

CARACTERIZAÇÃO DE LOCALIDADES DO SEMI-ÁRIDO PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO HELIOTÉRMICO DE GERAÇÃO ELÉTRICA

Ana Paula Cardoso Guimarães – pcardoso@cepel.br

Leonardo dos Santos Reis Vieira – lsrv@cepel.br

Eduardo Torres Serra – etserra@cepel.br

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Sérgio Roberto F. C. de Melo – smelo@cepel.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Ney Guilherme Leal de Macedo – neyleal@chesf.gov.br

Eletrobras Chesf

1.2 Potencial Solar

Resumo. Neste trabalho são apresentados estudos e análises preliminares relativos à caracterização de sítios potenciais para a aplicação dos sistemas heliotérmicos de geração elétrica na região do semi-árido brasileiro. Foram considerados alguns sítios localizados às margens do rio São Francisco e algumas localidades do Estado da Paraíba. O objetivo principal é selecionar localidades que reúnem os requisitos necessários para a operação de uma planta com tecnologia de concentração solar interligada à rede elétrica. Para tanto, foi realizada uma análise comparativa de alguns sítios a partir dos seguintes critérios: i) irradiação direta normal calculada com base em modelos clássicos de estimativa utilizando dados solarimétricos das estações meteorológicas do INMET; ii) característica de intermitência ou perenidade do fluxo dos rios mais próximos; iii) existência de linhas de transmissão e subestação próximas aos sítios em questão; iv) existência de infra-estrutura de acesso local. A metodologia utilizada referente à obtenção dos dados de irradiação direta normal foi testada para a localidade de Bom Jesus da Lapa na Bahia. Algumas localidades apresentam níveis de irradiação semelhantes ao sul da Espanha onde estão sendo construídas usinas heliotérmicas. Nestas há disponibilidade de água, além de infra-estrutura adequada para a construção de uma planta de demonstração.

Palavras-chave: Irradiação direta normal, Tecnologia Heliotérmica de Concentração, Sítios Potenciais

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a região potencial para a aplicação da tecnologia heliotérmica de concentração é aquela delimitada pelo semi-árido, onde se verificam as melhores condições de irradiação solar direta, decorrentes da baixa intensidade de nuvens e dos baixos índices pluviométricos. Contudo, outros fatores são também importantes para viabilizar a implantação de uma planta solar deste tipo, entre eles: (i) disponibilidade de recursos hídricos para o processo de geração de energia elétrica baseado no ciclo Rankine e para a lavagem de espelhos; (ii) proximidade com a rede elétrica para os casos da interligação; (iii) existência de uma infraestrutura mínima para transporte de equipamentos e para manutenção da planta (Guimarães *et al*, 2002).

Dentro deste contexto, no período de 1999 a 2002, foi desenvolvido um projeto, denominado Gerahelio, em que um dos objetivos era a realização de um estudo para caracterização dos sítios potenciais na região do semi-árido (Guimarães *et al*, 2002). Como resultado deste estudo, foram obtidos mapas mensais e anual da distribuição espacial da irradiação direta normal na região e, ainda, foram relacionadas localidades que reúnem os requisitos necessários para a operação de uma planta com tecnologia de concentração solar interligada à rede elétrica. As localidades relacionadas naquele estudo restringiram-se às margens do rio São Francisco que possui a característica de fluxo permanente - restrita a poucos rios da região. Além disso, observam-se altos índices de irradiação solar incidente na maior parte do seu percurso. Para dar continuidade ao estudo, novas localidades pertencentes aos estados não banhados pelo rio São Francisco estão sendo analisadas.

No presente trabalho o objetivo é apresentar o procedimento e os resultados da avaliação preliminar realizada para algumas localidades do Estado da Paraíba, em especial aquelas cujas estações meteorológicas do INMET fizeram parte do universo de estudo do Gerahelio, além de uma reavaliação dos sítios relacionados anteriormente às margens do rio São Francisco. Além destas localidades específicas do Estado da Paraíba, foi também analisada a região onde está situado o Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Xingó, cuja área é destinada ao desenvolvimento de programas de pesquisa para inserção das tecnologias energéticas renováveis. Para a realização da análise comparativa referente à potencialidade das localidades escolhidas, os seguintes critérios foram adotados: os valores calculados da irradiação direta normal, a informação relativa à característica de intermitência ou perenidade do fluxo dos rios mais

próximos e a existência das linhas de transmissão, subestação, rodovias e aeroportos próximos aos sítios em questão. Não foram levadas em consideração outras questões de infraestrutura também desejáveis à construção de uma planta solar térmica de demonstração tais como a existência de instituições técnicas próximas (universidades ou escolas técnicas). Na Fig. 1 estão apresentadas as localidades que fizeram parte deste estudo.

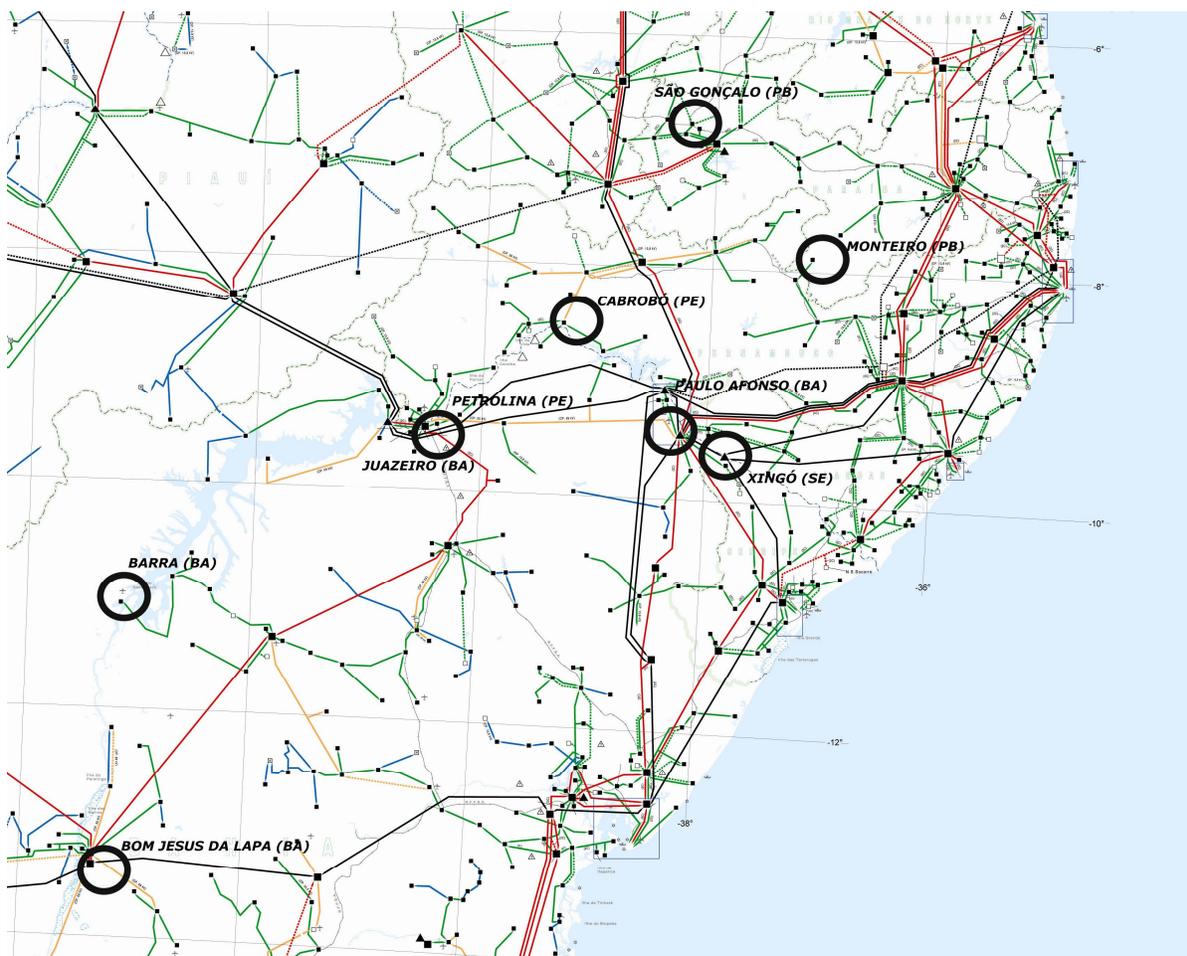


Figura 1 – Mapa das localidades consideradas nesta nota técnica

A metodologia utilizada e as tabelas contendo os valores estimados da irradiação direta normal para as localidades em estudo são apresentadas no item 2. Em seguida, no item 3, são apresentadas informações sobre os rios, as linhas de transmissão, as subestações e as rodovias de acesso para cada localidade. No item 4, os resultados obtidos são consolidados através de uma comparação global das localidades visando à possível implantação de uma planta de demonstração. Finalmente, no item 5, são apresentadas as conclusões finais.

2. ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL

Para a estimativa da irradiação direta normal no Estado da Paraíba, foram utilizados dados do número de horas de insolação de 4 estações meteorológicas pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) as quais fizeram parte do universo de estudo do mapeamento do recurso solar na região do semi-árido brasileiro (Guimarães *et al.*, 2002). É importante ressaltar que tais dados de insolação, medidos por Heliógrafo Campbell Stokes no período de 1960 a 1990, não quantificam a energia, contudo, são dados solarimétricos disponíveis em todas as estações do país e, portanto, são utilizados, através de modelos clássicos de estimativa, para calcular a energia solar incidente em uma superfície. No Estado da Paraíba não existem estações meteorológicas disponíveis que forneçam medidas da irradiação direta normal.

A metodologia desenvolvida para a obtenção dos dados da irradiação solar direta no plano de abertura dos concentradores, nas bases temporais horária e diária média mensal, calculados a partir do número de horas de insolação está baseada nos modelos clássicos apresentados no diagrama esquemático da Fig. 2. Os modelos matemáticos aplicados foram desenvolvidos por Nunes *et al.* (1976), Liu e Jordan (1960) e Collares-Pereira (1979 apud Duffie & Beckman, 1991)

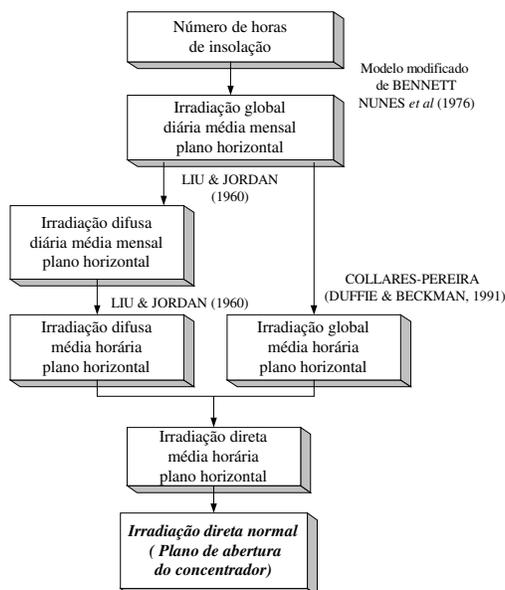


Figura 2 – Diagrama esquemático das etapas para a estimativa dos dados de irradiação direta no plano de abertura do concentrador solar.

De acordo com Duffie & Beckman (1991), as estimativas das componentes da irradiação direta normal através dos modelos terrestres clássicos utilizados na metodologia proposta apresentam erro anual variando no intervalo de 7 a 10%. No estudo de validação da metodologia proposta, apresentado no Relatório Técnico DG/1105/02 (Guimarães *et al.*, 2002) o erro médio anual relativo obtido foi de 7,58%, dentro da faixa esperada. O trabalho comparativo referente à validação da metodologia foi inicialmente desenvolvido para a estação de Bom Jesus da Lapa na Bahia. Nesta localidade foi possível obter medidas da irradiação direta e do número de horas de insolação para o mesmo período, através das estações da COELBA/CEPEL e 4º Distrito de Meteorologia do INMET.

Na Tab. 1 estão apresentados os valores resultantes da irradiação direta normal relativos às localidades escolhidas no Estado da Paraíba, nas quais estão instaladas as estações meteorológicas. Os maiores valores anuais acumulados na região ocorrem nas cidades de Monteiro e São Gonçalo, com irradiação anual acumulada de 1,99 MWh/m²/ano e 1,88 MWh/m²/ano, respectivamente.

Tabela 1 – Irradiação direta normal das localidades do Estado da Paraíba

Mês	Irradiação direta normal (kWh/m ² /dia)			
	Campina Grande	João Pessoa	Monteiro	São Gonçalo
Janeiro	5,99	5,72	6,02	5,76
Fevereiro	5,21	5,49	6,24	5,84
Março	4,65	4,71	5,37	5,04
Abril	4,23	4,05	4,69	4,43
Mai	3,96	3,79	4,38	4,00
Junho	3,63	3,64	4,32	3,95
Julho	3,08	3,17	4,53	4,18
Agosto	3,66	4,38	5,55	5,20
Setembro	4,38	5,12	5,88	5,62
Outubro	4,94	6,37	6,55	6,23
Novembro	5,58	6,73	5,53	5,29
Dezembro	5,17	5,45	6,48	6,20
Média anual	4,54	4,89	5,46	5,15
Desvio padrão	0,87	1,12	0,81	0,83
Anual acumulada (kWh/m ² /ano)	1.657,00	1.783,00	1.993,00	1.878,00

O Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Xingó está localizado no município de Canindé de São Francisco em Sergipe, onde não existem estações meteorológicas para a aplicação da mesma metodologia utilizada na construção da Tab. 1. Desta forma, para a localidade de Xingó foram adotados os seguintes procedimentos: (i) estimativa da irradiação com base no método indicado na Fig. 2 a partir das horas de insolação na localidade de Paulo Afonso na Bahia, distante 55 km de Canindé de São Francisco (Xingó) e (ii) cálculo da irradiação direta normal para a

localidade específica de Canindé de São Francisco a partir de dados da irradiação global e componente difusa no plano horizontal estimados por modelos baseados em imagens de satélite obtidos no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006). O procedimento (i) é justificado, pois na composição dos mapas mensais e anuais do semi-árido indicados no Relatório Técnico N° DG/1105/02 (Guimaraes *et al*, 2002), as localidades de Xingó e Paulo Afonso estão contidas na mesma faixa de valores.

Os valores da energia incidentes em Paulo Afonso (BA), utilizando dados base da rede de estação meteorológica INMET, e aqueles incidentes em Canindé de São Francisco (Instituto Xingó), utilizando dados base do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) estão apresentados na Tab.2. É importante ressaltar que tais resultados não devem ser comparados diretamente, pois decorrem de avaliações efetuadas com dados de origem relativos a diferentes períodos de medição. Porém, as avaliações fornecem estimativas, para a localidade do Instituto Xingó, que permitem a realização de uma análise comparativa preliminar com os outros sítios potenciais. Os valores da irradiação solar acumulada anual encontram-se na faixa de 1,73 a 1,83 MWh/m²/ano.

Tabela 2 – Irradiação direta normal das localidades de Paulo Afonso (BA) e Canindé de São Francisco (SE), ambas representando o Instituto Xingó.

Mês	Irradiação Direta Normal (kWh/m ² /dia)	
	Paulo Afonso (BA) (55 km distante do Instituto Xingó)	Canindé de São Francisco (SE) (Instituto Xingó)
Janeiro	5,62	6,70
Fevereiro	5,37	5,23
Março	4,89	5,00
Abril	4,81	4,26
Mai	4,04	4,20
Junho	3,73	3,50
Julho	3,97	3,40
Agosto	4,65	3,75
Setembro	5,10	4,30
Outubro	6,11	5,50
Novembro	6,22	5,57
Dezembro	5,53	5,60
Média anual	5,00	4,75
Desvio padrão	0,81	1,01
Anual acumulada (kWh/m ² /ano)	1.825,00	1.734,00

Na Tab. 3, estão apresentados os valores da irradiação direta normal (diária média mensal, média anual e anual acumulada) dos sítios localizados às margens do Rio São Francisco, os quais fizeram parte da seleção no estudo realizado no Projeto Gerahelio.

Tabela 3 – Irradiação direta normal dos sítios selecionados no Projeto Gerahelio.

Mês	Irradiação Direta Normal (kWh/m ² /dia)				
	Barra (BA)	Petrolina (PE)	Cabrobó (PE)	Bom Jesus da Lapa (BA)	Juazeiro (BA)
Janeiro	6,56	5,85	5,89	5,45	5,77
Fevereiro	6,34	5,82	5,51	5,15	5,65
Março	5,50	5,34	5,50	5,80	5,10
Abril	5,18	5,01	4,64	5,23	5,33
Mai	4,51	4,87	4,91	5,87	4,95
Junho	4,20	4,45	4,17	5,26	4,70
Julho	5,19	5,10	4,96	6,20	4,75
Agosto	5,05	5,80	4,98	6,29	5,21
Setembro	6,46	6,06	5,63	5,45	5,51
Outubro	6,60	6,42	6,75	5,69	6,59
Novembro	7,65	6,48	6,88	4,72	5,82
Dezembro	7,14	5,93	6,12	4,42	5,84
Média anual	5,86	5,59	5,49	5,46	5,43
Desvio padrão	1,11	0,64	0,82	0,56	1,11
Anual acumulada (kWh/m ² /ano)	2.140,12	2.041,84	2.005,34	1.993,14	1.983,68

A Fig. 3 apresenta os dados de irradiação solar anual acumulada em kWh/m²/ano, calculada a partir do número de horas de insolação para todas as localidades avaliadas. São representadas, ainda, as barras de erro, para cada localidade, correspondentes a um desvio padrão da média mensal de um dia para mais e para menos multiplicado por 365. Para comparação, são registrados os valores de irradiação solar acumulada de duas localidades onde existem plantas solares com concentração: deserto de Mojave (EUA) e sul da Espanha, com irradiações de 2800 kWh/m²/ano e 2100 kWh/m²/ano, respectivamente (Reilly *et al*, 2001). Observa-se que nenhuma localidade apresenta níveis de irradiação comparáveis aos do deserto de Mojave (EUA), porém algumas são comparáveis aos do sul da Espanha. Com relação aos índices de irradiação, podem-se dividir as localidades em três grupos. No primeiro grupo encontra-se a localidade com maior nível de irradiação que é Barra (BA). O segundo grupo compreende as localidades de Petrolina (PE), Cabrobó (PE), Monteiro (PB), Bom Jesus da Lapa (BA) e Juazeiro (BA) com valores de irradiação semelhantes. No terceiro grupo encontram-se as localidades de menor irradiação entre as localidades consideradas: São Gonçalo (PB), Paulo Afonso (BA), João Pessoa (PB) e Campina Grande (PB).

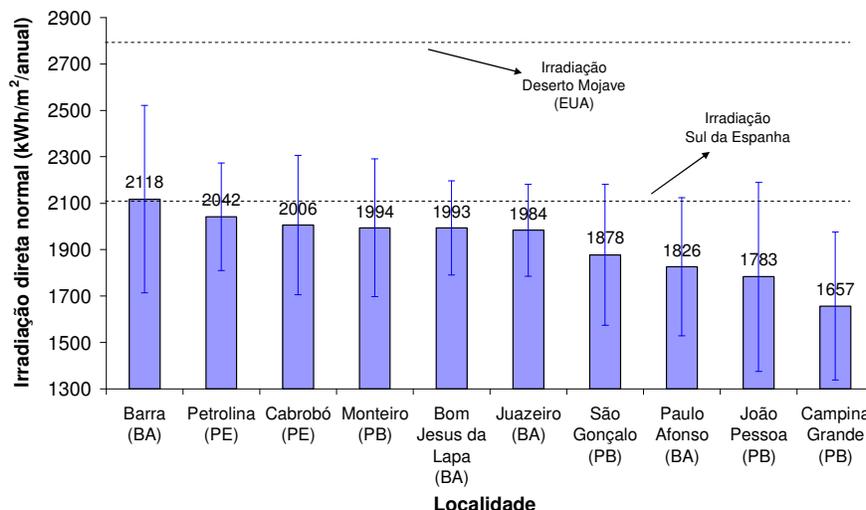


Figura 3 – Irradiação solar anual acumulada para diversas localidades e barras de erros correspondentes ao desvio padrão da média mensal.

A Fig. 4 apresenta os dados de irradiação solar anual acumulada de cada localidade em valor percentual com relação à irradiação da melhor localidade encontrada (Barra – BA). Observa-se que a irradiação em Barra é cerca de 5% superior à irradiação das localidades do segundo grupo, e cerca de 15% superior à média de irradiação das localidades do grupo 3.

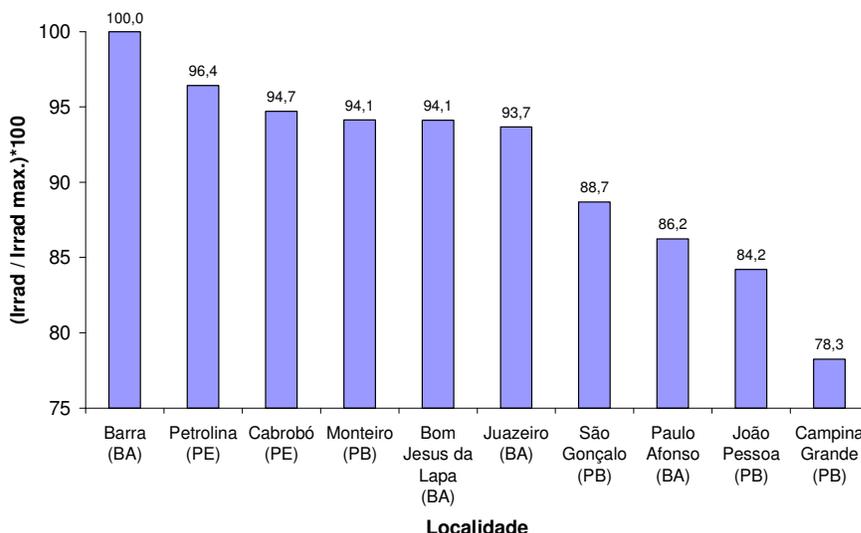


Figura 4 – Valor percentual da irradiação solar anual acumulada para diversas localidades.

A Fig. 5 apresenta o coeficiente de variação expresso em porcentagem, definido pela razão entre desvio padrão e média, da irradiação solar média mensal de cada localidade. Este coeficiente fornece uma estimativa da variação da irradiação direta normal ao longo do ano. Valores elevados do coeficiente de variação podem indicar uma maior necessidade de combustível auxiliar para a operação de uma planta solar. Observa-se que João Pessoa (PB) e Campina Grande (PB) são as localidades que apresentam maiores variações da irradiação ao longo do ano. Além disso, estas localidades apresentam menor irradiação anual (Fig. 3).

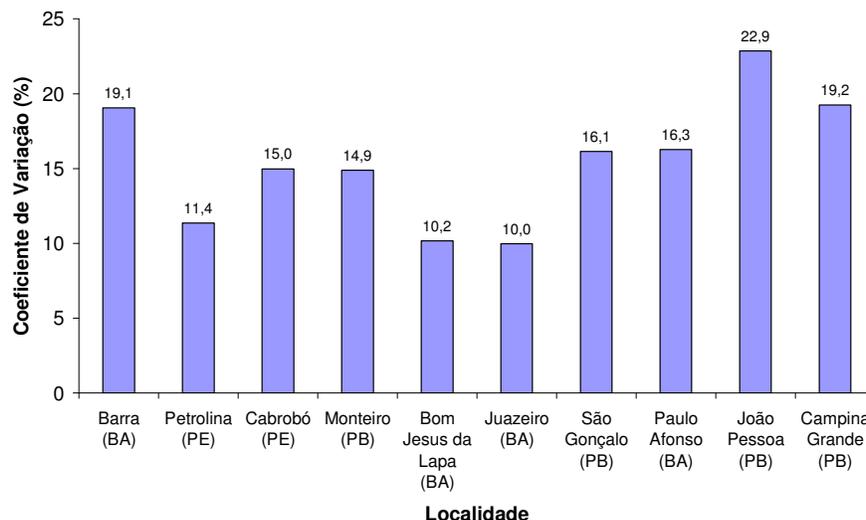


Figura 5 – Coeficiente de variação da irradiação solar média mensal para diversas localidades.

3. INFORMAÇÕES SOBRE RIOS, LINHAS DE TRANSMISSÃO, SUBESTAÇÃO E RODOVIAS DE ACESSO REFERENTES A CADA LOCALIDADE

Neste item são levantadas informações sobre rios, linhas de transmissão, subestações e rodovias de acesso e aeroportos para cada localidade em estudo. Conforme mencionado anteriormente, esses itens são necessários para a implantação de uma planta solar heliotérmica de concentração interligada a rede. Estas informações foram obtidas do Mapa do Sistema Elétrico da Região Nordeste (2009), elaborado pela CHESF. Para exemplificar, na Fig. 6 é apresentada a legenda do Mapa do Sistema Elétrico e nas Figs. 7 e 8 são apresentados cortes deste mapa para as localidades de Barra e Petrolina (as quais apresentam os maiores índices de irradiação direta normal no estudo). Nestas figuras, os rios ou lagos são classificados em perenes ou intermitentes e as rodovias são classificadas em pavimentadas ou não. Fazendo-se uma superposição deste mapa com os mapas rodoviários dos estados em que se encontram as localidades em estudo foi possível classificar, ainda, as rodovias em estadual ou federal (DNIT, 2007). Além disso, ainda nestes mapas, foi observada a existência ou não de aeroportos nas localidades em estudo.



Figura 6 – Legenda referente aos mapas das Figuras 7 e 8

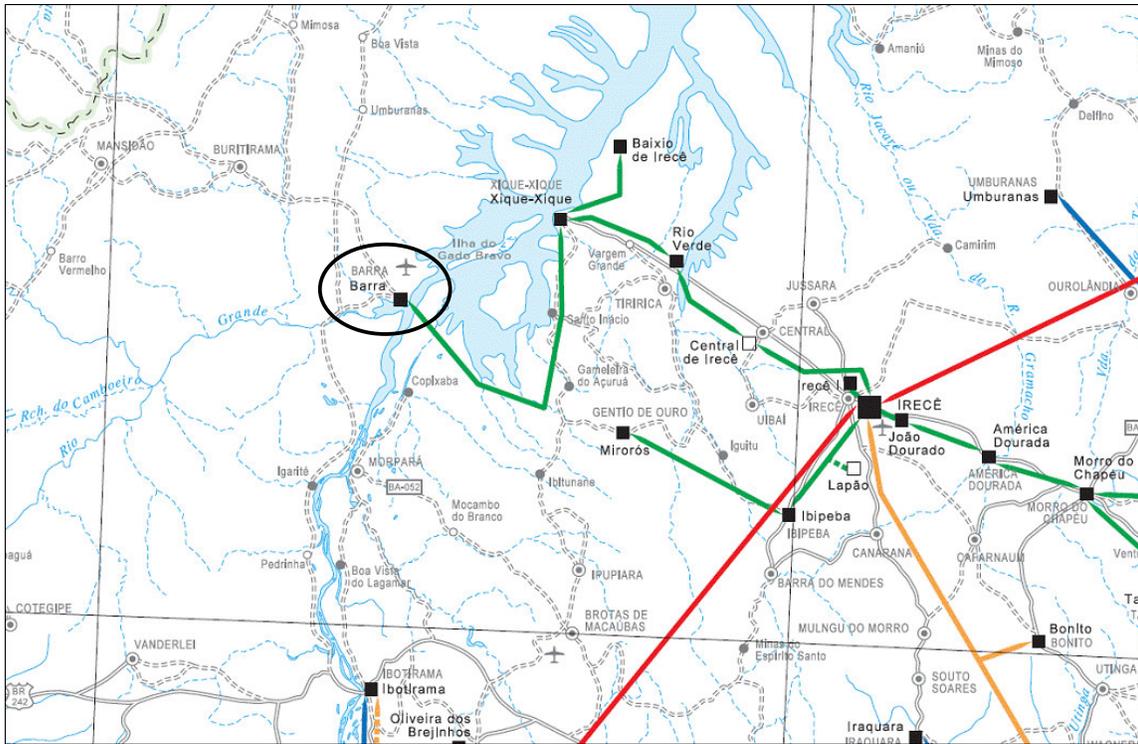


Figura 7 - Mapa da localidade de Barra - BA

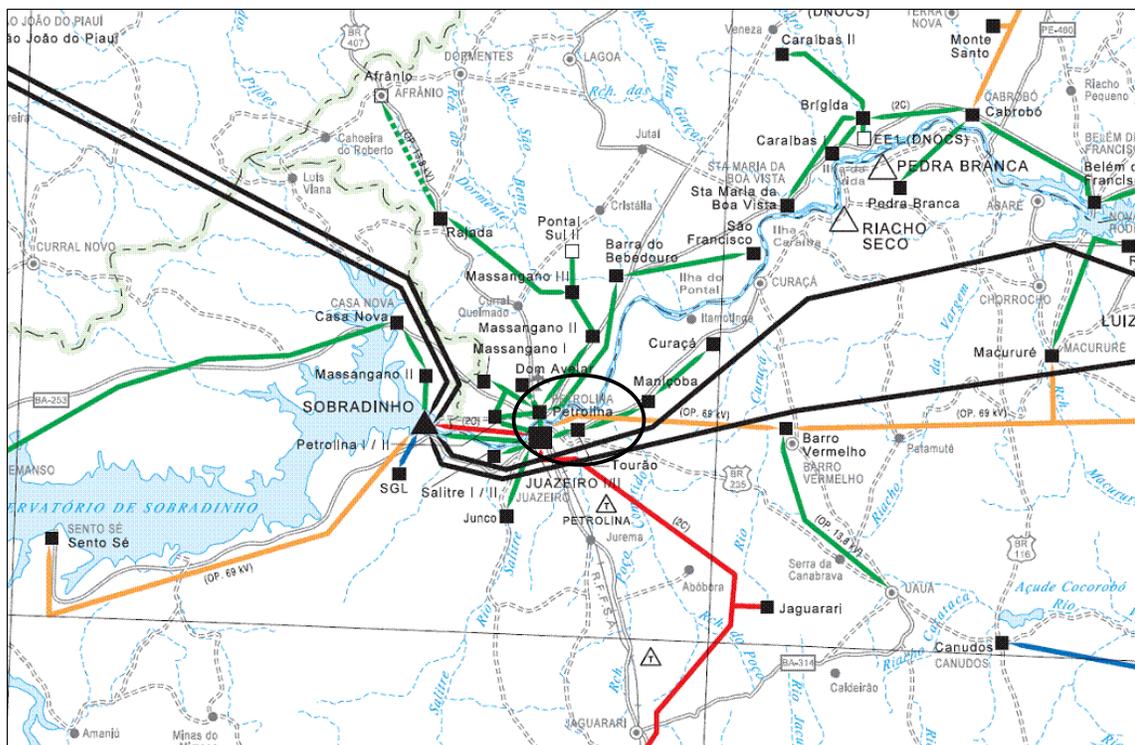


Figura 8 – Mapa da localidade de Petrolina - PE

Conforme já mencionado, a viabilidade da implantação de uma planta solar depende da disponibilidade de recursos hídricos para o processo de geração de energia elétrica baseado no ciclo Rankine e também para lavagem de espelhos. Através do programa IPSE-pro, (SimTech, 2000) foi feita uma simulação simplificada do ciclo Rankine, utilizando torres de resfriamento do tipo úmida, para uma planta de 2,5 MWe. Estima-se que o consumo de água para reposição na torre de resfriamento do tipo úmida seja de $2,63 \text{ m}^3/\text{MWh}$, correspondente a 1,5% da vazão total na torre. Para o ciclo Rankine é estimada uma vazão de reposição de $0,12$ a $0,13 \text{ m}^3/\text{MWh}$, correspondente a 2% da vazão total do ciclo. Os valores obtidos nas simulações são semelhantes aos reportados no relatório técnico da Sargent & Lundy (2003) (reposição de $2,9 \text{ m}^3/\text{MWh}$ na torre de resfriamento e $0,17 \text{ m}^3/\text{MWh}$ no ciclo Rankine) e aqueles calculados por Perry *et al* (1999) nas mesmas condições utilizadas nas simulações com o IPSE-pro (reposição de 2,8% e 2,3% na torre de resfriamento do tipo úmida). Ressalta-se que os valores de reposição da água do ciclo térmico, aqui estimados, são típicos e podem aumentar consideravelmente se a água de reposição for de má qualidade, podendo chegar a valores de até 20% (GE Power & Water, 2010).

Na Tab. 4 é apresentado um quadro das informações dos rios, das linhas de transmissão, das subestações, das rodovias de acesso e aeroportos referentes a cada localidade.

Tabela 4– Informações sobre rios, linhas de transmissão, subestações, rodovias e aeroportos para cada localidade.

Localidade	Rio	Linha de Transmissão	Subestação	Rodovia	Aeroporto
Barra (BA)	Rio São Francisco - perene	69 kV	sim	estadual (BA160) pavimentada	administrado pelo Estado
Petrolina (PE)	Rio São Francisco - perene	69 kV e 138 kV	sim	federal (BR122, BR235 e BR407) e estadual (PE626, PE655) pavimentadas	administrado pela Infraero
Cabrobó (PE)	Rio São Francisco - perene	69 kV	sim	federal (BR428, BR326) e estadual (BA700) pavimentadas	-
Monteiro (PB)	Rio Paraíba - intermitente	69 kV e 138 kV	sim	federal (BR412) pavimentada e estadual (PB264) em pavimentação	administrado pelo Estado
Bom Jesus da Lapa (BA)	Rio São Francisco - perene	69 kV e 138 kV	sim	federal (BR349) e estadual (BA160, BA430) pavimentadas	administrado pelo Estado
Juazeiro (BA)	Rio São Francisco - perene	69 kV e 138 kV	sim	federal (BR235, BR423, 407) e estadual (BA210) pavimentadas	-
São Gonçalo (PB)	Rio Piranhas - perene	69 kV	sim	federal (BR230) pavimentada e estadual (PB348) em pavimentação	-
Paulo Afonso (BA)	Rio São Francisco - perene	69 kV	sim	federal (BR110) e estadual (BA210) pavimentadas	administrado pela Infraero
João Pessoa (PB)	Rio Paraíba - perene	69 kV e 230 kV	sim	federal (BR101/230) e estadual (PB030) pavimentadas	administrado pela Infraero
Campina Grande (PB)	Rio São Pedro - intermitente	69 kV	sim	federal (BR230/412) e estadual (PB102/104) pavimentadas	administrado pela Infraero

4. CONSOLIDAÇÃO DAS INFORMAÇÕES VISANDO À IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA DE DEMONSTRAÇÃO

O aproveitamento da energia solar a partir de tecnologias de CSP requer níveis elevados de irradiação direta, condições topográficas adequadas, ventos de baixa velocidade e, para as aplicações de grande porte, é importante haver disponibilidade de infraestrutura de acesso (rodovias), disponibilidade de água para os sistemas convencionais de geração de vapor e para limpeza dos espelhos, além de acesso ao sistema interligado para conexão à rede.

Em relação à incidência de irradiação direta, todos os sítios, com exceção de Campina Grande (PB), apresentam condições de operação de um sistema heliotérmico para geração de energia elétrica, uma vez que os valores anuais acumulados da energia estão na faixa de 1,78 MWh/m²/ano a 2,14 MWh/m²/ano e os valores máximos de irradiação

(irradiação anual média acrescida do desvio padrão) são superiores a 2,1 MWh/m²/ano. Nota-se que, embora a localidade de Barra (BA) apresente coeficiente de variação da irradiação semelhante aos de Campina Grande e João Pessoa, os valores de irradiação direta normal acumulada no ano são os maiores encontrados (2,14 MWh/m²/ano) dentre todos os sítios analisados. Ressalta-se que as áreas que abrigam as maiores plantas com concentrador solar em operação no mundo, estão na região de Mojave nos Estados Unidos e no sul da Espanha, onde os valores da irradiação direta normal anual são de 2,8 MWh/m² e 2,1 MWh/m², respectivamente (Reilly *et al.*, 2001).

Em relação à disponibilidade de água, todos os sítios avaliados estão localizados às margens de rios que possuem fluxos permanentes, com exceção de Monteiro (PB) que está localizado às margens do Rio Paraíba e Campina Grande (PB), cujo rio mais próximo é o Rio São Pedro, ambos com fluxo intermitente. Em relação à possibilidade de interligação à rede elétrica, em todas as localidades estudadas existem linhas de transmissão com tensão de 69 KV e subestações transformadoras de propriedade da CHESF. Além disso, em todas as localidades estudadas existe infraestrutura de acesso através de rodovias federais e estaduais pavimentadas, com exceção de Barra (BA) que possui apenas rodovia estadual pavimentada e Monteiro (PB) e São Gonçalo (PB) que possuem apenas rodovias federais pavimentadas. As rodovias estaduais existentes em ambas as localidades do Estado da Paraíba estão em pavimentação. Com relação aos aeroportos, apenas as localidades de Cabrobó (PE) e São Gonçalo (PB) não possuem aeroportos locais. A localidade de Juazeiro (BA), embora não possua aeroporto, encontra-se próxima de Petrolina (PE), que possui aeroporto local. Na Tab. 5 está apresentado um resumo geral das informações obtidas para os sítios potenciais analisados.

Tabela 5 – Resumo das informações dos sítios potenciais em análise para implantação de planta piloto heliotérmica de concentração solar.

Sítios Potenciais	Justificativas
Barra (BA)	Irradiação Direta Anual = 2,14 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 19,1 % Linhas de Transmissão de 69kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia estadual pavimentada Aeroporto administrado pelo Estado
Petrolina (PE)	Irradiação Direta Anual = 2,04 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 11,4 % Linhas de Transmissão de 69 kV e 138 kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia federal e estadual pavimentadas Aeroporto administrado pela Infraero
Cabrobó (PE)	Irradiação Direta Anual = 2,00 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 15,0 % Linhas de Transmissão de 69 kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia federal e estadual pavimentadas Não possui aeroporto
Monteiro (PB)	Irradiação Direta Anual = 1,99 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 14,9 % Linhas de Transmissão de 69 kV e 138 kV Disponibilidade de Subestação Rio Paraíba – fluxo intermitente Rodovia federal pavimentada e estadual em pavimentação Aeroporto administrado pelo Estado
Bom Jesus da Lapa (BA)	Irradiação Direta Anual = 1,99 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 10,2 % Linhas de Transmissão de 69kV e 138kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia federal e estadual pavimentadas Aeroporto administrado pelo Estado

continuação da Tabela 5

Sítios Potenciais	Justificativas
Juazeiro (BA)	Irradiação Direta Anual = 1,98 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 10,0 % Linhas de Transmissão de 69 kV e 138 kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia federal e estadual pavimentadas Não possui aeroporto
São Gonçalo (PB)	Irradiação Direta Anual = 1,88 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 16,1 % Linhas de Transmissão de 69 kV Disponibilidade de Subestação Rio Piranhas – fluxo perene Rodovia federal pavimentada e estadual em pavimentação Não possui aeroporto
Paulo Afonso (BA)	Irradiação Direta Anual = 1,83 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 16,3 % Linhas de Transmissão de 69 kV Disponibilidade de Subestação Rio São Francisco – fluxo perene Rodovia federal e estadual pavimentadas Aeroporto administrado pela Infraero
João Pessoa (PB)	Irradiação Direta Anual = 1,78 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 22,9 % Linhas de Transmissão de 69 e 230 kV Disponibilidade de Subestação Rio Paraíba – fluxo perene Rodovia federal pavimentada e estadual pavimentadas Aeroporto administrado pela Infraero
Campina Grande (PB)	Irradiação Direta Anual = 1,66 MWh/m ² Coeficiente de variação média mensal = 19,2 % Linhas de Transmissão de 69 kV Disponibilidade de Subestação Rio São Pedro – fluxo intermitente Rodovia federal e estadual pavimentadas Aeroporto administrado pela Infraero

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise preliminar da potencialidade de algumas localidades no nordeste do Brasil escolhidas com base em índices calculados de irradiação direta normal, em informações relativas à característica de intermitência ou perenidade do fluxo de rios e na existência das linhas de transmissão e subestação próximas aos sítios em questão. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos no Projeto Gerahelio. Inicialmente, foram consideradas algumas localidades do Estado da Paraíba e também a região onde está situado o Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Xingó, cuja área é destinada ao desenvolvimento de programas de pesquisa para inserção das tecnologias energéticas renováveis. Com base no levantamento realizado pode-se concluir que:

- A maior parte das localidades avaliadas apresenta índices de irradiação direta normal compatíveis para a implantação de uma usina heliotérmica de geração de energia elétrica. As localidades com menores índices de irradiação são João Pessoa (PB) e Campina Grande (PB).
- Todas as localidades avaliadas apresentam disponibilidade de água em rios perenes, com exceção de Monteiro (PB) e Campina Grande (PB) cujos rios mais próximos são intermitentes. A indisponibilidade de suprimento contínuo de água implica na utilização de torre seca no ciclo Rankine acarretando aumento de custo de implantação e redução de eficiência na geração de energia elétrica, porém não impede a instalação de uma planta solar térmica.

- Todas as localidades apresentam linhas de transmissão de 69 kV, subestações transformadoras e rodovias pavimentadas.
- Dentre as localidades avaliadas, do ponto de vista da irradiação, os sítios mais adequados por ordem de mérito para instalação de um projeto de demonstração de geração heliotérmica seriam Petrolina (PE), Bom Jesus da Lapa (BA) e Juazeiro (BA). Estas localidades apresentam níveis elevados de irradiação direta, baixo coeficiente de variação anual e atendem os quesitos de existência de subestações de conexão, disponibilidade de água e acessibilidade por rodovias e aeroportos, com exceção de Juazeiro (BA) que não possui aeroporto local.
- A localidade de Cabrobó (PE), a menos do coeficiente de variação da irradiação anual, apresenta características semelhantes às de Petrolina, Bom Jesus da Lapa e Juazeiro.
- No Estado da Paraíba, embora a localidade de São Gonçalo (PB), seja a mais indicada para implantação de uma planta piloto heliotérmica de geração de energia elétrica, ela apresenta irradiação anual acumulada cerca de 10% inferior às dos sítios mais promissores e, também, um coeficiente de variação anual elevado.
- A localidade de Canindé de São Francisco (SE) possui como vantagem abrigar o Centro Tecnológico de Xingó, entretanto possui valor de irradiação anual superior apenas a de João Pessoa e a de Campina Grande, além de apresentar um coeficiente de variação anual elevado.

Diante dos resultados obtidos conclui-se que o território brasileiro possui uma área privilegiada para a implantação de usinas heliotérmicas para geração de energia elétrica. Entretanto, a priorização final das localidades nesta região requer a atualização das estimativas da irradiação direta normal com informações de novos modelos e dados de novas estações meteorológicas, o que é objeto de estudo em um convênio entre o MME e o CEPEL e que conta com a parceria da CHESF. Outras localidades eventualmente afastadas do rio São Francisco e que possuem disponibilidade de água estão sendo avaliadas em todos os estados da região do semi-árido. Finalmente, deverão ser levadas em consideração informações adicionais relativas à infraestrutura local, tais como a proximidade de instituições técnicas para apoio na construção e operação de uma usina de demonstração, além dos possíveis impactos ambientais nos sítios selecionados.

REFERÊNCIAS

- DNIT, 2007. <http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/mapas-multimodais>, acessada em 11/03/2010
- Duffie, J.A & Beckman, W.A, 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley – Interscience Publication.
- GE Power & Water, 2010. http://www.gewater.com/handbook/boiler_water_systems, acessado em 11/03/2010
- Guimarães, A.P.C., Cheroto, S. , Menezes, P.C.P., Junior, A.L.V, Nascimento, M.V.G, 2002. Caracterização dos sítios potenciais na região do semi-árido brasileiro para implantação de Sistema Piloto Heliotérmico de Geração Elétrica. Relatório Técnico DG/1105/02 CEPEL, Projeto Gerahelio.
- Liu, B.H., & Jordan, R. C., 1960. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, vol.4, n. 3.
- Mapa do Sistema Elétrico da Região Nordeste, 2009. CHESF.
- Nunes, G.S. *et al*, 1979. Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil, Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa.
- Pereira E. B., Martins F. R, Abreu S. L, Rütther, R. 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar, SWERA.
- Perry, R.H., Green, D.W., Perry's, 1999. Chemical Engineers Handbook, Mc.Graw-Hill Co. p.12-17.
- Reilly, E., Kolb, G.J, 2001. An Evaluation of Molten-Salt Power Towers Including Results of the Solar Two Project, SANDIA.
- Sargent and Lundy, 2003. Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts. Department of Energy and National Renewable Laboratory, SL-5641 Report.
- SimTech. Simulation Technology, 2000. IPSEpro Used Documentation

SITE CHARACTERIZATION FOR THE INSTALLATION OF A CSP PILOT PLANT IN THE SEMI-ARID REGION

Abstract. *This paper presents preliminary studies concerning the characterization of potential sites for the implementation of concentrating solar power plants in the semi-arid area of Brazil. Potential sites were investigated in the state of Paraíba and along the San Francisco river. The main objective of these studies was to select locations that meet the requirements for the operation of a concentrating solar power plant connected to the grid. To this end, a comparative analysis of some sites was performed based on the following criteria: i) direct normal irradiance estimation based on classical models using insolation data from INMET meteorological stations ii) flow*

characterization of existing rivers iii) availability of transmission lines and substation iv) availability of infrastructure for local access. The methodology for the estimation of direct normal irradiation data was validated for the city of Bom Jesus da Lapa in Bahia. It is shown that some locations have similar levels of radiation to the southern Spain region, where solar thermal plants are being built. These locations also have available water, and adequate infrastructure to build a demonstration plant.

Key words: *Direct Normal Irradiation, Concentrated Solar Power, Potential Sites.*