

Potencialidades da Integração em Larga Escala de Energia Solar (Fotovoltaica e Térmica) para Geração Centralizada de Eletricidade no Brasil

Prof. Roberto Schaeffer

Julho de 2012

Esta apresentação está baseada em um estudo que visou...

- Descrever e analisar o potencial solar brasileiro
- Analisar o estado da arte da geração solar centralizada (tecnologias)
- Identificar as principais políticas de incentivo à energia solar no mundo
- Avaliar o potencial de aproveitamento da energia solar para geração centralizada no Brasil considerando duas tecnologias:
 - Concentradores (CSP)
 - Fotovoltaico (FV)
- Estimar impactos no Sistema Interligado Nacional
- Propor políticas de incentivo à energia solar centralizada no Brasil

Ferramentas utilizadas

- SAM – System Advisor Model
 - Simulação de plantas solares

- GST/SWERA – Geospatial Toolkit
 - Georreferenciamento

- MESSAGE (PPE/COPPE versão 10 – Ano 2012)
 - Modelo de otimização da expansão e operação integrada do sistema energético com base em minimização de custos

- Premissas dos sistemas PV e CSP usados no MESSAGE (dados fornecidos pelo SAM):
 - custos de investimento de cada planta
 - sazonalidade da produção
 - fator de capacidade
 - produção anual

CSP

Potencial técnico
Casos estudados

Potencial Técnico de Geração Elétrica com CSP no Brasil

f (irradiação DNI, fatores exclusão do uso terra, tecnologia)

2.000 kWh/m²/ano
ou
6 kWh/m²/dia

Fatores de exclusão por uso da terra

Requerimento de Sup. Mín.

Água

Declividade

Áreas preservadas, etc.

Linhas de transmissão

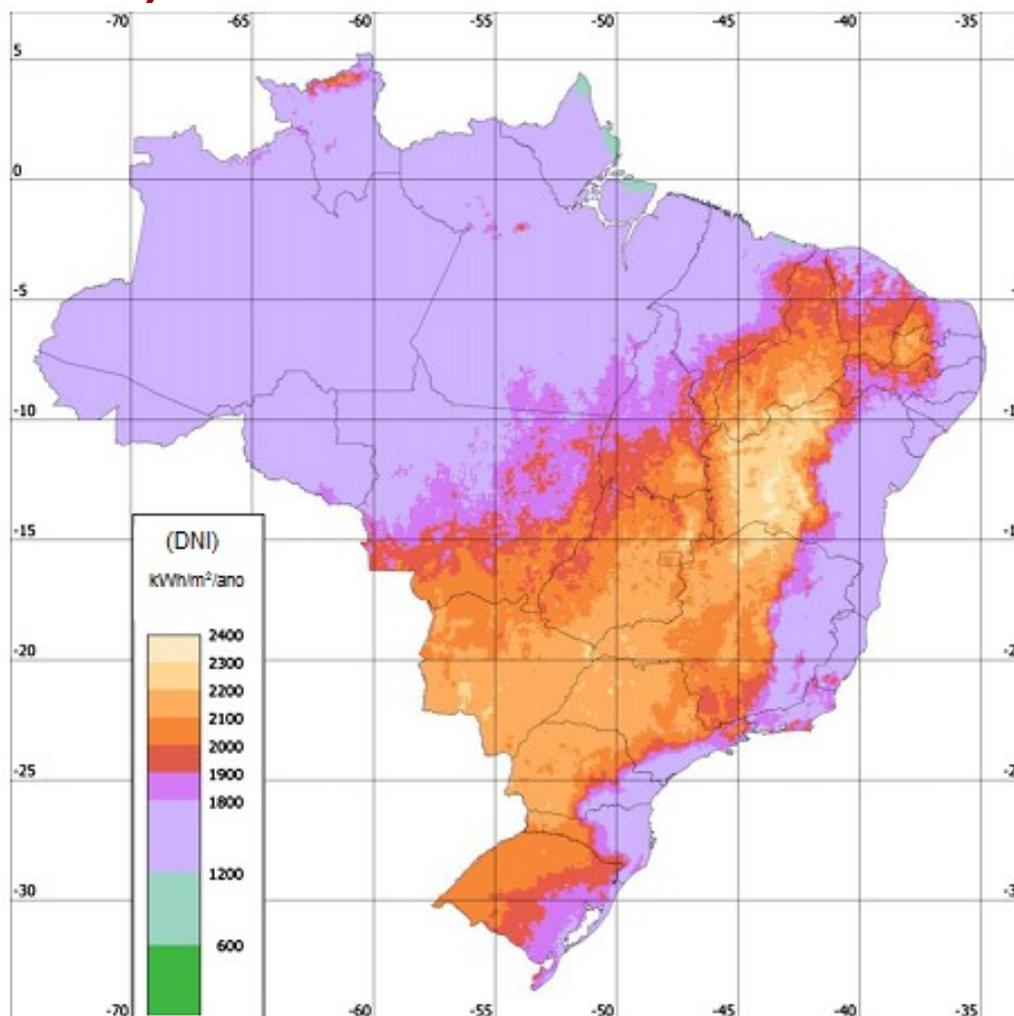
Agricultura, etc.

Estradas, etc.

Fator de capacidade =
 f (armazenamento calor,
hibridização)

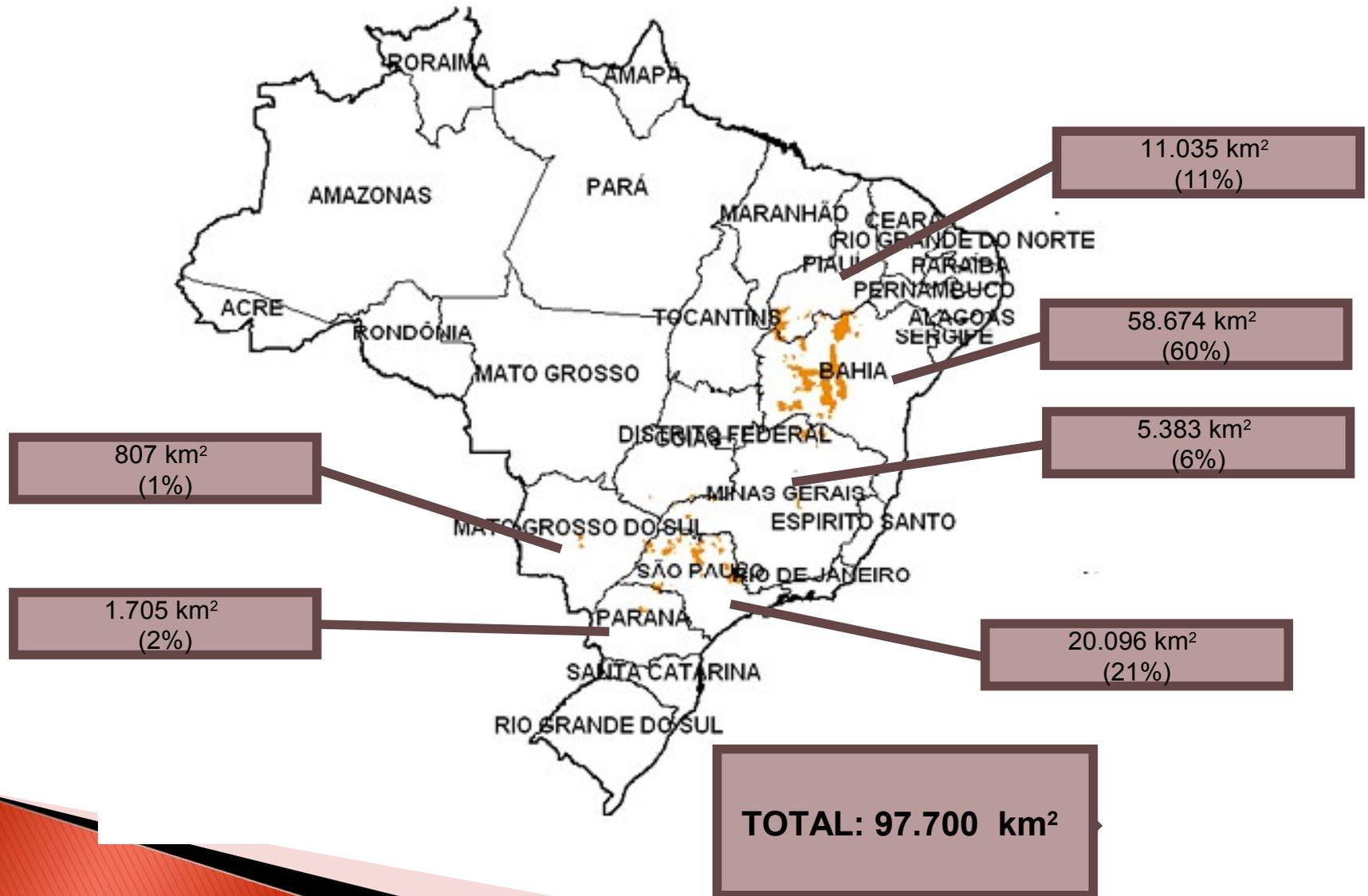
50% da superfície
com DNI apropriado

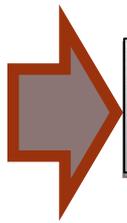
Irradiação direta normal (DNI) total anual (kWh/m²/ano)



Fonte: VIANA et al., 2011

Superfície com potencial técnico CSP





50% da superfície
com DNI apropriado

**Potencial elétrico a partir
de CSP no Brasil
(TWh/ano):**



3.664 TWh/ano

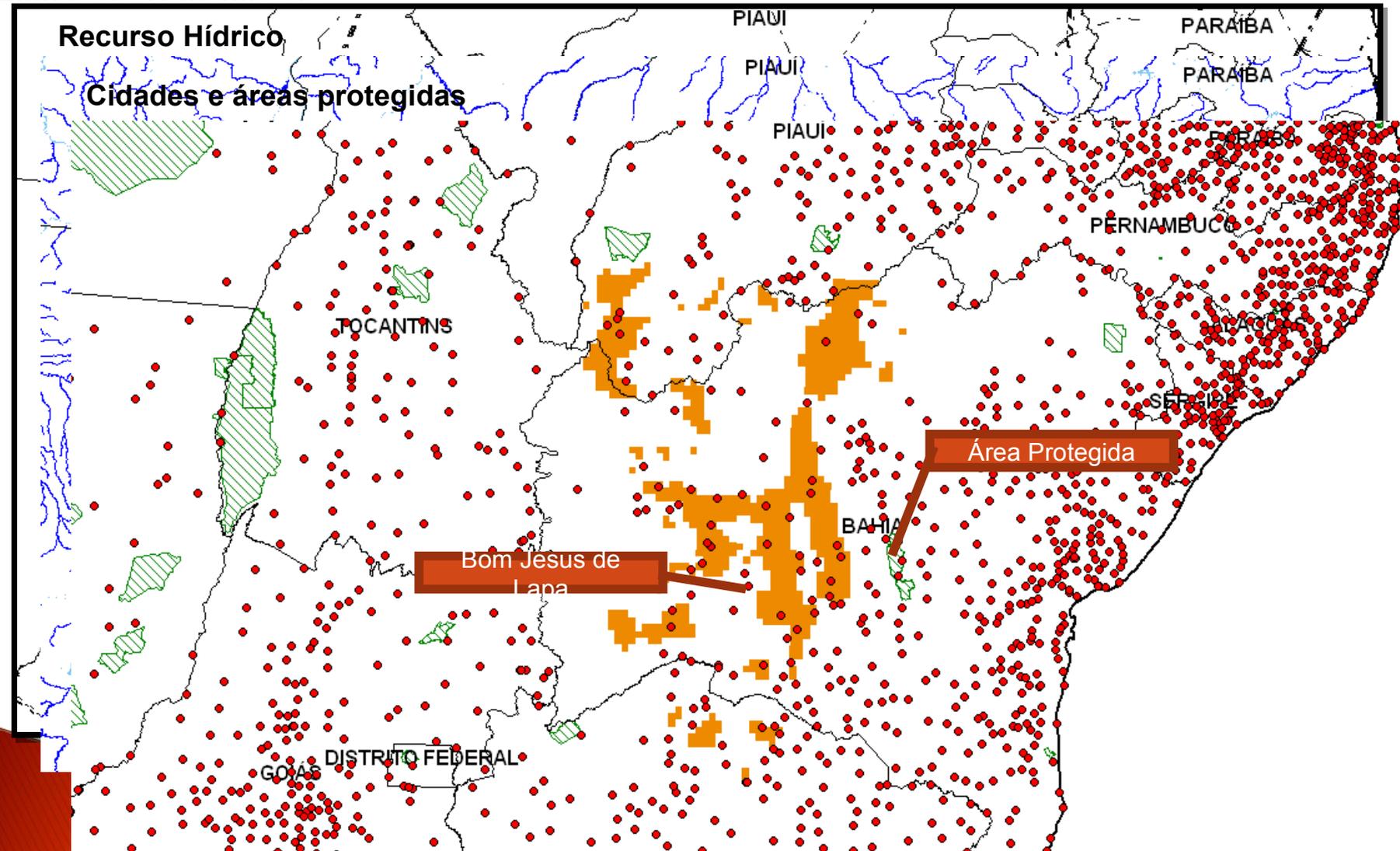
**Potencia média anual CSP
(GWe)**



Estado	Pot. inf. (GWe)	Pot. sup (GWe)
Bahia	978	1.467
Piauí	184	276
Total Nordeste (NE)	1.162	1.743
Mato Grosso do Sul	13	20
Total Sul (S)	13	20
Paraná	28	43
São Paulo	335	502
Minas Gerais	90	135
Total Cento- Oeste/ Sul-Este (CO/SE)	453	680
Total Brasil	1.628	2.443

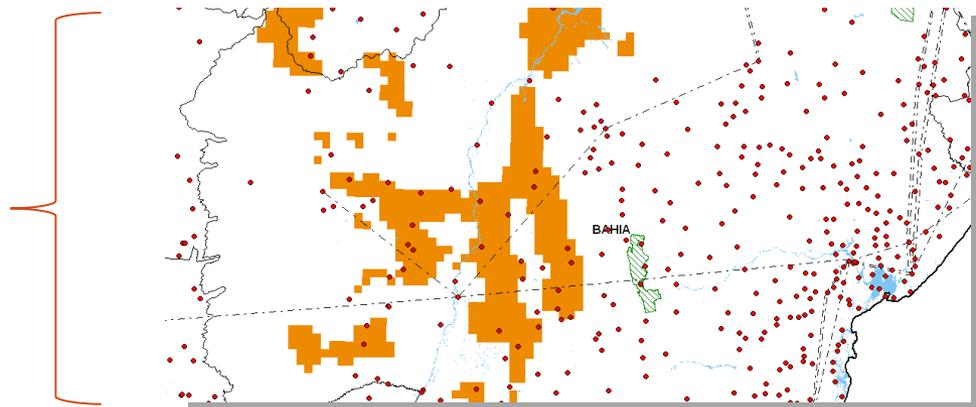
Seleção dos locais para os casos de estudo

Linhas de Transmissão

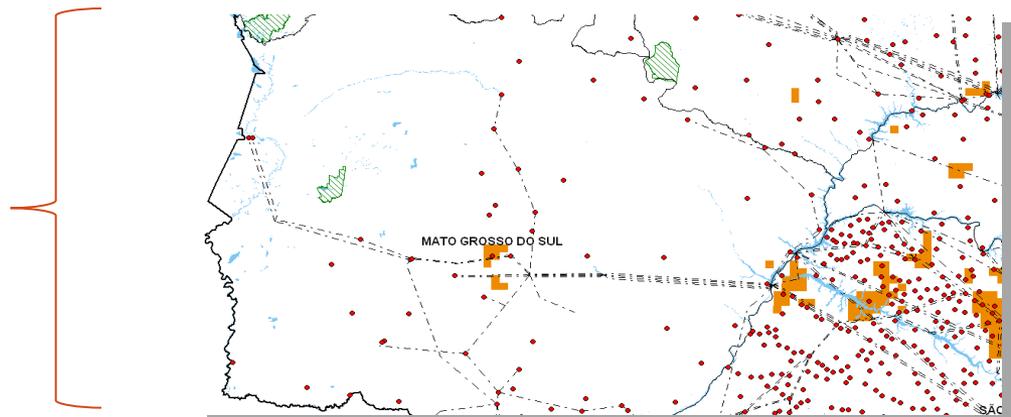


Estudos de caso CSP

1. Bom Jesus da Lapa



2. Campo Grande



Dados Climatológicos

Informação da localidade	Cidade	Bom Jesus da Lapa	Campo Grande
Estado	Bahia Mato Grosso do Sul		
Elevação		458 m	556 m
Latitude		-13,27°	-20,47°
Longitude		- 43,42°	-54,67°
Irradiação direta normal (DNI)		2.198,5 kWh/m ² .ano	1.785 kWh/m ² .ano
Irradiação global horizontal		2.143,2 kWh/m ² .ano	1.927,8 kWh/m ² .ano
Temperatura de bulbo seco		26,1 °C	24 °C
Velocidade do vento		1,6 m/s	3,9 m/s

Irradiação direta normal de projeto		Bom Jesus da Lapa: 750 W/m ² Campo Grande: 688,8 W/m ²			
		Simplex	c/ Hibridação	c/ Armazenamento	Avançada
Fluido de transferência de calor		Therminol VP-1			Hitec XL
Coletor		Solargenix SGX-1			
Receptor		Schott PRT70			Schott PRT70 Vacuum
Bloco de potência	Potência nominal	100 MWe			
	Potência de projeto	111 Mwe			
	Perdas parasíticas	10% (valor padrão do SAM)			
	Eficiência do ciclo termodinamico	37,7%			
	Pressão de operação da caldeira de back-up	-	BJL: 100 bar CG: 80 bar	-	-
	Eficiência LHV da caldeira de back-up	-	BJL: 85,7% CG: 65%	-	-
	Consumo de água	BJL: 0,1 m ³ /MWh CG: 3,0 a 4,0 m ³ /MWh			
	Tipo de condensador	BLJ: Torre seca CG: Torre úmida			
	Temperatura ambiente de projeto	BLJ: 26°C CG: 17°C			
	Horas de armazenamento	0h	0h	6h	12h
	Fluido de armazenamento	-	-	Sal Fundido	Hitec XL
	Modo de despacho	-	Operação suplementar	-	-
	Fração máxima de vapor proveniente da caldeira na entrada da turbina (em períodos de radiação insuficiente)	-	25%	-	-

Parâmetros financeiros: plantas CSP

PARÂMETROS FINANCEIROS	CENÁRIO	
	BASE	ALTERNATIVO
	BASE	ALTERNATIVO
Período de análise	30 anos	
Inflação	0%	
Taxa real de desconto	10%	
Tributos	34%	27%
Seguro	0,5% do custo total instalado	
Valor residual	0% do custo total instalado	
Prazo de amortização	*	16 anos
Taxa de juros	*	7,4% a.a.
Fração de dívida	*	70%
TIR	15% (a.a.)	
Depreciação	Linear 10 anos	MACRS 5 anos

Dados de entrada de custos: plantas CSP



	CSP simples	CSP armazenamento calor 6h	CSP hibridização	CSP planta avançada
Obras de melhoria do sítio	25 USD/m ²			
Campo solar	295 USD/m ²			260 USD/m ²
Fluido de transferência de calor	90 USD/m ²			85 USD/m ²
Armazenamento térmico	0 USD/kWht	80 USD/kWht	0 USD/kWht	70 USD/kWht
Sistema de hibridização	0 USD/kWe		420 USD/kWe	0 USD/kWe
Bloco de potência	940 USD/kWe			893 USD/kWe
Contingencia	20%			10%
EPC e custos do proprietário	11% dos custos diretos			
Terra	Em BJL: 1.000 USD/ha e em CG: 3.100 USD/ha			
Custo fixo por potência	BJL: 132 USD/kW-ano (base) e 70 USD/kW-ano (alternativo) CG: 139 USD/kW-ano (base) e 70 USD/kW-ano (alternativo)			70 USD/kW-ano,
Custo variável por geração	3 USD/MWh			
Custo do combustível de hibridização	0 USD/MMBTU		BJL: GN a 8,00 USD/MMBTU CG: Bagaço a 1,50 USD/MMBTU;	0 USD/MMBTU

Resultados de operação (SAM): - plantas CSP



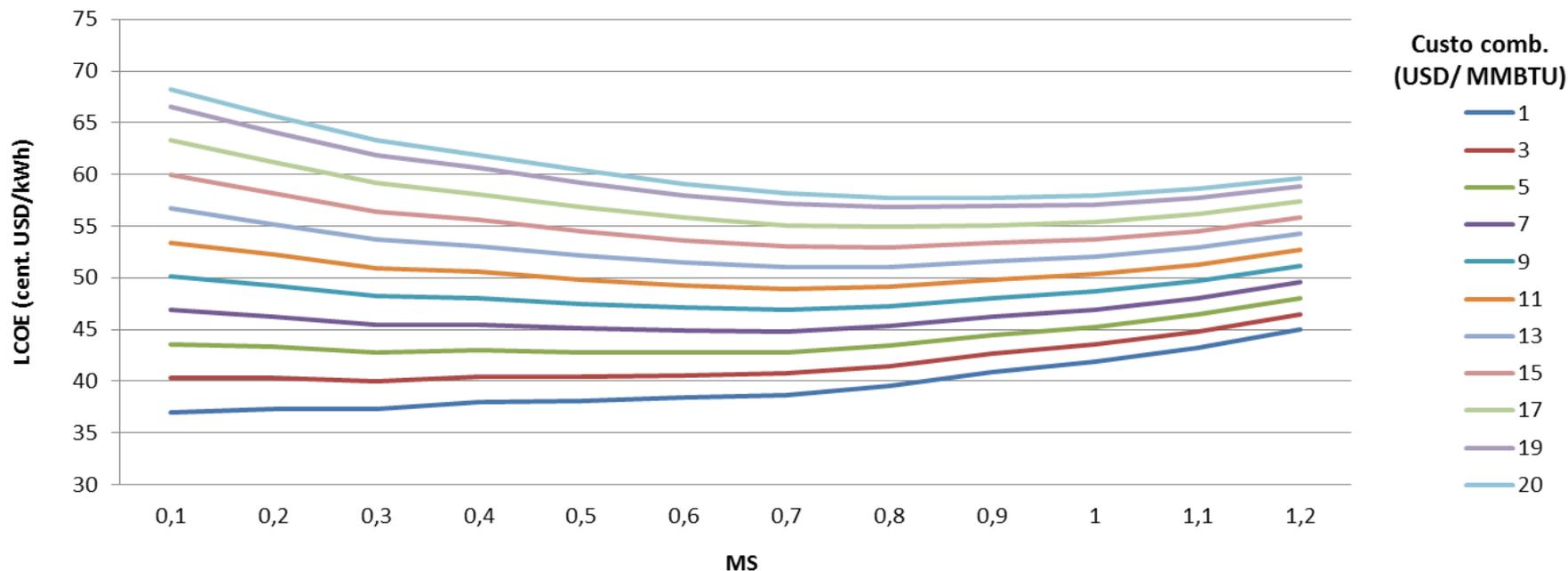
Bom Jesus da Lapa (cenário alternativo)	Simple	c/ Hibridização	c/ Armazenamento	Avançada
MS	1,18	0,87	2,02	2,85
Produção anual [GWh]	204	361	362	532
LCOE [US\$ c/kWh]	30,60	21,60	30,85	19,45
Fator de capacidade	23,3%	41,3%	41,3%	60,8%
Custos diretos de capital [milhões US\$]	449	417	850	779
Custos indiretos de capital [milhões US\$]	50	46	94	86
Total de custos de capital [milhões US\$]	499	463	944	865
Custo total instalado por potência [US\$/kW]	4.993	4.638	9.449	8.659

Campo Grande (cenário alternativo)	Simple	c/ Hibridização	c/ Armazenamento	Avançada
MS	1,13	0,8	1,84	2,9
Produção anual [GWh]	165	324	290	473
LCOE [US\$ c/kWh]	39,06	19,72	38,54	30,01
Fator de capacidade	18,8%	37,1%	33,1%	54,1%
Custos diretos de capital [milhões US\$]	466	422	850	1.095
Custos indiretos de capital [milhões US\$]	52	47	95	123
Total de custos de capital [milhões US\$]	518	469	945	1.218
Custo total instalado por potência [US\$/kW]	5.184	4.692	9.459	12.191

Resultados de operação (SAM): - plantas CSP

Plantas híbridas	CG		BJL	
	Base	Alternativo	Base	Alternativo
MS	0,8	0,8	0,72	0,87
Produção anual [GWh]	326	324	339	361
LCOE [US\$ c/kWh]	39,86	19,72	39,15	21,60
Fator de capacidade	37,3%	37,1%	38,7%	41,3%
Parcela da produção anual proveniente:				
do campo solar	43%	43%	42%	47%
da caldeira	57%	57%	58%	53%

Variação do custo nivelado da energia (LCOE) em função do MS e do custo do combustível de hibridização



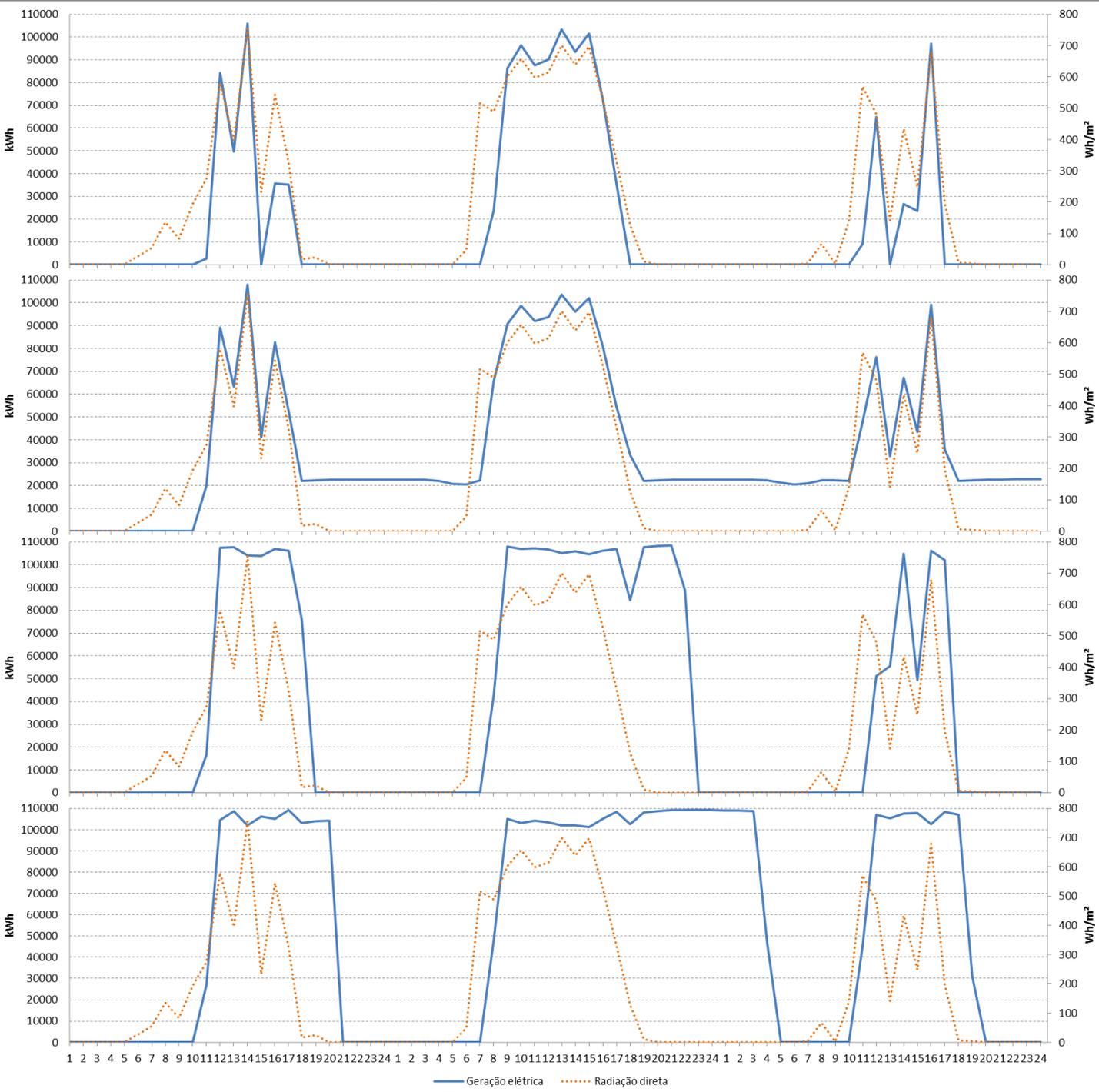
BJL Operação

Simplex →

Híbrida →

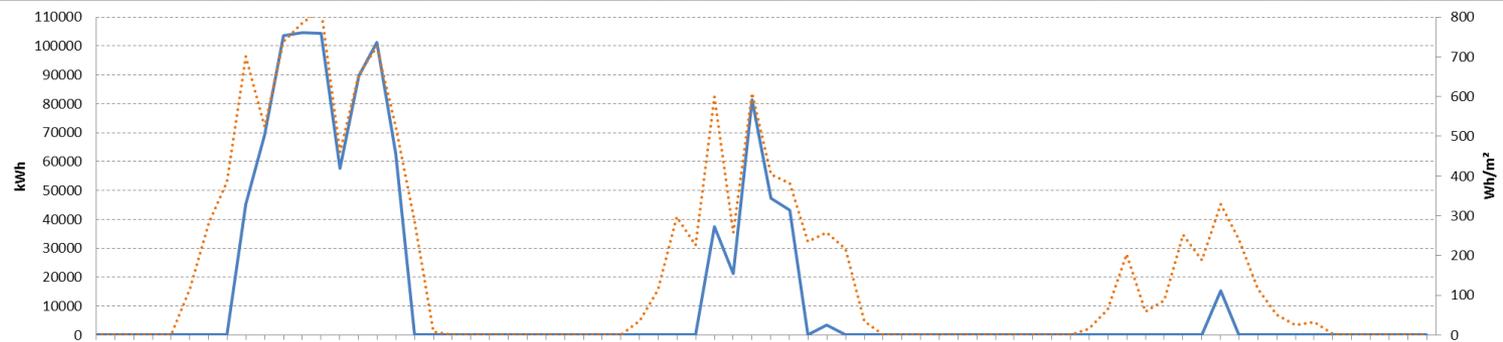
Armazenamento
6 horas →

Avançada
12 horas →

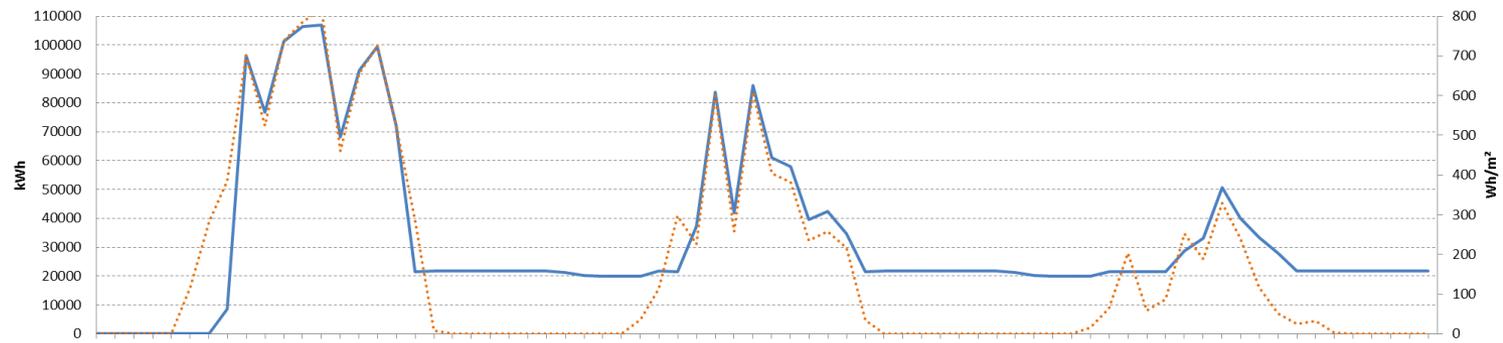


CG Operação

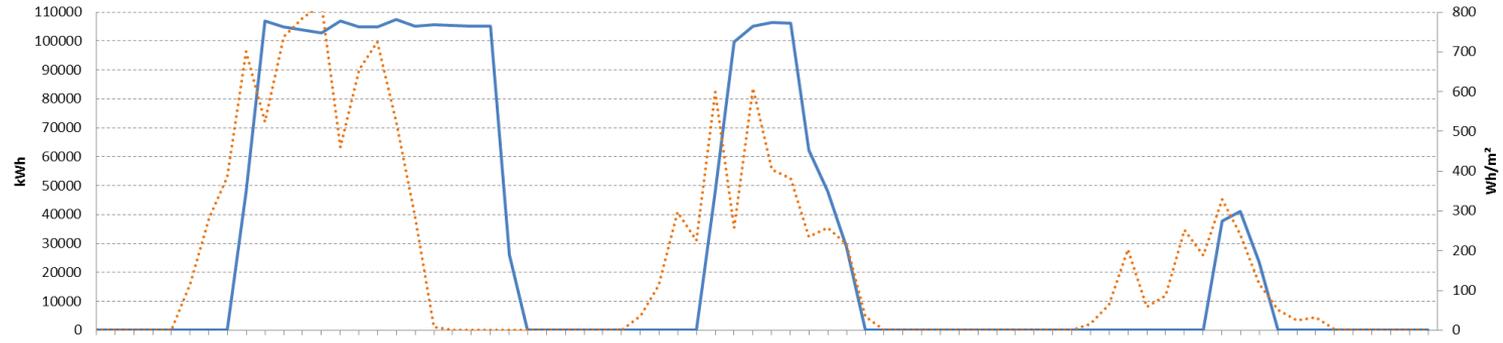
Simplex →



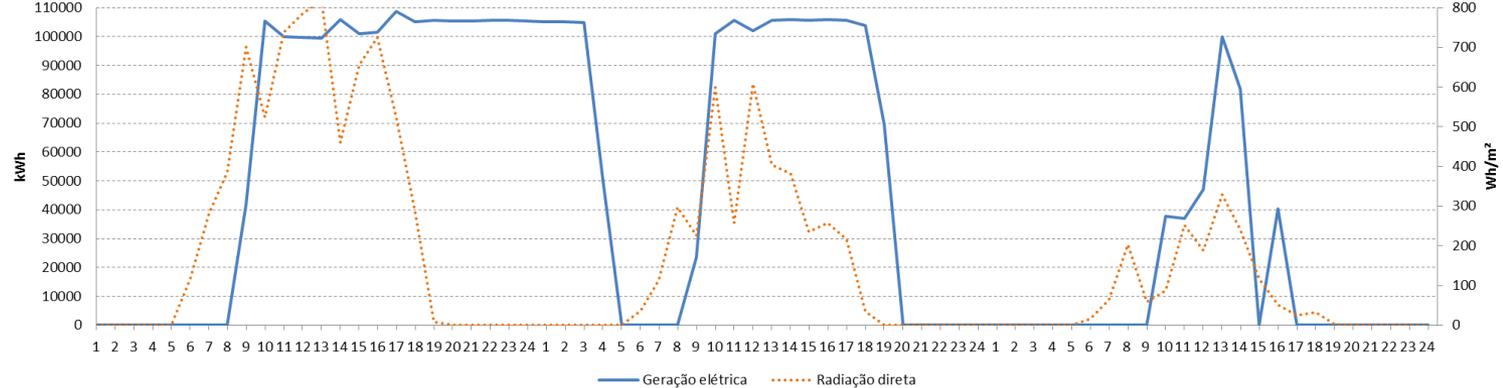
Híbrida →



Armazenamento
6 horas →



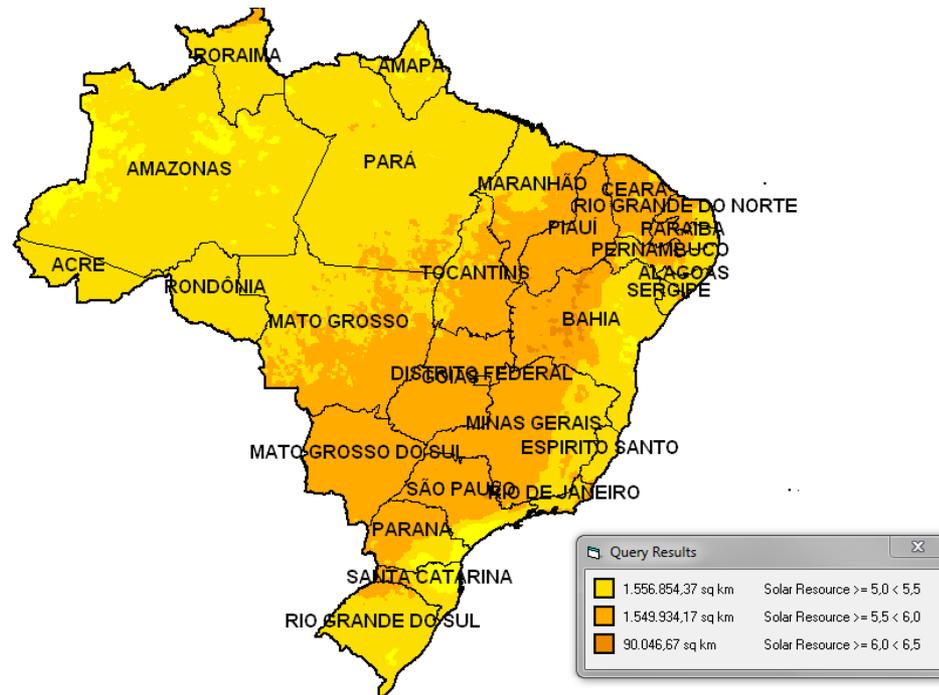
Avançada
12 horas →



Fotovoltaico (FV)

Potencial
Casos estudados

Recurso solar



- ▶ Referências (como ARVIZU et al, 2011) consideram valor mínimo de 1000 kWh(ano)/kW para viabilidade econômica, o que indica imenso potencial para o Brasil
- ▶ Nossas simulações resultaram em valores de 1500 kWh/kW, em áreas com irradiação de aproximadamente 5,4 kWh/m²/dia – ou mais de 1,5 milhões de km²

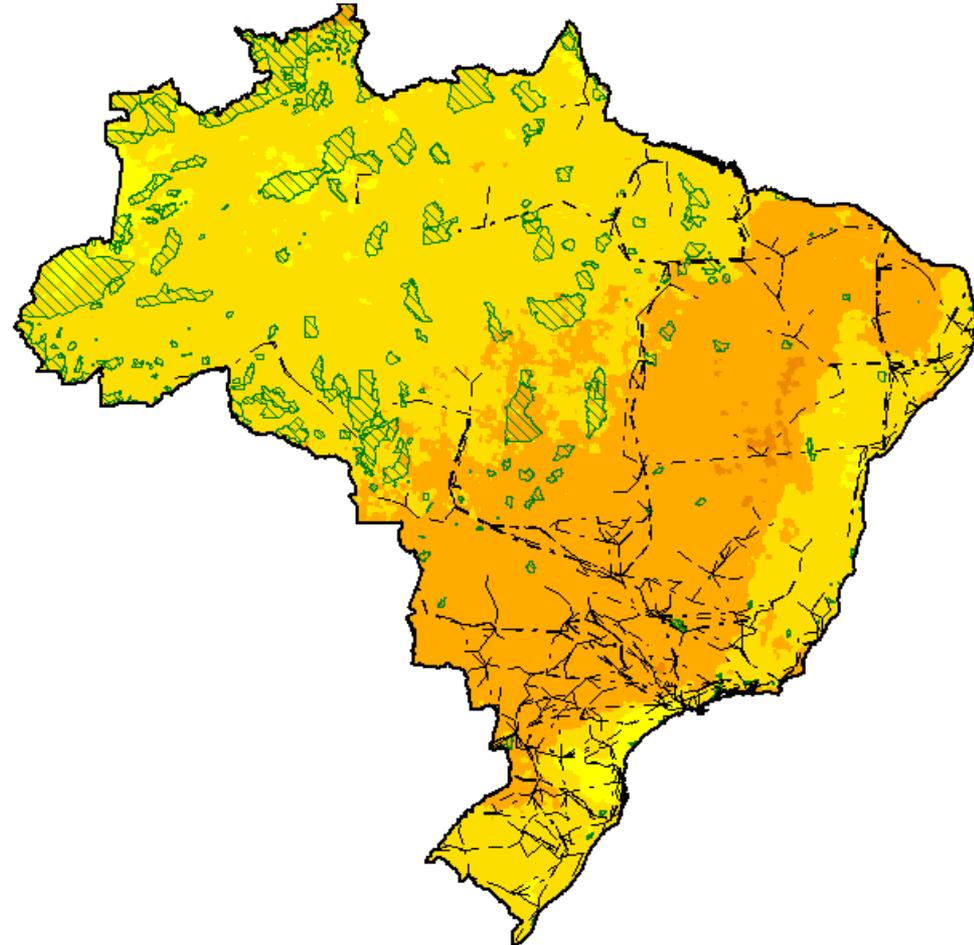
Potencial técnico

Sistemas fotovoltaicos:

- Aproveitam irradiação direta e difusa
- Pequena dependência de recursos hídricos
- Modularidade (menores ganhos de escala)

Premissas utilizadas:

- **Área de interesse: proximidade a rede básica 230 kV (faixa de 5 km)**
- **Potencial: 1,67% da área de interesse**
- **Densidade: 50 MW/km²**



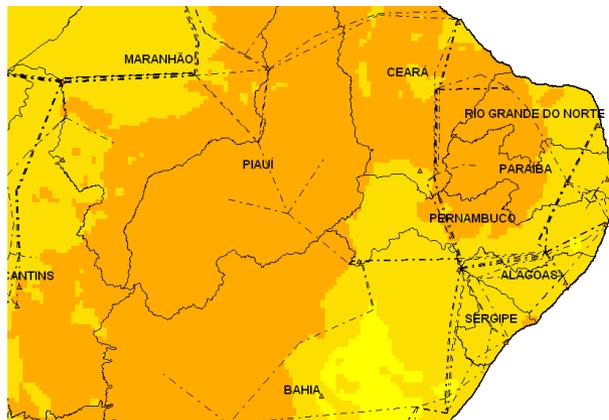
Potencial técnico

- ▶ Extensão SIN @ 230 kV:
43200 km
- ▶ Área de interesse:
 $1,67\% \times 43200 \text{ km} \times 10$
 $\text{km} = 7214 \text{ km}^2$
- ▶ **Potencial: 360 GW**



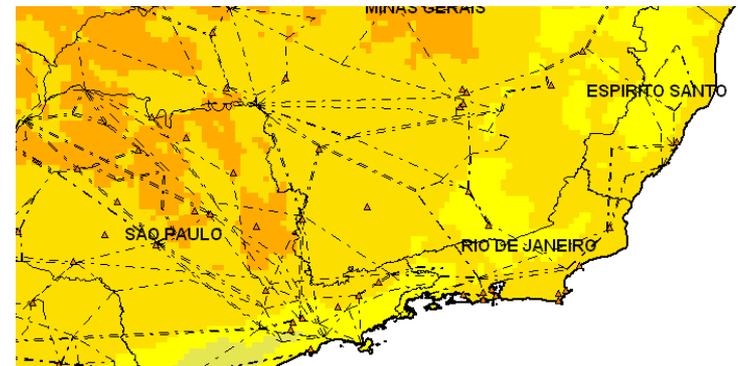
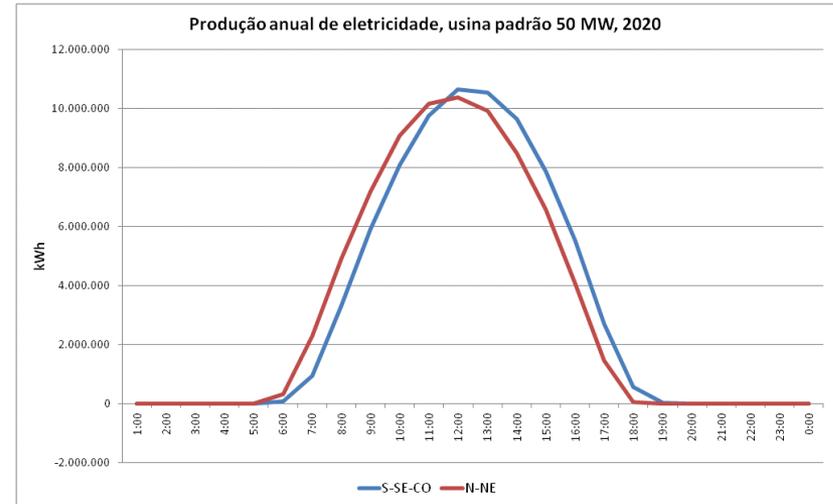
Casos

- Simulação para sistemas N-NE e S-SE-CO
- Usina padrão: 50 MW



RECIFE:

Posição central no sistema de transmissão NE



RIO DE JANEIRO:

Posição extrema no sistema de transmissão S/SE

Casos: sazonalidade

	Jan-Mar	Abr-Jun	Jul-Set	Out-Dez
24 - 06h	0%	0%	0%	1%
06 - 10h	30%	31%	31%	34%
10h - 18h	70%	68%	69%	65%
18h - 21h	0%	0%	0%	0%
21h - 24h	0%	0%	0%	0%

RECIFE

RIO DE JANEIRO

	Jan-Mar	Abr-Jun	Jul-Set	Out-Dez
24 - 06h	0%	0%	0%	0%
06 - 10h	23%	23%	23%	27%
10h - 18h	77%	77%	77%	72%
18h - 21h	0%	0%	0%	0%
21h - 24h	0%	0%	0%	0%

Horizonte

ITEM	2020	2030	2040
Pregomódulo (USD/kWDC)	1,95	1,23	0,85
Pregoinversor (USD/kWAC)	0,29	0,18	0,13
Eficiência do módulo (%)	13,5	19,4	21,1
Custo implantação (USD/kW)	4560	3600	3090

- ▶ Custos dos equipamentos principais (painéis e inversores)
- ▶ Eficiência
- ▶ Custo implantação

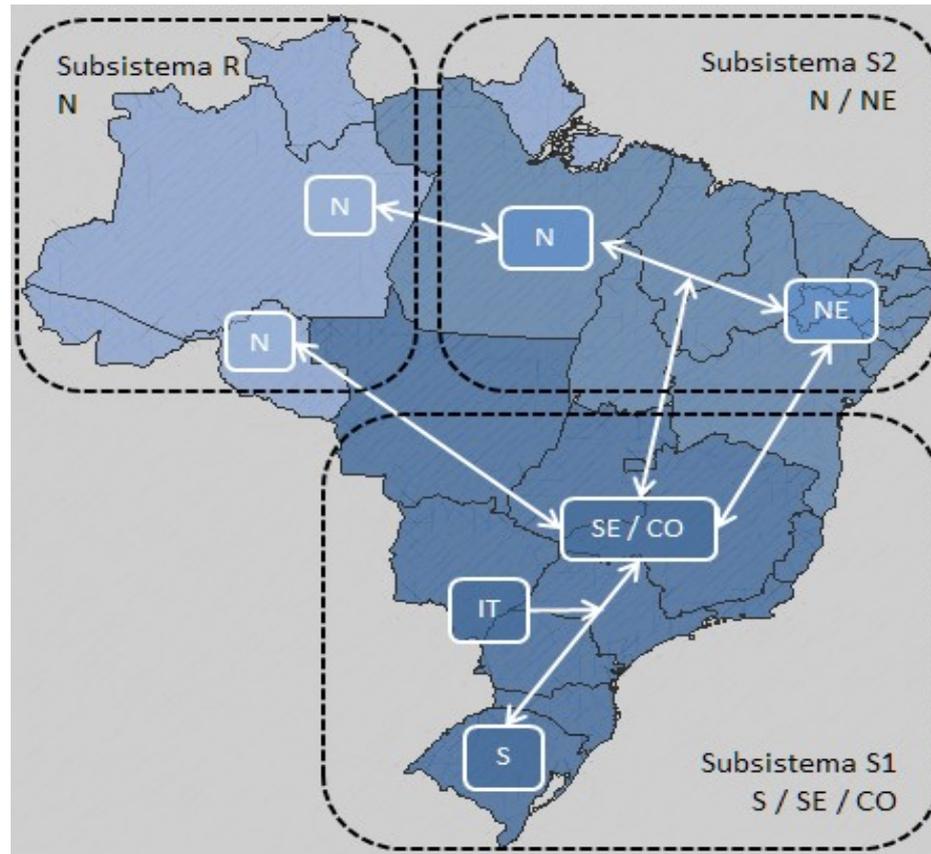
Custo nivelado da energia		2020	2030	2040
S-SECO	Normal	0,337	0,274	0,240
	Incentivo	0,320	0,237	0,205
N-NE	Normal	0,340	0,276	0,243
	Incentivo	0,299	0,239	0,207

- ▶ Custo nivelado (USD/kWh)

Otimização energética e impactos no SIN

Estudos de caso

Otimização do Sistema Energético Nacional



Interconexão do Sistema Elétrico Nacional no MESSAGE

Cenários de integração Solar/SIN



Cenário Base: Potência (GW)

GW	Bagaço	Carvão	Gás	Óleo Comb	Hidro	Diesel	Nuclear	Solar	Eólica	Total
2010	6	3	11	2	95	3	3	0	1	123
2015	11	5	21	2	103	3	3	0	4	152
2020	16	5	21	2	117	3	3	0	7	174
2025	22	5	29	2	117	3	4	0	9	191
2030	29	5	29	2	119	3	5	0	12	203
2035	34	5	29	2	136	3	6	0	14	229
2040	39	5	36	1	145	1	6	0	16	249

Cenário Base: Energia (TWh)

TWh	Bagaço	Carvão	Gás	Óleo Comb	Hidro	Diesel	Nuclear	Solar	Eólica	Total
2010	23	17	85	0	453	0	22	0	2	601
2015	46	36	128	0	466	0	22	0	9	707
2020	89	36	118	0	555	0	22	0	13	833
2025	135	36	178	0	555	0	30	0	19	954
2030	183	36	178	0	569	0	37	0	25	1.028
2035	222	36	178	0	654	0	45	0	30	1.165
2040	262	34	255	0	699	0	45	0	34	1.328

Cenário alternativo



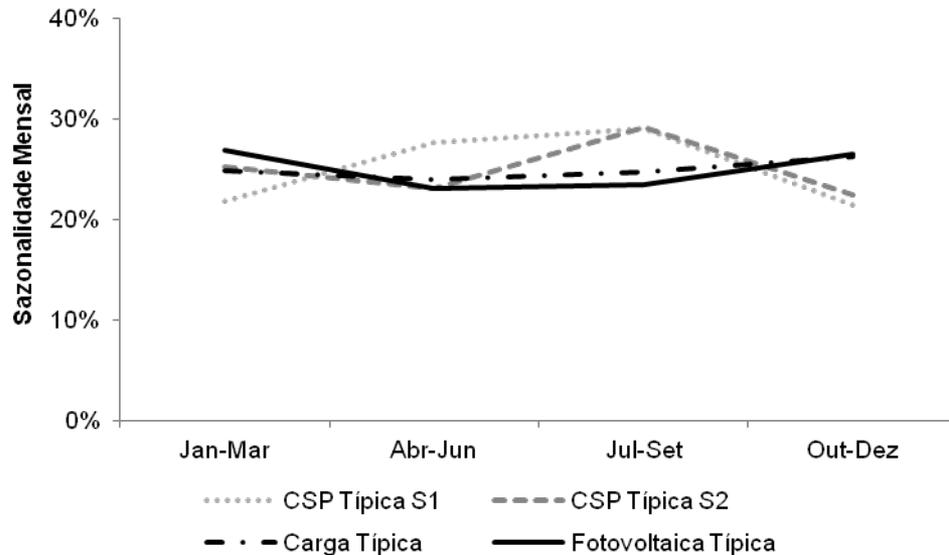
Capacidade Acumulada de Energia Solar no Brasil (MW)

	CSP 12h	CSP 6h	FV	CSP Híbrido	CSP Simples	Total
2015	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	100	800	0	900
2025	0	400	300	1.600	400	2.700
2030	800	800	500	2.000	400	4.500
2035	1.600	1.200	5.000	2.400	400	10.600
2040	1.600	2.400	10.000	2.800	400	17.200

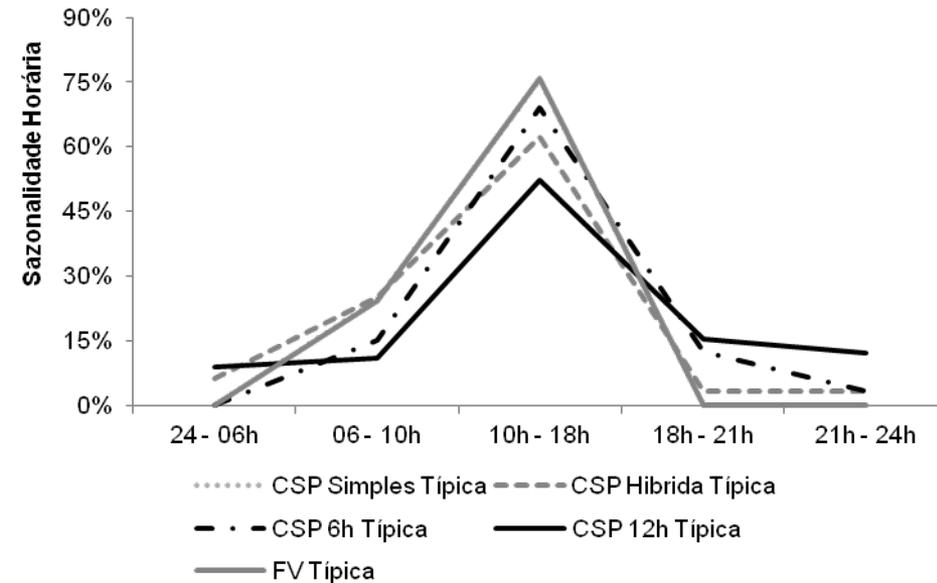
Varição de Potência em Relação ao Cenário Referência (MW)

	Bagaço	Carvão	Gás	Óleo Comb	Hidro	Nuclear	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	-210	0	0	0	900	0	690
2025	0	0	-709	0	0	0	2.700	0	1.991
2030	0	0	-709	0	-1.301	0	4.500	0	2.490
2035	0	0	-709	0	-3.769	0	10.600	0	6.122
2040	0	0	-937	0	-5.911	0	17.200	0	10.352

Otimização do Sistema Energético Nacional



Sazonalidade Mensal



Sazonalidade Horária

Cenário alternativo



Variação Custo de Investimento / Cenário Base (Mi US\$)

	Gas	Hidro	CSP 12h	CSP 6h	FV	CSP Hib	CSP Simples	Total
2015	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	-250	0	0	0	456	6.436	0	6.641
2025	-844	0	0	3.781	1.224	12.449	2.016	18.626
2030	-844	-3.268	7.633	7.561	1.800	15.697	2.016	30.595
2035	-844	-9.471	15.267	11.342	16.725	18.471	2.016	53.506
2040	-1.115	-14.854	15.267	22.684	30.900	21.473	2.016	76.370
						Custo Total		185.739

Variação custo total no ano / Cenário Base (Mi US\$)

	Gas	Hidro	CSP 12h	CSP 6h	FV	CSP Hib	CSP Simples	Total
2015	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	-385	0	0	0	54	2.302	0	1.972
2025	-1.366	0	0	688	148	4.560	378	4.408
2030	-1.530	-335	1.672	1.377	221	5.879	378	7.662
2035	-1.662	-970	3.344	2.065	2.078	6.817	378	12.051
2040	-2.245	-1.522	3.344	4.131	3.886	7.945	378	15.917

INSERÇÃO SOMENTE DAS PLANTAS CSP

Variações em relação ao cenário base - Brasil

Variação Potência (MW)

MW	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-187	0	800	0	613
2025	-650	0	2.400	0	1.750
2030	-650	-1.243	4.000	0	2.107
2035	-650	-2.398	5.600	0	2.552
2040	-431	-3.739	7.200	0	3.031

Variação Energia (GWh)

GWh	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-1.382	0	1.421	16	54
2025	-4.839	0	4.997	0	158
2030	-4.839	-6.273	11.493	0	381
2035	-4.839	-12.668	17.450	0	-57
2040	-3.207	-19.749	22.285	327	-344

Variação Transmissão (GWh)

GWh	S2 --> S1	R --> S1	R --> S2
2015	0	0	0
2020	0	79	460
2025	1.194	1.476	-1.476
2030	3.428	4.078	-4.078
2035	-518	1.373	-1.373
2040	-2.164	344	-344

INSERÇÃO SOMENTE DAS PLANTAS CSP

Variações em relação ao cenário base por regiões



Variação Potência – N/NE (S2)

MW	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	0	0	600	0	600
2025	0	0	1.800	0	1.800
2030	0	-196	3.000	0	2.804
2035	0	-2.398	4.200	0	1.802
2040	0	-3.739	5.400	0	1.661

Variação Potência – S/SE/CO (S1)

MW	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-187	0	200	0	13
2025	-650	0	600	0	-50
2030	-650	-1.047	1.000	0	-697
2035	-650	0	1.400	0	750
2040	-431	0	1.800	0	1.369

Variação Transmissão (GWh)

GWh	S2 --> S1	R --> S1	R --> S2
2015	0	0	0
2020	0	79	460
2025	1.194	1.476	-1.476
2030	3.428	4.078	-4.078
2035	-518	1.373	-1.373
2040	-2.164	344	-344

INSERÇÃO SOMENTE DAS PLANTAS PV

Variações em relação ao cenário base - Brasil

Variação Potência (MW)

Variação Energia (GWh)

	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-23	0	100	0	77
2025	-59	0	300	0	241
2030	-59	-58	500	0	383
2035	-59	-1.372	5.000	0	3.569
2040	-807	-1.696	10.000	0	7.497

	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-163	0	149	8	-7
2025	-440	0	447	0	7
2030	-440	-294	745	0	11
2035	-440	-7.246	7.446	0	-240
2040	-6.011	-8.957	14.892	0	-76

Variação Transmissão (GWh)

	S2 --> S1	R --> S1	R --> S2
2015	0	0	0
2020	0	-11	551
2025	37	66	-66
2030	97	148	-148
2035	-2.161	-1.123	1.123
2040	-1.552	117	-117

INSERÇÃO SOMENTE DAS PLANTAS PV

Variações em relação ao cenário base por regiões



Variação Potência – N/NE (S2)

MW	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	0	0	50	0	50
2025	0	0	150	0	150
2030	0	-22	250	0	228
2035	0	-1.372	2.500	0	1.128
2040	0	-1.696	5.000	0	3.304

Variação Potência – S/SE/CO (S1)

MW	Gás	Hidro	Solar	Eólica	Total
2015	0	0	0	0	0
2020	-23	0	50	0	27
2025	-59	0	150	0	91
2030	-59	-35	250	0	156
2035	-59	0	2.500	0	2.441
2040	-807	0	5.000	0	4.193

Variação Transmissão (GWh)

	S2 --> S1	R --> S1	R --> S2
2015	0	0	0
2020	0	-11	551
2025	37	66	-66
2030	97	148	-148
2035	-2.161	-1.123	1.123
2040	-1.552	117	-117

Políticas de incentivo

- ▶ Experiências em geração descentralizada: PRODEEM, Luz no Campo, Luz para Todos
- ▶ Não inclusão da energia solar no PROINFA
- ▶ PL 2952/2011: Propõe o Programa de Incentivo ao Aproveitamento da Energia Solar – PROSOLAR
 - Obrigação de aquisição, por concessionárias, da eletricidade gerada por central fotovoltaica de até 3 MW conectada à rede de distribuição;
 - Redução de 100% das tarifas dos usos dos sistemas de transmissão e distribuição, por 10 anos;
 - Permissão à União da concessão de incentivos tais como redução do Imposto sobre Produtos Industrializados – IPI, incidente sobre conversores, painéis fotovoltaicos e equipamentos complementares, até 2016;
 - Realização de leilões específicos para energia solar fotovoltaica e definição de cotas para energia solar nos leilões do setor elétrico;
 - Estabelecimento de metas nacionais de geração, iguais a 1% da matriz elétrica brasileira para os próximos 3 anos e de 3% em 5 anos.

- ▶ Pesquisa e Desenvolvimento:
 - Possibilidade de utilização de recursos financeiros regulados pela ANEEL
 - Chamada Pública 013/2011: PROJETO ESTRATÉGICO: “ARRANJOS TÉCNICOS E COMERCIAIS PARA INSERÇÃO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA”

Brasil: ideias

- ▶ Linhas de P&D específicas:
 - Armazenamento de calor
 - Transferência de tecnologias (coletores, inversores, módulos fotovoltaicos)
- ▶ Incentivos à construção de unidades de demonstração
- ▶ Realização de leilões específicos, com estabelecimento de condições para análise de projetos e precificação (similar à experiência com energia eólica)
 - Inclusive permissão para participação de usinas CSP híbridas, com participação decrescente da fração não solar
- ▶ Prêmio para térmicas a gás, conforme fração solar, em leilões A-3

Obrigado

Roberto Schaeffer

roberto@ppe.ufrj.br

Programa de Planejamento Energetico

PPE / COPPE / UFRJ