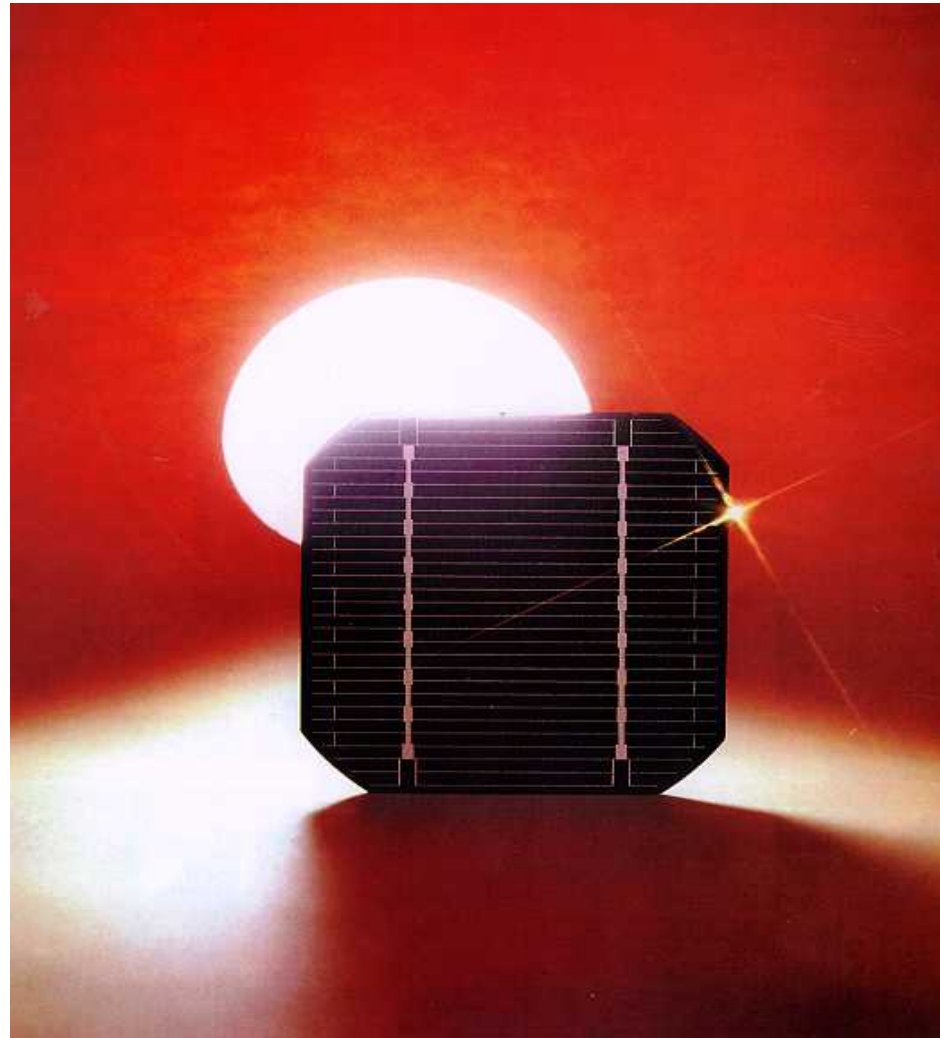


ANÁLISE PROSPECTIVA DA INTRODUÇÃO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO BRASIL

TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA



EQUIPE DE TRABALHO

NAUM FRAIDENRAICH (Coordenador)

CHIGUERU TIBA

OLGA DE CASTRO VILELA

ELIELZA MOURA DE SOUZA BARBOSA

Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia - Grupo FAE

Departamento de Energia Nuclear-DEN

Centro de Tecnologia e Geociências

UFPE

INTRODUÇÃO

1950 Inicia-se o desenvolvimento das células solares, estimulado pela necessidade de prover, às naves espaciais, com uma fonte de energia.

1970 As células solares para aplicações terrestres, superam a produção de células para uso espacial.

O progresso realizado ao longo deste período tem sido surpreendente.

- Aumento substancial da eficiência do processo de conversão de energia solar em energia elétrica
- Crescimento da produção e vendas
- Abertura de mercados no âmbito internacional
- Aumento de oportunidades para aplicação da tecnologia
- Desenvolvimento de novos materiais

INTRODUÇÃO

As primeiras décadas de existência da tecnologia fotovoltaica foram conformando padrões de comportamento, bastante familiares para as pessoas que acompanham o desenvolvimento da mesma

Entretanto, mudanças importantes estão acontecendo, tanto no âmbito dos componentes como dos sistemas. Algumas dessas mudanças serão mostradas ao longo desta palestra

Sobre a conjuntura

O momento atual apresenta condições propícias para a introdução, das novas energias renováveis, nas suas diversas formas, em especial depois da aprovação da lei 10438/2002, que estabelece a universalização dos serviços de energia elétrica.

O tempo e as circunstâncias dirão se estamos em condições de aproveitar essa conjuntura

Temas que serão apresentados

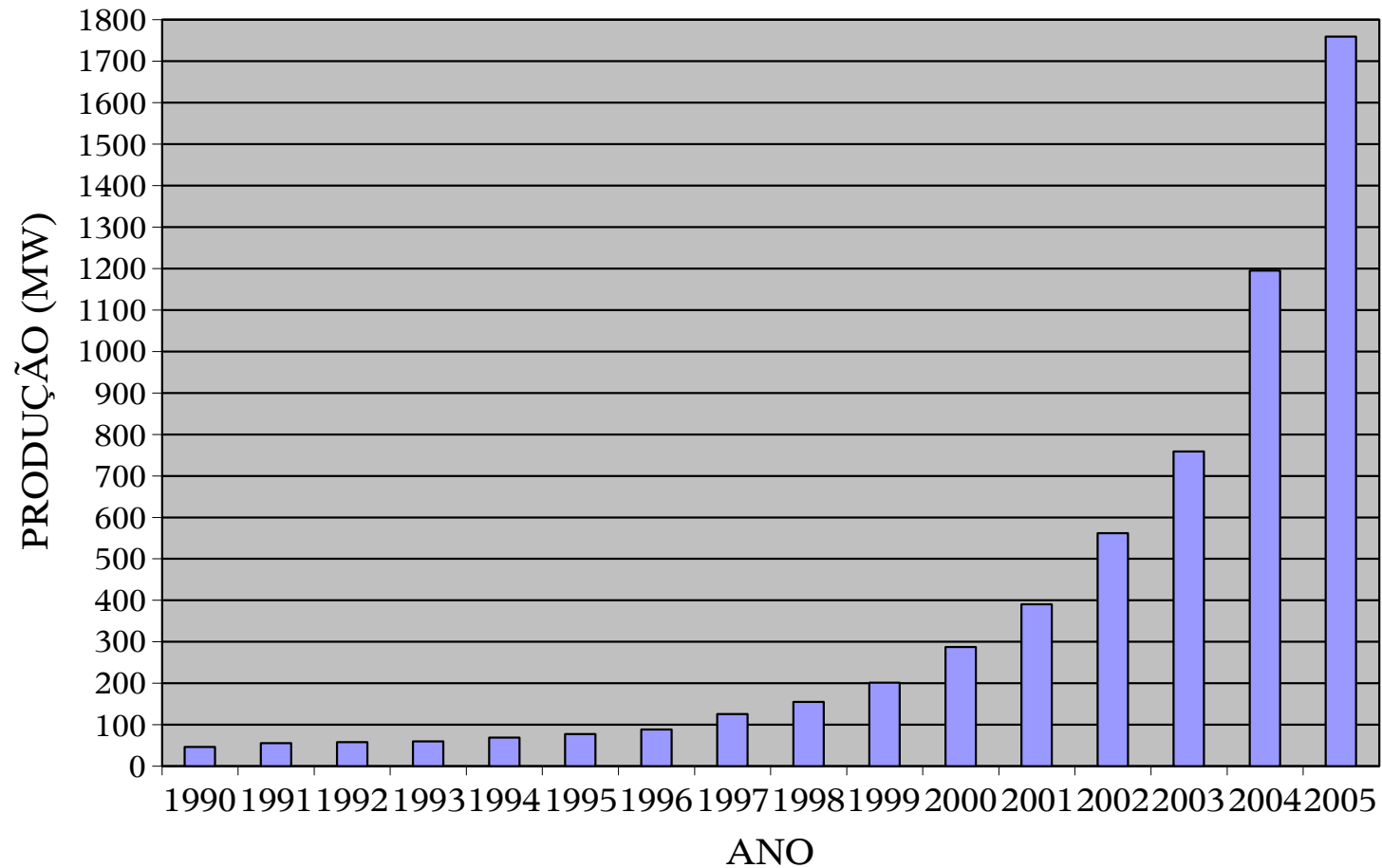
- **MERCADO INTERNACIONAL DE MÓDULOS PV**
- **MUDANÇAS NO CARÁTER DAS APLICAÇÕES**
- **ASPECTOS RELATIVOS À FORMAÇÃO DE PREÇOS PV**
- **CUSTO DA ENERGIA RESULTANTE PARA O USUÁRIO**
- **CARACTERÍSTICAS DO MERCADO BRASILEIRO**
- **PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL**

MERCADO INTERNACIONAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O crescimento do mercado de módulos fotovoltaicos nos últimos anos tem sido espetacular.

No quinquênio 2000-2005 cresceu a uma taxa igual a 40%.

PRODUÇÃO INTERNACIONAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

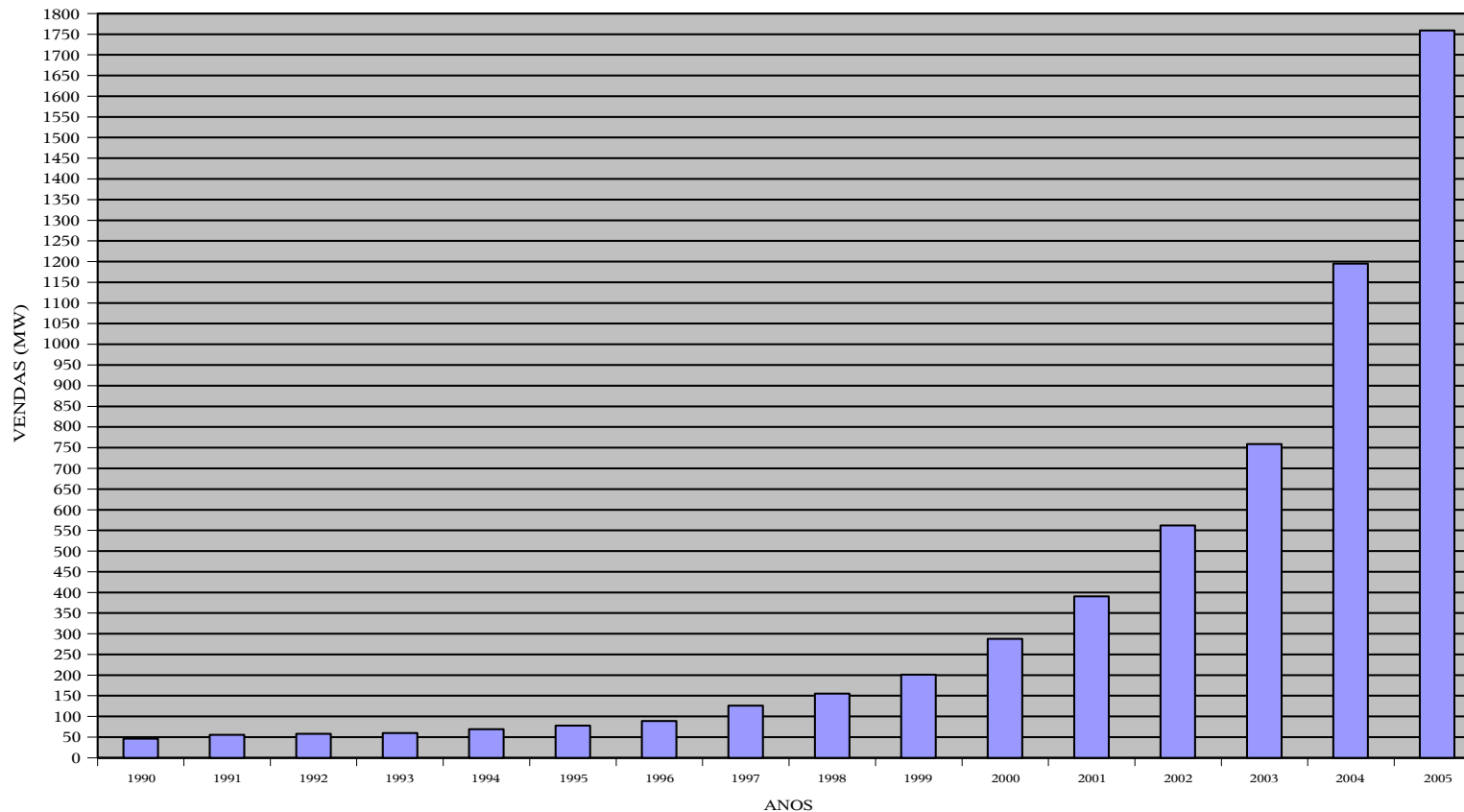


MERCADO INTERNACIONAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Vendas no ano de

2003	658	MW	
2004	980	MW	49%
2005	1.525	MW	56%

Produção acumulada (1975 - 2005)



ANOS

Principais empresas fabricantes

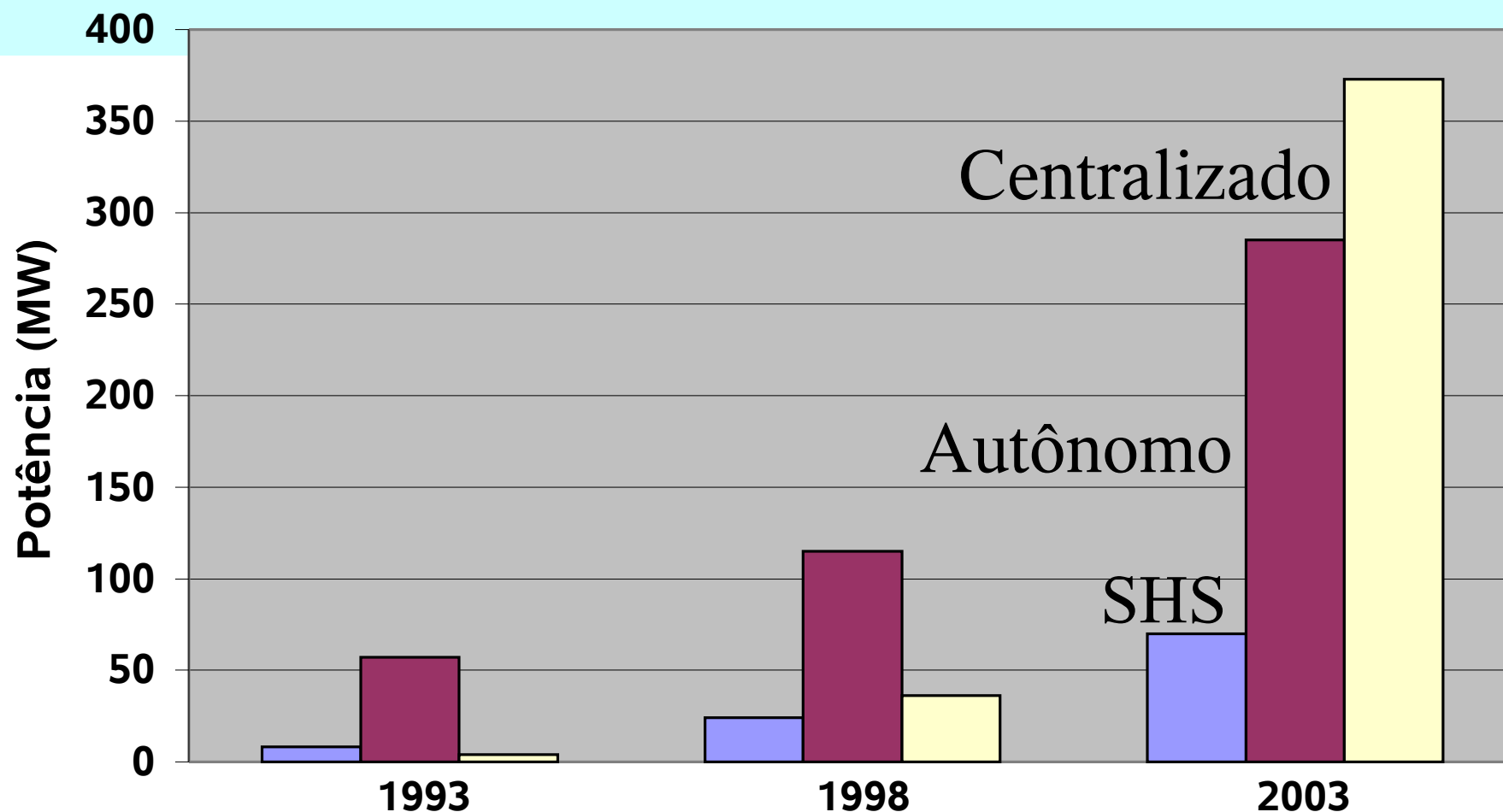
Nos anos de 2003 e 2005 a participação das empresas era a seguinte

Fabricante	Participação			
	2003		2005	
	(MW)	(%)	(MW)	(%)
Sharp	198	26,1	428	24,3
Q-Cells	28	3,7	166	9,4
Kyocera	72	9,5	142	8,1
Sanyo	35	4,6	125	7,1
Mitsubishi	40	5,3	100	5,7
Shell Solar	73	9,6	59	3,4
BP Solar	70	9,2	88	5,0
Schott Solar	42	5,5	95	5,4
Total	759	73,5	1759	68,4

Mudança na composição das aplicações

USO FINAL	Ano 1993 (MWp/ano)	Ano 2005 (MWp/ano)
Produtos de consumo	18	75
SHS (residencial) – EUA	5 (8,2%)	35 (2,3%)
SHS rural (residencial) – Mundo	8 (13,1%)	90 (5,9%)
Comunicação e sinalização	16 (26,2%)	95 (6,2%)
Sistema FV/Diesel, comercial	10	70
Residência conectada a rede	2 (6,5%)	1100 (72,1%)
Central FV maior 100 kW (AC)	2	60
Total (MWp/ano)	61	1525

Mudança na composição das aplicações - Sistemas centralizados vs sistemas isolados



Nos anos 1993, 1998 e 2003, a relação SHS/centralizado foram iguais a 2,0; 0,63 e 0,19

Deslocamento geográfico do mercado mundial

REGIÃO	Ano 1995 (%)	Ano 2000 (%)	
EUA	18	16	
Europa	21	25	
América Latina	8	46	27
África e Oriente médio	13		
Ilhas do Pacífico (inclusive Austrália)	25		
Leste da Ásia (inclusive Japão)	15	32	
Total	100	201	

Modificações observadas

- **Mudança na composição das aplicações**
- **Deslocamento geográfico do mercado mundial**

Tecnologia dos módulos fabricados em 1997 e 2006

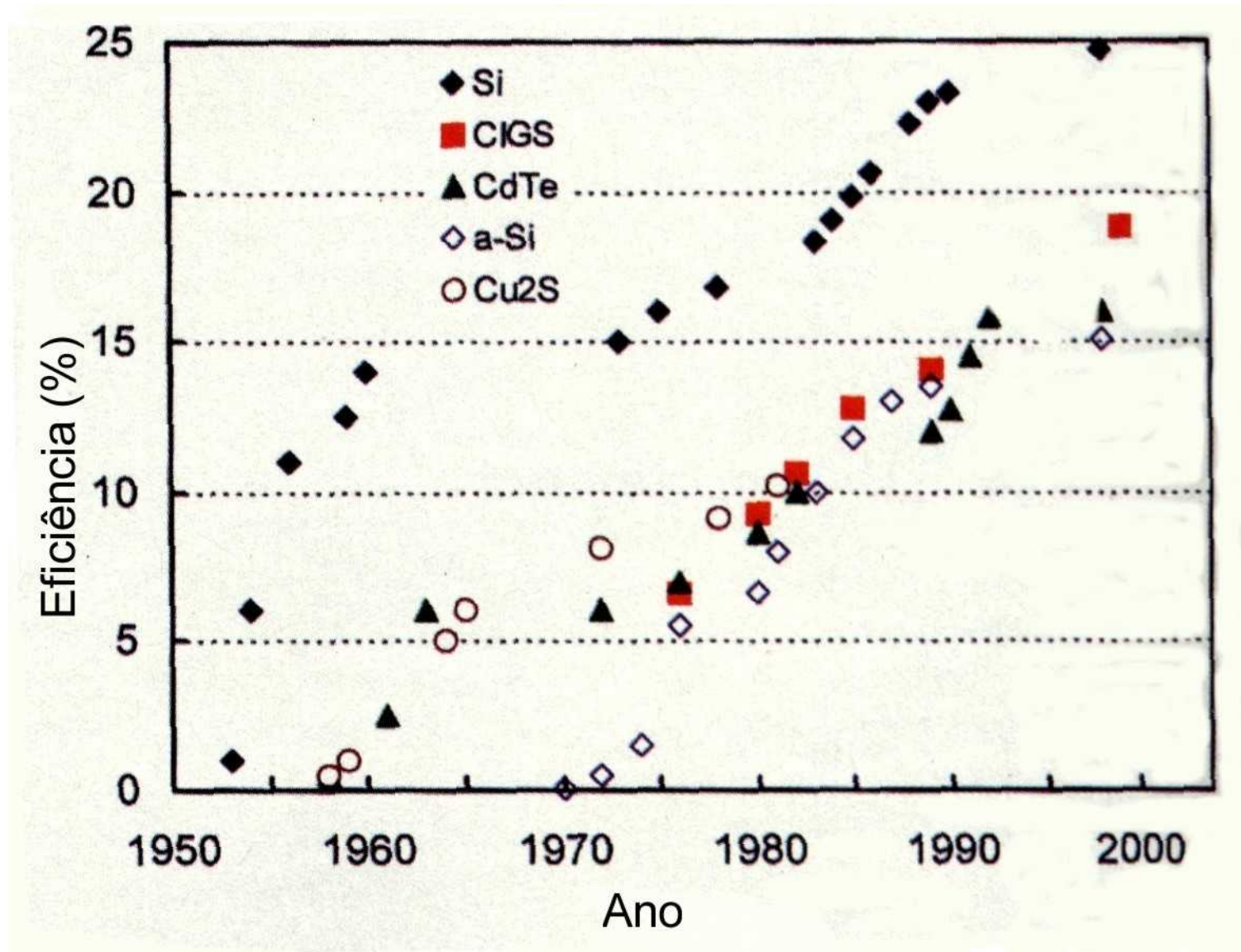
TECNOLOGIA	Ano			
	1997		2006	
	Potência (MWp)	(%)	Potência (MWp)	(%)
Silício cristalino (c-Si)	62,8	49,6	486,4	27,6
Silício policristalino (p-Si)	43,0	33,9	991,0	56,3
Silício amorfo (a-Si)	15,0	11,8	71,3	4,1
Fitas de silício	4,0	3,2	53,0	3,0
Silício sobre substrato de baixo custo	0,5	0,4	-	-
Concentradores (células de silício)	0,2	0,2	-	-
a-Si/lâminas de SiC			122,0	6,9
Telureto de cádmio e CIS	1,2	0,9	37,0	2,1
Total	126,7	100	1760,7	100,0

Tecnologia dos módulos comercializados em 1997 e 2006 (abril)

O silício mono e policristalino integravam, em 1997 e em 2006, 83,5% da produção total de módulos.

O silício, em todas suas formas, integrava em ambos anos, 99% da produção de células no mundo.

Evolução da eficiência de células de laboratório



Evolução da eficiência de células de laboratório

Material	Ano 1976 (%)	Ano 1997 (%)
Silício monocristalino	15	25
Silício amorfo	5	15
Telureto de cádmio	7	15
Sulfeto de cádmio/sulfeto de cobre	8	10 (1981)
Disseleneto de cobre índio	7	18

Deve-se destacar aqui o ingresso comercial de células

Multijunção a partir da metade da década do 90

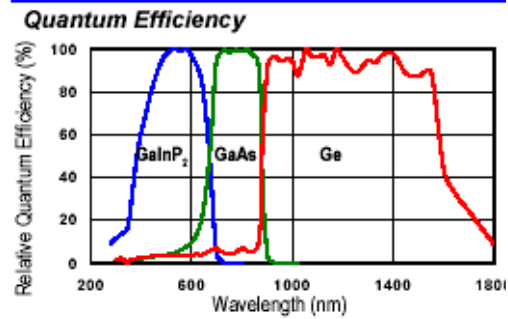
Eficiência de módulos (2004)

Material	Ano 2004 (%)
Silício monocristalino	13-17
Silício multicristalino	11-14
Silício amorfo	7
Disseleneto de cobre índio - CIS (CuInSe₂)	7
Telureto de cádmio (CdTe)	7

Avanços na tecnologia de células e sistemas

Na última década avanços significativos foram logrados com estruturas conhecidas como células tandem. O espectro solar abarca a região compreendida entre 0,2 e 4,0 micra. Não obstante o silício, por exemplo, tem condições de experimentar efeito fotovoltaico na região compreendida entre 0,45 e 0,90 micra. Para 56% da energia a célula é transparente.

Célula multijunção



Três materiais cobrem boa parte do espectro solar, entre 0,3 e 1,60 micra

Eficiência das células multijunção

Material	Tipo	Eficiência (%)	Ano
GaAs/Ge	Junção simples	24	1995
GaInP/GaAs/Ge	Junção dupla	27	1997
GaInP/GaAs/Ge/Ge	Junção tripla	34,2	2001
GaInP/GaAs/Ge/Ge	Junção tripla	37,3	2004
GaInP/GaAs/Ge/Ge	Junção tripla	40	2006

Primeiro sistema com células multijunção interligado na rede



Instalado na cidade de Tempe, Arizona, pela empresa Spectrolab em conjunto com a prefeitura da cidade.

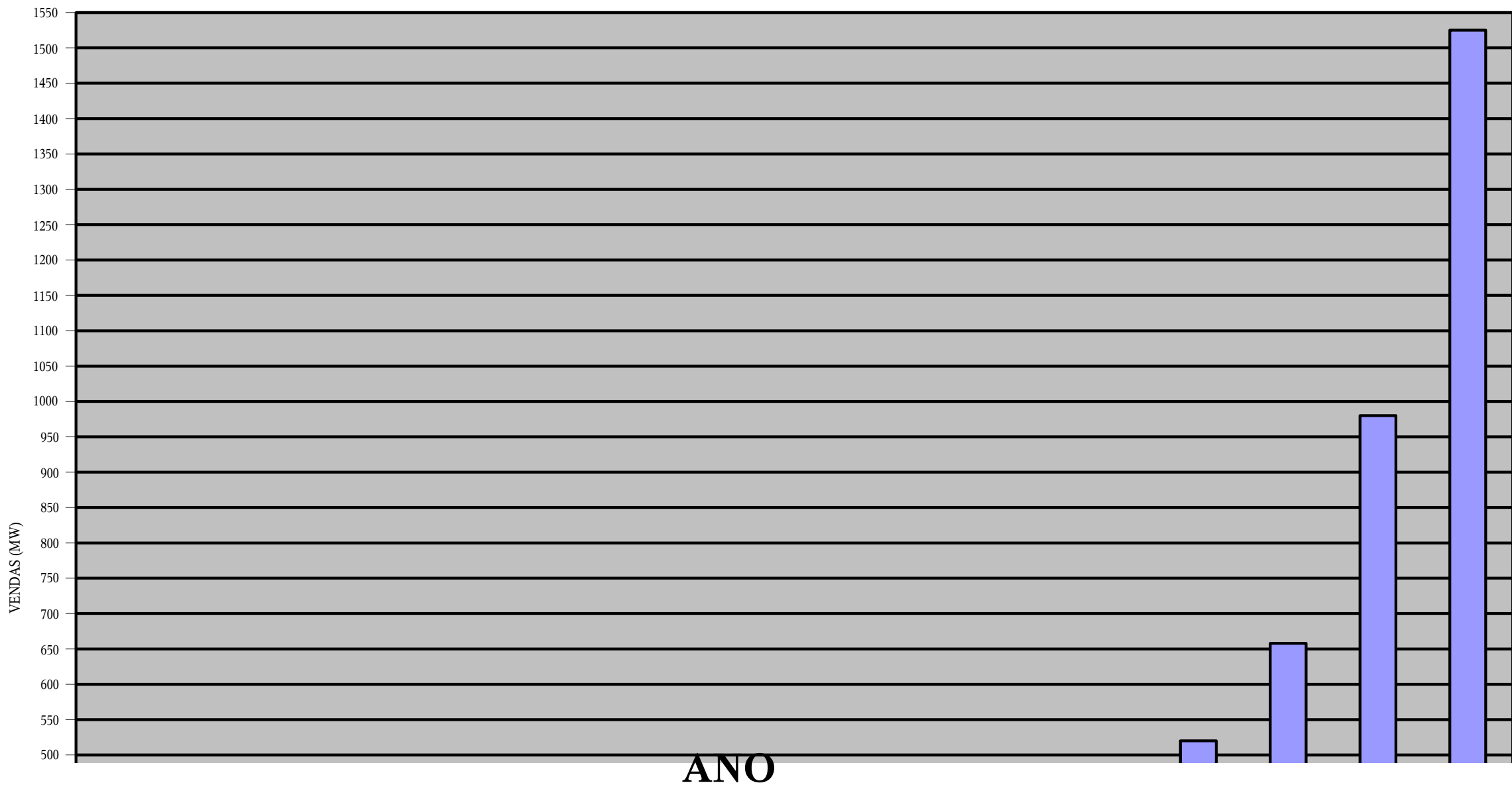
Concentradores tipo Fresnel $C=500 \times$

Preços de módulos fotovoltaicos

Desde 1998 até 2003 os preços do Watt pico dos módulos diminuíram de 4 para valores entre 3 e 3,50 dólares, com um valor médio, no período, de 3,5 dólares

Na última década observa-se uma lenta, mas sustentada, redução de preços, com uma taxa da ordem de 1,3 a 2% ao ano

Preços de módulos mono e policristalinos comprados em grandes quantidades

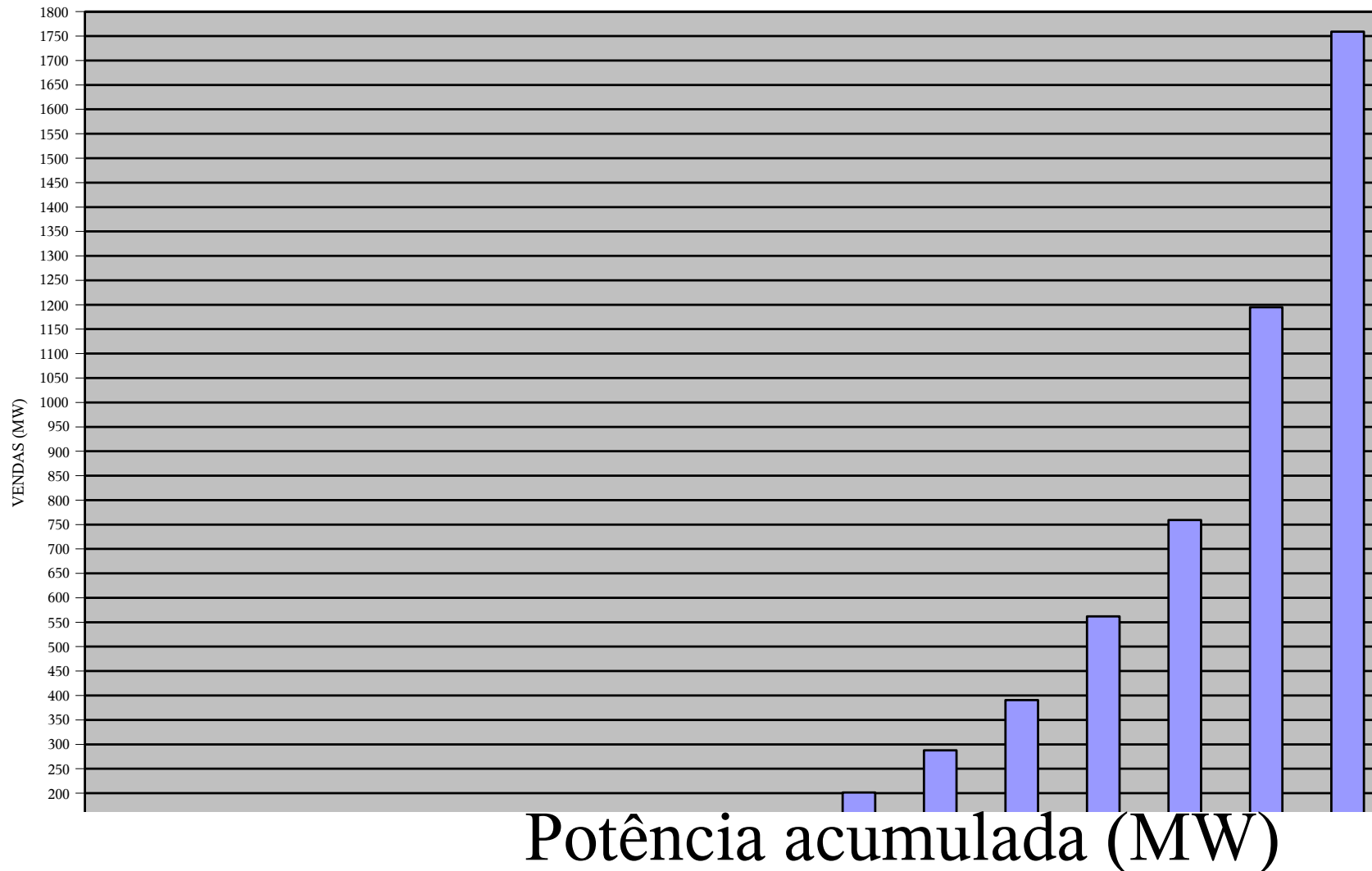


Previsão de custos de módulos fotovoltaicos

Uma forma que tende a levar em consideração a história dos preços dos módulos fotovoltaicos é sua representação em função da produção acumulada.

A relação preço - produção tende a ser mais equilibrada.

Tendência do preço dos módulos versus potência acumulada



A curva de tendência prevê um preço de 2,0 US/Wp para o ano 2010. Crescimento anual da produção de módulos de 30%

Previsão de preços de módulos fotovoltaicos*

Material	Preços em 1997	Custo e preço para o ano 2000	Custo e preço para o ano 2010
Silício mono poli e fitas de silício	3,90-4,25	1,50/2,00	1,20/2,00
Silício amorfo	2,50-4,50	1,20/2,00	0,50/1,33
Concentrador e acessórios	6,00	1,50/2,50	0,50/1,33

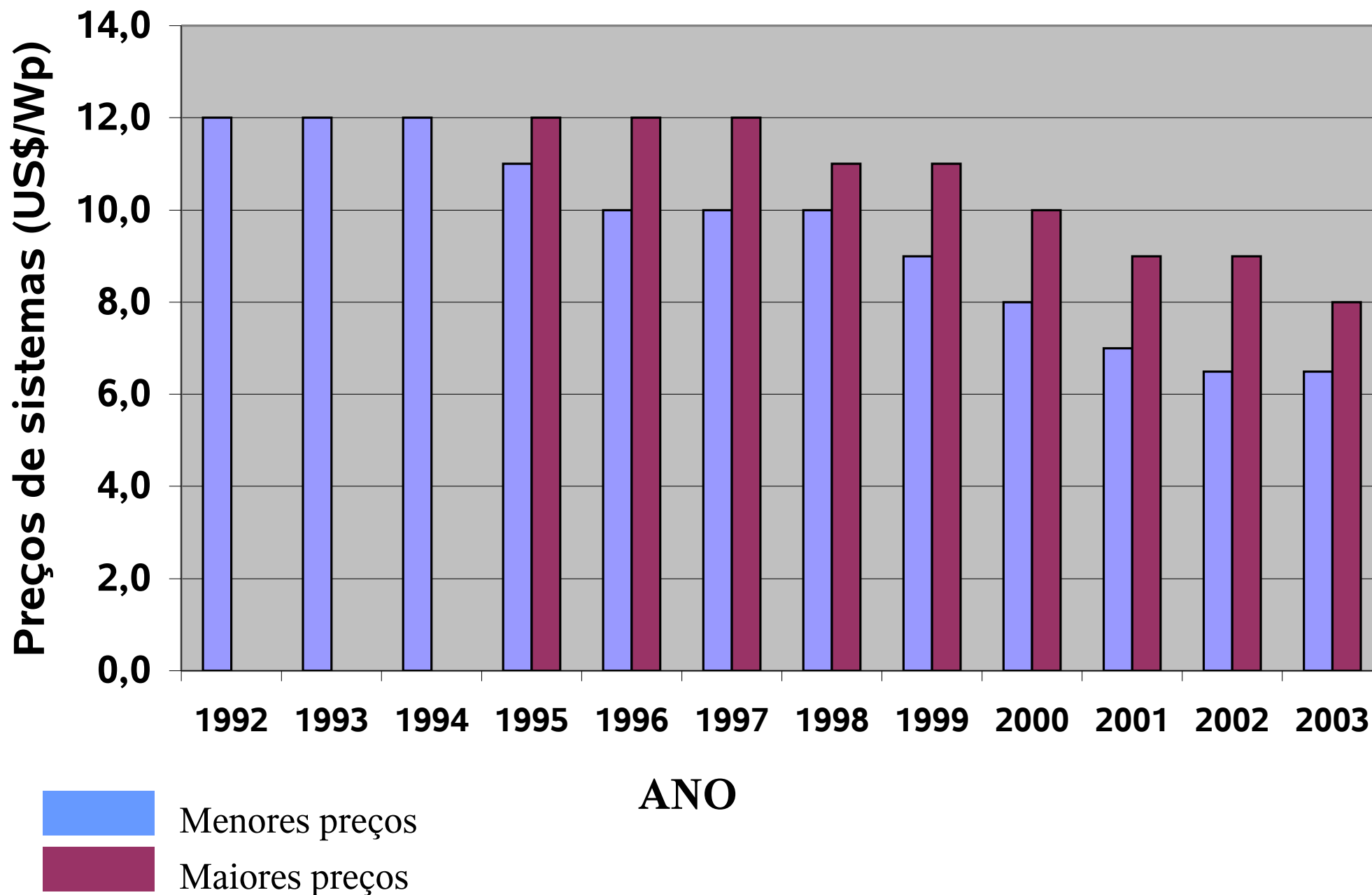
*Maycock 1999

Com bastante frequência, as previsões não se verificam na prática. Por diversos motivos a redução de preços tem sido muito lenta com períodos de aumento inclusive

Preços de sistemas conectados à rede

Os preços dos sistemas interligados à rede diminuíram de 12 dólares por Wp, em 1992 para 6,50 a 8 dólares por Wp em 2003, como resultado da redução do preço dos módulos e da mão de obra, esta última devido ao aumento gigantesco do número de instalações.

Preços de sistemas conectados à rede



Processo de formação de preços dos módulos

- **Disponibilidade de Silício grau eletrônico**
- **Conteúdo energético do processo de fabricação de células**
- **Conteúdo energético de módulos e componentes do sistema**
- **Eficiência de células e módulos**

Demanda de Silício grau eletrônico

Anos	Produção de Si-Ge (tn)	Demanda da industria PV (tn)
1990	7.600	690
2001		8.000
2005	31.600	15.000
2010	75.000	30.000

Taxa de crescimento anual da demanda de Si-Ge

Para a industria eletrônica 9 %

Para a industria fotovoltaica 18 %

Rendimento na produção e custo do SiGe

Rendimento material
na produção de SiGe,
(partindo do quartzito a 90%) 7 %

Custo do Si Gm 2 US\$/kg

Custo do Si Ge (0,2 ppma) 35- 50 US\$/kg (2005)

ppma partes por milhão de átomos

Uso do SiGe

A pesar de que as células precisam de uma certa espessura para absorver a radiação, poderia ser reduzida bastante se não fosse pelas limitações do corte mecânico ao qual os lingotes de SiC estão submetidos.

Um valor típico da espessura das laminas, em 2005, era 240 microns e espera-se, em 2010, poder obter laminas com espessuras de 100 a 130 microns. Aumentando a eficiência pode se reduzir bastante (até 7,5 g/Wp) o número de gramas por

Insumo energético primário no processo de fabricação de módulos e tempo de retorno

	Si-Cz	Si-multicristalino
	400 mícrons	400 mícrons
Módulos (kWh/m ²)	2500	2000
Sistema (kWh/ m ²)	2925	2420
Tempo de retorno (anos)	5,3	4,9

Eficiência de conversão de energia térmica - elétrica (33%)

Eficiência média de módulo Si-CZ (10%) e multicristalino (9%)

Tempo de retorno para sistemas interligados na rede e sistemas residenciais (SHS)

Inclui: módulos (salvo alumínio), estrutura dos módulos (alumínio), elementos de suporte e baterias

Ano de referencia 1997	Radiação solar (kWh/m ² /ano)	Tempo de retorno (anos)
Sistemas residenciais	1700	8 a 11
Sistemas interligados à rede	1700	3,5 a 8

A diferença entre sistemas residenciais e interligados deve-se, essencialmente, às baterias

Eficiência de conversão de células e módulos

Material	Eficiência de laboratório (%)	Eficiência de células manufaturadas (%)
Silício monocristalino	25	13-17
Silício multicristalino	21	11-14
Silício amorfo	15	7
Disseleneto de cobre índio - CIS	18	7
Telureto de cádmio (CdTe)	16	7

A tecnologia de laboratório não pode ser totalmente transferida aos processos industriais

Os fatores mencionados

- Custo do SiGe
- Insumo energético no processo de fabricação dos módulos ou, o que é equivalente, tempo de retorno energético
- Insumo energético dos acessórios
- Custo energético das baterias, relativamente independente da tecnologia fotovoltaica
- Eficiência de módulos e sistemas

Estabelecem severas condições sobre o processo de formação de preços

Custo da energia de sistemas interligados à rede para o usuário

Custo de instalação **7 US\$/W_p AC**

Horas de sol: **Recife 1930 horas e Porto Alegre 1560 horas**

Com as seguintes hipóteses **alternativas ou combinadas**

- Fator de recuperação de capital **0,10** ($r = 8\%$ e 20 anos)
ou **0,05** (tempo de retorno simples, $r = 0\%$ e 20 anos)
- Desconto inicial de **3 US\$/W**
- Retorno simples e **15%** reembolso do imposto de renda

O custo da eletricidade varia entre **0,45 e 0,18 US\$/kWh**

Linhas de atuação

- *Estudo do mercado atual e futuro (10 anos)*
- *Formação de recursos humanos*
- *Pesquisa e desenvolvimento*
- *Projetos de demonstração*
- *Recuperação da indústria nacional*
- *Estabelecimento de indústrias regionais de fabricação de módulos e componentes*

Projetos de demonstração

Sistemas integrados á rede

Sistemas com concentração

Sistemas híbridos solar-eólico e

Centrais fotovoltaicas

São projetos acessíveis e em algumas modalidades já existem no Brasil. É necessário, entretanto, uma programação que permita dar continuidade a esses projetos.

CONCLUSÕES

- Existe um crescimento muito rápido do mercado fotovoltaico, que poderá atingir, no ano de 2010 5.000 a 6000 MW/ano de potência pico de módulos produzidos.
- Verifica-se um rápido deslocamento das vendas do setor rural para o setor urbano, fato que poderá estruturar um mercado auto-suficiente, independente de subsídios governamentais.

- O silício domina amplamente o mercado de materiais utilizados na tecnologia fotovoltaica. Existem indicações claras de que o modelo de suprimento atual de Si-Ge está se esgotando, tornando urgente a pesquisa para obtenção de silício grau solar (Si-GSo)
- Isto último pode ter conseqüências altamente favoráveis no processo de formação do preço dos módulos fotovoltaicos, já que rotas mais diretas para a obtenção do silício, eventualmente (Si-GSo), requererão menos energia durante o processo de purificação, reduzindo o tempo de retorno energético.

- Existe uma forte correlação entre custos de fabricação da célula solar e do módulo fotovoltaico e insumo energético. Reduzir portanto a quantidade de energia implica reduzir custos.
- A eficiência das células solares tem grande importância, tanto no custo dos módulos como dos sistemas. Existe um esforço permanente para elevar essa eficiência, compatível com as restrições teóricas existentes.

- O tempo de retorno energético resulta ser mais favorável para sistemas interligados na rede que para sistemas de eletrificação rural, devido, neste último caso, à presença de baterias, equipamento cuja fabricação apresenta um elevado insumo energético.

- Os custos da energia fotovoltaica são, de maneira geral, da ordem de 3 a 4 vezes os custos da energia convencional. Esta relação pode se modificar favoravelmente à tecnologia fotovoltaica, na dependência do local de instalação e da maior ou menor dificuldade de acesso à combustíveis convencionais
- É necessário dimensionar e prever o destino dos resíduos sólidos gerados no fim da vida útil dos sistemas PV. Tais resíduos estarão contaminados por metais pesados (provenientes do estanho das conexões, nos módulos de Si, e do Cd, In, As e Se para outras tecnologias de filmes finos), materiais que em muitos países são considerados perigosos e necessitam de uma destinação especial

- Boa parte dos equipamentos destinados a sistemas PV é importada, ainda no caso em que podem ser, ou são, fabricados no Brasil.
- A quantidade acumulada de sistemas PV implantados ou em implantação pelo programa PRODEEM, no período 1996-2002 (da ordem de 5 MW), justifica a instalação de fábricas em regiões onde estão sendo instalados um número elevado de sistemas fotovoltaicos

- As perspectivas de aumento substancial na utilização de tecnologia fotovoltaica no âmbito nacional, sobretudo depois da aprovação da lei 10438/2002, que estabelece a universalização dos serviços de energia elétrica, sugere a necessidade e urgência de estabelecer uma estratégia e um programa nacional de desenvolvimento dessa tecnologia.

- Esboçamos neste trabalho algumas idéias que podem servir como subsídios para a elaboração desse plano.

MUCHAS GRACIAS