



Eletrobras
Cepel



ELETRICIDADE SOLAR WORKSHOP SOBRE USINAS SOLAR TERMELÉTRICAS

VISÃO DO CEPEL

JUN 2010

Apresentador: Leonardo Vieira

Área: Departamento de Tecnologias Especiais

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Comentários do documento *CSP Technology Roadmap, 2010, IEA*

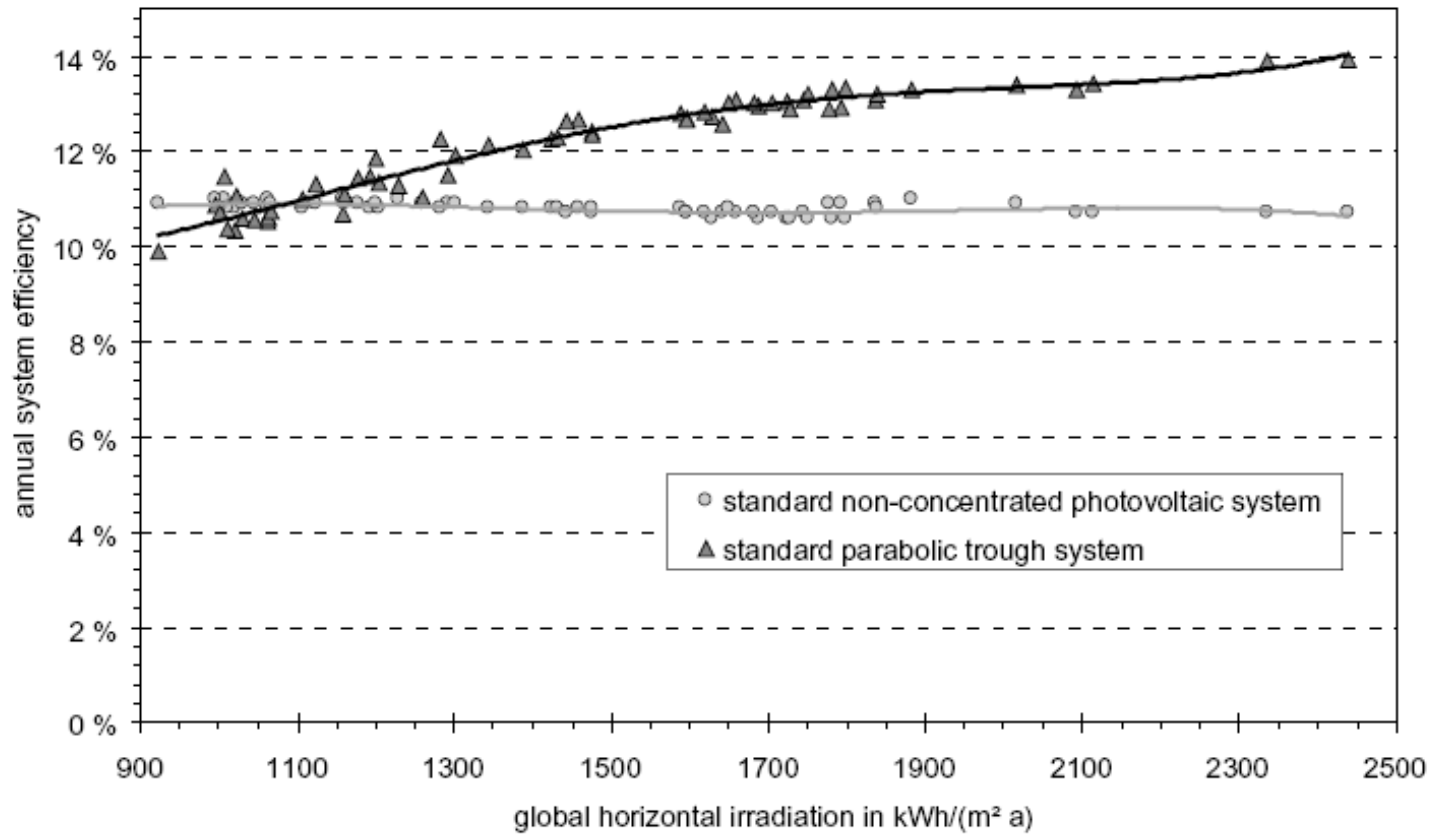
- A tecnologia CSP é uma alternativa de uma fonte de energia renovável em países e regiões com forte irradiação direta normal (sol forte e céu claro).
- Com suporte apropriado, a tecnologia CSP é capaz de fornecer até 2050, 11,3 % da energia elétrica global, sendo 9,6% proveniente diretamente do recurso solar e 1,7% de combustíveis de “back-up” (fóssil ou biomassa).
- Nos países com maior incidência solar a tecnologia CSP pode vir a se tornar competitiva para o suprimento de cargas de pico em 2020 e na base entre 2025 e 2030.
- Uma característica das plantas CSP é a possibilidade de integração com sistemas térmicos de armazenamento (fornecimento de uma energia firme e operação flexível). Facilita, ainda, o gerenciamento da energia proveniente de outras fontes renováveis (por exemplo, fotovoltaico e eólica)

Comentários do documento *CSP Technology Roadmap, 2010, IEA*

- Em função de seu grande potencial para a energia solar, a região nordeste da África pode vir a se tornar um grande exportador de energia, particularmente para a Europa, compensando, assim o custo adicional de longas linhas de transmissão.
- CSP produz ainda quantidade significativa de energia a alta temperatura que pode ser aproveitada em processos industriais e dessalinização de água.
- Em locais áridos ou semi-áridos, usualmente mais adequados para CSP, pode-se empregar os sistemas de resfriamento do tipo híbrido ou seco.
- A maior limitação para a expansão de plantas CSP não é a disponibilidade de áreas, mas a grande distância destas áreas em relação ao consumidor final.

A opção por CSP

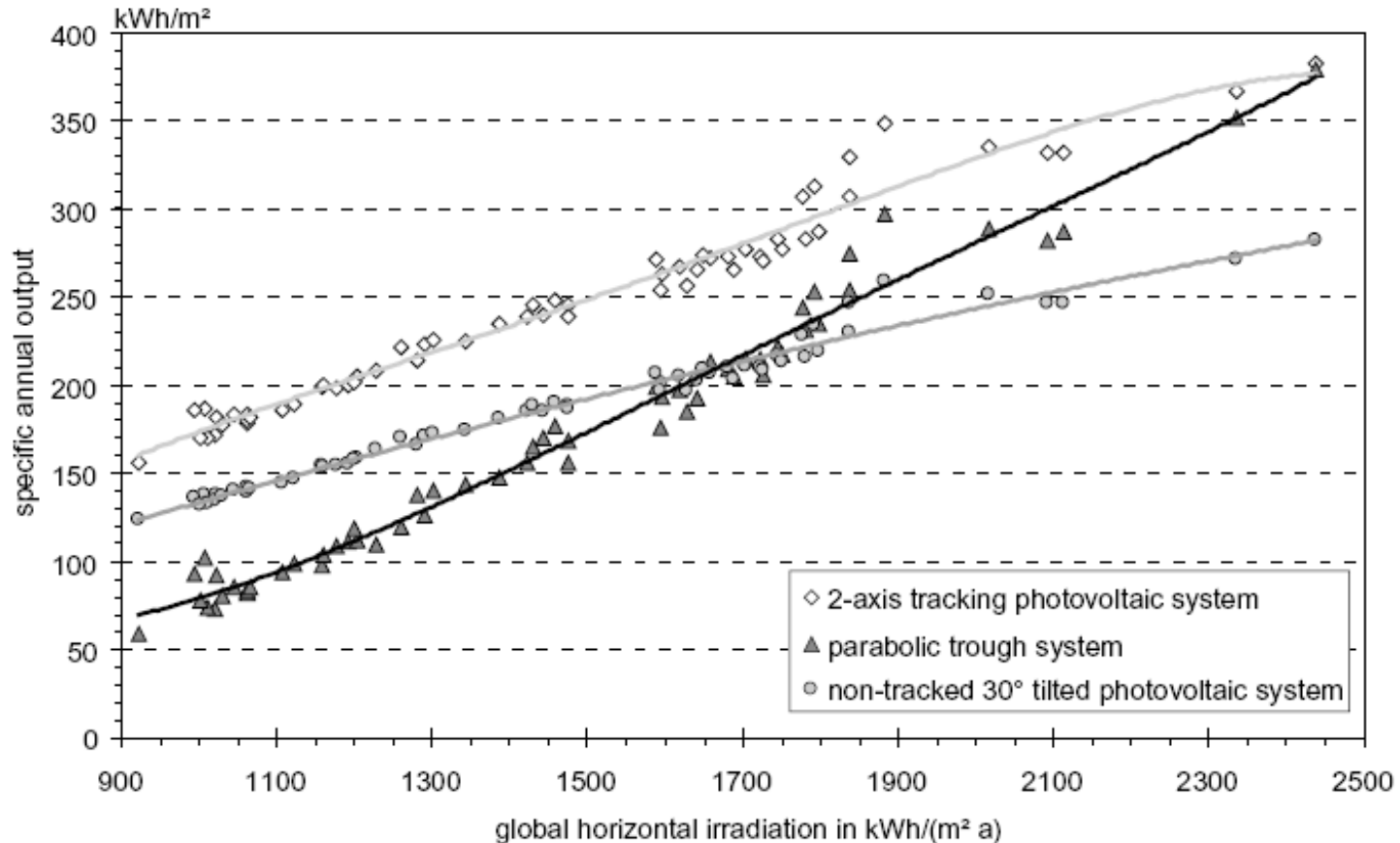
- CSP x PV



Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation, Solar Energy, 77 (2004) 171–178, Volker Quaschnig

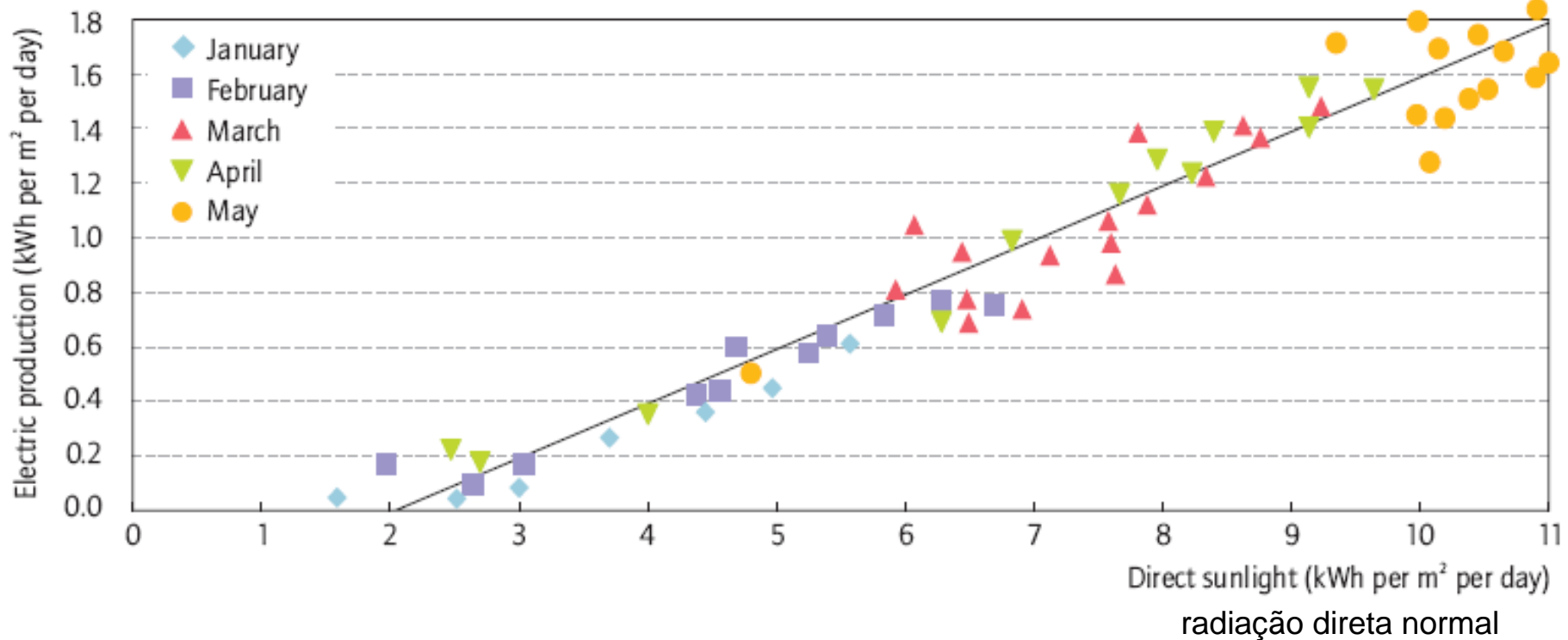
A opção por CSP

• CSP x PV



Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation, Solar Energy, 77 (2004) 171–178, Volker Quaschnig

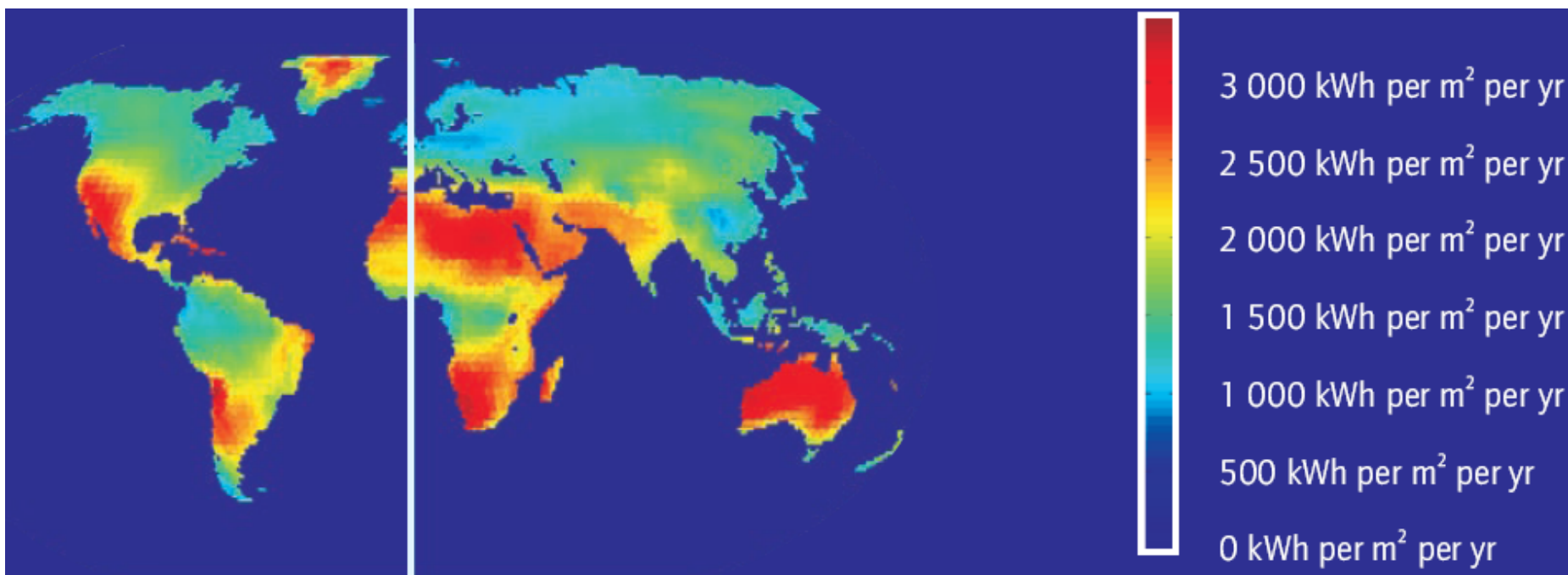
- Outros aspectos técnicos



Energia gerada de CSP fortemente dependente da irradiação direta normal

O recurso solar no mundo

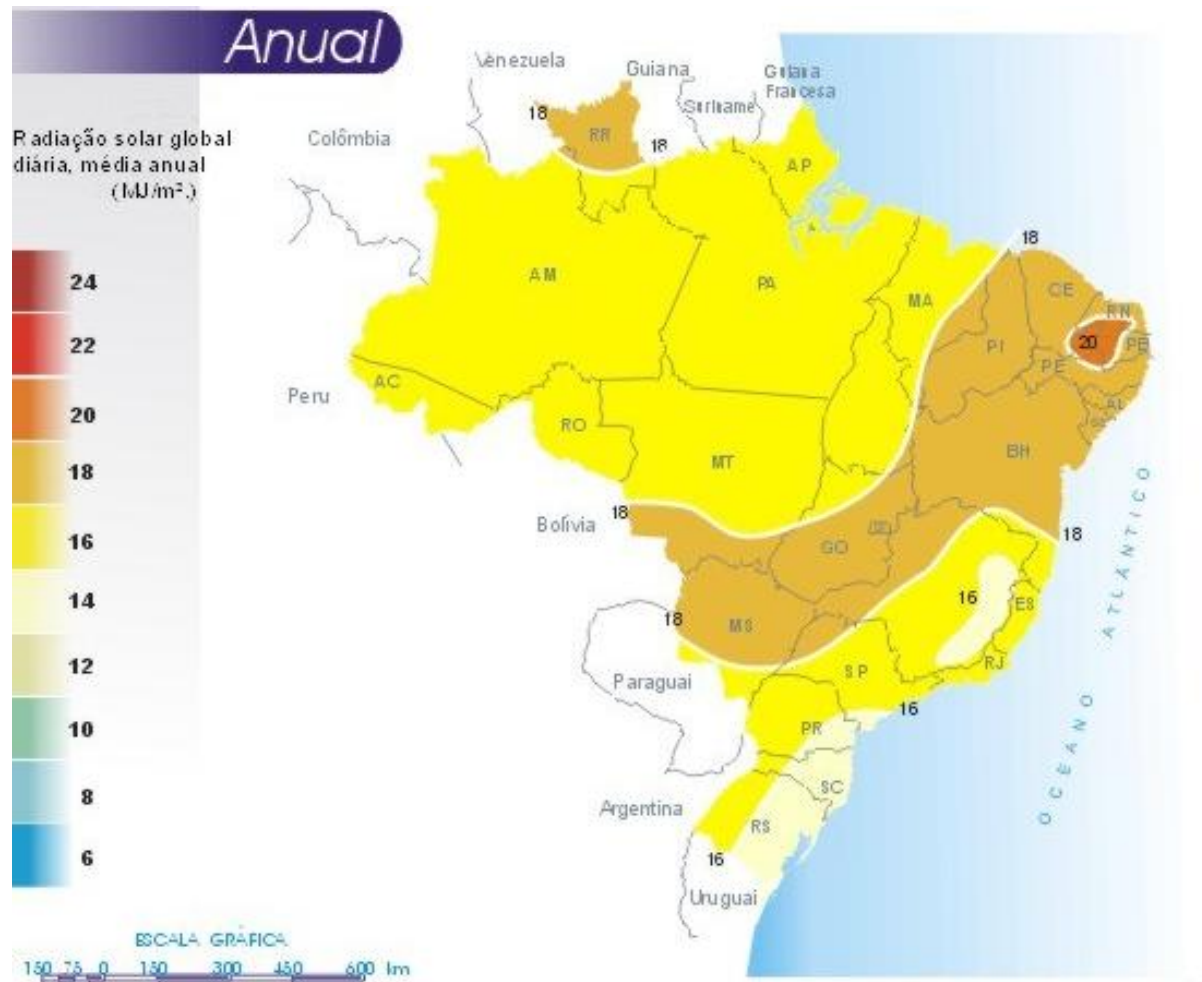
- **Radiação direta normal**



Embora não seja igual a dos melhores lugares no mundo, o Brasil possui regiões com irradiação direta normal próxima a 2000 kWh/m² por ano

O recurso solar no Brasil

mapas solarimétricos existentes



Radiação global (MJ/m².dia)

Interpolação utilizando dados medidos da radiação global em diversas estações meteorológicas do país.

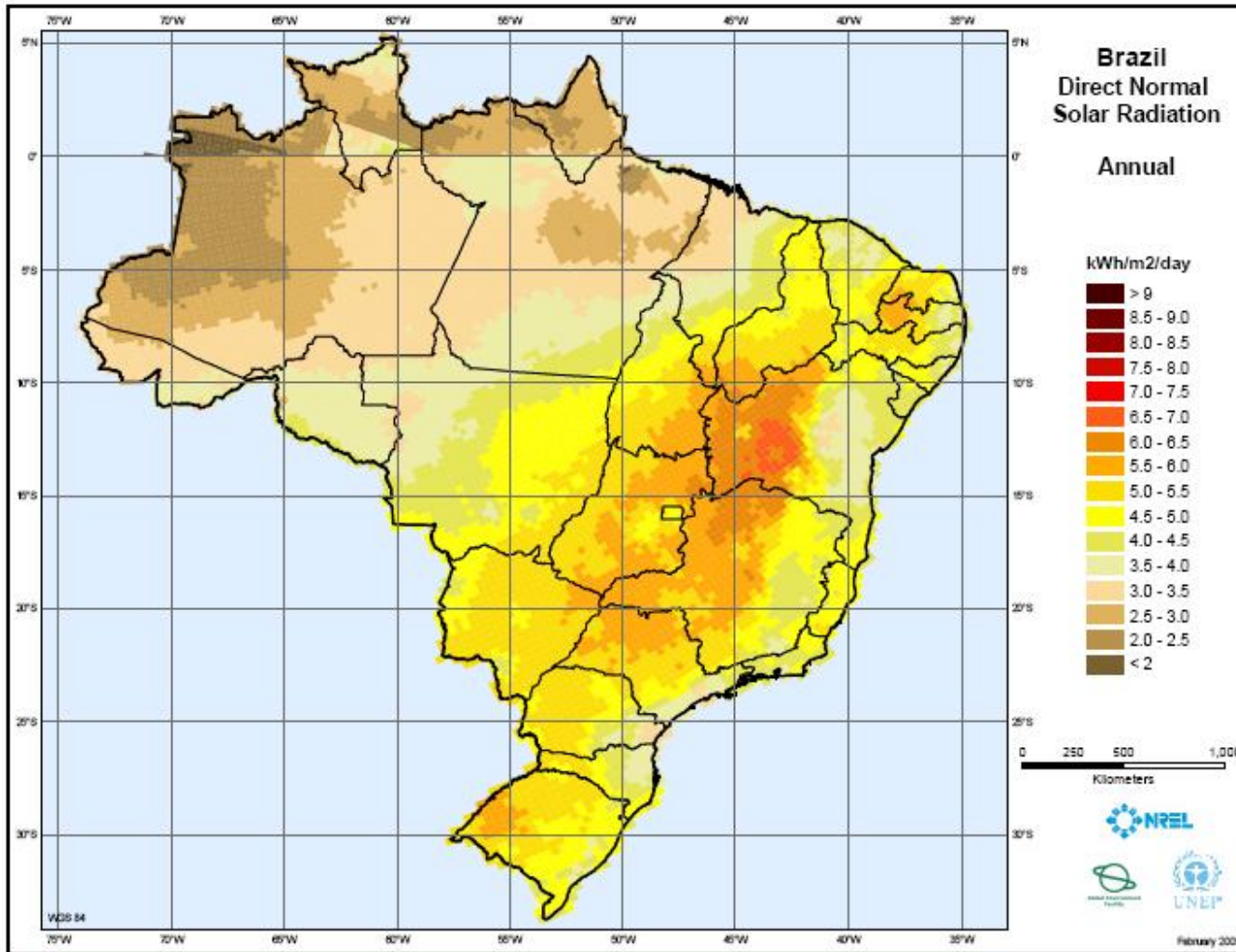
Instrumentos de medição: actinógrafos (maior parte) e piranômetros

Período de medição: 1960 a 1990

Atlas Solarimétrico do Brasil – UFPE/CHESF – 2000

O recurso solar no Brasil

mapas solarimétricos existentes



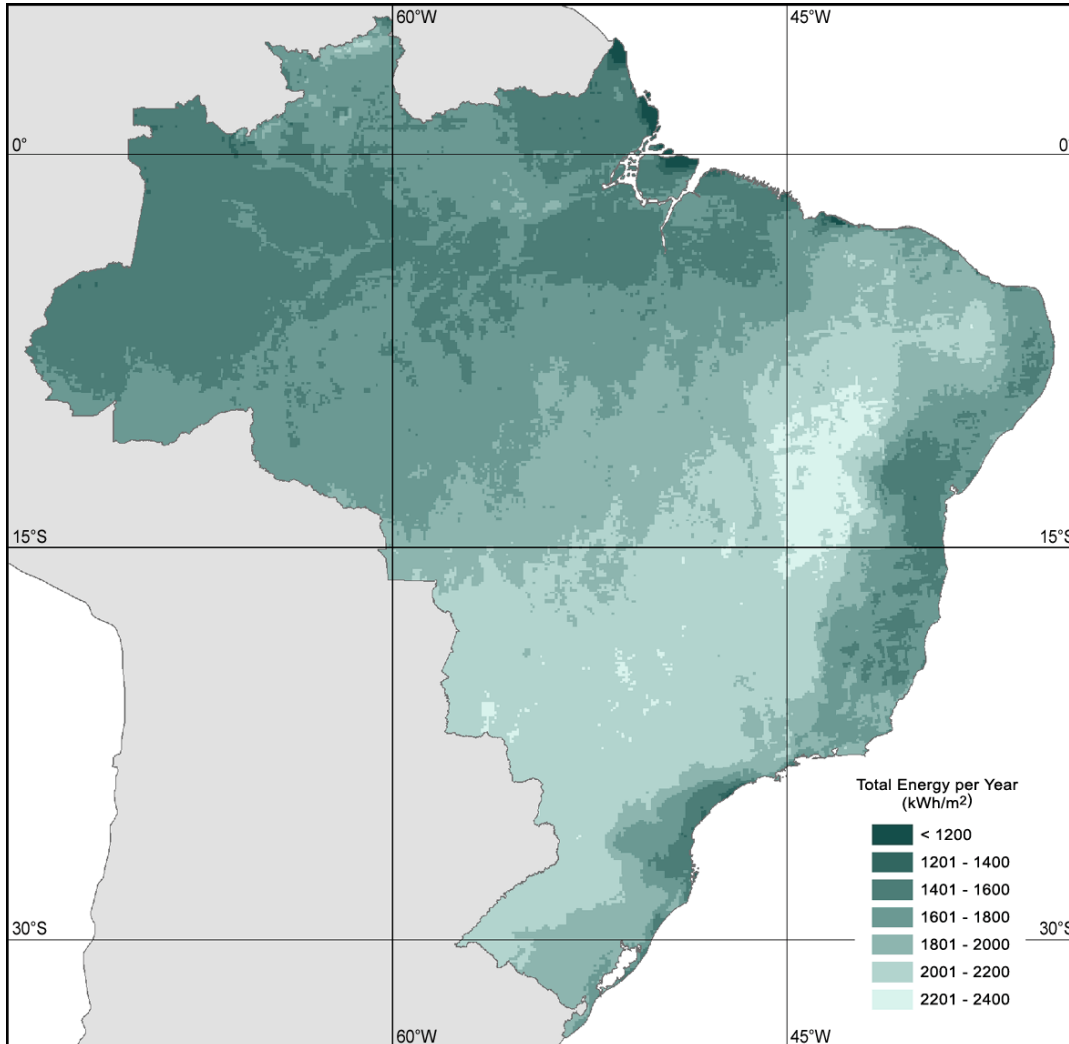
**Radiação
direta normal
(kWh/m².dia)**

**Estimativa da radiação
direta normal a partir
de modelo físico com
dados medidos de
satélite.**

**Período de medição:
1985 a 1991**

O recurso solar no Brasil

mapas solarimétricos existentes



Radiação direta normal (kWh/m².dia)

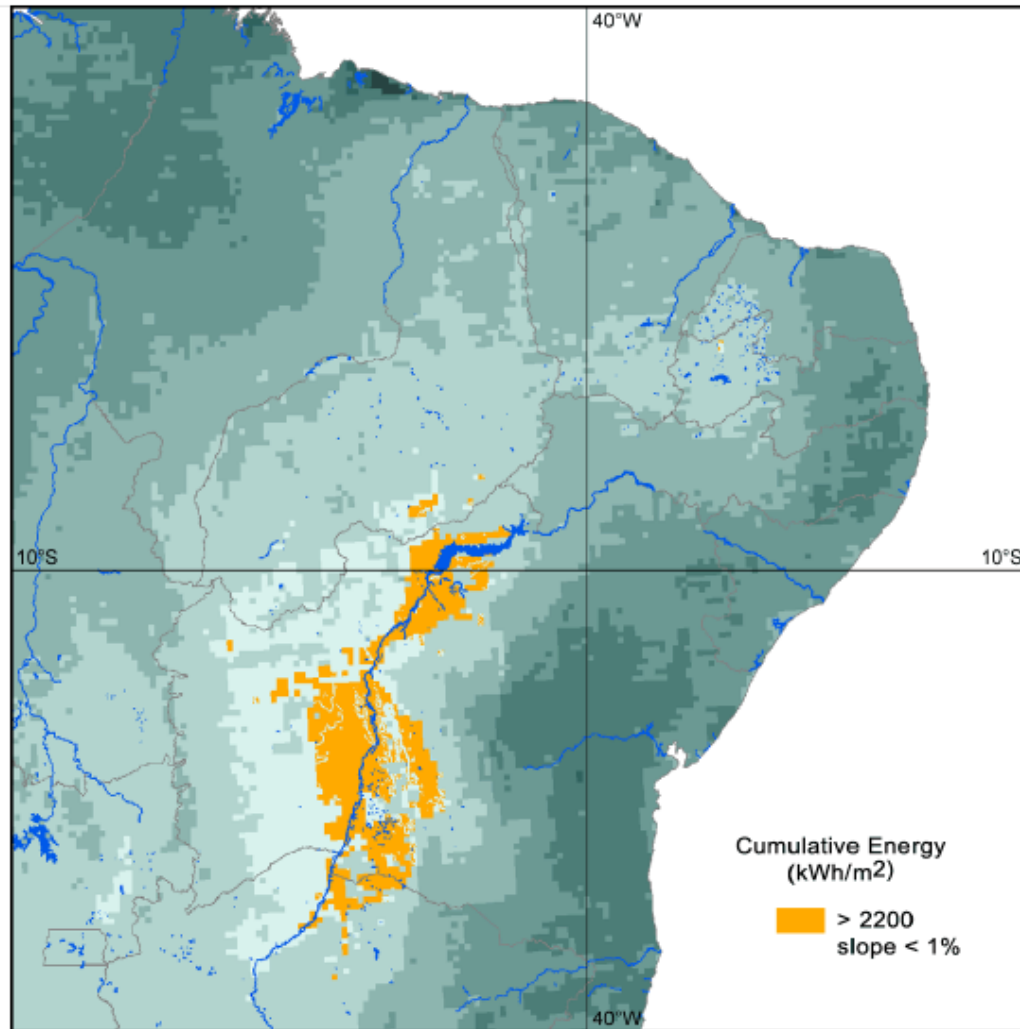
Estimativa da radiação
direta normal a partir
de modelo físico com
dados medidos de
satélite.

Período de medição:
1995 a 2002

SWERA – INPE - 2008

O recurso solar no Brasil

mapas solarimétricos existentes



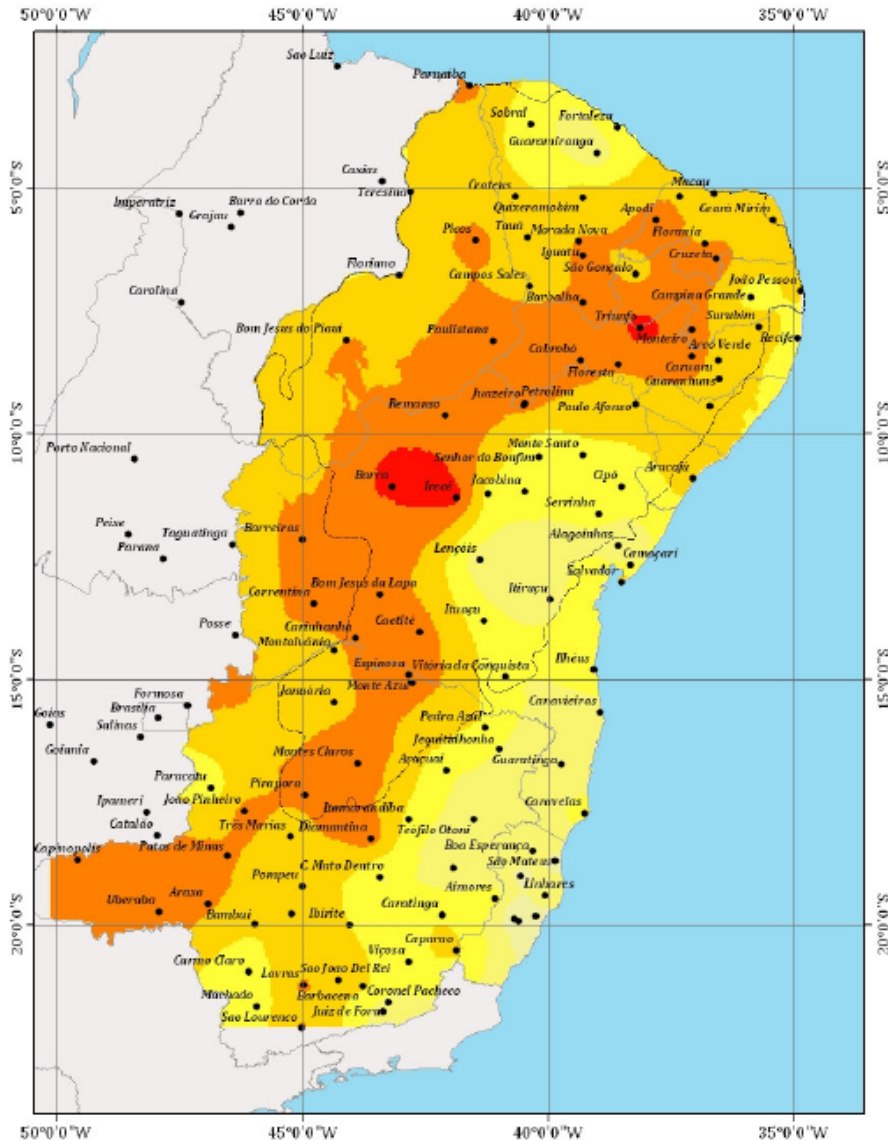
Radiação direta normal (kWh/m².dia)

Estimativa da radiação
direta normal a partir
de modelo físico com
dados medidos de
satélite.

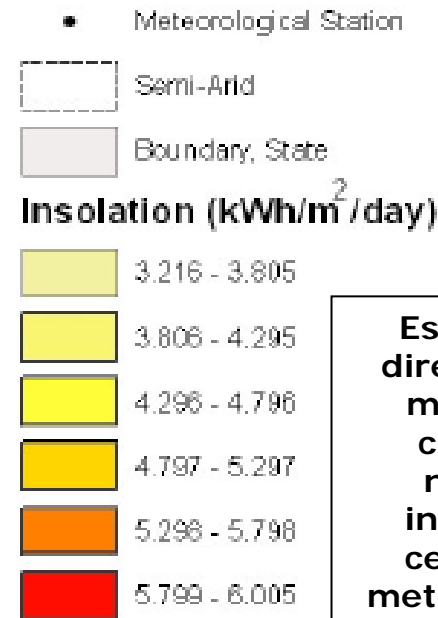
Período de medição:
1995 a 2002

O recurso solar no Brasil

mapas solarimétricos existentes



Radiação direta normal (kWh/m².dia)



Estimativa da radiação direta normal, utilizando modelos matemáticos clássicos, a partir do número de horas de insolação medidos em cerca de 100 estações meteorológicas do INMET. Período de medição: 1960 a 1990

CEPEL, 2002

O recurso solar no Brasil

Avaliações realizadas no passado / Proj. Gerahelio 2002

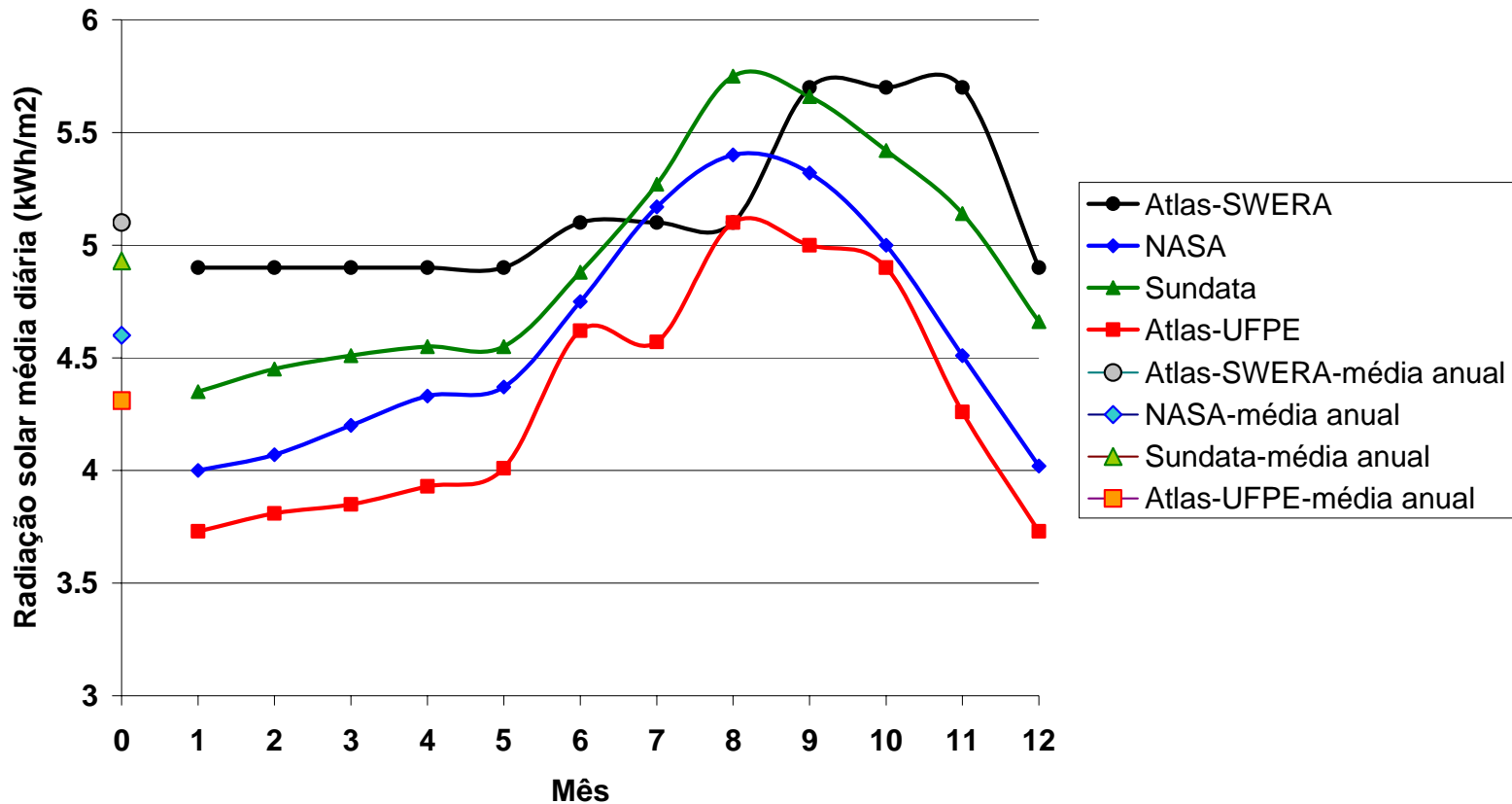
Localidade	Estimativa da Irradiação direta normal			
	média anual kWh/m ² .dia	máxima média mensal kWh/m ² .dia	mínima média mensal kWh/m ² .dia	Anual acumulada kWh/m ² .ano
Mojave (EUA)	7,7	-	-	2.800
Almeria (Espanha)	5,9	-	-	2.140
Barra (BA)	5,9	7,7	4,2	2.139
Petrolina (PE)	5,6	6,5	4,5	2.040
Cabrobó (PE)	5,5	6,9	4,2	2.004

O Brasil possui uma área com irradiação comparável às áreas onde atualmente estão sendo construídas usinas solares com concentradores

O recurso solar no Brasil

comparação de modelos

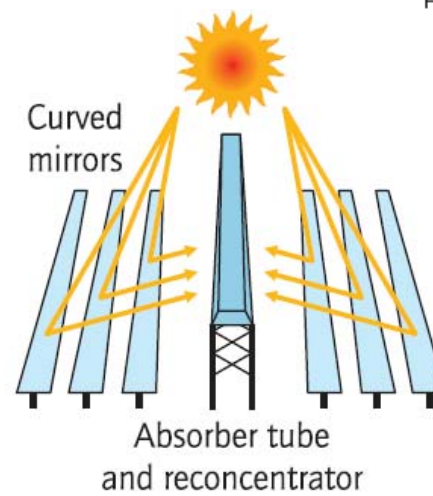
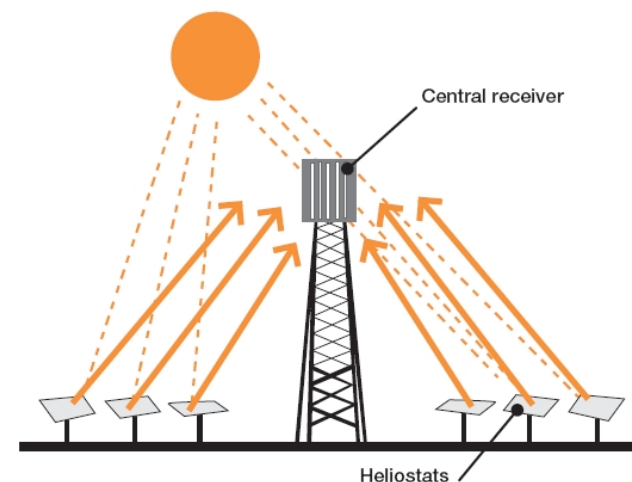
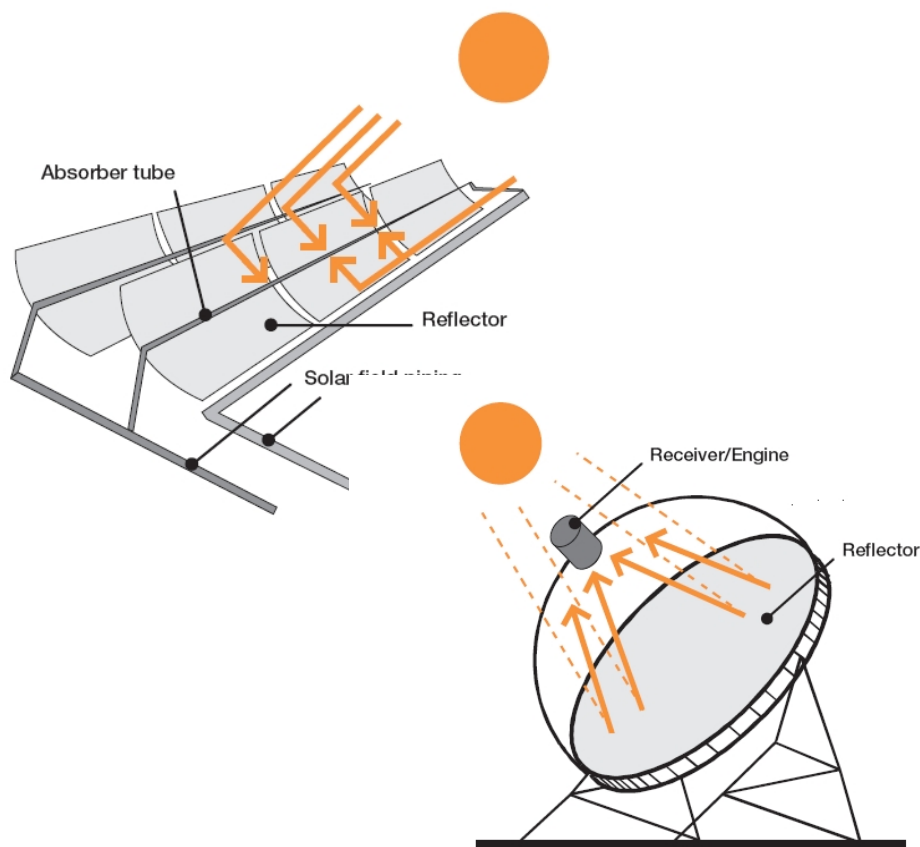
- Médias mensais e anual da radiação solar global média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10° N (Manaus)



necessidade de medições locais de irradiação

Tecnologias de CSP

- Principais tecnologias com concentradores
 - Cilindros parabólicos, torre central, discos parabólicos e refletores linear Fresnel











Comparação entre as tecnologias de CSP

Tecnologia	Efic. solar / elétrica estimada	Área	Água para resf. L/kWh	Armazen.	Oper. híbrida	Melhoria no futuro
Cilindro parabólico	15%	elevada	3000 ou seco	sim, porém sem DSG	possível	limitada
Refletor Fresnel	8 a 10%	média	3000 ou seco	sim, porém sem DSG	possível	significativa
Torre central	20 a 35%, teórico	média	2000 ou seco	depende da config.	possível	bastante significativa
Disco parabólico	25 a 30%	pequena	0	depende da config.	possível em casos limitados	mediante produção em massa

CSP Technology Roadmap, 2010 IEA: Breyer & Knies, 2009, baseado em dados de DLR-ISIS (Lohmann, et al. 2006).

Plantas solares térmicas em operação (Junho 2010) – Total = 736MW

Capacity (MW) ^[4]	Technology type ^[4]	Name ^[4]	Country ^[4]	Location ^[4]	Notes ^[4]
354	parabolic trough	Solar Energy Generating Systems	 USA	Mojave Desert California	Collection of 9 units
64	parabolic trough	Nevada Solar One	 USA	Boulder City, Nevada	
100	parabolic trough	Andasol solar power station	 Spain	Granada	Andasol 1 completed, 2008 Andasol 2 completed, 2009 [4][5]
50	parabolic trough	Puertollano Photovoltaic Park	 Spain	Puertollano, Ciudad Real	Completed May 2009 ^[6]
50	parabolic trough	Alvarado I	 Spain	Badajoz	Completed July 2009 ^{[7][8][9]}
50	parabolic trough	Extresol 1	 Spain	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)	Completed February 2010 [10][11][12]
50	parabolic trough	Solnova	 Spain	Seville	[13][14]
20	solar power tower	PS20 solar power tower	 Spain	Seville	Completed April 2009

Plantas solares térmicas em operação (Junho 2010) – Total = 736MW

17	parabolic trough	Yazd integrated solar combined cycle power station	 Iran	Yazd	World's first solar combined cycle power plant
11	solar power tower	PS10 solar power tower	 Spain	Seville	World's first commercial solar tower
5	fresnel reflector	Kimberlina Solar Thermal Energy Plant	 USA	Bakersfield, California	Ausra demonstration plant ^[15]
5	solar power tower	Sierra SunTower	 USA	Lancaster,  California	eSolar commercial power plant, North America's only operating solar tower, completed August 2009 ^{[16][17][18]}
2	fresnel reflector	Liddell Power Station Solar Steam Generator	 Australia	New South Wales	electrical equivalent steam boost for coal station ^{[19][20]}
1.5	dish stirling	Maricopa Solar	 USA	Peoria, Arizona	Stirling Energy Systems / Tessera Solar's first commercial-scale Dish Stirling power plant. Completed January 2010 ^[21]
1.5	solar power tower	Jülich Solar Tower	 Germany	Jülich	Completed December 2008 ^[22]

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas em operação (Junho 2010) Total = 736MW

1.5	solar power tower	Jülich Solar Tower	 Germany	Jülich	Completed December 2008 ^[22]
1.4	solar power tower	THEMIS Solar Power Tower	 France	Pyénées-Orientales	Hybrid solar/gas electric power, using solar energy to heat the air entering a gas turbine ^[23]
1.4	fresnel reflector	Puerto Errado 1	 Spain	Murcia	Completed April 2009 ^[24]
1	parabolic trough	Saguaro Solar Power Station	 USA	Red Rock  Arizona	[25]
2	parabolic trough	Keahole Solar Power	 USA	Hawaii	[26][27]
0.25	CSP	Shiraz solar power plant	 Iran	Shiraz	Iran's first solar power plant
736.15	-	Overall operational capacity	-	-	-











http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas em construção (Junho 2010) Total = 2083MW

Capacity (MW) ^[4]	Technology ^[4]	Name ^[4]	Country ^[4]	Location ^[4]	Notes ^[4]
100	parabolic trough	Solnova 3, 4	 Spain	Seville	[13]
100	parabolic trough	Extresol 2-3	 Spain	Torre de Miguel Sesmero (Badajoz)	with 7.5h heat storage ^{[10][11]}
100	parabolic trough	Andasol 3–4	 Spain	Granada	with 7.5h heat storage ^[28] [10][29][30]
100	parabolic trough	Palma del Rio 1, 2	 Spain	Cordoba	[31][32][10]
100	parabolic trough	Helioenergy 1, 2	 Spain	Ecija	with heat storage ^[10] [33][34]
100	parabolic trough	Solaben 1, 2	 Spain	Logrosan	[35]
100	parabolic trough	Valle Solar Power Station	 Spain	Cadiz	with 7.5h heat storage ^[36]










http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas em construção (Junho 2010) Total = 2083MW

100	parabolic trough	Aste 1A, 1B	 Spain	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	[10][37]
100	parabolic trough	Termosol 1+2	 Spain	Navalvillar de Pela (Badajoz)	[10]
100	parabolic trough	Helios 1+2	 Spain	Ciudad Real	[10]
50	parabolic trough	Majadas de Tiétar	 Spain	Cacares	[32]
50	parabolic trough	Lebrija-1	 Spain	Lebrija	[38]
50	parabolic trough	Manchasol-1	 Spain	Ciudad Real	with heat storage ^[39]
50	parabolic trough	La Florida	 Spain	Alvarado (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	La Dehesa	 Spain	La Garrovilla (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Axtesol 2	 Spain	Badajoz	[10][37]
50	parabolic trough	Arenales PS	 Spain	Moron de la Frontera (Seville)	[10][37]

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas em construção (Junho 2010) Total = 2083MW

50	parabolic trough	Serrezuella Solar 2	 Spain	Talarrubias (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	El Rebozo 2	 Spain	El Puebla del Rio (Seville)	[10]
50	parabolic trough	Moron	 Spain	Moron de la Frontera (Sevilla)	[10]
50	parabolic trough	Olivenza 1	 Spain	Olivenza (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Medellin	 Spain	Medellin (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Valdetorres	 Spain	Valdetorres (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Badajoz 2	 Spain	Talavera la Real (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Santa Amalia	 Spain	Santa Amalia (Badajoz)	[10]
50	parabolic trough	Torrefresneda	 Spain	Torrefresneda (Badajoz)	[10]

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas em construção (Junho 2010) Total = 2083MW

50	parabolic trough	La Puebla 2	 Spain	La Puebla del Rio (Sevilla)	[10]
25	parabolic trough	Termosolar Borges	 Spain	Borges Blanques (Lerida)	[10]
17	power tower	Gemasolar, former Solar Tres Power Tower	 Spain	Fuentes de Andalucia (Seville)	with 15h heat storage ^[10]
1	dish	Renovalia	 Spain	Albacete	[10]
75	ISCC	Martin Next Generation Solar Energy Center	 USA	Florida	steam input into a combined cycle ^[40]
20	ISCC	Kuraymat Plant	 Egypt	Kuraymat	[41]
25	ISCC	Hassi R'mel integrated solar combined cycle power station	 Algeria	Hassi R'mel	[42]
20	ISCC	Beni Mathar Plant	 Morocco	Beni Mathar	[43]
2083	-	Overall capacity under construction	-	-	-

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations

Plantas solares térmicas descomissionadas (Junho 2010)

- **Torre Central**

- ✓ SES 5 – USSR – 5 MW, torre central (1985-1989)
- ✓ Solar One – EUA - 10 MW, torre central, armazenamento com óleo (1982-1986), posteriormente convertida para Solar Two
- ✓ Solar Two – EUA – 10 MW, torre central, armazenamento com sal fundido (1995-1999); a tecnologia das usinas Solar One e Two será utilizada na usina Solar Tres – Espanha – 15 MW

Maioria das usinas localizadas na Espanha e nos EUA

Maioria das usinas possui tecnologia de concentração com cilindros parabólicos e torre central, com predominância dos cilindros parabólicos

- **Barreiras Tecnológicas**

- ✓ necessidade de aumentar a eficiência do campo solar (relação entre a energia absorvida no receptor e a energia incidente nos espelhos) , hoje próxima de 55%, e reduzir custos de fabricação
- ✓ necessidade de melhorar a eficiência dos receptores (perdas por radiação e convecção), hoje próxima de 75%

- **Barreiras de Mercado**

- **Todos os países:**

- ✓ investimento elevado; necessidade de algum tipo de incentivo para a venda de energia
- ✓ riscos técnicos e financeiros
- ✓ sistemas convencionais mais atrativos

- **No Brasil, acrescentar:**

- ✓ falta ou deficiência de instrumentos legais e regulatórios
- ✓ ausência de políticas tarifárias para incentivo aos investimentos
- ✓ desconhecimento do custo real de implantação de uma usina no país
- ✓ maior parte do fornecimento da energia no país já é proveniente de fontes renováveis

Pesquisas em energia solar de média e alta temperatura no Brasil

Maioria das usinas possui tecnologia de concentração com cilindros parabólicos e torre central

+

Área privilegiada para aplicação das tecnologias heliotérmicas de geração elétrica

+

Atividades incipientes já realizadas nos centros de pesquisa, universidades e concessionárias



PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UMA USINA DE DEMONSTRAÇÃO COM AS TECNOLOGIAS DE TORRE CENTRAL E CILINDRO PARABÓLICO VISANDO À INTERNALIZAÇÃO DESTAS TECNOLOGIAS NO PAÍS

Introdução da energia solar no Brasil

Benefícios e Vantagens

- geração de energia elétrica com baixo impacto ambiental
- considerado o aspecto ambiental, a energia solar consiste num bom instrumento para acompanhamento do crescimento da demanda, papel que hoje tem sido exercido pelas usinas acionadas por combustíveis fósseis
- aproveitamento econômico de um recurso energético disponível, contribuindo para a redução da importação de energia pela Região Nordeste do País
- complementaridade energética com o sistema hidrelétrico, pois a radiação solar é mais intensa no período de menor afluência hídrica dos rios
- diversificação da matriz energética nacional
- criação de uma base de pesquisa para desenvolvimento de sistemas, equipamentos e materiais para energia solar
- criação de empregos qualificados na indústria, nas empresas de engenharia, no setor elétrico e nos locais de implantação das usinas
- estímulo à implementação de cursos de pós-graduação com foco em concentração da energia solar

Proposta: Projeto de Demonstração de Central Heliotérmica no Semi-árido

- **Tecnologia**

- ✓ não há clareza quanto à tecnologia que será dominante a longo prazo
- ✓ proposta é utilizar as duas tecnologias mais promissoras (2 campos solares e uma unidade de potência):
 - cilindros parabólicos (estágio mais avançado de amadurecimento)
 - torre central (potencial teórico para atingir maiores eficiências dada a sua maior concentração)

- **Localização**

- ✓ a ser definida, na região do semi-árido, onde a irradiação solar direta normal é próxima a 2000 kWh/m²/ano
- ✓ há disponibilidade de água e infraestrutura adequada (acesso aero-rodoviário, proximidade da rede elétrica, apoio técnico e logístico)

Proposta: Projeto de Demonstração de Central Heliotérmica no Semi-árido

- **Características técnicas básicas estimadas**

- ✓ Potência: 2,5 MWe
- ✓ Área estimada do campo solar:
 - Cilindros parabólicos: 7,5 ha
 - Torre central: 12,5 ha
 - Área total: 20 ha
- ✓ Ciclo térmico: ciclo Rankine
- ✓ Estimativa da eficiência (médias anuais)*
 - Ciclo Rankine: de 22 a 25%
 - Conversão solar / elétrica:
 - Cilindros parabólicos: 7,4 a 8,5 %
 - Torre central: 8,5 a 9,7 %
 - Consumo de água estimado: 16.500 m³/ano (admitindo um fator de capacidade de 20%)

* Relatório da Sargent & Lundy, “Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Costs and Performance Forecasts” (maio 2003) corrigindo-se as eficiências do ciclo Rankine pelos valores mais condizentes com uma planta de 2,5MW.

Proposta: Projeto de Demonstração de Central Heliotérmica no Semi-árido

- **Estimativa do investimento para planta de 2,5 MW**

- ✓ premissas extraídas do Relatório CEPEL DP 21120/08, do estudo da CHESF/Grupo FAE “Luz do Sol I – Usina de Demonstração” e Relatório Técnico Sargent & Lundy, 2003)
 - sistema cilindro parabólico incluindo o bloco de potência e sem armazenamento térmico : US\$ 22,95 Mi (Relatório Chesf/Grupo FAE)
 - campo heliostático para o sistema de torre central: US\$ 11,38 Mi (representa cerca de 45 a 50% do custo de instalação de um sistema com torre central estimado no Relatório CEPEL DP 21120/08 em 7000 EU/kW)
- ✓ Total: US\$ 33,43 Mi

- **Estimativa do custo da energia**

- regime de operação é bastante diferente do regime de uma planta comercial
- custo de geração de plantas comerciais estão em torno de 0,22 euros/kWh em 2007 (Abengoa)
- subsídio recebido do governo espanhol como incentivo à geração com tecnologia solar: 0,25 euros/kWh

Atividades mais recentes

- **Convênio com MME**

- Apoiar (através da emissão de relatórios técnicos e organização de reuniões) a elaboração de Projeto Básico para Implantação de uma Planta Piloto de Geração Heliotérmica no Nordeste do Brasil.
- Período de desenvolvimento: 2 anos
- Atividades:
 - ✓ Identificação dos recursos solar (irradiação direta normal) e hídrico, das redes elétricas disponíveis e da infra-estrutura local de acesso
 - ✓ Levantamento dos impactos ambientais atribuídos às plantas baseadas em concentração solar
 - ✓ Levantamento do estado da arte da geração heliotérmica (plantas experimentais e comerciais em operação, estágio das tecnologias existentes e estimativas de custos atuais e projetados para o futuro)
 - ✓ Participação em reuniões com o MME, CHESF, ELETROBRÁS e outros parceiros potencialmente interessados visando a definição de diretrizes para elaboração de Projeto Básico para implantação de uma Planta Piloto de Geração Heliotérmica no Nordeste do Brasil

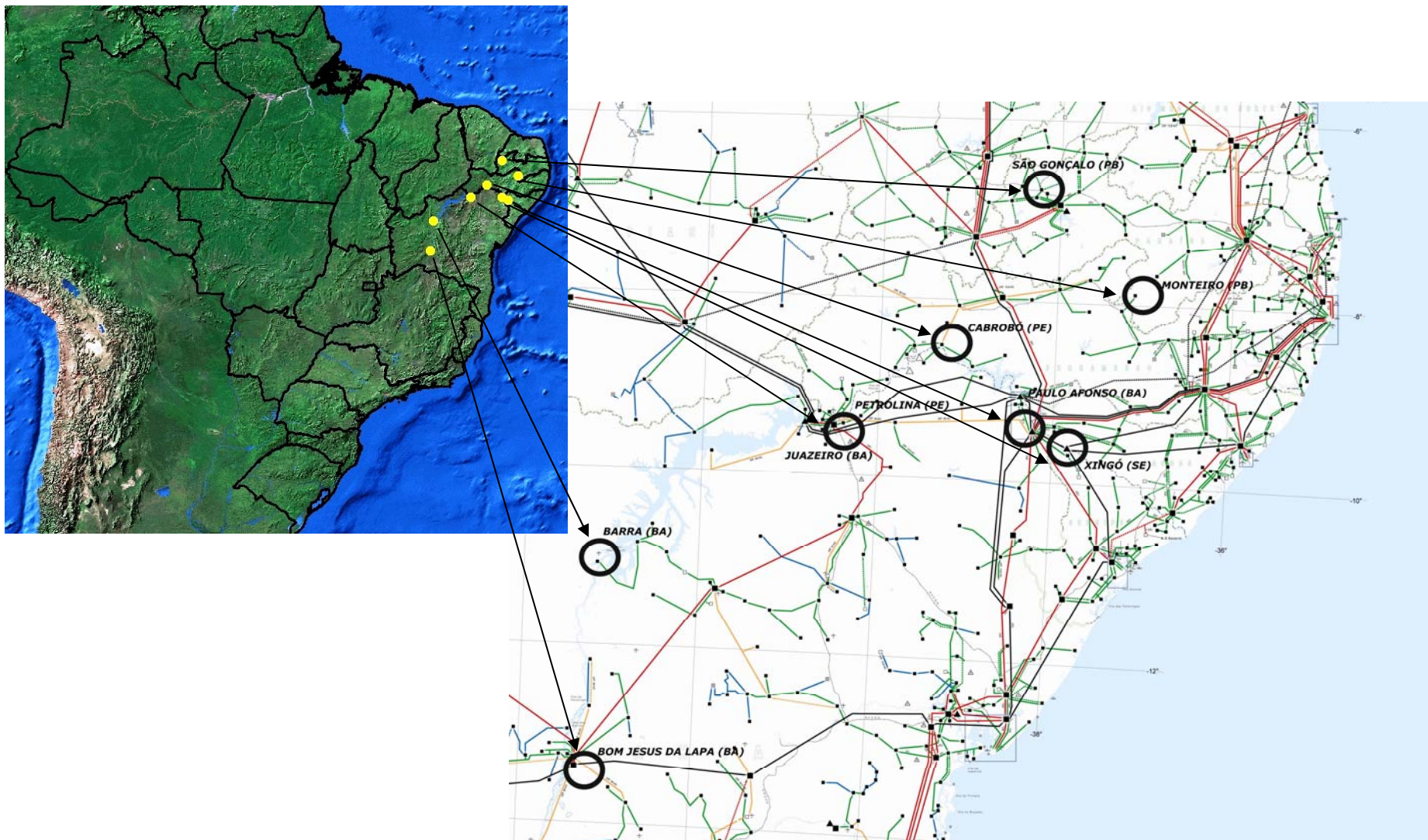
Atividades mais recentes

- **Proposta para obtenção de recursos submetidos ao MCT**
 - Foi submetido ao MCT um termo de referência elaborado em conjunto com a CHESF solicitando recursos para implantação da planta piloto.
- **Obtenção de novos dados do número de horas de insolação do período de jan. 1999 a dez. 2009**
 - Fonte: INMET
 - Estados: da região do semi-árido e regiões limítrofes
 - ✓ Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Maranhão, Tocantins, Goiás, Minas Gerais e Espírito Santo

Atividades mais recentes

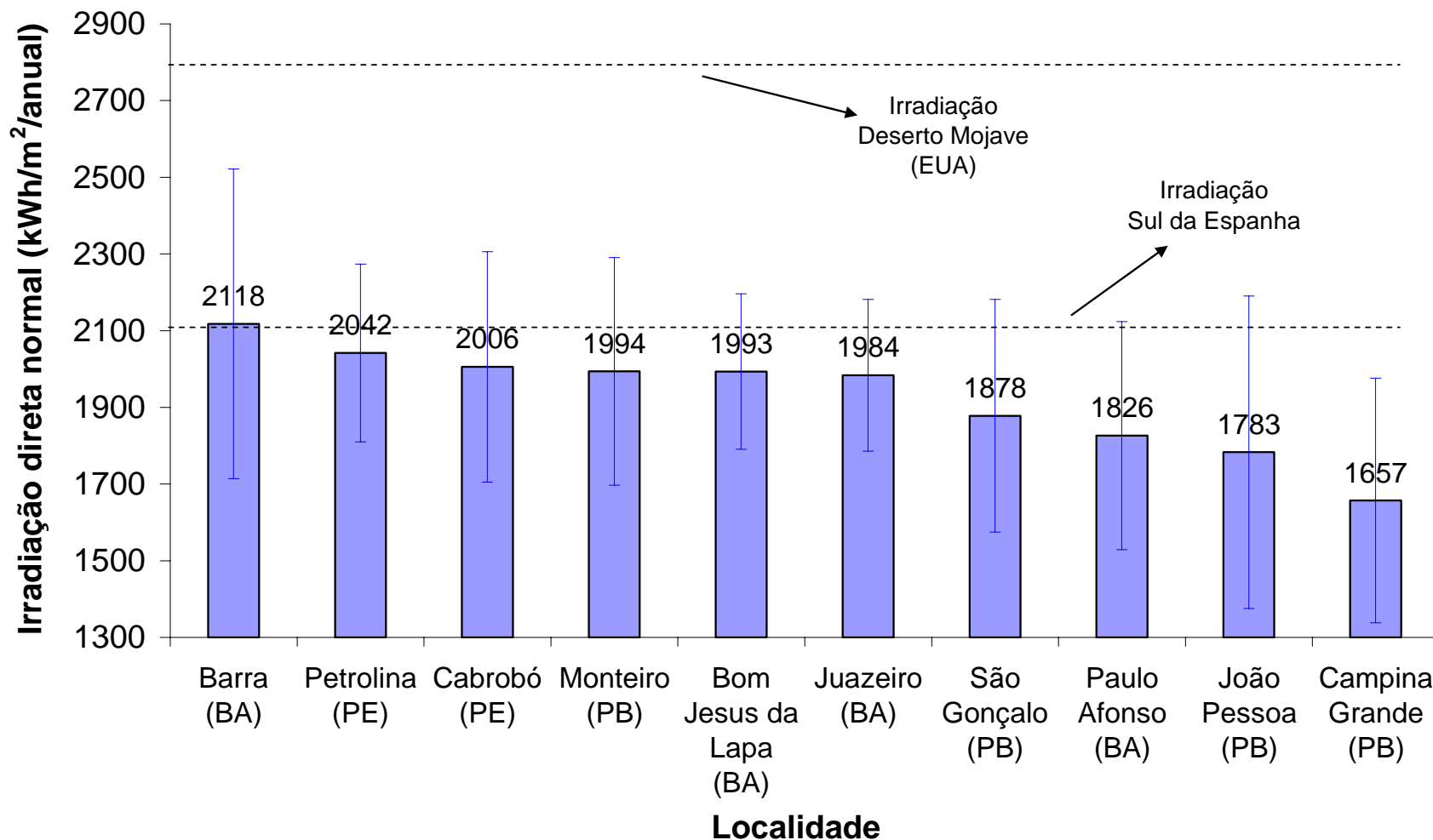
- **Avaliação de novas localidades no Estado da Paraíba e na região de Xingó**
 - ✓ Irradiação
 - ✓ Disponibilidade de água
 - ✓ Disponibilidade de infraestrutura
 - Rede elétrica
 - Acesso
- **Apoio ao MME para retorno do Brasil à condição de membro do SolarPaces**
 - ✓ O Brasil foi aceito por unanimidade a se tornar membro do SolarPaces na última reunião do Comitê Executivo (abril, 2010)
 - ✓ O CEPEL foi designado pelo MME para ser seu representante
- **Simulações com o uso do programa SAM (Solar Advisor Model)**
 - ✓ dimensionamento dos sistemas
 - ✓ detalhamento dos custos estimados da planta

- Localidades avaliadas



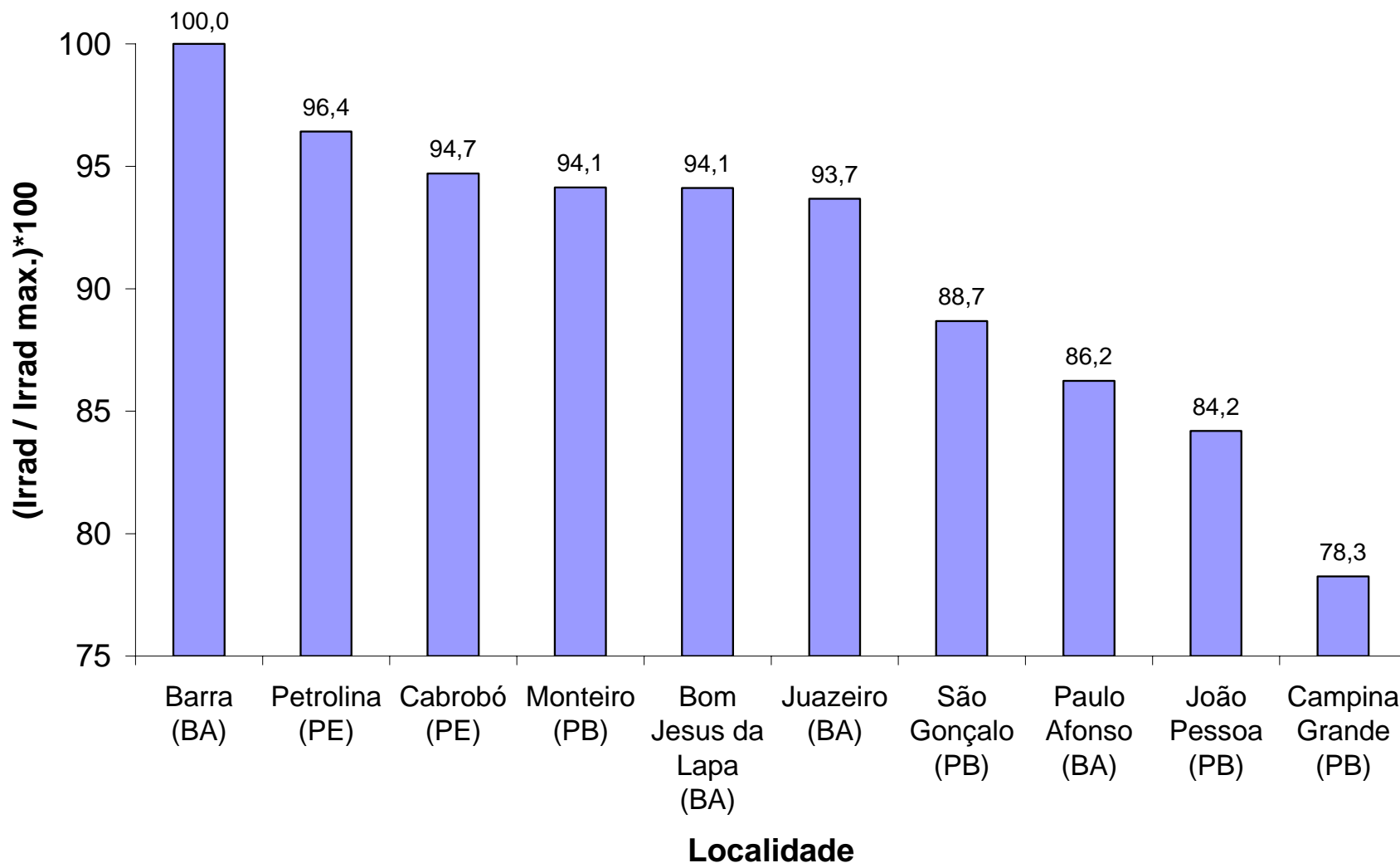
Atividades mais recentes

- Avaliação da irradiação direta normal**



Atividades mais recentes

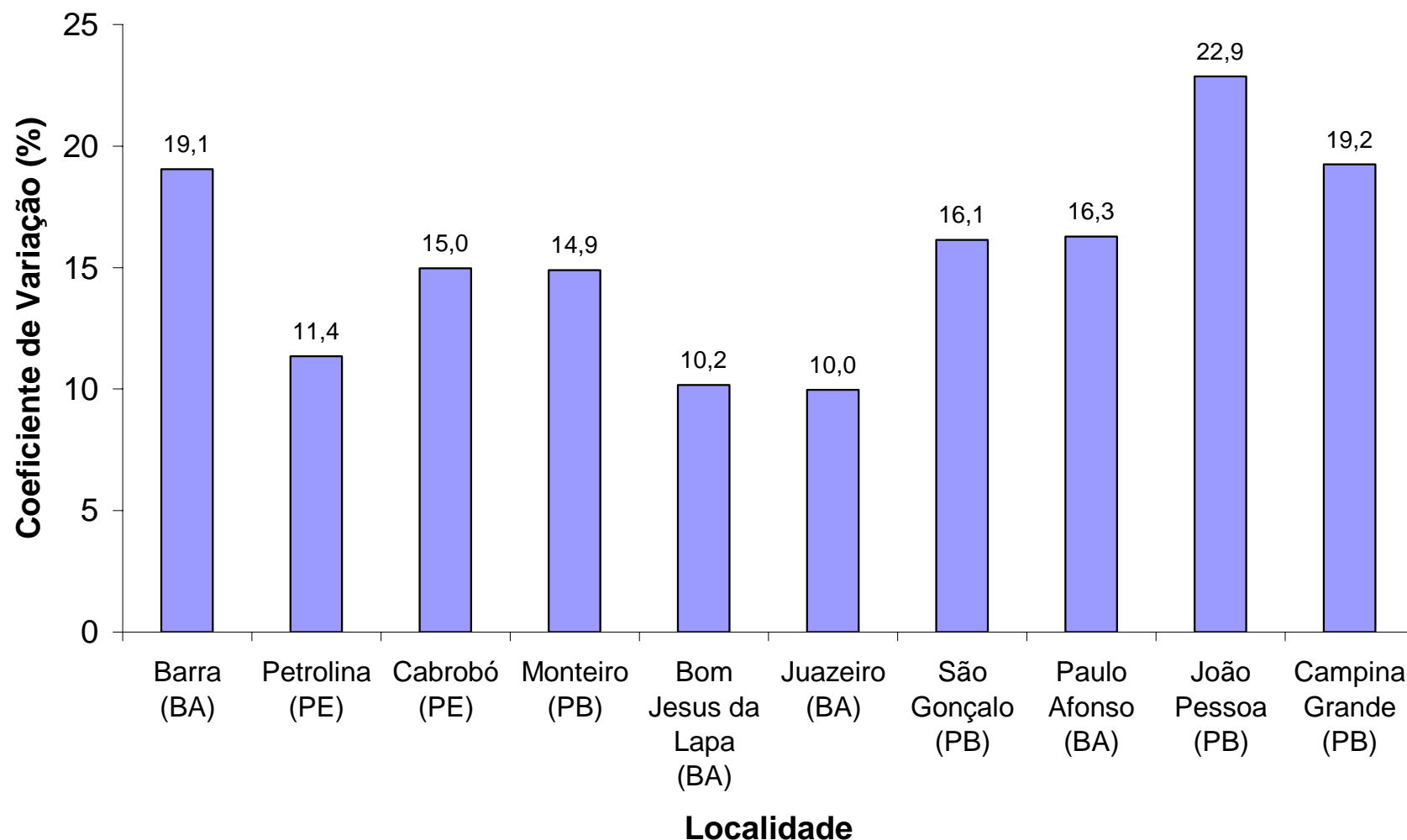
- Avaliação da irradiação direta normal**



Atividades mais recentes

- **Avaliação da irradiação direta normal**

- **Coeficiente de variação = (desvio padrão/média) x 100 [%]**



- **Resumo da avaliação**

Localidade	Características
Barra (BA)	Irradiação normal direta anual= 2,14 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 19,1 % Linhas de transmissão= 69 kV Rio São Francisco– fluxo perene
Petrolina (PE)	Irradiação normal direta anual= 2,04 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 11,4 % Linhas de transmissão= 69 kV and 138 kV Rio São Francisco– fluxo perene
Cabrobó (PE)	Irradiação normal direta anual= 2,00 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 15,0 % Linhas de transmissão= 69 kV Rio São Francisco– fluxo perene
Monteiro (PB)	Irradiação normal direta anual= 1,99 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 14,9 % Linhas de transmissão= 69 kV and 138 kV Rio Paraíba – fluxo intermitente

NOTA: todas as localidades possuem subestações e rodovias de acesso

Localidade	Características
Bom Jesus da Lapa (BA)	Irradiação normal direta anual= 1,99 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 10,2 % Linhas de transmissão= 69 kV and 138 kV Rio São Francisco– fluxo perene
Juazeiro (BA)	Irradiação normal direta anual= 1,99 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 10,0 % Linhas de transmissão= 69 kV and 138 kV Rio São Francisco– fluxo perene
São Gonçalo (PB)	Irradiação normal direta anual= 1,88 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 16,1 % Linhas de transmissão= 69 kV Rio Piranhas – fluxo perene
Paulo Afonso (BA)	Irradiação normal direta anual= 1,83 MWh/m ² .ano Coeficiente de variação da média mensal = 16,3 % Linhas de transmissão= 69 kV Rio São Francisco– fluxo perene

NOTA: todas as localidades possuem subestações e rodovias de acesso



Eletrobras

Cepel

Ana Paula Cardoso Guimarães
pcardoso@cepel.br

Ary Vaz Pinto Júnior
ary@cepel.br

Eduardo Torres Serra
etserra@cepel.br

Leonardo dos S. R. Vieira
lsrv@cepel.br