações pioneiras no Brasil, e infere-se que a partir deles se desenvolva o mercado brasileiro para a energia fotovoltaica.

4.3. Usuários e possíveis usuários no Brasil

Para iniciar a análise, podemos dividir os usuários brasileiros em usuários institucionais e usuários eventuais que, como se verá, abrem diferentes perspectivas para a disseminação de uma tecnologia. No caso brasileiro, o que se chama de usuários institucionais são, na realidade, as empresas estatais, não havendo nenhum exemplo conhecido de um grupo privado de empresas empregando a tecnologia fotovoltaica(*).

As companhias de energia do grupo ELETROBRÁS foram as pioneiras no incentivo ao estudo e à utilização de sistemas fotovoltaicos no Brasil, motivadas em boa parte pelas crises do petróleo das décadas de 70 e 80. Algumas empresas do grupo TELEBRÁS também fizeram uso dessa tecnologia, mas até pelo fato de não estarem diretamente ligadas à questão energética, comportaram-se apenas como usuários. No entanto são destacáveis as substituições de grupos geradores diesel em estações repetidoras de microondas, realizadas pela TELEBRÁS, motivada pela campanha nacional de conservação de energia.

Já as empresas de energia tiveram um papel mais atuante, transformando-se em usuárias e parceiras na disseminação da tecnologia, mesmo que inicialmente de forma muito tímida.

(*) O uso de células solares em relógios e máquinas de calcular deve representar um mercado de proporções muito maiores que os usos que estão sendo analisados neste trabalho, e também poderiam ser classificados como usos institucionais. No entanto, a literatura mundial sobre a geração fotovoltaica de energia tradicionalmente não tem abordado esse segmento de mercado. É, no entanto, uma aplicação importante e relevante das células solares.

4.3.1. As Companhias de Energia

As aplicações pioneiras dessa tecnologia no Brasil foram exclusivamente feitas para geração localizada de energia, sendo que apenas agora surge a possibilidade de aplicações para geração centralizada. É o caso do projeto da CEMIG-Companhia Energética de Minas Gerais, de 1 MW de potência, planejado para o Vale do Jequitinhonha, região noroeste do Estado de Minas Gerais, com tecnologia da Luz International Ltd., que aguarda definição de financiamento. Segundo os estudos de viabilidade já concluídos, previa-se uma unidade de geração integrando energia solar fototérmica e geração térmica para complementação. A energia gerada seria distribuída pela rede da CEMIG.

Também existe o projeto Central Solar Integrada, da CHESF-Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco⁽²⁶⁾, que pretende atingir 1 MWp de potência instalada em três fases: a primeira com 100 kWp de potência, a segunda com 300 kWp e a terceira com 600 kWp. Segundo a companhia, a motivação principal para a busca de uma opção de geração centralizada é o fato de que a CHESF será a primeira empresa do grupo ELETROBRÁS a se defrontar com o esgotamento da capacidade de expansão da exploração dos recursos hidráulicos em sua área de concessão. O projeto, ainda em fase de planejamento, conta com o apoio da UFPE-Universidade Federal de Pernambuco, que deverá se encarregar do estudo sobre a viabilidade de acoplamento de sistemas concentradores aos arranjos de módulos fotovoltaicos. É intenção que a Central, a ser implantada em Gravatá, Estado de Pernambuco, seja interligada à rede de distribuição.

Entretanto, é bastante provável que o mercado que agora começa a se esboçar se desenvolva preferencialmente onde não existe a competição com outras fontes de energia, ou seja, onde as vantagens da geração fotovoltaica sejam óbvias.

Devem ser lembradas as experiências da CEMIG, que nos últimos 6 anos tem sido, das empresas de energia, a mais atuante na área da energia solar, tanto fototérmica como fotovoltaica. Os projetos fotovoltaicos desenvolvidos por aquela empresa caracterizam-se por estarem prioritariamente voltados à questão da eletrificação rural. Já existem instalados em sua área de concessão os seguintes projetos:

1. Sistema de suprimento de eletricidade à estação repetidora de UHF do Morro do Camelinho, no município de Gouveia (1984); trata-se de um sistema híbrido, com um gerador eólico de 2,2 kW e 17 módulos fotovoltaicos, perfazendo 597 Wp, operando em paralelo.
2. Sistema de suprimento de eletricidade à estação de telemedição hidrológica de Porto Indaiá, no município de Biquinhas (1985): sistema composto de 8 módulos fotovoltaicos, num total de 280 Wp.
3. Sistema de bombeamento de água para irrigação, instalado na Fazenda Energética de Uberaba (1986), composto de 12 módulos de 35 Wp, totalizando 420 Wp; a instalação fornece energia a uma bomba de água acoplada a um motor de corrente contínua de 3/5 HP, que irriga uma plantação de 0,8 ha.
4. Sistema de medição hidrológica, composto por 6 estações, sendo 3 delas com 34,4 Wp cada e as 3 restantes com 17,2 Wp cada.

Em andamento e em fase de estudos, estão os seguintes projetos:

5. Suprimento de eletricidade para residência rural, iniciado em 1992, na Fazenda Energética de Uberaba, com 185 Wp no total, e atualmente em fase de estudo do desempenho.
6. Suprimento de eletricidade para residência de produtor rural, em convênio com a Siemens, também iniciado em 1992, com 8 módulos de 48 Wp cada.
7. Suprimento de eletricidade para a estação repetidora de telecomunicações de Serra Selada, iniciado em 1992; também é um sistema híbrido, composto por um gerador eólico de 2,2 kW e 1000 Wp para geração em 48 Vcc e 110 Wp para geração a 12 Vcc.
8. Sistema de sinalização noturna de torres de linhas de transmissão, composto de 2 módulos de 48 Wp cada, para cada uma das 20 torres previstas, na linha Mesquita-Governador Valadares, de 230 kV.
9. Energização de estações de telemetria hidrológica, num total de 13 estações, com 400 Wp cada, em fase de licitação.

A eletrificação de cerca de 300.000 pequenas propriedades rurais (potencial), em projetos avaliados em cerca de US\$ 6000 por propriedade, a sinalização da linha de transmissão entre Adelaide e Neves, com um custo estimado de US\$ 2000, são outros planos que estão sendo estudados pela CEMIG.

Outra empresa de energia que vem se destacando recentemente pelos esforços na difusão da tecnologia fotovoltaica é a COELBA-Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. Dentre os seus projetos, destacam-se a eletrificação de 12 localidades rurais e instalação de 9 poços artesianos, dentro do Projeto Eldorado do Governo da Alemanha (ver descrição do projeto no item 2.2), e o desenvolvimento de estudos para projetos de irrigação.

Também dentro do Projeto Eldorado, a COELCE-Companhia Energética do Ceará desenvolveu projetos para 15 sistemas de bombeamento de água e para eletrificação de 500 residências na área rural. Os sistemas de bombeamento contam com, no número mínimo, 14 módulos de 50 Wp cada.

A CELPE-Companhia Energética de Pernambuco também está desenvolvendo projetos de eletrificação de residências rurais, sob suporte financeiro do Departamento de Energia dos EUA.

As experiências dessas companhias de energia são fundamentais para o aprimoramento da tecnologia fotovoltaica nas condições ambientais e sócio-culturais do semi-árido nordestino, onde a renda familiar média anual é inferior a US\$ 220(*).

A Light-Serviços de Eletricidade S/A, do Estado do Rio de Janeiro, também desenvolveu projetos fotovoltaicos em sua área de concessão, com o intenção de absorver a nova tecnologia. São projetos de iluminação pública, com cerca de 100 Wp, iluminação residencial, com 50 Wp e bombeamento de água, com 100 Wp.

4.3.2. A experiência da CESP

A experiência da CESP-Companhia Energética de São Paulo merece destaque pelo pioneirismo no envolvimento com a questão da energia solar e, o que é importante para esta dissertação, por ter sido através do empenho em concretizá-la, junto com toda a sua equipe

(*) Essa informação foi fornecida pelos técnicos da COELCE, durante o Workshop de energia fotovoltaica, realizado no Rio de Janeiro, em setembro de 1992, e obtida por eles através de levantamento do perfil sócio-econômico dos beneficiados pelo projeto de bombeamento de água.

técnica, que se originou a idéia do trabalho que aqui está sendo desenvolvido.

A CESP(*) desenvolve estudos na área da energia solar há cerca de 20 anos. A exemplo do que ocorreu no país, esses estudos foram impulsionados pelos 2 choques do petróleo nas décadas de 70 e 80 e, mais recentemente, pela incorporação do discurso mundial pela preservação das qualidades ambientais.

Seu primeiro projeto na área fotovoltaica, foi o convênio com o Instituto de Física da UNICAMP, visando o estudo de novos materiais amorfos de grau solar e o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de células solares.

Com o passar do tempo, no entanto, a empresa modificou sua postura em relação à pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Atualmente restringe sua atuação a apoiar as universidades e centros de pesquisa em suas iniciativas específicas, através de convênios, e a implantar alguns projetos de demonstração. Os projetos de demonstração devem responder à diretriz da empresa, de estender às regiões ainda não atendidas pela rede de distribuição, e pertencentes à sua área de concessão, os serviços de energia elétrica.

Posto de Saúde do Vale do Ribeira

O primeiro projeto de demonstração surgiu a partir de uma solicitação da Secretaria Estadual da Saúde, para que a CESP estudasse uma forma de fornecer energia a 10 Postos de Saúde, descentralizados e distantes da rede de distribuição de energia. O primeiro desses postos foi instalado em 1985.

(*) As informações seguintes foram compiladas a partir de relatórios internos da empresa.

O programa previa a implantação de sistemas fotovoltaicos, utilizados para refrigeração de vacinas e soros, iluminação e carga para instalação de rádios VHF em 10 (dez) postos de saúde, em áreas previamente selecionadas. Os locais escolhidos espalham-se por vários municípios da região do Vale do Ribeira. Do ponto de vista da CESP, a experiência visava ampliar o conhecimento nacional na área de sistemas fotovoltaicos e colaborar com o segmento de serviços públicos. Dos 10 postos previstos foram instalados 7, de acordo com a Tabela 11, e representados no mapa da Figura 19.

LOCALIDADE	MUNICÍPIO	DATA INSTAL.	Nº PESSOAS ATENDIDAS	UTILIZAÇÃO
Marujá (I. do Cardoso)	Cananéia	07/10/85	1.050	Ref. de vacinas, iluminação e comunicação
Pedrinhas	I. Comprida	05/11/86	900	Ref. e iluminação
Pilões	Iporanga	06/05/87	560	Ref. e iluminação
Praia Grande	Iporanga	29/12/87	816	Ref. e iluminação
Indaiatuba	Barra do Turvo	21/04/88	1.100	Ref. e iluminação
Paraíso	Barra do Turvo	05/05/88	1.150	Ref. e iluminação
Santa Maria	Cananéia	25/07/89	450	Ref. e iluminação

Tabela 11 - Postos de Saúde do Vale do Ribeira.

Os sistemas fotovoltaicos foram adquiridos pela CESP da Heliodinâmica, e dimensionados com a seguinte configuração:

- . 4 módulos fotovoltaicos, de 37 Wp cada, totalizando 148 Wp;
- . 1 bateria automotiva tipo chumbo-ácido, 12V, 135 Ah (100 h de autonomia);
- . 1 refrigerador de 120 l, consumo médio de 18 Ah/dia;

- . 3 luminárias fluorescentes, 12V/ 15W;
- . 1 rádio VHF com consumo médio de 12 Ah/dia, fornecido pela própria Secretaria.

Os custos do projeto foram arcados pela CESP, mas foi estipulada uma "conta anual de energia" paga pela Sec. da Saúde, equivalente a um consumo anual de 170,7 MWh através da tarifa rural de grupo B-2(*).

Esse plano inicial está sendo repensado em função das mudanças administrativas sofridas pela Saúde, que municipalizou seus serviços de atendimento, a partir de 1991. Em seu novo esquema administrativo, que pretende oferecer maior agilidade ao atendimento da população na área da saúde, a Sec. da Saúde fez com que as prefeituras arcassem com as responsabilidades que antes estavam a cargo dos ERSA's-Escritórios Regionais de Saúde. Por esse motivo, a CESP está enviando às prefeituras envolvidas novas propostas de contratos, baseados nos seguintes tópicos:

- . a conta passará a ser mensal, individual de cada posto e refletirá a máxima condição de consumo possível com as instalações disponíveis, ou seja 50 kWh/mês;
- . a propriedade dos equipamentos permanecerá sendo da CESP e, portanto sua também a responsabilidade pela manutenção e remoção para novas localidades;

(*) A tarifa B-2 equivale a aproximadamente US\$ 0,04/kWh, ou seja, a Secretaria pagava de acordo com um consumo médio de 2032 kWh/mês em cada posto de saúde instalado, muito superior ao real. Este valor anual, sendo pago durante 10 anos, proporcionaria o retorno total do investimento em equipamentos feito pela CESP, uma vez que cada conta anual corresponde aproximadamente ao valor de 1 sistema completo.

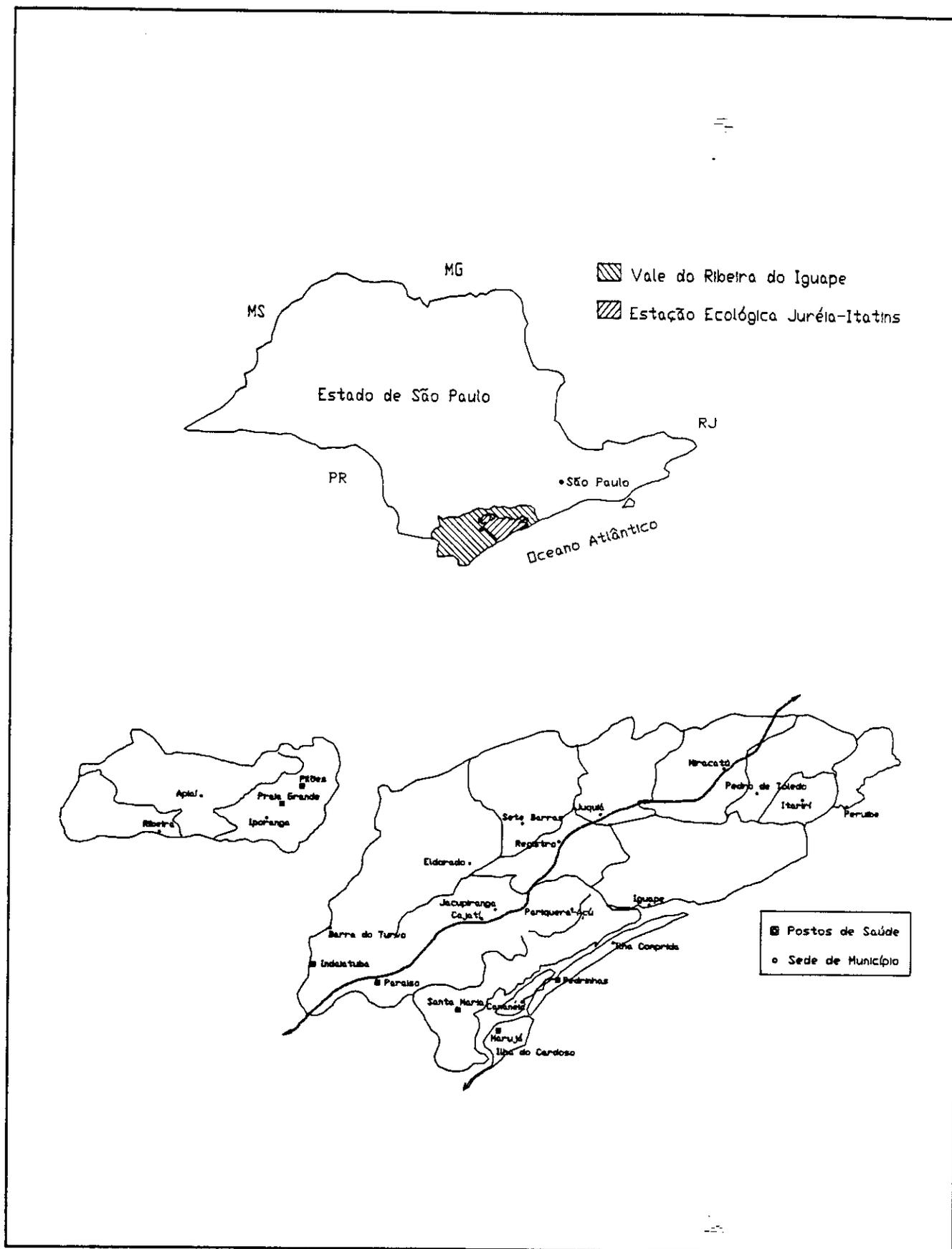


Figura 19 - Postos de Saúde do Vale do Ribeira.

- . fica a cargo da prefeitura indicar quais as localidades para onde deverão ser removidos os sistemas provenientes de localidades onde já chegou a rede de distribuição;
- . a prefeitura terá também a liberdade de decidir se os sistemas serão ainda usados em postos de saúde ou deslocados para outros usos como escolas ou mesmo telefonia.

A revisão conjunta do projeto pela CESP e pelas prefeituras é importante pois algumas localidades, como é o caso do bairro de Pedrinhas, já fazem parte da rede de distribuição de energia elétrica, e já existem solicitações de outras localidades no mesmo município, para que o sistema fotovoltaico seja reinstalado.

Também é preciso projetar o uso dos equipamentos em um horizonte de médio prazo (até 5 anos), quando as primeiras instalações ainda terão uma vida útil significativa (cerca de 7 anos, do total de 20, de acordo com o fabricante). Nesse prazo de tempo é possível que a rede elétrica já atinja a maioria dessas localidades e a comunidade poderá, portanto, contar com sistemas itinerantes para geração autônoma de pequenos blocos de energia. Para melhor aproveitar dessa disponibilidade caberá à comunidade planejar o uso dos sistemas liberados, segundo suas prioridades.

Projeto "Estação Ecológica Juréia-Itatins"

A partir de 1991 a CESP e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente-Instituto Florestal (SEMA-IF) passaram a realizar contatos sistemáticos no sentido de prover as Unidades de Preservação do Estado (parques estaduais, estações ecológicas, etc) de infra-estrutura

energética adequada ao desenvolvimento de trabalhos de proteção ambiental, pesquisa biológica e atendimento aos habitantes locais.

Para esclarecer a importância dessa ação do Estado é preciso compreender como se formaram essas unidades de preservação. As áreas de proteção ambiental, de grande importância ecológica, são também bolsões onde a atividade econômica não penetrou e, por esse motivo, permaneceram minimamente preservadas. Em decorrência disso, são áreas do Estado onde a população residente não dispõe da mesma infraestrutura que caracteriza as outras áreas do Estado.

Em função das prioridades da SEMA, ficou definido que a primeira unidade de preservação a ser atendida seria a Estação Ecológica Juréia-Itatins. Esse atendimento, no entanto, deveria ajustar-se às características muito particulares das unidades de preservação.

A análise das diversas alternativas para geração descentralizada de energia, requisito básico dessas unidades localizadas em sítios distantes e de difícil acesso, apontou a energia solar fotovoltaica como a solução mais indicada. Áreas isoladas, com extremas dificuldades para transporte de combustível, com escalas reduzidas de consumo, espalhadas dentro de parques e/ou reservas florestais, e em vários casos, com instalações de pesquisa de fauna e flora, **não podem, nesses casos, receber qualquer tipo de emissão de poluentes**, tais como gases, rejeitos e dejetos sólidos ou líquidos, ruídos ou vibrações estranhos ao meio. Igualmente devem ser evitados impactos visuais que acarretem na descaracterização da localidade. A tecnologia fotovoltaica era a única capaz de responder às essas demandas.

Os custos estimados na época (cerca de 250 mil dólares, ou seja cerca de US\$ 25/Wp do projeto completo), em função das dimensões previstas inicialmente para o projeto e dos preços praticados na ocasião pelos fornecedores de equipamentos fotovoltaicos, estavam tornando indefensável a sua realização, com recursos próprios da CESP. Foi preciso redimensionar o projeto, buscando atingir custos aceitáveis frente aos praticados em outros empreendimentos da Companhia, e compatibilizá-lo à dinâmica da vida em uma unidade de preservação.

Essas reflexões levaram à exclusão das instalações em residências e priorizaram as instalações em equipamentos comunitários, onde os benefícios seriam melhor compartilhados por todos os moradores.

A Tabela 12 apresenta a listagem das localidades, representadas no mapa da Figura 20, com o tipo de atividade prevista em cada uma delas e, em função disso, os pontos de luz, número de refrigeradores e rádios a serem instalados e alimentados pelos sistemas fotovoltaicos. Também foram estimadas as horas de uso diárias para os pontos de luz e rádios. Previu-se o uso de lâmpadas fluorescentes de baixo consumo, em adequação às recomendações básicas de conservação de energia.

A opção ao projeto era instalar 135 km de linha de distribuição tipo MRT (monofásica retorno terra; a linha de distribuição de menor custo), que permitiria o fornecimento controlado de energia. Mesmo assim atenderia a uma demanda bem superior à dimensionada no projeto, com um custo bastante elevado (US\$ 953 mil). O obstáculo determinante a essa opção, além da questão de custo, era o

impedimento legal de desmatamento em áreas de proteção ambiental, necessário para a extensão de redes de distribuição.

O projeto implantado veio sanar esses problemas, oferecendo uma solução energética eficiente para as localidades selecionadas.

A Siemens, empresa vencedora do processo de seleção, apresentou sua proposta com um total de 108 módulos, de 48 Wp cada. O projeto "Estação Ecológica Juréia-Itatins" tornou-se a maior instalação fotovoltaica feita no país até o momento.

LOCAL	ATIVIDADE	EQUIPAMENTOS			
		G	L	H	R
Rio das Pedras	Manejo e Educação Ambiental	02	07	02	01
Praia da Juréia	Núcleo de Interpretação	01	03	02	01
Rio Verde	Alojamento	01	15	02	02
	Laboratório	01	02	01	--
	Casa Moradia	01	08	02	--
Praia do Una	Escola	--	06	04	--
Tabaqueira	Abrigo de Pesquisa	02	06	02	01
C. Guilherme	Escola	--	06	04	--
Barreirinho	Posto de Fiscalização	--	03	02	01
Guarauzinho	Abrigo/Posto de Fiscaliz.	01	06	02	01
Palhal	Abrigo de Pesquisa	02	06	02	01
Aguapeú	Escola	--	06	04	--
Paranapuã	Escola	--	06	04	--
TOTAL	----	11	80	--	08

Tabela 12 - Necessidades energéticas da Est. Ecológica Juréia-Itatins.

G - geladeira de no mínimo 140 l

L - número de pontos de luz (9W/12V)

H - horas/dia estimadas de uso de cada ponto de luz

R - rádio VHF/consumo nominal: 8,5 A - comunicação (1 h/dia)

500 mA - recepção (1 h/dia)

150 mA - stand-by

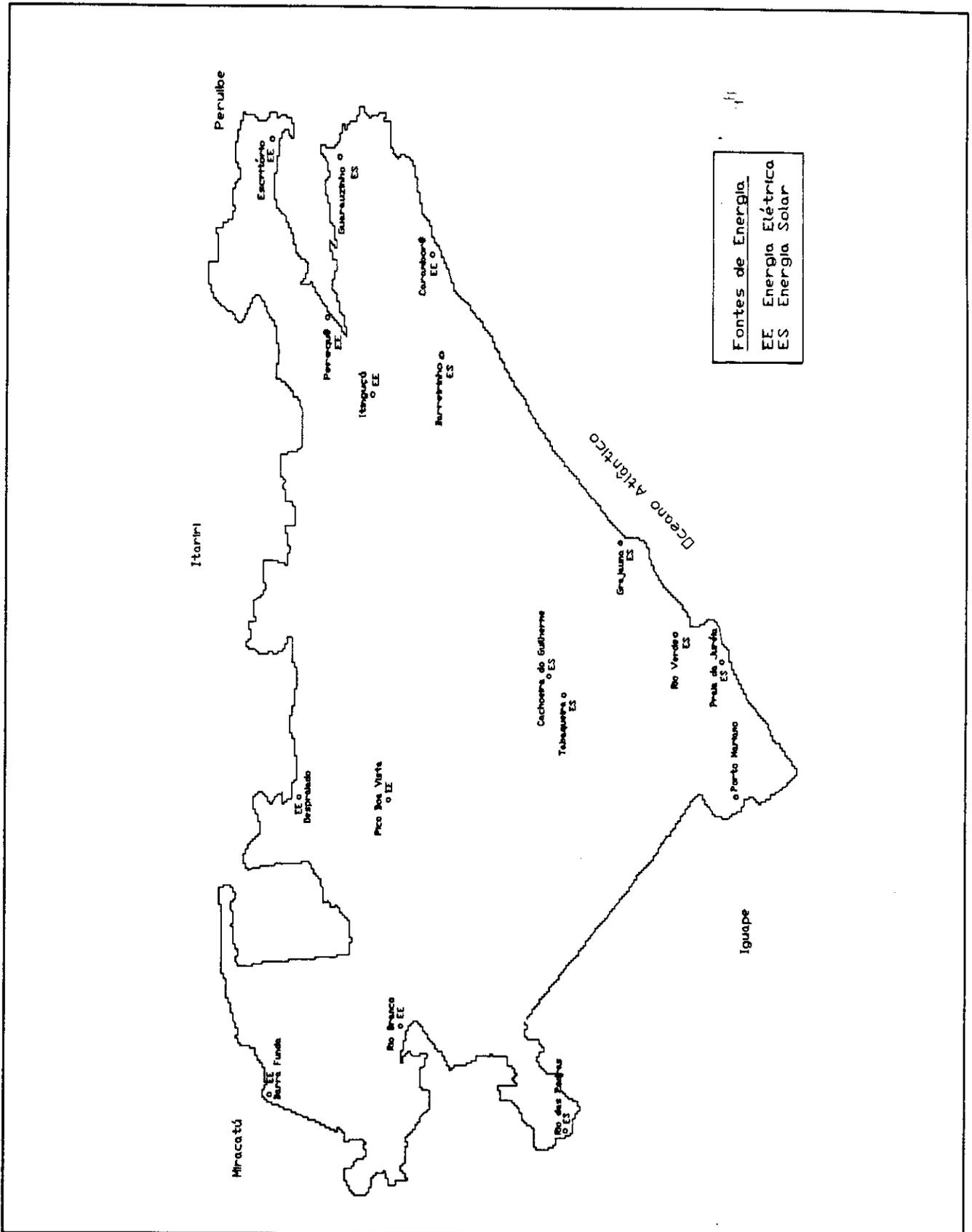


Figura 20 - Representação das localidades beneficiadas com o projeto "Estação Ecológica Juréia-Itatins".

4.3.3. Possíveis usuários

A simples consolidação dos usos que já são feitos no Brasil, e a sua disseminação entre as companhias energéticas dos outros Estados já representaria um crescimento muito expressivo do número de usuários em comparação com o que já existe, e definiria uma tipologia de mercado. No entanto, para poder ensaiar uma previsão de novos usuários, é necessário analisar com mais detalhe outras características dos projetos que já estão implantados, buscando extrair disso as razões que foram decisivas para a opção pela geração fotovoltaica(*).

A eletrificação de áreas em que as redes de distribuição das concessionárias de energia ainda não existem é uma possibilidade que deve ser analisada com atenção. É importante lembrar que, quase sempre, a energia não chega a lugares em que a atividade econômica ali desenvolvida não tem relevância. Dito de outra forma, o Estado, por diversas razões, inclusive pelas suas limitações de capacidade de investimento, não investe em áreas que não tenham capacidade de retornar esse investimento, nas formas que o Estado julgar convenientes. Se esse é o motivo pelo qual a rede de distribuição não atingiu uma determinada localidade, também não haverá interesse das companhias de energia em investir capital na tecnologia fotovoltaica ou em qualquer outra opção. Portanto, dimensionar o mercado potencial na área de eletrificação rural pelo número de localidades não atendidas pelas redes de distribuição é um erro. Seria necessário definir nesse universo o sub-conjunto das localidades que estão

(*) É importante lembrar que aplicações recentes nos países desenvolvidos já abarcam outros nichos de mercado, como geração energética para residências de veraneio.

incluídas nos planos de atendimento das companhias (o que não é igual ao todo).

Também é verdade que o critério da atividade econômica não é o único utilizado para organizar a "escala de prioridades de novas ligações" nas companhias de energia, quando esta existe, mesmo que de forma não explícita. A importância do atendimento de uma localidade pode estar definida pelas suas características ecológicas, de localização estratégica e, em último mas usualmente o mais importante, por sua importância política.

A partir dessa classificação, é possível identificar categorias de localidades que deverão se constituir em um mercado potencial para as novas tecnologias, e dentre essas, aquelas em que apenas a tecnologia fotovoltaica consegue responder às demandas específicas.

As localidades classificadas por sua "importância política", configuram um sub-grupo variável, de acordo com as variações dos interesses políticos e, portanto, é difícil identificar linhas gerais que as caracterize. Pode-se ponderar, no entanto, que para essas localidades a condição de "carga limitada", inerente a projetos fotovoltaicos, é possivelmente incompatível. Portanto, localidades para as quais exista "interesse político" em promover o seu atendimento energético deverão optar por tecnologias que favoreçam a expansão da demanda energética das mesmas. Para estas, a opção deverá ser a extensão das redes de distribuição das companhias de energia.

As localidades classificadas por sua "localização estratégica", eventualmente poderão contar com mais de uma opção para geração de energia. No entanto, a geração fotovoltaica passa a ser uma

opção real. As localidades desse sub-grupo constituem, portanto, uma possibilidade de mercado para a tecnologia fotovoltaica. Dentro dele estão os postos de fiscalização em fronteiras, linhas de distribuição e outros pontos que necessitem de sinalização, postos de atendimento de saúde, escolas rurais, entrepostos de comercialização para a produção rural, entre outros.

As localidades classificadas por suas características ecológicas constituem a área de certeza do mercado potencial. Dito de outra forma, são áreas para as quais a tecnologia fotovoltaica é a única opção, o que pode se constatar através da experiência da CESP, que foi relatada no item anterior. A intenção do Estado em suprir de energia essas áreas de interesse ecológico, no entanto, é uma questão incerta. Porém, mesmo em casos onde essa intenção não se concretize por intermédio do Estado, existe interesse da comunidade internacional, expresso através da criação de linhas especiais de crédito, em apoiar o desenvolvimento de projetos dessa natureza. É o que mostram os casos já citados do Projeto Eldorado, e do suporte financeiro do Departamento de Energia dos EUA. Fora essas linhas de crédito já formalizadas junto ao Governo brasileiro, existem interesses das Organizações Não-Governamentais, envolvidas com questões ambientais, em disseminar as formas de geração de energia menos agressivas ao meio-ambiente, com destaque para a utilização da energia solar. Portanto, as áreas de preservação ambiental constituem uma reserva de mercado para a energia fotovoltaica, com boas condições de concretização e ampliação do número de projetos já existentes. Podem ser incluídas nessa categoria, além dos parques e reservas

ecológicas, as áreas demarcadas de populações indígenas, que estejam inseridas em matas e florestas protegidas pelas leis ambientais.

Ainda dentro das companhias de energia, existem as já citadas possibilidades de instalações para proteção catódica de dutos. Como não existem experiências anteriores dessa aplicação no Brasil, é prematuro apontá-la como uma área potencial de mercado.

As possibilidades de novos usuários não se esgotam nas companhias de energia, mas o surgimento de novas aplicações, além de aplicações em casos esporádicos e das já citadas, dependerão exclusivamente do empenho dos fornecedores de sistemas fotovoltaicos.

4.4. Motivações para expansão do número de projetos

Apesar da síntese anterior, sobre os novos possíveis usuários da tecnologia fotovoltaica no Brasil, já trazer motivos para uma ampliação significativa do mercado, existem outras motivações que devem ser analisadas, e que podem causar ampliações mais expressivas. Pode-se dividi-las em motivações econômicas e outras motivações.

4.4.1. Motivações econômicas

O principal contra argumento usado quando se analisa a opção fotovoltaica é a questão de custo. No entanto, a situação vem se modificando nos últimos anos, embora essa modificação seja mais sensível fora do país.

A tendência mundial de queda do preço do Wp, que pode ser constatada na Figura 21, e o desenvolvimento da tecnologia, produzindo células de maior eficiência e, portanto, causando uma diminuição na área de módulos necessária para os projetos, são fatores importantes que afetam os custos de projetos fotovoltaicos. Na figura citada pode-se constatar que o custo praticado no Brasil ainda é superior as custos internacionais.

Ao contrário do que anteriormente se acreditava, os limites superiores para as eficiências de conversão ainda tem perspectivas de maiores aumentos. Essas considerações, que se traduzem em motivações de ordem econômica a longo prazo, estão baseadas em recentes progressos tecnológicos, sobre a possibilidade de obtenção de células solares com eficiências de até 26%⁽²⁸⁾, combinando a teoria já existente com semicondutores de "super-redes"(*).

(*) Tema de estudos recente, na área de cristalografia.

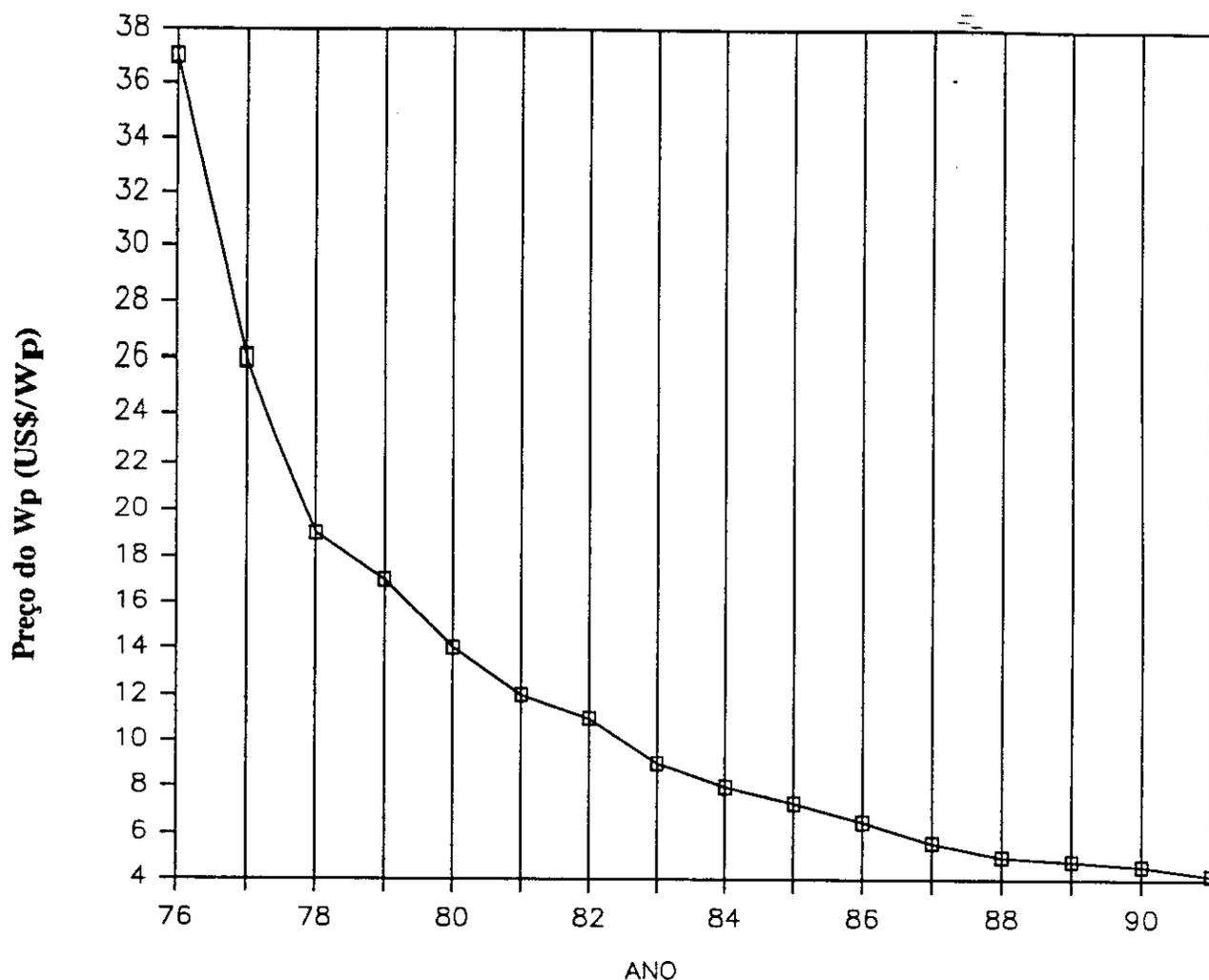


Figura 21 - Evolução dos preços mundiais do Wp em módulos fotovoltaicos (*).

A Figura 22 apresenta a curva referente à evolução da eficiência das células de laboratório que, segundo a mesma fonte, já possuem eficiências comprovadas de até 23%.

Comparando-se com as projeções da década de 80, feitas pelo DOE-EUA (apresentadas na Tabela 2), pode-se observar que estas não se

(*) Os dados foram compilados pela revista Solar Energy, agosto/1988. Os dados referentes aos anos de 1989 e 1990 foram obtidos por informação de fabricantes.

concretizaram, ou seja, a difusão da tecnologia fotovoltaica segue em um ritmo mais lento do que o esperado.

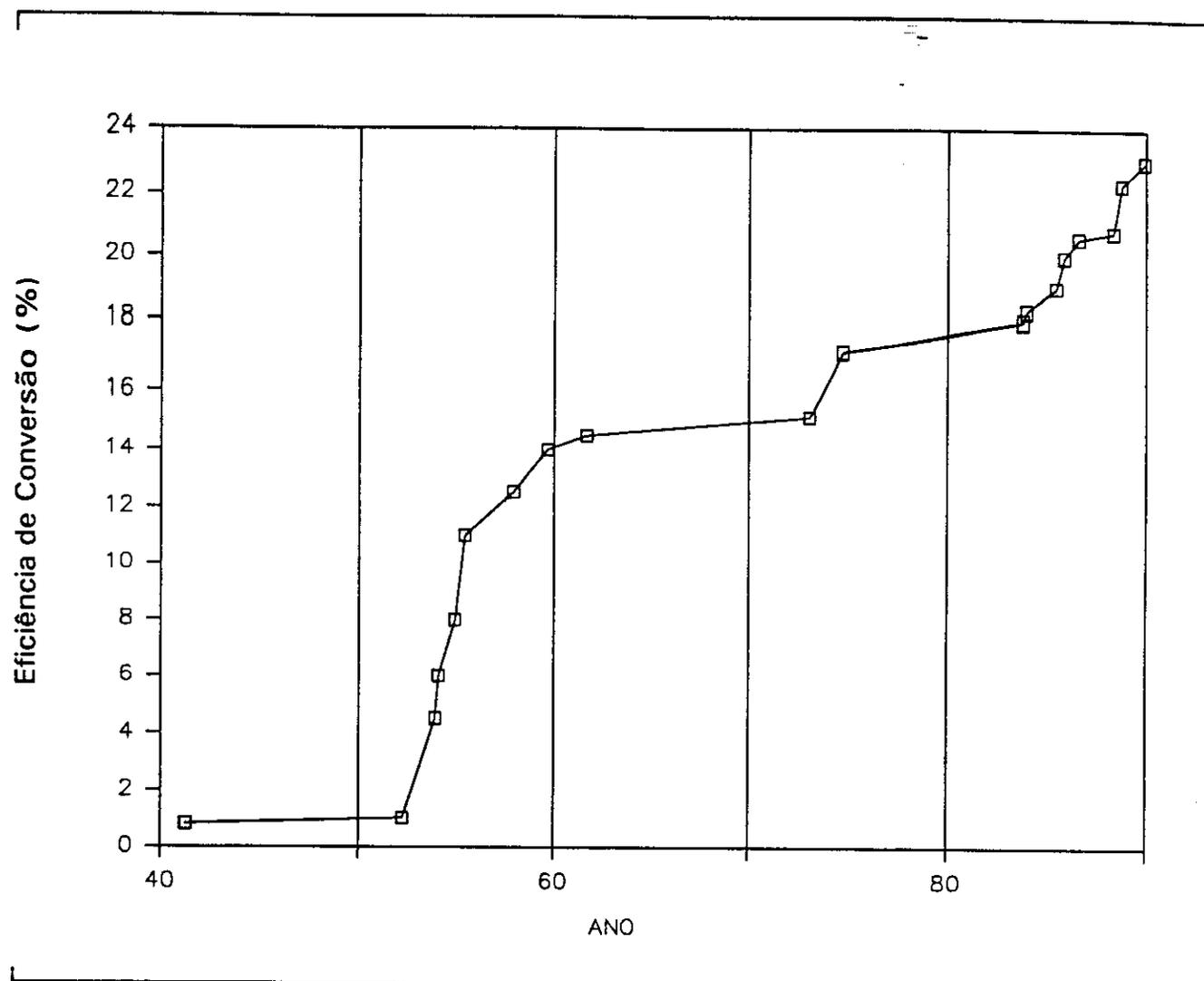


Figura 22 - Evolução da eficiência de conversão de células solares de silício produzidas em laboratório⁽²⁹⁾.

Pode-se verificar o impacto econômico traduzido pelo aumento da eficiência de conversão de módulos fotovoltaicos, relacionando a eficiência e o custo do kW médio nessa tecnologia. Nessa formulação de custos para a geração fotovoltaica, o valor β representará o custo da terra, em US\$/km². No caso de sistemas fotovoltaicos, a potência de uma instalação está diretamente relacionada à área de captação de energia.

Partindo de 4,5 kWh/m²dia, como um valor típico de radiação incidente no Brasil, e de outros dados como: dia típico teórico de 12 horas e valor típico nacional para n/N de 0,4, já vistos no item 3.2, para módulos com η de eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica, a área ideal A_i de módulos fotovoltaicos será:

$$\frac{P_{\text{méd}}}{A_i} = \frac{E_{\text{inc}} \times \eta}{T}$$

$$A_i = \frac{T \times P_{\text{méd}}}{E_{\text{inc}} \times \eta}$$

ou seja,

$$A_i = 1,07 \times 10^{-6} \times \frac{P_{\text{méd}}}{\eta} \text{ km}^2/\text{kW} \quad (10)$$

Inserindo-se uma margem de segurança de 25% na equação (10), usual em projetos fotovoltaicos, a área real A será:

$$A = 1,25 \times A_i$$

e, para 1 kW médio,

$$A = \frac{1,33 \times 10^{-6}}{\eta} \text{ km}^2/\text{kW} \quad (11)$$

À partir disso, pode-se calcular o custo do kW médio de uma instalação fotovoltaica, como a soma de duas parcelas que seriam a parcela de geração, incluindo módulos e baterias e uma parcela referente ao custo da terra, expressa na equação (12).

$$C_F = \left(@ \times \frac{P_p}{P_{\text{méd}}} \right) + (A \times \beta)$$

onde @ é o custo de equipamentos fotovoltaicos para geração, em US\$/kWp. Como, deve-se usar a mesma margem de segurança no cálculo da potência média,

$$P_{\text{méd}} = P_p \times 1,25 \times \eta$$

$$\frac{P_p}{P_{\text{méd}}} = \frac{0,8}{\eta}$$

C_F será, então,

$$C_F = \frac{(0,8 \times \theta)}{\eta} + \left(\frac{1,33 \times 10^{-6}}{\eta} \times \beta \right) \quad (12)$$

Através dessa equação pode-se observar que a parcela referente ao custo da terra é desprezível em relação à parcela referente à aquisição de equipamentos. É bastante possível que a parcela referente a obras civis, que não foi considerada nesse exercício e que deverá compor o custo total, seja mais expressiva que a parcela referente ao custo da terra.

Então, a variação do custo do kW médio obtido por geração fotovoltaica, para diferentes valores de eficiência de conversão, pode ser observada na Figura 23.

Por essas curvas pode-se observar que o impacto da evolução tecnológica é bastante importante na composição de preços de projetos fotovoltaicos. No entanto, também é visível que os custos obtidos para a geração fotovoltaica ainda estão muito distantes dos custos divulgados para de geração hidroelétrica ou termoelétrica.

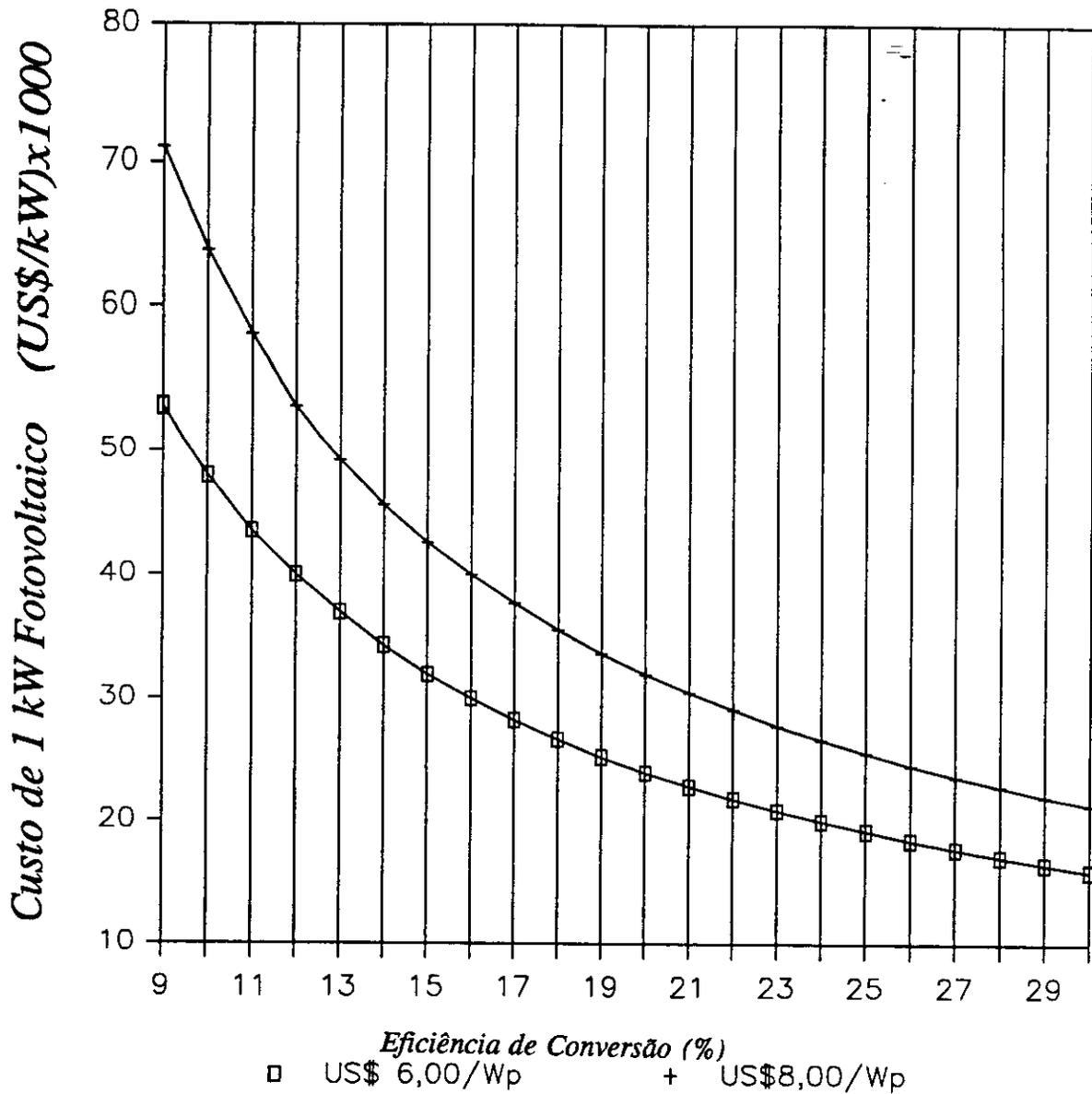


Figura 23 - Variação do custo do kW médio, obtido por conversão fotovoltaica, para diferentes eficiências de conversão de energia solar em energia elétrica, e para dois custos de Wp: US\$ 6,00/Wp (valores internacionais de 1990), e US\$ 8,00/Wp (*).

(*). Esse custo de módulos e baterias, @ = US\$ 8,00 Wp, corresponde aos custos obtidos para o projeto "Estação Ecológica Juréia-Itatins".

4.4.2. Outras motivações

As outras motivações que serão abordadas, por serem outras, não são menos importantes, muito menos no caso da energia solar. Nessa categoria estão inseridas todas as motivações que não podem ser quantificadas.

Em primeiro lugar está o fato de que, por ser a única fonte inesgotável em nossa escala histórica e restrita de tempo, sempre instigou o Homem a aproveitá-la, e não há nada que leve a crer na mudança dessa postura humana. Portanto, na hipótese mais pessimista, é inevitável que a energia solar venha a ser explorada para suprir as demandas energéticas da humanidade.

Em seguida, vem com destaque a questão ambiental. É muito difícil abordar essa questão sem se incorrer em repetitividade, mas é necessário ressaltar alguns aspectos dessa questão para melhor entendimento das possibilidades de ampliação dos usos da energia solar no Brasil.

As possibilidades de aproveitamento dos rios para geração elétrica estão, em muitas regiões, chegando aos seus limites. As opções tecnológicas disponíveis para geração de grandes pacotes de energia, a se insistir nessa estratégia, são as usinas termoelétricas, com os mais variados combustíveis. Independentemente da escolha do combustível, que pode ser mais ou menos impactante ao ambiente, a queima de qualquer substância gera CO_2 , na melhor das hipóteses, que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa na atmosfera terrestre.

Embora esse problema ainda não atinja diretamente o território brasileiro, a preocupação dos países desenvolvidos levou à formulação de tratados internacionais para o controle de emissões nas

últimas conferências realizadas sobre o meio-ambiente. Como o uso direto da energia solar não produz nenhum dos gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa na atmosfera terrestre, nem mesmo o CO₂, esse talvez seja o motivo principal, ao lado da redução de preços do Wp, para que o interesse no uso de módulos fotovoltaicos tenha se intensificado nos países do primeiro mundo.

5. CONCLUSÕES

Como ponto de partida para o uso da energia solar, devem ser analisadas as condições solarimétricas, pois correspondem aos recursos e reservas dos outros energéticos^(*). Em relação a esse ítem, existem condições propícias em todas as regiões do país para o uso da energia solar, como se pode observar nos trabalhos citados no texto.

Na região Norte, porém, existe o caso muito particular da floresta amazônica. Para ela, ou partes dela, o que será a fonte de energia apropriada depende mais da compreensão da unidade "floresta", do que de informações que possam ser obtidas através dos instrumentos clássicos de planejamento, como por exemplo a comparação de preços entre formas diferentes de geração de energia. Já as outras regiões do país, salvo um exame mais detalhado a nível regional, não apresentam obstáculos destacáveis à essa forma de geração. Em especial, para as regiões Nordeste e Centro-Oeste, onde as redes de distribuição de energia não são suficientes para o atendimento de todos os possíveis consumidores, a disponibilidade de recursos torna o uso da energia solar em uma opção a ser considerada.

Mesmo assim, a deficiência de informações a esse respeito deverá ser sanada, com a instalação de postos para medição e centros para sistematização e análise dados, caso se pretenda implementar um programa eficaz de utilização da energia solar no país. O planejamento da expansão da Rede Solarimétrica Nacional, assim como a pesquisa sobre métodos para o tratamento adequado desses dados, é uma linha de

(*) Recursos são as reais disponibilidades de conversão de insumos em energia disponível para consumo, e reservas as disponibilidades que se tornarão recursos com a evolução tecnológica, fatores econômicos e outros fatores, todos funções do tempo.

investigação importante para a continuidade dos estudos em energia solar no país. Ligado à questão solarimétrica, alguns pesquisadores apontam o problema da não uniformidade na saída de dados, o que dificulta a manipulação dos mesmos, e que poderia ser sanado com esforços de ordem administrativa.

Outro aspecto relevante está relacionado ao estágio tecnológico atual e ao desenvolvimento que vem ocorrendo na área de pesquisa em materiais para conversão fotovoltaica, o que pode ser chamado de sua *vertente tecnológica*. Isso vem se traduzindo na redução dos custos de produção de sistemas e no aumento da eficiência das células solares. A maioria dos estudos desenvolvidos a nível mundial, vêm enfatizando esse aspecto, e as perspectivas que estão se delineando da disseminação da tecnologia fotovoltaica de uma forma mais expressiva. As estratégias de venda e expansão de mercado dos principais fabricantes de sistemas fotovoltaicos, haja visto sua recente incursão no mercado brasileiro, também estão se tornando mais agressivas, contribuindo para a definição desse quadro.

O grande impeditivo para a opção por geração fotovoltaica, que sempre foi a questão do preço, vem sendo paulatinamente derrubado, já que o custo unitário está se reduzindo, e o aumento da eficiência de conversão permite que sejam utilizadas menos unidades. Essa questão é extremamente importante para as aplicações que vem sendo feitas no Brasil. Como foi exposto, são as Companhias de Energia as principais usuárias dessa tecnologia, e as que reúnem mais condições de implementar esse uso. A questão de preço, para uma tecnologia que nesse universo tem que concorrer com outras formas de geração, é questão decisiva. O desenvolvimento de uma estratégia planejada para a

utilização da energia solar fotovoltaica, ou de outras fontes renováveis de geração de energia, que venham a ser fundamentais para as próximas décadas, é um tema de estudos de real interesse para essas companhias.

Outra linha de estudos, relacionada à penetração de novas tecnologias de geração de energia, é o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação econômica que considere as contribuições relevantes dessa nova tecnologia em um cenário futuro. No caso da tecnologia fotovoltaica, desenvolver uma metodologia que considere suas qualidades ambientais em um cenário adequado aos acordos de redução de emissão de gases poluentes e de geração de resíduos.

Para finalizar, cabe ressaltar a vinculação que os projetos fotovoltaicos vêm tendo no país até hoje, com os problemas de infraestrutura de populações de baixo poder aquisitivo. É o que pode ser chamada de sua *vertente social*. São exemplos disso os projetos já implementados pelas companhias de energia. As implicações dessa vinculação levam a um questionamento do papel de *provedoras de infraestrutura para o desenvolvimento*, atribuído às companhias de energia, de como esse papel é desempenhado, e da forma pela qual são definidas as prioridades de atendimento das necessidades desse público-alvo. Levam também à necessidade de definição de estratégias para dimensionamento de projetos fotovoltaicos, que considerem a especificidade de demanda que esse estrato social apresenta.

O estudo sobre o comprometimento dessa *vertente social* com a questão ecológica poderá trazer contribuições importantes à compreensão do papel do Estado e, em decorrência disso, das empresas públicas no país.

"...e quando o Sol dilatar,
vou dar à luz."

A.Antunes

RELAÇÃO DE ANEXOS

ANEXO A - TRABALHO DE BECQUEREL

ANEXO B - CONTEÚDO ENERGÉTICO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

ANEXO C - MAPAS MENSAS DA RADIAÇÃO INCIDENTE NO BRASIL

ANEXO D - HORAS DE SOL DISPONÍVEIS

ANEXO A**TRABALHO APRESENTADO POR BECQUEREL**

As páginas seguintes trazem a reprodução do trabalho original, apresentado por Edmond Becquerel à Academia de Ciências de Paris, em 1839, na qual relata o descobrimento do efeito fotovoltaico.

Esta reprodução é cópia da transcrição feita pela Universidade Nova Lisboa, por ocasião da apresentação do 3^o Premio Edmond Becquerel, em 1992, destinado a pesquisadores na área da energia solar fotovoltaica.

Está presente nessa dissertação como uma homenagem.



EDMOND BECQUEREL

(1820 - 1891)

Mémoire sur les effets électriques produits
sous l'influence des rayons solaires;
par M. EDMOND BECQUEREL

MÉMOIRES LUS. (*)

Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires; par M. EDMOND BECQUEREL.

§ 1^{er}. *Action de la radiation sur les lames métalliques.*

« Dans le dernier Mémoire que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie, dans sa séance du lundi 29 juillet 1839, je me suis attaché à mettre en évidence, à l'aide des courants électriques, les réactions chimiques qui ont lieu au contact de deux liquides, sous l'influence de la lumière solaire. Le procédé que j'ai employé nécessitait l'emploi de deux lames de platine, en relation avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur très sensible et qui plongeaient chacune dans une des dissolutions superposées. Or comme ces deux lames éprouvaient elles-mêmes les effets de la radiation, il a dû en résulter des phénomènes composés, dont je vais m'occuper dans ce nouveau Mémoire. On sera à même ensuite de faire la part de chacun des effets produits.

(*) E. Becquerel,

» Quand deux lames de platine parfaitement propres, mais d'inégale température, sont plongées dans un liquide, il y a aussitôt production d'un courant électrique; et que le liquide soit de l'eau ou de l'eau alcaline, le courant est tel, que la lame échauffée prend au liquide l'électricité négative; le contraire a lieu quand on emploie pour liquide conducteur de l'eau acidulée. Comme le même phénomène se produit quand on expose inégalement à la radiation solaire deux lames de platine ou d'or plongeant dans une solution acide, neutre, ou alcaline, il est important de reconnaître jusqu'à quel point la radiation calorifique intervient dans la production du phénomène. Pour observer les effets de la radiation solaire, on prend une boîte en bois noircie intérieurement et divisée, au moyen d'une membrane très mince, en deux compartiments, que l'on remplit de la solution d'essai. Dans chacun de ces compartiments, on plonge une lame de platine après l'avoir chauffée préalablement au rouge; les lames de platine sont mises en communication avec un excellent multiplicateur à fil long, et l'on recouvre enfin chaque compartiment avec une planchette, afin d'intercepter l'action de la lumière solaire. Quand on veut opérer, on enlève successivement chacune d'elles.

» J'ai d'abord recherché l'ordre des écrans diversement colorés, par rapport à la radiation solaire qui agit sur les lames de platine, afin de pouvoir le comparer à l'ordre de ces mêmes écrans par rapport à la radiation calorifique solaire, qui agit sur une pile thermo-électrique. Cet ordre est complètement différent; il nous suffira de citer un verre jaune, qui est très diathermane et qui intercepte complètement toute action de la lumière solaire sur les lames de platine.

» M. Melloni a montré que les rayons calorifiques de réfrangibilité différente étaient inégalement absorbés par un écran d'eau d'un millimètre d'épaisseur, et que la perte était en raison inverse de la réfrangibilité; mais, comme dans les expériences précédentes, les rayons solaires avant de frapper les lames de platine, traversaient une couche liquide, j'ai voulu mettre la pile thermo-électrique dans la même position relative que les deux lames de platine; j'ai donc cherché l'ordre des écrans interposés entre la couche liquide et la pile thermo-électrique. Dans ce cas, le verre jaune, cité plus haut, laisse encore passer une grande partie de la chaleur rayonnante; l'ordre des autres écrans est tout-à-fait différent de celui que l'on a trouvé pour les lames de platine. On doit donc en conclure que ce n'est pas la radiation calorifique qui produit ce phénomène, mais des

les écrans semblent l'indiquer, ainsi que les diverses parties du spectre. En effet:

» J'ai appliqué verticalement une des deux lames de platine, qui avait été préalablement chauffée au rouge, sur une des faces d'une boîte en verre qui avait été noircie, à l'exception d'une partie qui se trouvait vis-à-vis de la lame; puis ayant projeté successivement, sur cette lame, les rayons colorés du spectre solaire formés en réfractant les rayons directs du soleil, on n'a eu un courant électrique sensible que lorsque la lame était exposée dans les rayons violets ou bleus.

» Toutes les fois que les lames sont très propres, qu'elles ont séjourné dans l'acide nitrique concentré, puis qu'elles ont été rougies, les rayons du spectre sont absolument sans effet pour déterminer la production de courants électriques dont nous recherchons la cause. Cette expérience tend à montrer que les rayons qui agissent sur les lames de platine ou d'or, plongées dans des dissolutions, sont plus réfrangibles que les rayons calorifiques. On peut se demander maintenant quel est le mode d'action de ces rayons dans la circonstance actuelle; c'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Cependant comme les effets sont presque nuls quand les surfaces des lames sont très nettes et parfaitement décappées, il pourrait se faire que les effets produits, quand elles ne sont pas dans cet état, fussent dus à l'action des rayons chimiques sur des corpuscules d'une ténuité extrême qui adhèrent aux surfaces. La nature des corpuscules étant inconnue, on est conduit naturellement à rechercher d'abord l'influence que peut exercer sur le phénomène la présence de corps inaltérables à la lumière, tels que le charbon et divers oxides métalliques placés sur les lames en couches très minces. Alors, dans ce cas, bien loin d'avoir une augmentation d'effets lorsqu'on expose les lames ainsi recouvertes à la radiation solaire, on a plutôt une diminution, résultat inverse de ce qui devait se passer si le phénomène était purement calorifique, les corps mis sur les lames de platine ayant un pouvoir absorbant plus fort sur le platine.

» J'ai opéré aussi avec des lames de métaux oxidables.

» *Lames de laiton.* — Des lames de laiton bien décappés ont été mises dans l'appareil à compartiment qui renfermait de l'eau ordinaire aiguillée de quelques gouttes d'acide nitrique; on a obtenu un courant de 4 à 5 degrés, lors de l'exposition aux rayons solaires; alors on a fait passer un courant électrique par les deux lames servant d'électrodes; la lame positive s'est oxidée, tandis que l'autre est restée brillante: alors

on les a exposées successivement à la lumière solaire, la lame brillante s'est comportée comme avant, c'est-à-dire qu'elle a pris au liquide l'électricité positive, tandis que la lame oxidée est devenue fortement négative : ayant interverti l'ordre des lames, quand elles servaient d'électrodes, les résultats ont encore été les mêmes ; une des lames oxidées ayant été mise successivement dans les rayons colorés du spectre solaire, a donné :

Rayons du spectre.	Intensité du courant par première impulsion.
Rouges.....	1°
Orangés.....	"
Jaunes.....	2
Verts.....	4
Bleus.....	2
Indigo.....	"
Violetts.....	0

» *Lames d'argent.* — Des lames d'argent parfaitement décapées ont été mises dans l'appareil à compartiment rempli d'eau acidulée par l'acide sulfurique : exposées successivement à la radiation solaire, elles ont donné un courant de 1 à 2 degrés ; la lame exposée était négative par rapport au liquide : en opérant avec les mêmes lames qui avaient servi d'électrodes et exposant à la radiation solaire la lame positive ou oxidée, le courant n'a pas été plus intense.

» Cette faible action pouvant être négligée, j'ai déposé sur les lames d'argent des vapeurs de brome, d'iode et du chlore. Avec une couche épaisse de vapeur d'iode, répandu sur la lame, on a obtenu un courant assez intense, dirigé dans un sens tel, que la lame exposée au soleil prenait au liquide l'électricité négative, résultat qui annonçait l'action de l'iode sur l'argent ; quand la couche d'iode était très mince, on avait un courant électrique allant en sens inverse, ce qui indiquait une action chimique inverse de la précédente ; par première impulsion à la lumière diffuse, le courant obtenu dans une expérience, produisait une déviation de 45 degrés.

» Quand on emploie du brome au lieu d'iode, le courant qui est assez fort a toujours lieu de manière que la lame exposée est négative par rapport au liquide.

» Ces courants n'ont que peu de durée, car une exposition de quelques instants à la radiation atmosphérique suffit pour effectuer complètement

» Avec le chlore, le courant a été si peu marqué, que l'effet n'est pas différent de celui que l'on obtient avec les lames de platine seules.

§ II. *Courants électriques développés par la décomposition du chlorure, bromure et iodure d'argent, sous l'influence de la lumière solaire.*

» Lorsque le chlorure d'argent est exposé à la lumière, il perd de son chlore et se change en sous-chlorure ; d'un côté, ce composé n'étant pas conducteur de l'électricité, lorsqu'il est en masse, et le devenant quand il est en couche très mince, il s'ensuit que l'on peut observer les effets électriques produits sur ce corps par la radiation solaire. Pour cela on l'étend, quand il est nouvellement préparé, sur une lame de platine plongée dans l'eau rendue conductrice par l'addition de quelques gouttes d'un acide, d'acide nitrique, par exemple ; dès l'instant que la lame est exposée aux rayons solaires, ou même à la lumière diffuse, le chlorure noircit et l'aiguille du galvanomètre se dévie de plusieurs degrés dans un sens qui annonce que la lame est positive ; résultat facile à expliquer : le chlorure, en se décomposant, prend l'électricité positive qu'il transmet à la lame métallique avec laquelle il est en contact, tandis que le liquide prend l'électricité négative. On ne peut opérer ici avec une lame d'argent, attendu que la réaction du chlore, qui provient de la décomposition du chlorure sur l'argent, produit un courant en sens inverse de celui qu'on étudie. Une lame d'or se comporte de la même manière qu'une lame de platine.

» Le meilleur procédé pour étendre le chlorure d'argent sur la lame, est de le déposer dessus quand il est encore humide et de faire chauffer doucement la lame dans l'obscurité ; l'adhérence du chlorure est telle, qu'il ne tombe pas, quelle que soit la position que l'on donne à la lame dans le liquide.

» Le bromure d'argent, qui se décompose à la lumière plus vite que le chlorure, donne aussi un courant plus intense. Pour comparer les effets produits par la radiation sur le chlorure et le bromure, on a recouvert deux lames de platine, chacune de 4 centimètres carrés de surface, l'une de chlorure, l'autre de bromure d'argent ; ces lames ayant été mises dans l'appareil à compartiment, on a eu à la lumière diffuse, 15 degrés de déviation avec le chlorure, et 26 degrés avec le bromure. Le bromure d'argent, dans les premiers instants, a chassé l'aiguille à 55 degrés, à l'instant où l'on a fait tomber dessus un rayon solaire ; dans une autre expérience, le

bromure d'argent, à la lumière diffuse, a donné par première impulsion, une déviation de - 5 degrés.

» Mais une différence qui caractérise ces deux corps, c'est que le chlorure donne pendant très long-temps un courant d'une égale intensité, et même au bout de deux heures d'exposition à la lumière solaire on a encore un courant sensible. Il n'en est pas de même avec le bromure; après une exposition de dix minutes à la lumière diffuse, il a perdu presque toute sa faculté de donner un courant.

» L'iodure d'argent, qui ne change pas sensiblement de couleur à la lumière, donne néanmoins, dans les mêmes circonstances, un courant presque aussi intense que celui du chlorure; cependant il n'est pas constant pendant aussi long-temps. Ce courant, produit par l'iodure d'argent, annonce qu'il se change en sous-iodure, à l'action de la lumière. Il est très probable que dans l'explication des phénomènes relatifs à la production des dessins photogéniques faits par M. Daguerre, il faut avoir égard à cette transformation. Du reste nous y reviendrons plus tard. Cette propriété du chlorure d'argent de donner un courant assez constant pendant un certain temps, permet de s'en servir pour déterminer les rapports des nombres de rayons chimiques qui traversent les écrans, ainsi que la distribution des rayons qui influent sur le chlorure d'argent dans le spectre solaire. Voici les résultats de deux expériences :

Écrans.	Nombre des rayons.	Rayons du spectre.	Intensité du courant.
Sans écrans.....	100	Rouges	} 0
Verre blanc.....	66	Orangés	
Verre violet.....	53	Jaunes	
— bleu.....	40	Verts.....	trace
— vert	} 0	Bleus.....	0°,75
— jaune		Indigo.....	1°
— rouge		Violetes.....	3°
		Rayons au-delà du violet..	3°

» En résumé ce Mémoire met en évidence les faits suivants :

» 1°. Des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire, sont éprouvés à des lames métalliques plongées dans un liquide, une action telle, qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique.

» 2°. La décomposition du chlorure, du bromure et de l'iodure d'argent sous l'influence de la lumière, produit des effets électriques qui peuvent servir à déterminer le nombre des rayons chimiques actifs.

» On voit donc que lorsqu'on veut employer les effets électriques produits dans la réaction de deux dissolutions l'une sur l'autre , pour étudier cette réaction sous l'influence de la lumière , il faut avoir égard à l'action de la radiation solaire sur les lames métalliques employées , dont l'effet peut être séparé facilement de l'effet total , en opérant avec l'appareil rempli successivement des deux liquides. Du reste , dans un autre Mémoire, je reviendrai sur la distinction de ces deux effets. »

ANEXO B

CONTEÚDO ENERGÉTICO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO(*)

A estimativa que será apresentada foi feita com base nas potências nominais dos equipamentos usados na fabricação dos módulos fotovoltaicos e que, portanto, deverá representar um consumo de energia direta muito superior ao real. Estimativas anteriores, realizadas no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP, geraram os dados que estão sintetizados na Tabela 13.

Capacidade de geração anual	213 kWh/m ²
Energia consumida na produção	2170 kWh/m ²
Tempo de amortização da energia	10 anos

Tabela 13 - Estimativas sobre economicidade de módulos comerciais, um exemplo.

O cálculo do consumo direto de energia em cada etapa do processo de fabricação, e uma estimativa da energia indireta requerida para a fabricação de um módulo, serão usados para fornecer um balanço energético de cada módulo.

O processo de fabricação compreende as seguintes etapas principais:

- A) Puxamento ou Crescimento do cristal de silício monocristalino
- B) Corte
- C) Retífica do Cristal
- D) Encapsulamento e montagem
- E) Caracterização eletro-óptica dos painéis

(*) A primeira versão desta estimativa foi apresentada como trabalho do curso oferecido pelo Prof. Vito Vanin em 1989, e seus autores, além da redatora desta dissertação, foram: Arq. Armando Shalders Neto e a Fís. Maria Regina Fonseca Guimarães.

As características técnicas de um módulo fotovoltaico comercial, fornecidas pelo fabricante, estão representadas no Tabela 14.

Tipo	HM - 37C 12
Células de Silício Monocristalino (10 cm de diâmetro)	36 células inteiras
Potência (Wp)	37,0
Corrente* (A)	2,27
Tensão* (V)	16,2
Corrente de Curto Circuito* (A)	2,43
Tensão em Circuito Aberto* (V)	21,00
Capacidade Média de Geração** (Ah/dia)	12,0
Dimensões (C X L X A) (mm)	1007 X 402 X 45
Massa (kg)	7,0
Condições de operação	-55°C < T < +60°C umid.rel.de 0 a 100% altitude até 7000 m ventos até 200 km/h

Tabela 14 - Características do módulo fotovoltaico HM 37C/12.

- * - Especificações médias:
sob condições de insolação de 1000 W/m², temperatura de 25°C, sujeitas a variações de 10%
- ** - Sob insolação média anual de 5.580 Wh/m².dia

Também fazem parte do processo de fabricação outras etapas, tais como a remoção de defeitos cristalinos, obtenção da junção p-n,

texturização, metalização e caracterização das células solares, que, no entanto, demandam uma quantidade de energia insignificante se comparadas às cinco etapas destacadas.

O custo de um módulo HM-37C 12, fornecido e instalado pelo fabricante é de aproximadamente US\$ 600,00 , a preços de janeiro/1993. Ainda segundo o fabricante, a vida útil destes módulos é superior a 20 anos, o que tem respaldo em publicações internacionais(29). Experiências acompanhadas no Estado de São Paulo indicam que em 8 anos ainda não houve perda de eficiência que interferisse nos usos aos quais esses módulos estão sendo aplicados.

Para um dia típico de 8 horas de sol e radiação incidente de 70% da radiação de pico, considerada pelo fabricante (1000 W/m²), o módulo em questão fornece a seguinte energia(*):

$$E_u = 0,207 \text{ kWh/dia}$$

Cálculo da Energia Direta:

A) Crescimento do Cristal: a partir de 18 kg de Silício de grau eletrônico (99,999% de pureza), num processo que pode durar cerca de 26 horas, obtem-se um monocristal de Silício cilíndrico de onde serão retiradas cerca de 1000 lâminas de 7 g cada e 0,45 mm de espessura havendo perda de 11 kg de material, sendo que pequena parte pode ser reaproveitada em processos sucessivos.

O forno para crescimento dos cristais, pelo método Czochralski, tem cerca de 3 toneladas de aço inoxidável e opera com 80 kW de potência; a cada 5200 horas de trabalho repõe-se 1 resistência

(*) Este cálculo, apenas indicativo, foi feito no item 3.3, para as condições reais de radiação incidente, nas cinco regiões do país.

de grafite maciço, em forma de coroa, de cerca de 5 cm de espessura, 50 cm de diâmetro e 70 cm de altura, o que será relevante apenas no cálculo da energia indireta. Para cada lâmina o forno trabalha 0,026 horas, e para cada módulo 0,936 horas. Portanto, são consumidos por lingote,

$$E_{cr}'' = 80 \times 26 = 2080 \text{ kWh}$$

por lâmina, teremos,

$$E_{cr} = 2,080 \text{ kWh/lâmina}$$

e por módulo, teremos,

$$E_{cr} = 74,880 \text{ kWh/mód.}$$

B) Corte: A operação de corte é feita por máquinas de corte mecânico de 2 toneladas de ferro, com 2 kW de potência. O corte de 1 lâmina demora de 2 a 4 minutos (usaremos o tempo médio de 3 minutos). por lâmina, teremos,

$$E_{co} = 2 \times 1/20 = 0,100 \text{ kWh/lâmina}$$

e por módulo, teremos,

$$E_{co} = 3,600 \text{ kWh/mód.}$$

C) Retífica: A máquina de retífica processa um bloco de 1000 lâminas em 1 hora e 30 minutos, é acionada por um motor de 2 kW de potência e tem uma massa estimada de 2 toneladas de ferro. Para 1000 lâminas, teremos,

$$E_{re}'' = 1,5 \times 2 = 3,000 \text{ kWh}$$

por lâmina, teremos,

$$E_{re} = 0,003 \text{ kWh/lam.}$$

e por módulo, teremos,

$$E_{re} = 0,108 \text{ kWh/mód.}$$

D) Encapsulamento: A máquina utilizada na operação de encapsulamento tem massa de 700 kg de ferro, potência de 14 kW e encapsula um módulo em 5 minutos.

por módulo, teremos,

$$E_{enc} = 5/60 \times 14 \text{ kWh}$$

$$E_{enc} = 1,167 \text{ kWh/mód.}$$

E) Caracterização: O simulador é uma máquina de 3 toneladas de ferro e 8 kW de potência, que testa 1 módulo em 40 segundos. A energia consumida para testar 1 módulo será:

$$E_{sim} = (40/3600 \times 8) \text{ kWh}$$

$$E_{sim} = 0,089 \text{ kWh/mód.}$$

A energia direta total por módulo será, portanto:

$$E_D = E_{cr} + E_{co} + E_{re} + E_{enc} + E_{sim}$$

ou seja,

$$E_D = 79,844 \text{ kWh/mód.}$$

Calculando-se a energia direta consumida por cada módulo em cada dia de sua vida útil, teremos:

$$E_{Dd} = 79,964 / (20 \times 365 + 5) \text{ kWh/dia}$$

$$E_{Dd} = 0,011 \text{ kWh/dia}$$

Cálculo da Energia Indireta:

No cálculo da energia indireta serão computados os valores de energia necessários para a produção de 252 g de Silício grau eletrônico (36 lâminas de 7 g cada), e a energia embutida em cada um

dos equipamentos listados. Desconsiderou-se o consumo de energia para a fabricação dos filmes de EVA e Tedlar por serem insignificantes em relação ao conteúdo energético das máquinas.

Também serão considerados os conteúdos energéticos dos perfis de alumínio e do vidro.

A obtenção de 1 kg de Silício grau eletrônico, a partir do Silício grau metalúrgico, consome 250,7 kWh e a obtenção de 1 kg de Silício grau metalúrgico consome 51,3 kWh⁽³⁰⁾.

Portanto, a energia indireta embutida nas 252 g de Silício usadas no módulo seria:

ou,
$$E_{Si}' = 302 \times 0,252 \text{ kWh}$$

$$E_{Si}' = 76,104 \text{ kWh/mód.}$$

Porém, como para a produção de 1000 lâminas são utilizadas 18 kg de Silício, das quais 11 kg poderão ser reutilizadas em outros processos de fabricação que não o citado nesse exercício, considera-se que a cada 1000 lâminas serão consumidas as 18 kg de Silício no processo em questão. Portanto, para produzir 1 lâmina serão consumidas 0,018 kg de Silício, e para as 36 lâminas de 1 módulo serão consumida 0,648 kg. Logo,

ou,
$$E_{Si} = 302 \times 0,648 \text{ kWh}$$

$$E_{Si} = 195,696 \text{ kWh/mód.}$$

Os cálculos a seguir foram feitos com base no trabalho sobre coeficientes energéticos dos materiais⁽³¹⁾, e na matriz de

coeficientes de intensidade de energia (C.I.E.) de 1975 e Cr\$ da mesma época.

O tempo de vida útil estimado para cada um dos equipamentos abaixo foi de 10 anos, ou seja 87.600 h, segundo a informação do fabricante de sistemas fotovoltaicos, proprietário das máquinas (a única exceção é a resistência de grafite que é repostada a cada 5200 h). A energia indireta será computada tendo como base as dimensões de cada equipamento, a matéria prima empregada em sua fabricação, e sem considerar a energia consumida em projeto e desenvolvimento tecnológicos, necessários para a produção dos mesmos. É, portanto, uma estimativa inferior.

Para o cálculo da energia indireta global contida em todos os equipamentos, não distribuída pela vida útil, usaremos:

$$E_i'' = \text{Quantidade} \times \text{Preço} \times \text{CIE}$$

e para o cálculo da energia indireta distribuída durante a vida útil:

$$E_i' = E_i''/v.u.$$

Para o vidro, os valores encontrados foram:

Área : 0,405 m²

Preço : Cr\$ 6,24/m² (vidro plano, 10021)

C.I.E.: 1726 kcal/Cr\$

$$E_{vi}'' = 10,77 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2$$

$$E_{vi}' = 4,36 \times 10^3 \text{ kcal/mód.}$$

$$E_{vi} = 5,062 \text{ kWh/mód.}$$

Para os perfis de alumínio foram considerados dados de outra referência(*) , segundo a qual a energia embutida em 1 tonelada de Alumínio varia entre 75 e 108 GJ/t, ou seja 20,8 e 30 kWh/kg. Para 0,5 kg (aproximadamente a quantidade presente no exemplo estudado) essa energia será:

$$E_p = 10 \text{ kWh/mód.}$$

A) Forno para Crescimento dos Cristais: O equipamento usado para crescimento dos cristais tem uma massa aproximada de 3 toneladas de aço inoxidável, com as seguintes características:

Massa : 3 toneladas
 Preço : Cr\$ 1700/t. (aço inox, 11031)
 C.I.E.: 5957 kcal/Cr\$

$$E_{icr}'' = 3,038 \times 10^7 \text{ kcal}$$

Para efeito de estimativa supõe-se que a duração do ano na unidade fabril será de 240 dias, com 8 horas de duração, dando um total de 19200 horas em 10 anos de vida útil.

$$E_{icr}' = 1,582 \times 10^3 \text{ kcal/hora}$$

como em 26 h são fabricadas 1000 lâminas e 1 painel tem 36 lâminas,

$$E_{icr} = 41,140 \text{ kcal/lâmina} = 1,481 \times 10^3 \text{ kcal/mód.}$$

ou,

$$E_{icr} = 1,719 \text{ kWh/mód.}$$

B) Resistência de Grafite: O equipamento para crescimento dos cristais contém também uma resistência de grafite maciço, reposta

(*) Os dados foram obtidos da **Mineral Facts and Problems**, 1985; Bureau of Mines, USA, Preprint from Bulletin 675; Us Department of the Interior.

a cada 5200 horas (é o único caso em que o valor da vida útil é diferente), em forma de coroa cilíndrica, com 50 cm de diâmetro externo, 5 cm de espessura e 70 cm de altura. Como a densidade do grafite (ρ) é de 2,1 toneladas/m³, a massa da resistência é:

$$\text{Massa} = V \times \rho = 0,7 \times \pi \times ((0,25)^2 - (0,20)^2) \times 2,1$$

Massa : 0,105 toneladas

Preço : Cr\$ 52/t. (grafite, 5022)

C.I.E.: 718 kcal/Cr\$

$$E_{iGr}'' = 3,920 \times 10^3 \text{ kcal}$$

$$E_{iGr}' = 0,754 \text{ kcal/hora}$$

como a cada 26 horas são produzidas 1000 lâminas,

$$E_{iGr} = 1,960 \times 10^{-2} \text{ kcal/lâmina} = 70,565 \times 10^{-2} \text{ kcal/mód.}$$

ou,

$$E_{iGr} = 0,819 \times 10^{-3} \text{ kWh/mód.}$$

C) Máquina de Corte Mecânico: A máquina de corte mecânico tem aproximadamente 2 toneladas de ferro, para o qual o preço e o C.I.E são os mesmos do item A, portanto:

Massa : 2 toneladas

Preço : Cr\$ 1700/t. (ferro, 11031)

C.I.E.: 5957 kcal/Cr\$

$$E''_{iMC} = 20,254 \times 10^6 \text{ kcal}$$

Novamente considerando o ano fabril como tendo 240 dias, e cada dia de 8 horas, teremos;

$$E'_{iMC} = 17,581 \text{ kcal/min.}$$

como o equipamento demora 3 minutos em média por lâmina cortada,

$$E_{iMC} = 52,743 \text{ kcal/lâmina} = 1,900 \times 10^3 \text{ kcal/mód.}$$

ou,

$$E_{iMC} = 2,206 \text{ kWh/mód.}$$

D) Máquina de Retífica: Equipamento com 2 toneladas de ferro, portanto:

Massa : 2 toneladas
 Preço : Cr\$ 1700/t. (ferro, 11031) =
 C.I.E.: 5957 kcal/Cr\$

$E''_{iMR} = 20,254 \times 10^6$ kcal
 ou, em 19200 horas,

$$E'_{iMR} = 1,055 \times 10^3 \text{ kcal/h}$$

como o equipamento processa 1000 lâminas a cada 1,5 horas,

$E_{iMR} = 1,583$ kcal/lâmina = 56,988 kcal/mód.
 ou,

$E_{iMR} = 6,616 \times 10^{-2}$ kWh/mód.

E) Máquina de Encapsulamento: Tem 700 kg de ferro, logo:

Massa : $0,70 \times 10^{-3}$ toneladas
 Preço : Cr\$ 1700/t. (ferro, 11031)
 C.I.E.: 5957 kcal/Cr\$

$E''_{iME} = 7,089 \times 10^3$ kcal
 ou, em 19200 horas,

$$E'_{iME} = 0,369 \text{ kcal/h}$$

como a máquina encapsula cada módulo em 5 minutos,

$E_{iME} = 0,031$ kcal/mód.
 ou,

$E_{iME} = 0,357 \times 10^{-4}$ kWh/mód.

F) Simulador: Por fim, o simulador, utilizado para reproduzir as condições de operação de cada módulo, com cerca de 3 toneladas de ferro, fornecerá indiretamente uma energia de:

Massa : 3 toneladas
 Preço : Cr\$ 1700/t. (ferro, 11031)
 C.I.E.: 5957 kcal/Cr\$

$$E''_{iSI} = 30,381 \times 10^6 \text{ kcal}$$

para a mesma vida útil de 19200 horas,

$$E'_{iSI} = 1,582 \times 10^3 \text{ kcal/h} = 0,440 \text{ kcal/s}$$

e como o simulador testa cada módulo em 40 segundos,

$$E_{iSI} = 17,581 \text{ kcal/mód.}$$

ou,

$$E_{iSI} = 2,041 \times 10^{-2} \text{ kWh/mód.}$$

Assim, a energia indireta total desta estimativa será:

$$E_I = E_{iTOTAL} = E_{icr} + E_{igr} + E_{imc} + E_{imr} + E_{ime} + E_{isi}$$

ou seja,

$$E_I = 4,012 \text{ kWh/mód.}$$

Cálculo da Energia Total:

O consumo de energia total para produzir um módulo do modelo especificado será, portanto,

$$E_T = E_D + E_I + E_{Si} + E_{Vi} + E_P$$

ou ainda,

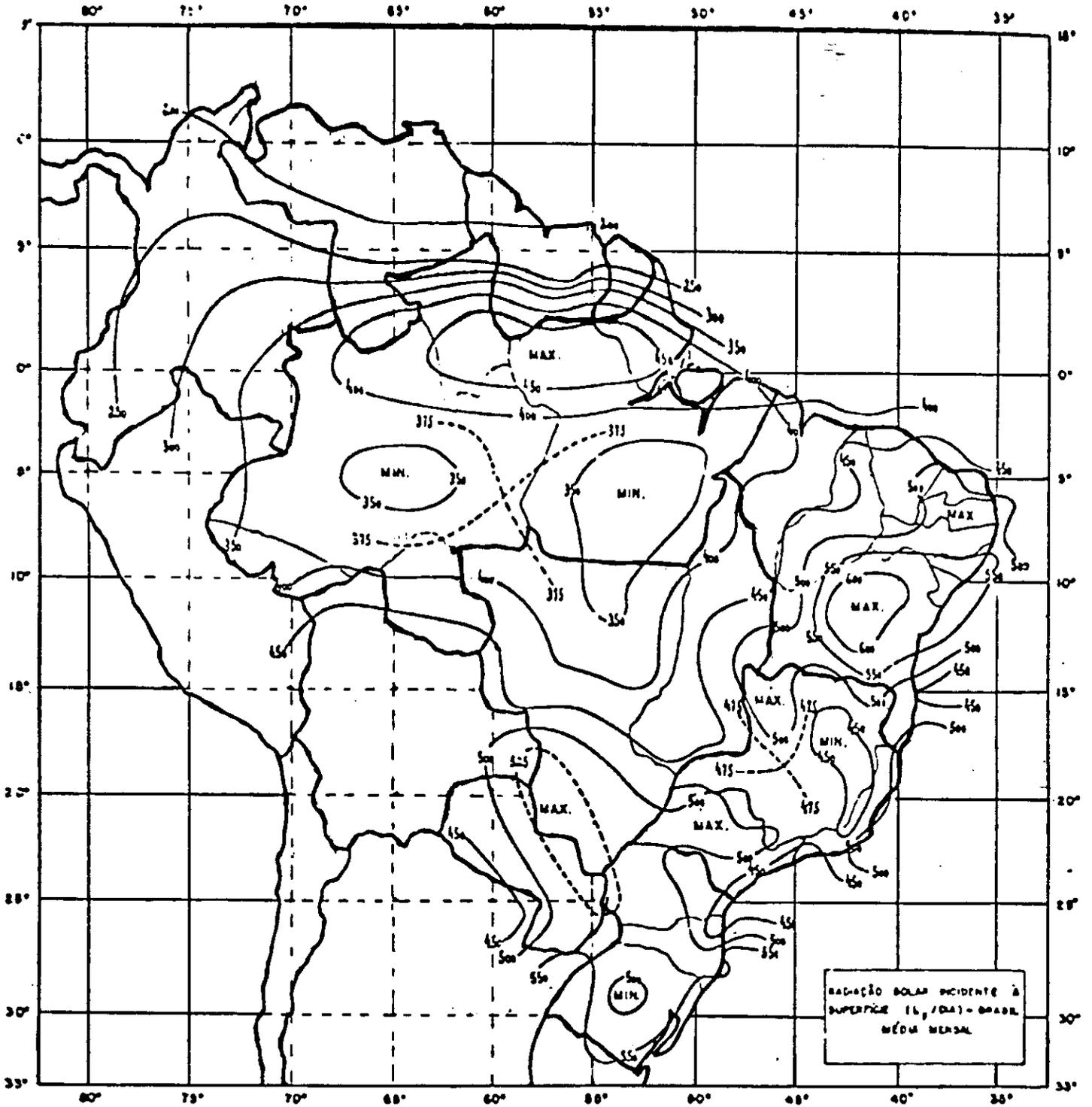
$$E_T = 294,614 \text{ kWh/mód.}$$

Esse valor também corresponde a 727,442 kWh/m². Isto equivale a dizer que, da energia diária gerada pelo módulo durante a sua vida útil, 0,04 kWh/dia correspondem ao que foi consumido em sua fabricação, ou seja, cerca de um quinto da energia média diária gerada pelo mesmo (0,207 kWh/dia). Trata-se, portanto, de um balanço energético favorável(*).

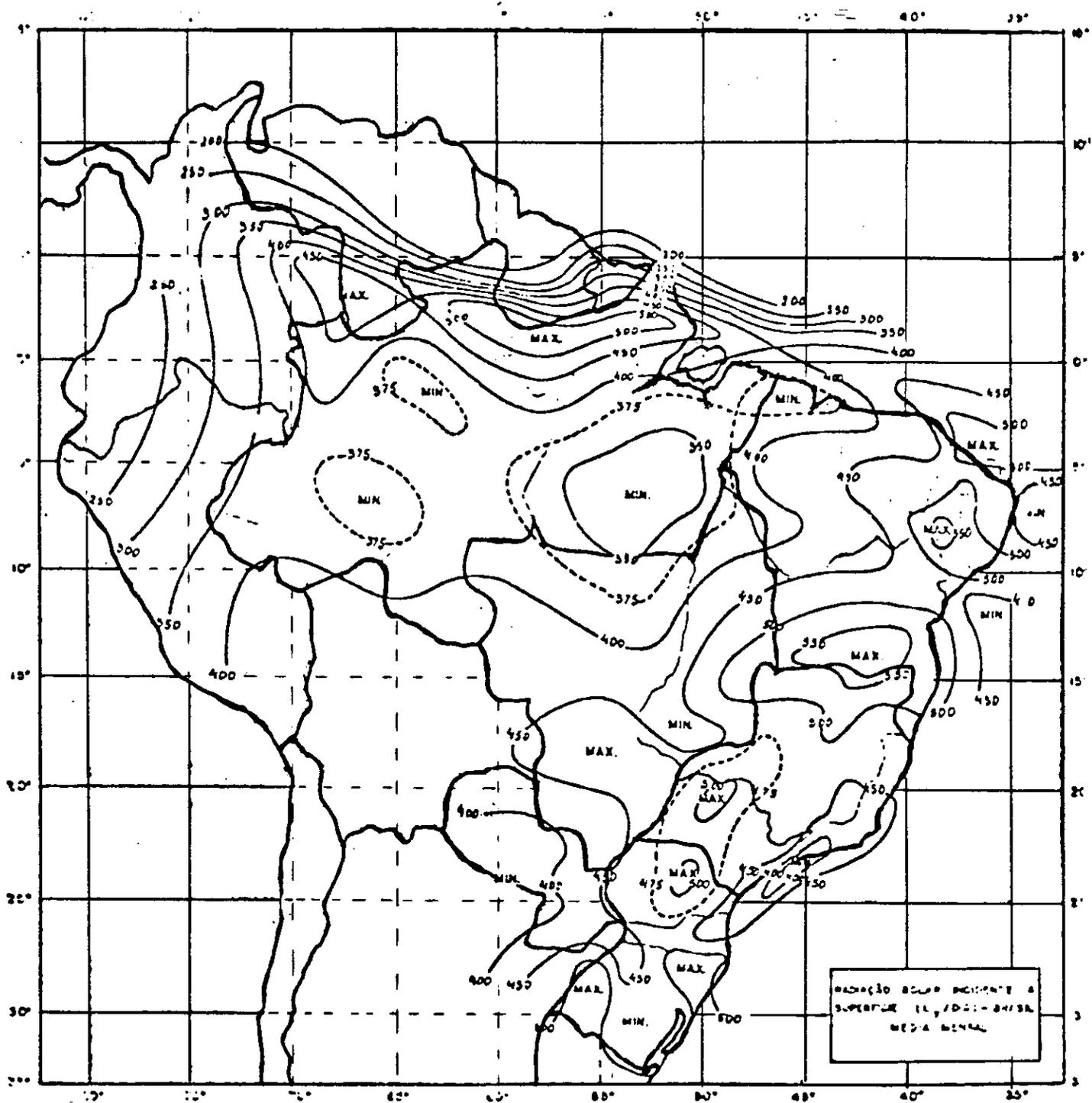
(*) Essa comparação está refeita, com mais detalhes, no item 3.3 desta dissertação.

ANEXO C**MAPAS MENSAIS DA RADIAÇÃO INCIDENTE NO BRASIL**

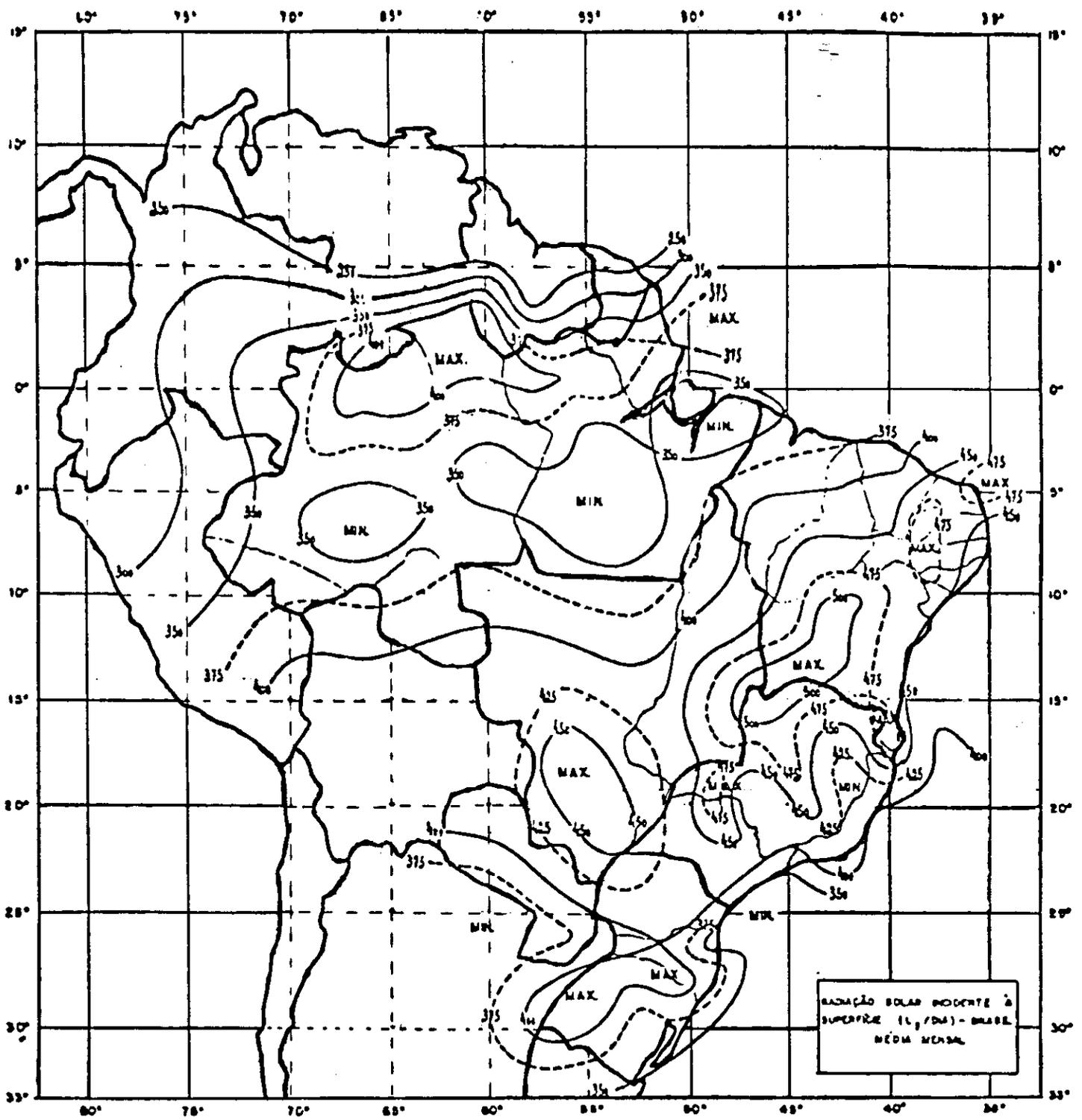
Os doze mapas que se seguem representam os valores obtidos para a radiação incidente no Brasil, nos estudos de Nunes⁽²¹⁾, e que foram usados nesta dissertação.



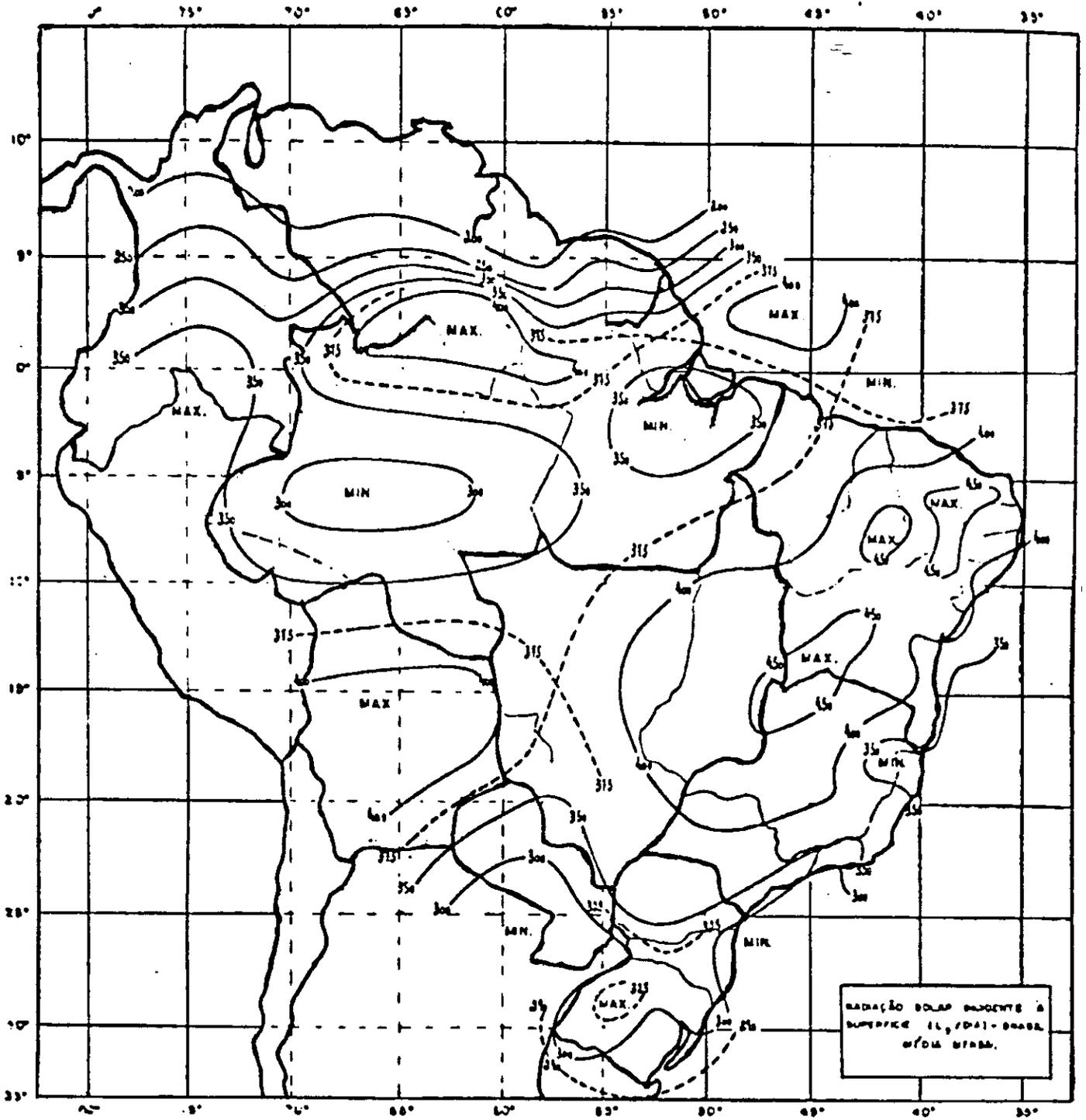
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Janeiro.



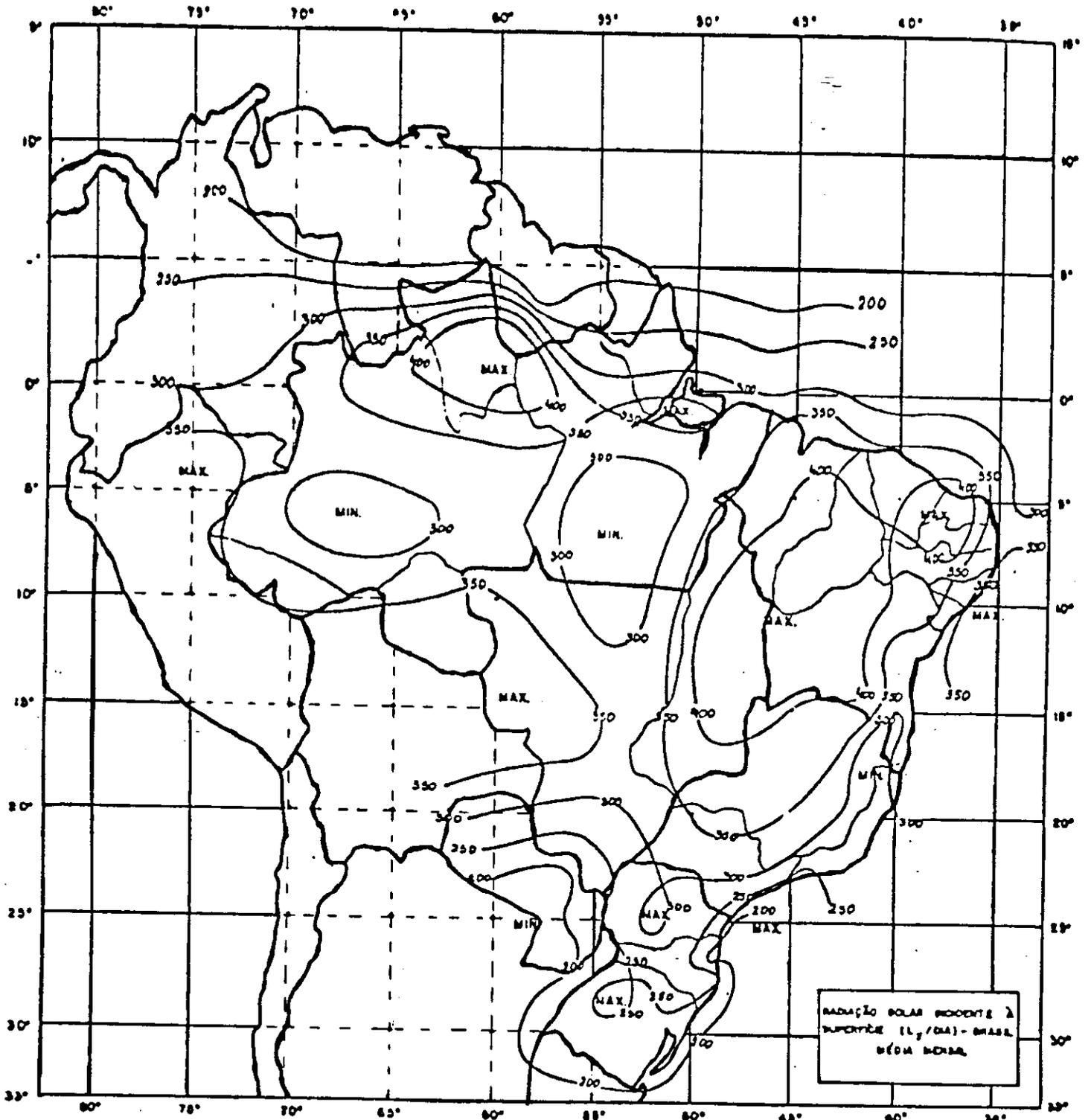
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Fevereiro.



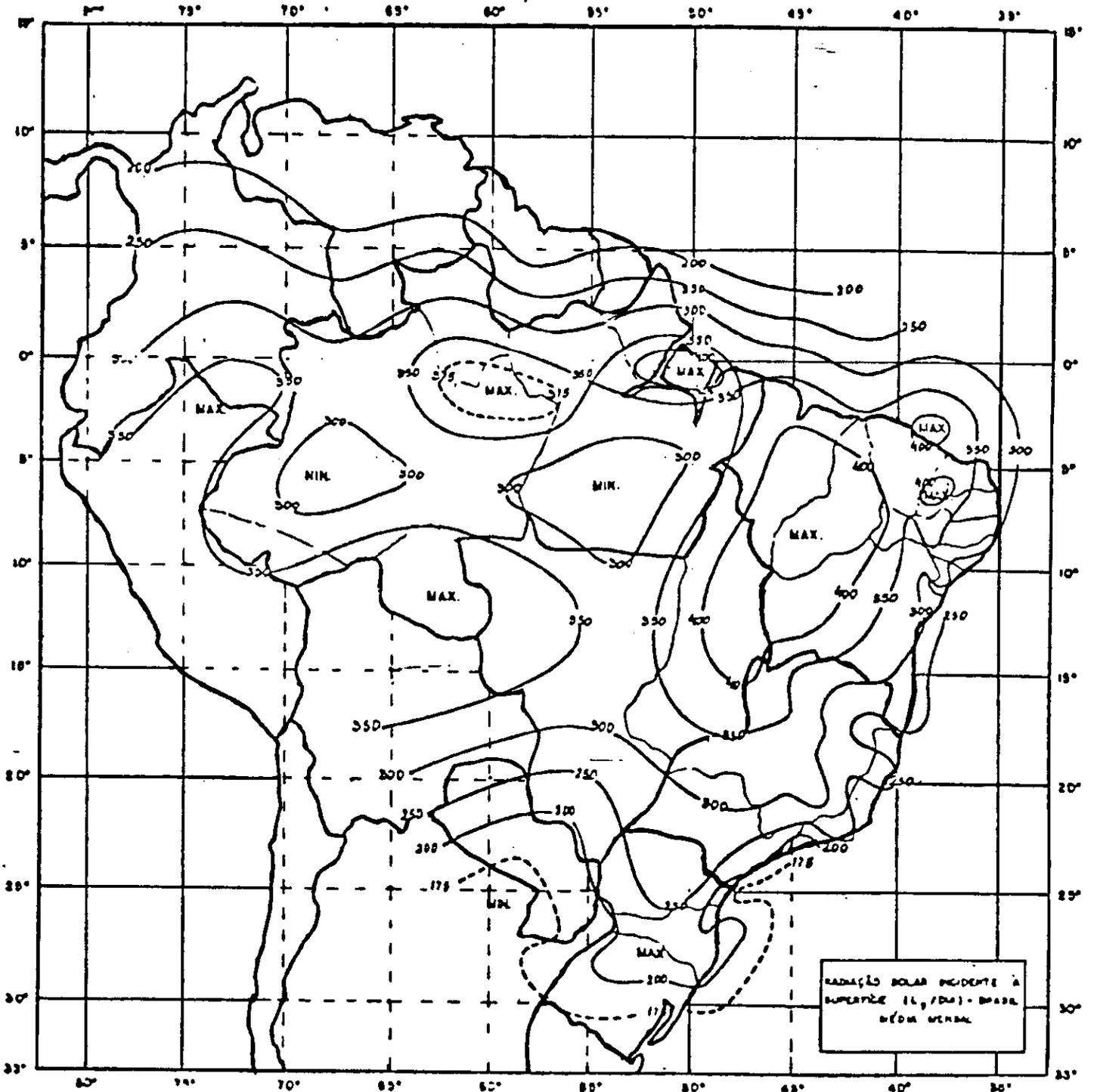
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Março.



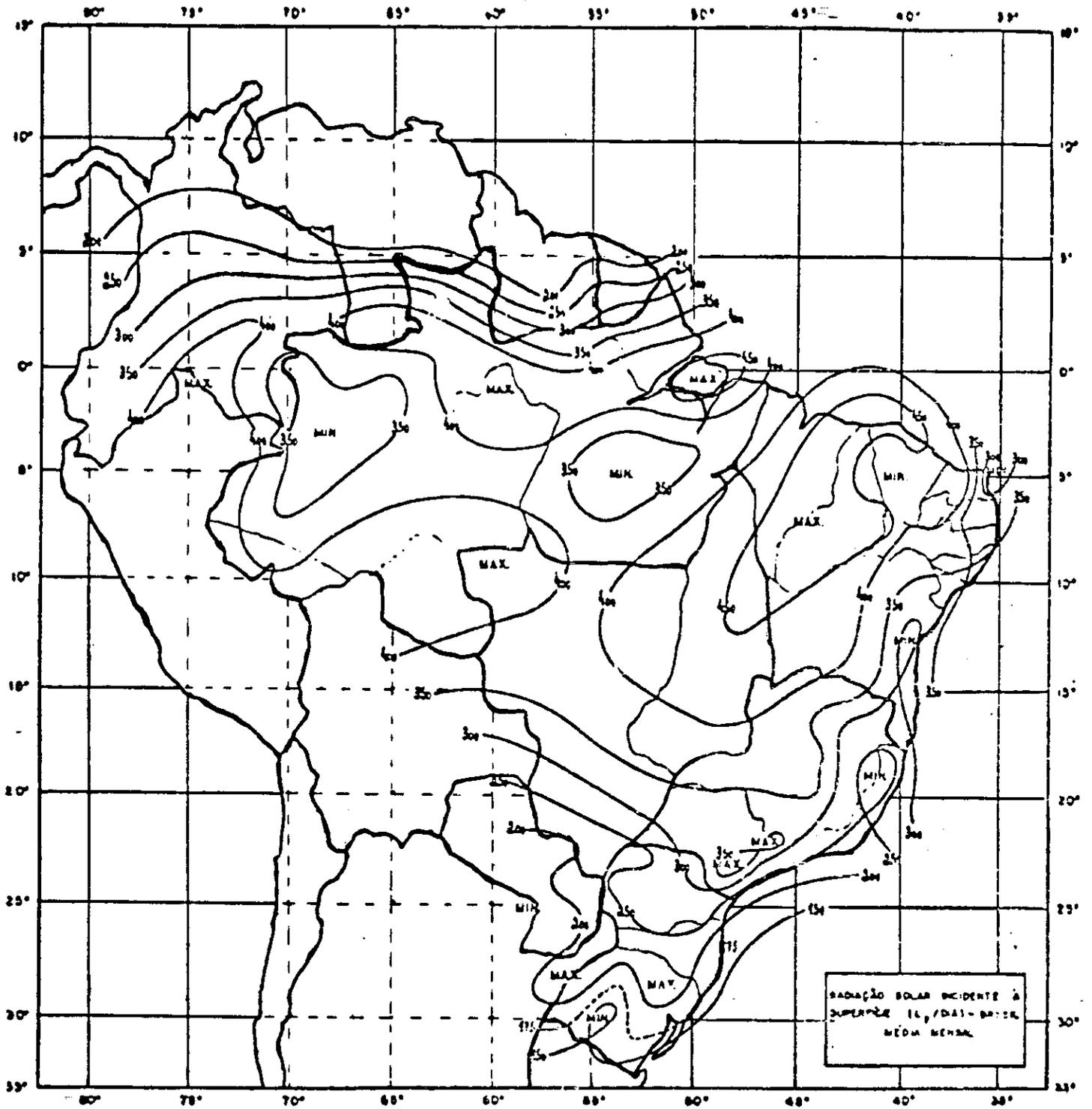
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Abril.



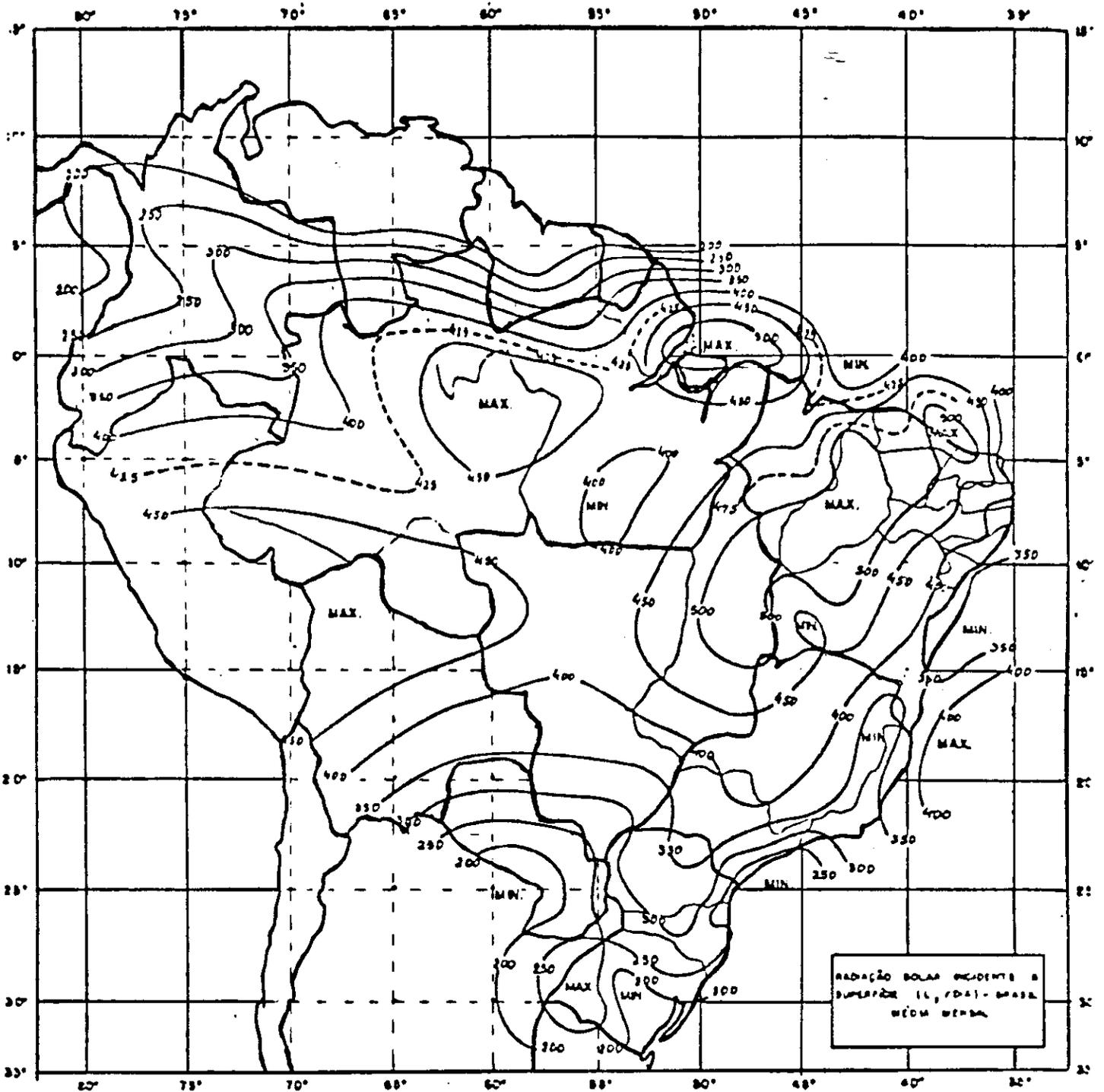
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Maio.



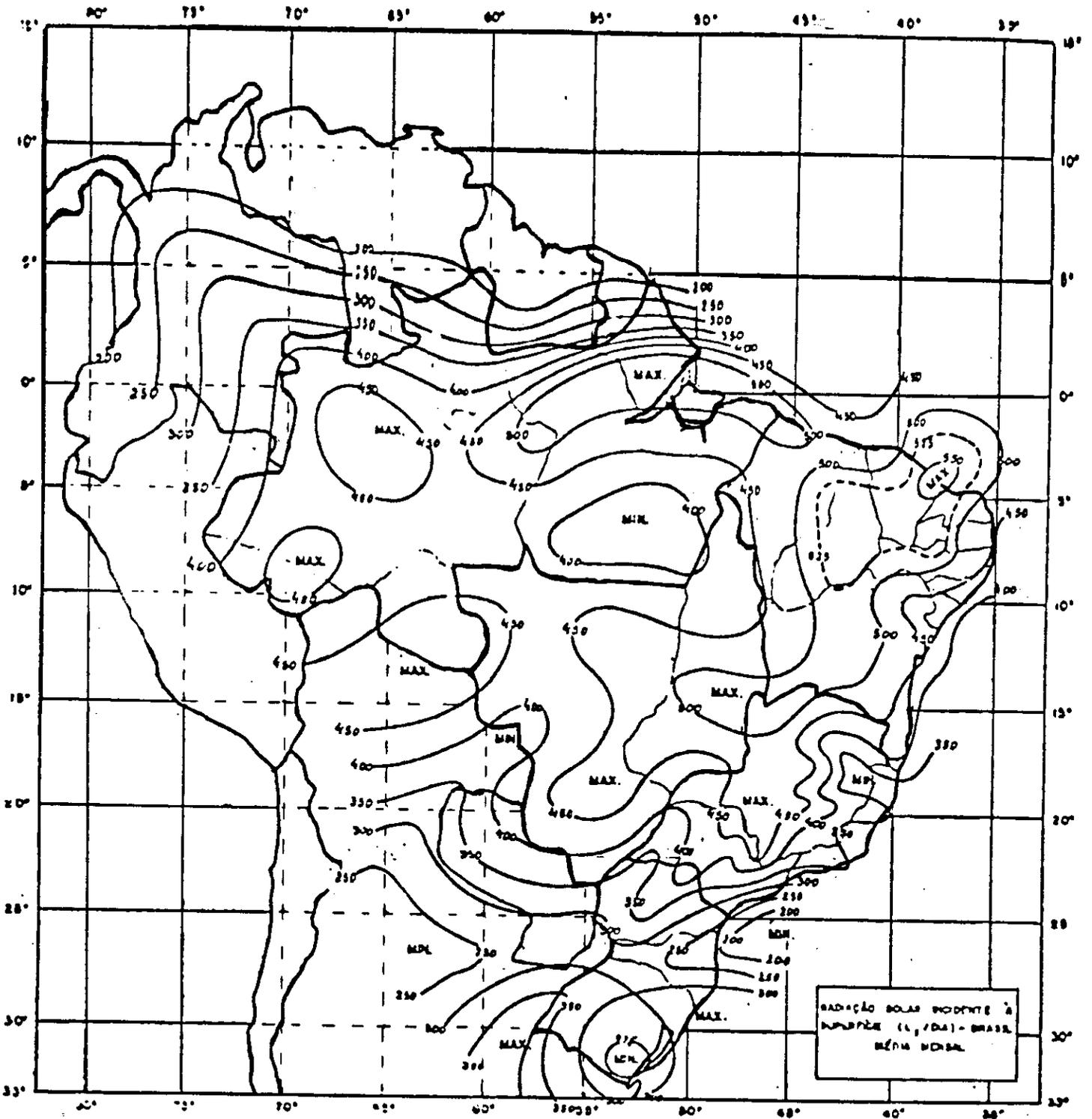
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Junho.



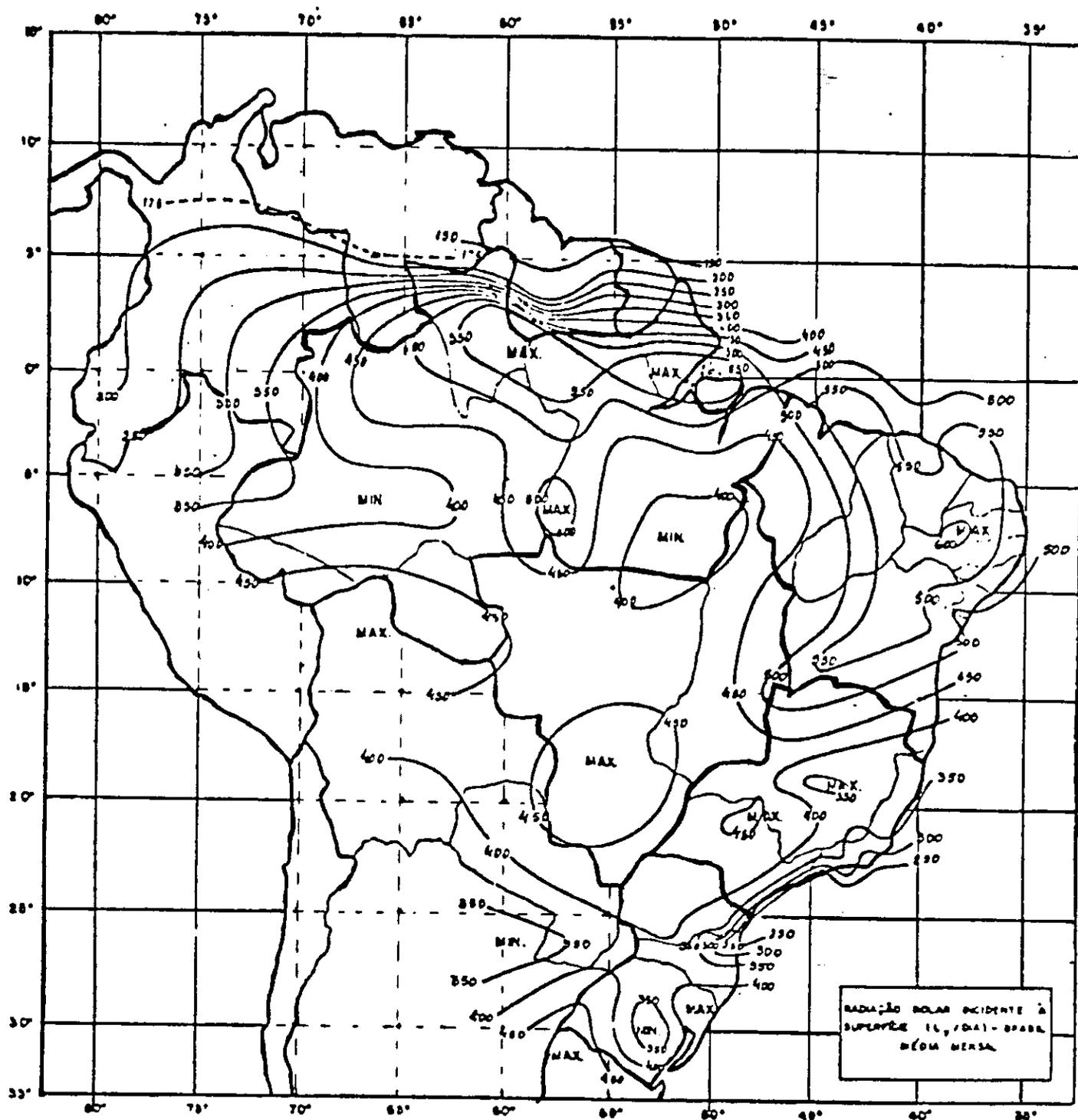
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Julho.



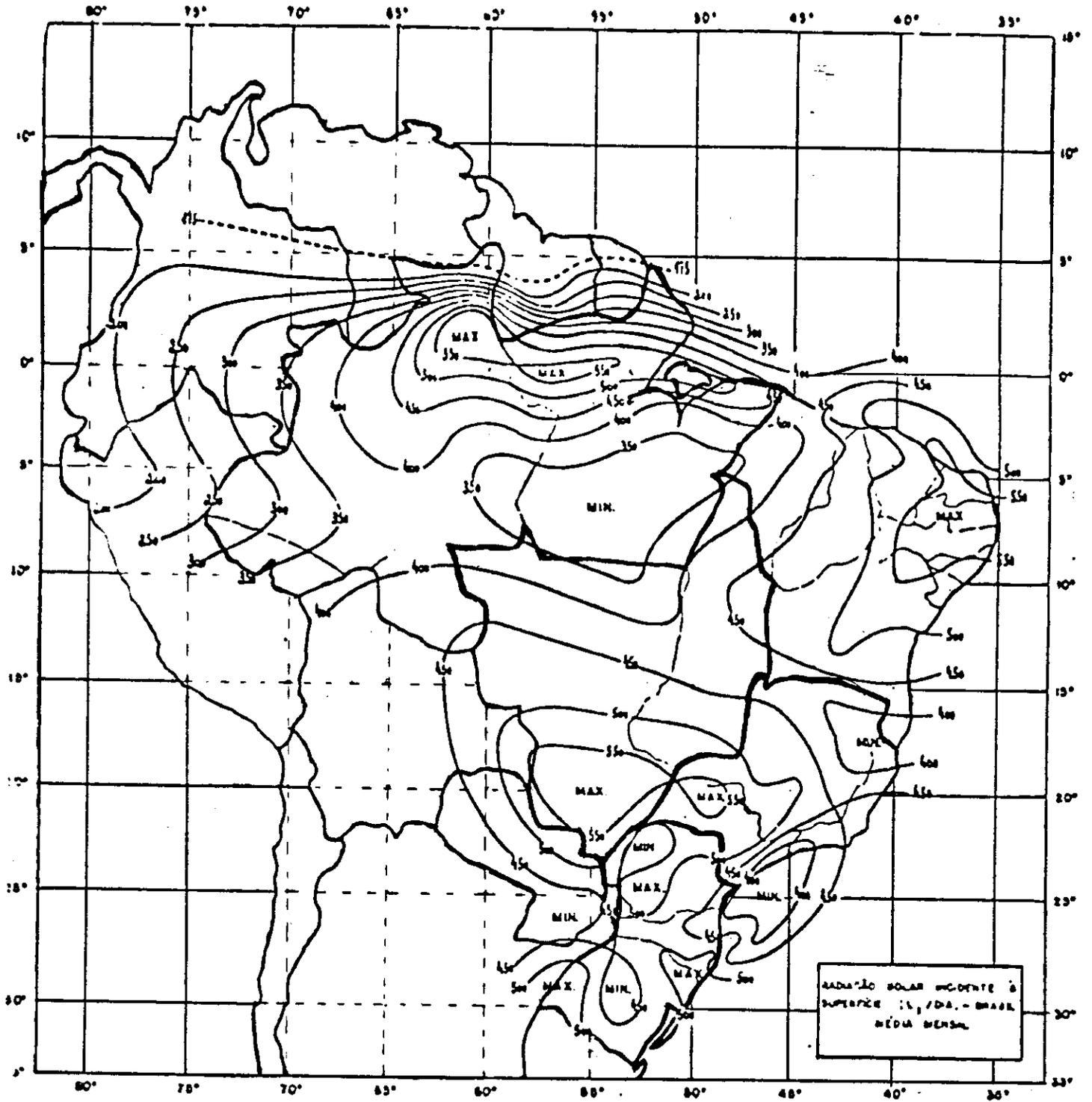
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Agosto.



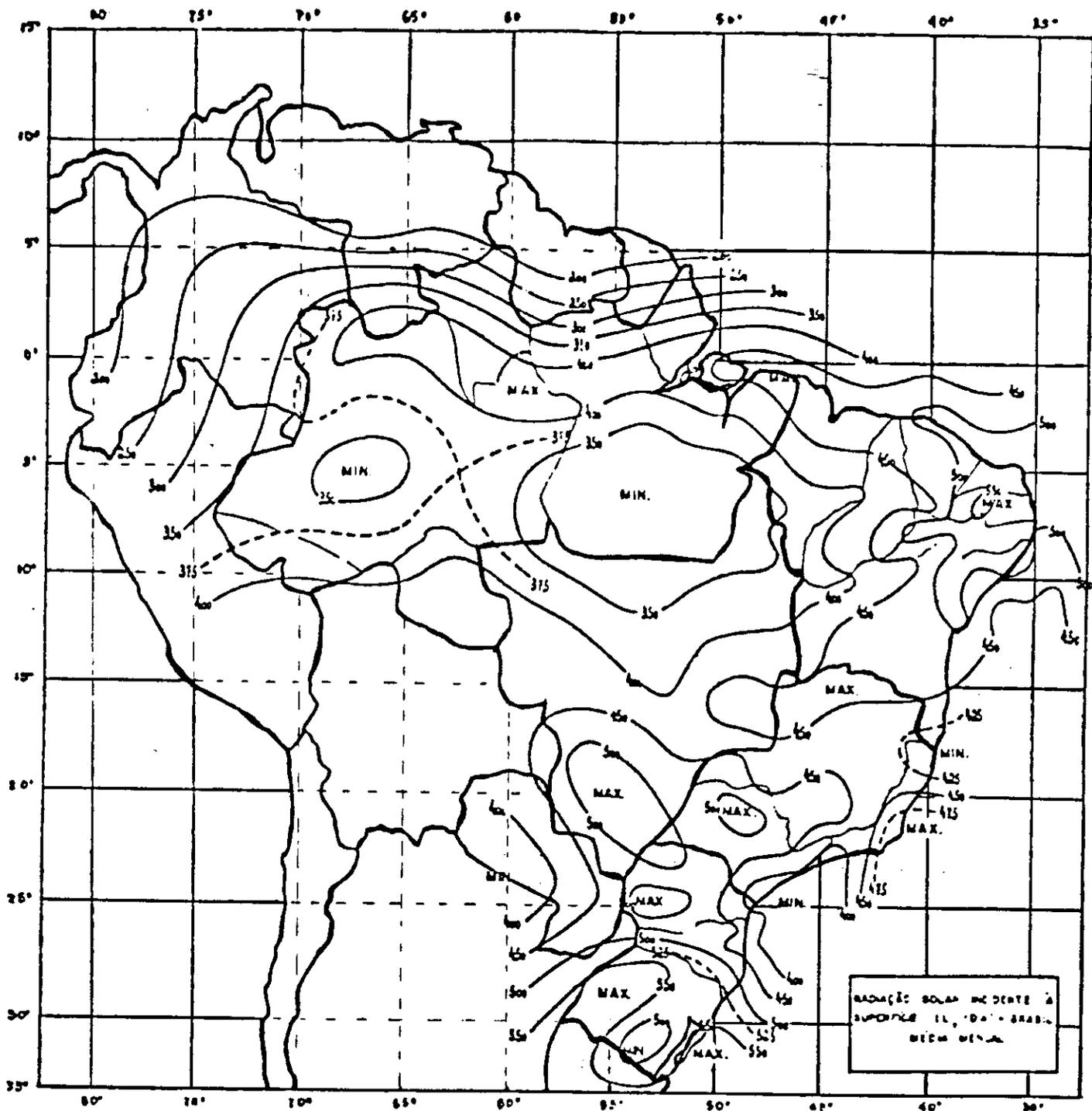
Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Setembro.



Radiação Solar incidente à Superfície (l./dia) - Brasil.
Média Mensal - Outubro.



Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Novembro.



Radiação Solar incidente à Superfície (ly/dia) - Brasil.
Média Mensal - Dezembro.

ANEXO D

MEDIA MENSAL DE HORAS DE SOL EM FUNÇÃO DA LATITUDE, NO TOPO DA ATMOSFERA (21)
(dados em horas e minutos)

LAT (°)	JAN	FEV	MAR	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
-35	14:16	13:22	12:21	11:14	10:18	09:49	10:02	10:49	11:52	12:58	13:57	14:30
-30	13:52	13:08	12:18	11:26	10:36	10:14	10:24	11:02	11:54	12:48	13:37	14:04
-25	13:32	12:56	12:15	11:35	10:54	10:36	10:44	11:14	11:56	12:41	13:19	13:41
-20	13:12	12:45	12:13	11:39	11:10	10:56	11:02	11:25	11:59	12:33	13:03	13:20
-15	12:56	12:35	12:11	11:46	11:25	11:14	11:19	11:37	12:01	12:26	12:49	13:00
-10	12:38	12:25	12:09	11:52	11:40	11:32	11:36	11:47	12:03	12:19	12:34	12:42
-05	12:23	12:16	12:09	12:01	11:54	11:50	11:52	11:57	12:05	12:13	12:21	12:24
0	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07	12:07
+05	11:52	11:58	12:05	12:14	12:21	12:24	12:23	12:17	12:10	12:01	11:54	11:50
+10	11:36	11:49	12:04	12:21	12:34	12:42	12:39	12:27	12:10	11:54	11:40	11:33

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (01) SHIMOKAWA, R. e HAYASHI, Y., **Recent Progress in Research and Development os Crystalline Silicon Cells in Japan**, T.Saitoh (Div. of Electron & Inf. Eng., Tokyo Univ. of Agric. & Technol., Japan), jan/93.
- (02) KREITH, F. e KREIDER, J. F. **Principles of Solar Engineering**, Mc Graw-Hill, 1978.
- (03) DUFFIE, J.A. e BECKMAN, W.A. **Solar Energy Thermal Processes**, Wiley-Interscience Publication, 1974.
- (04) MACEDO, I.C. e TREVISAN, O.V. **ESTUDO DA CONFIGURAÇÃO DE CAMPO DE COLETORES SOLARES PLANOS**, Convênio CESP-UNICAMP, agosto/81.
- (05) ANHALT, J., GILL, W. e VAZ, C.C. **Teste Comparativo de Quatro Sistemas de Aquecimento Solar**, Relatório do convênio INPE/CESP, nov/86.
- (06) CORBELLA, O. **A Arquitetura Bioclimática ou de Baixo Consumo Energético**, Seminário de Arquitetura Bioclimática, Conselho Estadual de Energia, São Paulo, 1983.
- (07) CHAMBOULEYRON, I. **Aspectos Básicos da Conversão Fotovoltaica da Energia Solar**, Instituto de Física/UNICAMP, 1979.
- (08) ANGRIST, S.W. **Direct Energy Conversion**, Allyn & Bacon, Inc., 1982.
- (09) WOLF, M. **Historical Developmente of Solar Cells**, 25th Power Sources Symp., maio/72.
- (10) SMITS, F.M. **History of Silicon Solar Cells**, IEEE Transactions on Electron Devices, jul/76.
- (11) MEINEL, A.B. e M.P. **Applied Solar Energy**, Addison & Wesley Publishing Company, 1976.
- (12) DHERE, N.G. **Células Solares de Filmes Finos**, Revista Brasileira de Vácuo, vol.1, nº 1, 1981.
- (13) **Eletricidade Solar**, artigo traduzido do periódico "The Economist", publicado pela Gazeta Mercantil, jun/90.
- (14) MAC DOWELL, A.M.A. **Programas do Governo Brasileiro em Energia Solar**, Seminário Alternativas de Desenvolvimento: Energia Solar, São Paulo, nov./75.

- (15) ANDRADE, A.M. Photovoltaic Energy in Brazil; Research, Development, Industrialization, 1^o Meeting Brazil-CEC on Solar Energy Technologies", Itaipava/90.
- (16) Relatório de Andamento do Projeto Centro Nacional de Radiação Solar/Rede Solarimétrica Nacional, INEMET/1986.
- (17) FRAIDENRAICH, N. et al. Solarimetria no Brasil-Situação e Propostas, GTEF, Recife, maio/93.
- (18) FRULLA, L.A. et al., Analysis of Satellite-Measured Insolation in Brazil, Solar & Wind Technology, v.7, nº5, 1990.
- (19) OMETTO, J.C. Estudo das Relações entre Radiação Global, Radiação Líquida e Insolação, Tese de Doutorado USP Piracicaba Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, 1968.
SÁ, D.F. Alguns Aspectos da Energia Solar em Mandacarú, Recife, SUDENE, 1972.
- (20) BUDIKO, M.I. Atlas of Heat Balance of the Earth, URSS-S.C.P., 1963.
- (21) NUNES, G.S.S. et al. Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil, INPE, jan/78.
- (22) BENNETT, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States, Solar Energy, 1975.
- (23) SANTOS, P.M., Levantamento Solarimétrico-Projetos de Estudos, Dimensionamento e Pré-Implantação, CESP, abril/79.
- (24) HIRSCMAN, A.O. The rise and decline of Development Economics, Essays in Trespassing, 1981.
- (25) OLIVEIRA, Adilson, Energy Technology Policy in Developing Countries, Science and Public Policy, jun/91.
- (26) ELETROBRÁS PLANO 2015, Projeto 4, Subprojeto Fontes Alternativas de Energia- Solar, Eólica, Xisto, Oceânica, Hidrogênio, Resíduos Orgânicos, Turfa e Linhito, texto preliminar, out/92.
- (27) OVERSTRAETEN, R.J., MERTENS, R.P. Physics, Technology and Uses of Photovoltaics, Adam Hilger Ltd.,Ingl., 1986.
- (28) OKUMURA, H. et al. Observation os Direct Band Gap Properties in Ge_nSi_m Strained-Layer Superlattices, Japão, J.Appl.Phys., 28, 1993.
- (29) GREEN, M.A. Silicon Solar Cells: Evolution, High-efficiency Design and Efficiency Enhancements, Semiconductors Sci. Technol., vol.8, 1993.

- (30) HAGEDORN, G. Hidden Energy in Solar Cells and Photovoltaic Power Stations, 9th E.C., set/89.
- (31) VANIN, V.R. e GRAÇA, G.M.G. Obtenção de Coeficientes de Intensidade de Energia - Brasil/1970, USP - 1982.