

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO DE GERAÇÃO ELÉTRICA TERMOSSOLAR NO BRASIL A PARTIR DE MODELAGEM EM SIG E SIMULAÇÃO DE PLANTAS VIRTUAIS

Adriano Salvi Burgi – adrianoburgi@ppe.ufrj.br

Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo. A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis no mundo vem aumentando nos últimos anos. A tecnologia de concentração solar para geração elétrica – ou geração termossolar (Concentrated Solar Power, CSP) – poderá desempenhar um papel importante na transição para uma produção mundial de eletricidade menos intensiva em carbono. No Brasil, a tecnologia CSP ainda é aproveitada apenas em projetos piloto. Assim, avaliar o potencial para esta tecnologia, identificando geograficamente os melhores sítios para a instalação de plantas CSP se torna um exercício importante para o planejamento energético nacional. Nesse contexto, o presente trabalho avalia o potencial para a tecnologia CSP no Brasil combinando uma análise com base em sistemas de informação geográfica (SIG) com simulação de plantas CSP virtuais. Diversos critérios de aptidão de áreas à instalação de plantas CSP são adotados, como radiação solar adequada, áreas de proteção ambiental, entre outros. A simulação de plantas CSP virtuais fornece resultados, como o requerimento mínimo de área, que realimentam a análise com base em SIG, refinando os resultados. O potencial técnico identificado em termos de capacidade instalada para as tecnologias cilindro-parabólico sem e com armazenamento térmico, e para torre solar com armazenamento térmico foi de 346 GW, 166 GW e 85 GW, respectivamente. O potencial identificado em termos de energia produzida anualmente foi de 602 TWh, 538 TWh e 303 TWh, respectivamente.

Palavras-chave: Tecnologia de Concentração Solar (CSP), Planejamento Energético, Sistemas de Informação Geográfica, Simulação da Geração de Eletricidade.

1. INTRODUÇÃO

O setor de energia desempenhará um papel central na transição para uma economia menos intensiva em carbono nos próximos anos. O subsetor de geração de energia elétrica possui potencial significativo para contribuir para essa transição, tendo em vista que atualmente no mundo aproximadamente 80% da geração de energia elétrica é oriunda da queima de combustíveis fósseis e da fissão nuclear (REN21, 2012). Mesmo nos cenários mais conservadores, propostos por IEA (2011), é possível notar que, num horizonte de aproximadamente 20 anos, a contribuição percentual de outras fontes renováveis de geração de eletricidade dobrará. O fato de alguns países já terem implementado políticas de incentivo às fontes renováveis, aliado à redução esperada dos custos de geração de eletricidade devido à curva de aprendizado de tecnologias emergentes, contribuirá para o acréscimo da capacidade instalada para a geração de energia elétrica de fontes como a solar, a eólica e a biomassa na matriz elétrica global (McDonald & Schrattenholzer, 2011).

O sistema de geração de energia elétrica brasileiro pode ser caracterizado como um sistema hidrotérmico com maior capacidade instalada de usinas hidrelétricas, que geralmente operam para atender à base de carga diária, e usinas termelétricas, operando, principalmente, para atender à carga de ponta diária ou ainda para contribuir parcialmente para a geração de energia elétrica com vistas ao atendimento da carga de base diária em períodos onde menores vazões afluentes aos reservatórios de usinas hidrelétricas são esperadas (Lucena, 2010). Contudo, o sistema de geração de energia elétrica brasileiro tende, no longo prazo, a ter menor participação de usinas hidrelétricas, devido ao fato de grande parte do potencial remanescente para aproveitamentos hidrelétricos estar situado no bioma amazônico, o que torna o processo de licenciamento ambiental mais oneroso em tempo. As usinas termelétricas a combustíveis fósseis, principalmente aquelas que fazem uso do gás natural como combustível, são utilizadas para expandir a capacidade de geração de energia elétrica para o atendimento da ponta de carga diária, uma vez que possuem alta flexibilidade operacional. Nesse sentido, o sistema de geração de energia elétrica brasileiro tende, no longo prazo, a se tornar mais carbono intensivo.

Diante dessa conjuntura, para manter a geração de eletricidade no Brasil com um patamar pelo menos constante no que diz respeito à participação de fontes renováveis de energia, se faz necessário avaliar o potencial e estudar a aplicabilidade e adaptação à realidade brasileira de outras fontes renováveis utilizadas para a geração de energia elétrica, como, por exemplo, as usinas termossolares (CSP).

Dados de radiação solar direta normal evidenciam regiões adequadas para a instalação de plantas CSP no Brasil (SWERA, 2011). Entretanto, uma análise considerando sistemas de informação geográfica (SIG) pode contribuir para

estimar com maior precisão o potencial desta tecnologia no país, conforme atributos adicionais como disponibilidade de área, declividade de terreno, proximidade a subestações do Sistema Interligado Nacional (SIN), entre outros.

Diversos estudos aplicados para avaliar o potencial de CSP em outros países baseiam-se em sistemas de informação geográfica (SIG) para identificar áreas com alta aptidão para instalação de plantas CSP e excluir áreas inapropriadas (Clifton & Boruff 2010; Fluri, 2009; Gastli et al., 2010; Bravo et al., 2007; Anders et al., 2005). No Brasil estes estudos estão voltados para a identificação dos melhores sítios e localidades para a instalação de usinas CSP (Martins et al., 2012; Guimarães et al., 2010), não tendo como foco a estimativa do potencial brasileiro em termos de capacidade instalada e produção de energia elétrica.

Portanto, um aspecto relevante a ser considerado na avaliação do potencial de CSP é a simulação da geração de energia elétrica a partir da modelagem de plantas CSP para áreas de interesse, utilizando dados climatológicos da região que se pretende analisar.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende avaliar o potencial para a tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil, conectada ao Sistema Interligado Nacional, combinando a análise com base em sistemas de informação geográfica (SIG) com simulação de plantas CSP.

Técnicas de geoprocessamento foram aplicadas para a determinação das áreas aptas à instalação de plantas CSP. Em sequência, foram identificadas as localidades situadas mais próximas às áreas aptas, para as quais foram modeladas e simuladas plantas CSP com as tecnologias cilindro parabólico com e sem armazenamento térmico, e com a tecnologia torre solar com armazenamento térmico. O resultado das simulações, como o requerimento mínimo de área, foi incorporado na análise com base em SIG para refinamento dos resultados e obtenção do potencial para CSP no Brasil.

Dessa maneira, a análise do potencial de CSP para o Brasil foi conduzida combinando-se técnicas de geoprocessamento com resultados de simulações para a geração de energia elétrica de plantas CSP virtualmente localizadas nas áreas de aptidão previamente identificadas na etapa de geoprocessamento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A definição dos critérios chave adotados na avaliação do potencial da tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil resultaram da análise de estudos que avaliaram o potencial para CSP com base em sistemas de informação geográfica para outras regiões de estudo, assim como em estudos que realizaram simulações da geração de energia elétrica para plantas termosolares para o Brasil.

Como mencionado na introdução do presente trabalho, diversos estudos avaliam o potencial de CSP em outros países com base em sistemas de informação geográfica (Clifton & Boruff 2010; Fluri 2009; Bravo et al., 2007; Pletka et al., 2007; Anders et al., 2005). Alguns deles possuem análises exclusivamente aplicadas à tecnologia CSP (Clifton & Boruff 2010; Fluri, 2009), enquanto que outros avaliam a tecnologia CSP dentro de um contexto de análise que inclui outras fontes renováveis utilizadas na geração de energia elétrica (Bravo et al., 2007; Pletka et al., 2007; Anders et al., 2005). Estudos com o objetivo de análise da melhor localização para a instalação de usinas CSP com base em sistemas de informação geográfica também vêm sendo desenvolvidos, como no caso do Brasil e do Omã (Martins et al., 2012; Guimarães et al., 2010; Gastli et al., 2010).

Clifton & Boruff (2010) identificam o potencial para CSP em uma região rural no oeste da Austrália através da sobreposição georreferenciada de variáveis ambientais com a infraestrutura do setor elétrico utilizando uma base de dados disponível ao público e de alta resolução espacial. Clifton & Boruff (2010) criaram uma escala de um a zero por para associar as células com resolução espacial de 90 m x 90 m à aptidão da área, criando um índice para o potencial CSP. Dessa maneira, Clifton & Boruff (2010) não chegam a calcular um potencial em termos de capacidade instalada, pois a análise não se baseia em uma tecnologia específica para a geração de energia elétrica pelo aproveitamento solar heliotérmico.

O estudo realizado por Fluri (2009), por outro lado, aponta o potencial expresso em capacidade instalada considerando-se a tecnologia CSP de cilindro parabólico para a África do Sul. A análise de Fluri (2009) também é baseada em sistemas de informação geográfica e é aplicada a províncias na África do Sul com bom potencial para a implementação de plantas CSP de larga escala. A área total disponível e apta para a instalação de plantas CSP na África do Sul se estende por 15.334 km² (Fluri, 2009). Para obter o potencial em termos de capacidade instalada, Fluri (2009) utiliza o valor de 28 km²/GW. Este valor deriva do estudo desenvolvido por Pletka et al. (2007). Uma vez calculado o potencial em termos de capacidade para a África do Sul, Fluri (2009) assume um fator de capacidade de 38,8% para estimar a geração de energia elétrica associada ao potencial para CSP na África do Sul. Este valor também deriva do estudo de Pletka et al. (2007), indicando que não houve no estudo de Fluri (2009) a incorporação de dados referentes à performance de plantas CSP situadas na África do Sul.

Pletka et al. (2007) consideram em sua avaliação do potencial de CSP para o estado do Arizona, nos Estados Unidos, a tecnologia cilindro parabólico, utilizando parâmetros de plantas existentes situadas próximas à região de estudo. A análise conduzida por Pletka et al. (2007) é voltada para a avaliação do potencial para CSP de plantas conectadas ao grid. Pletka et al. (2007) identificam quatro localidades aptas para a instalação de plantas CSP no Arizona e propõem a instalação gradual de plantas CSP nessas localidades. Com isso, o potencial para CSP obtido como resultado no estudo de Pletka et al. (2007) não visa estimar o potencial máximo da região à qual o estudo é aplicado, e sim avaliar o potencial segundo a proposta de instalação de plantas específicas para sites identificados através da análise

com base em sistemas de informação geográfica. Pletka et al. (2007) sugerem no total a instalação de 22 plantas CSP com a tecnologia cilindro parabólico, totalizando 4300 MW de capacidade instalada capazes de gerar 10.935 GWh.

Gastli et al. (2010) realizam uma análise com base em sistemas de informação geográfica para obter a localização ideal de uma planta CSP combinada com uma planta de dessalinização de águas marinhas no Omã. Para atender à demanda futura de água da região Gastli et al. (2010) propõem dois arranjos de plantas CSP, com capacidade para geração de energia elétrica de 21 MW e produção diária de água de 24.000 m³. Nesse sentido, Gastli et al. (2010) consideram em sua análise com base em sistemas de informação geográfica aspectos técnicos de plantas CSP específicas, onde as características da planta de dessalinização acoplada à planta CSP possuem influência nos parâmetros a serem avaliados na análise de localização.

Martins et al. (2012) avaliam os melhores sítios no Brasil para a instalação de usinas CSP com base em sistemas de informação geográfica. Os valores mínimos de radiação direta normal considerados no estudo de Martins et al (2012) correspondem a 1.800 kWh/m².ano para a tecnologia “chaminé solar” e a 2.200 kWh/m².ano para a tecnologia CSP. Adicionalmente, informações georreferenciadas relacionadas à infraestrutura de linhas de transmissão no Brasil, aos corpos hídricos de grande porte, à inclinação do terreno e à velocidade do vento (apenas para a tecnologia “chaminé solar”) são utilizadas para analisar as melhores localidades para a instalação de usinas CSP e usinas “chaminé solar” no território brasileiro. Martins et al. (2012) sugerem 10km² como área mínima requerida para a instalação das usinas termossolares, porém não aplicam esta informação como critério de exclusão de áreas. De acordo com Martins et al. (2012), as melhores localidades para a instalação de usinas CSP estão situadas no semi-árido nordestino, pois além de possuírem radiação solar direta normal adequada, apresentam terrenos planos e próximos ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e aos grandes rios da bacia hidrográfica do São Francisco.

A análise conduzida por Guimarães et al. (2010) consiste na caracterização de localidades do semi-árido nordestino para a implantação de uma usina CSP piloto de pequena escala, porém conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). As localidades avaliadas por Guimarães et al. (2010) foram: Barra (BA), Petrolina (PE), Cabrobró (PE), Monteiro (PB), Bom Jesus da Lapa (BA), Juazeiro (BA), São Gonçalo (PB), Paulo Afonso (BA), João Pessoa (PB) e Campina Grande (PB). Guimarães et al. (2010) utilizam dados de número de horas insolação coletados em estações meteorológicas nas localidades estudadas para estimar, a partir de modelos matemáticos, os respectivos valores de radiação direta normal. Adicionalmente, são avaliadas, de forma georreferenciada, as informações a respeito da infraestrutura rodoviária e aeroportuária, da disponibilidade hídrica, e da infraestrutura de conexão e transmissão do SIN para as localidades do semi-árido consideradas. Todas as localidades avaliadas por Guimarães et al. (2010) apresentam condições favoráveis à instalação de uma usina CSP piloto, dado que os valores de radiação direta normal se apresentaram adequados, assim como a maioria das localidades possui rios perenes capazes de fornecerem a quantidade adequada de água para sistema de resfriamento úmido. Além disso, as localidades avaliadas por Guimarães et al. (2010) apresentam possibilidade de conexão ao SIN através de subestações. Dentre as localidades avaliadas por Guimarães et al. (2010) para a instalação de um projeto de demonstração de geração elétrica termossolar, os sítios mais adequados são Petrolina (PE), Bom Jesus da Lapa (BA) e Juazeiro (BA), por apresentarem níveis elevados de radiação direta normal, baixo coeficiente de variação anual e por atenderem aos critérios de proximidade a subestações do SIN, disponibilidade hídrica e proximidade a rodovias.

Bravo et al. (2007) avaliam a capacidade de geração de energia elétrica na Espanha para fontes de geração de energia elétrica como CSP, eólica, solar fotovoltaica, aproveitamento da energia das ondas, biomassa – combustão direta, gaseificação e pirólise – e hidroeletricidade. Nesse sentido, Bravo et al. (2007) buscaram avaliar a contribuição máxima capaz de ser atendida por fontes renováveis de energia para a geração de eletricidade na Espanha, a fim de responder se é possível a existência de um sistema para a geração de eletricidade baseado apenas em fontes renováveis de energia. Para estimar este potencial, o estudo aplicado à Espanha se vale de uma análise espacial baseada em sistemas de informação geográfica, além de considerar aspectos técnicos associados às tecnologias consideradas na análise. No que tange os aspectos da tecnologia CSP considerada por Bravo et al. (2007), os autores consideram uma planta CSP operando com a tecnologia cilindro parabólico utilizando óleo sintético como fluido de transferência de calor e com capacidade de armazenamento térmico de 6 horas.

Similarmente ao estudo desenvolvido por Bravo et al. (2007), que buscou avaliar com base em SIG, o potencial de geração de eletricidade para uma gama de fontes renováveis, Anders et al. (2005) avaliam o potencial associado a fontes renováveis na região de San Diego, nos Estados Unidos. As fontes renováveis para a geração de energia elétrica consideradas por Anders et al. (2005) incluem, além de CSP, a energia solar fotovoltaica, eólica, geotérmica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Anders et al. (2005) ponderam, entretanto, que a área calculada como disponível para algumas localidades pode possuir atividades agrícolas, o que restringiria a sua disponibilidade, tornando necessária a consideração desta informação para análises mais aprofundadas.

Em relação à aplicação de análises com base em sistemas de informação geográfica para fontes renováveis de geração de energia elétrica no Brasil pode-se citar o estudo realizado por Tiba et al. (2010). Tiba et al. (2010) formulam uma ferramenta baseada em sistemas de informação geográfica para auxílio à tomada de decisão para o planejamento e gestão de fontes renováveis na região do nordeste brasileiro. As fontes renováveis para a geração de energia elétrica abordadas pela ferramenta com base em SIG proposta por Tiba et al. (2010) incluem solar fotovoltaica, eólica e biomassa.

Como este trabalho incorpora à análise com base em sistemas de informação geográfica os resultados de simulação de plantas CSP virtuais, modeladas com o auxílio do software SAM, para diferentes localidades no Brasil, faz-se necessário revisar a literatura científica voltada à simulação de plantas CSP com o auxílio deste software.

Autores como Turchi (2010), Lodi (2011) e Soria (2011) fazem uso do software SAM para modelar plantas CSP. O primeiro autor utiliza o software SAM para modelagem de uma planta CSP de referência para análises referentes aos custos associados a uma planta CSP cilindro parabólico. Os outros dois autores realizam simulações com um auxílio do software SAM para localidades situadas no Brasil.

Turchi (2010) propõe uma planta cilindro parabólico de referência para modelagem de custos com o software SAM. A planta CSP utilizada como referência para a análise de custo por Turchi (2010) possui 100 MW de capacidade instalada (de geração elétrica) e seis horas de armazenamento térmico.

Lodi (2011) baseia sua análise técnico-econômica em uma planta CSP cilindro parabólico sem armazenamento térmico com capacidade instalada de 30 MW. Lodi (2011) realiza simulações paramétricas no software SAM para obter o valor de múltiplo solar correspondente ao menor custo nivelado da energia.

Para propor políticas de incentivo e avaliar o efeito delas no custo nivelado da energia de 5 configurações distintas de plantas CSP, Soria (2011) faz uso do software SAM. Mesmo possuindo configurações distintas no que diz respeito a aspectos como armazenamento térmico e hibridização, todas as configurações de plantas CSP avaliadas por Soria (2011) fazem uso da tecnologia cilindro parabólico. Soria (2011) estima o potencial técnico para CSP no Brasil com base no software Geo Spatial Toolkit. É importante mencionar que a análise conduzida possui a radiação solar como fator limitante ao desenvolvimento. Soria (2011) aponta, em suas recomendações, para a importância de análises para o cálculo do potencial brasileiro para CSP que inclua de forma georreferenciada outros fatores limitantes, além da radiação solar direta normal.

3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida para a elaboração do presente trabalho inclui: (i) o levantamento da base de dados georreferenciada; (ii) a aplicação de técnicas de geoprocessamento para exclusão de áreas inadequadas à instalação de usinas CSP; (iii) a identificação das localidades para a simulação da geração de eletricidade no SAM; (iv) a definição dos parâmetros técnicos utilizados para modelar e simular a geração de eletricidades das usinas CSP; (v) a otimização do múltiplo solar realizada para as tecnologias CSP consideradas; (vi) a aplicação georreferenciada do requerimento mínimo de área obtido com o SAM; (vii) e a identificação georreferenciada do potencial em termos de capacidade instalada e produção de eletricidade a partir do desempenho de cada usina simulada no SAM.

A etapa de geoprocessamento foi realizada com auxílio do software ArcGIS, desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute (ESRI), enquanto a etapa de modelagem e simulação da geração de energia elétrica de plantas CSP foi realizada com auxílio do software System Advisor Model (SAM), desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL).

O fluxograma apresentado na Fig. 1 evidencia a ordem e o encadeamento das etapas de geoprocessamento e simulação de plantas virtuais;

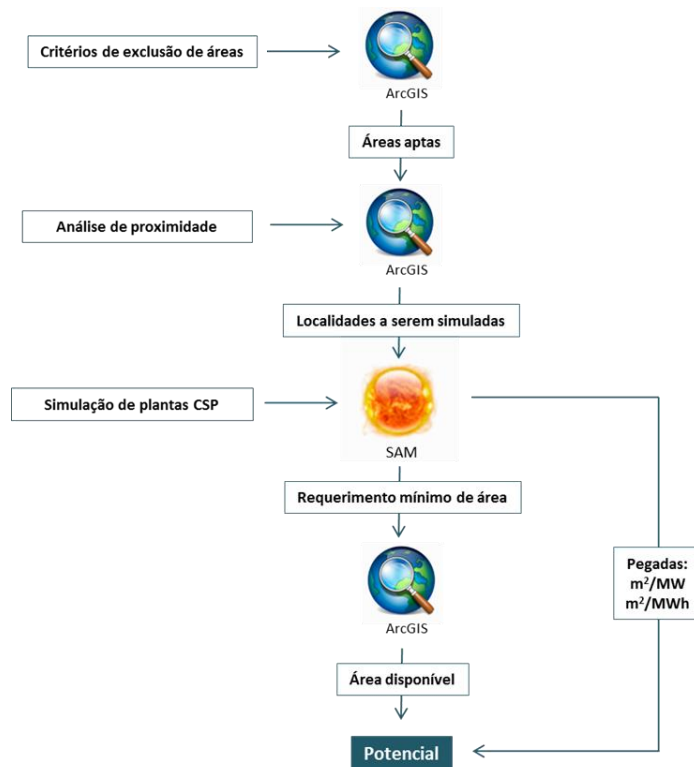


Figura 1 - Etapas de geoprocessamento e simulação de plantas virtuais.

A base de dados georreferenciada utilizada no presente trabalho possibilitou a aplicação dos seguintes critérios para a avaliação do potencial para CSP com base em SIG: radiação solar direta normal, declividade do terreno, Unidades de Conservação (UCs), terras indígenas, reservatórios de usinas hidrelétricas, áreas urbanas, subestações, área de servidão de linhas de transmissão, rodovias e uso do solo. Adicionalmente, os valores para o requerimento mínimo de área foram obtidos com as simulações no SAM e aplicados na informação georreferenciada das áreas aptas para CSP no Brasil. Dessa maneira, a pesquisa para compor a base de dados georreferenciada segundo os critérios adotados se configurou em uma importante etapa deste trabalho. Os dados georreferenciados utilizados no presente trabalho estão disponíveis na internet e podem ser obtidos em websites de diversos órgãos como o United Nations Environment Programme (SWERA, 2011), Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2012). A Tab. 1 descreve a base de dados georreferenciada utilizada neste trabalho, assim como o órgão ou agência responsável pela disponibilização do dado.

Tabela 1 - Base de dados georreferenciada utilizada para avaliação do potencial brasileiro para CSP.

Dado Georreferenciado	Responsável pela disponibilização	Referência
Radiação Direta Normal	Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)	SWERA (2011)
Declividade	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	EMBRAPA (2012)
Unidades de Conservação	Ministério do Meio Ambiente (MMA)	MMA (2011)
Terras Indígenas	Ministério do Meio Ambiente (MMA)	MMA (2011)
Reservatórios	Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	ANEEL (2012)
Áreas Urbanas	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	IBGE (2012)
Subestações	Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	ANEEL (2012)
Linhas de Transmissão	Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	ANEEL (2012)
Rodovias	Ministério do Meio Ambiente (MMA)	MMA (2011)
Uso do solo	Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)	UFMG (2012)

Diversas técnicas de geoprocessamento foram aplicadas, como por exemplo, a sobreposição das informações georreferenciadas apresentadas na Tab. 1. A partir da aplicação destas técnicas foi possível excluir áreas inadequadas à instalação de usinas CSP. A revisão da literatura científica acerca da avaliação do potencial para CSP com base em sistemas de informação geográfica possibilitou identificar e balizar os critérios de exclusão de áreas adotados nesta etapa do trabalho. Os critérios para exclusão de áreas inadequadas, assim como as informações georreferenciadas consideradas neste trabalho e por outros autores são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 - Comparação entre estudos com base em sistemas de informação geográfica aplicados para CSP.

	Fluri (2009)	Gastli <i>et al.</i> (2010)	Clifton & Boruff (2010)	Bravo <i>et al.</i> (2007)	Anders <i>et al.</i> (2005)	Pletka <i>et al.</i> (2007)	Guimarães <i>et al.</i> (2010)	Martins <i>et al.</i> (2012)	Presente trabalho
Objetivo	Avaliação do potencial	Análise de localização	Avaliação do potencial	Avaliação do potencial	Avaliação do potencial	Avaliação do potencial	Análise de localização	Análise de localização	Avaliação do potencial e análise de localização
Região de estudo	África do Sul	Omã	Oeste da Austrália	Espanha	Sudoeste dos Estados Unidos	Arizona, Estados Unidos	Brasil	Brasil	Brasil
Tecnologias CSP	Cilindro parabólico (6 horas de armazenamento)	Cilindro parabólico combinado com dessalinização de água	Não especificado	Cilindro parabólico "Chaminé Solar"	Cilindro parabólico	Cilindro parabólico (sem e com armazenamento de 3h e de 6h)	Não especificado	Cilindro parabólico Torre Solar "Chaminé Solar"	Cilindro parabólico (sem e com armazenamento de 6h) Torre Solar (7,5h de armazenamento)
Dados de radiação direta normal	Derivados de satélite com 40km x 40km de resolução	Modelo de radiação solar do software ArcGIS para uma resolução de 40m x 40m	Modelo de radiação solar do software ArcGIS para uma resolução de 90m x 90m	Não especificado	Derivados de satélite	Derivados de satélite	Estimativas derivadas de medições em estações meteorológicas	Derivados de satélite com 10km x 10km de resolução	Derivados de satélite com 10km x 10km de resolução
Radiação direta normal anual mínima	2500 kWh/m ² .ano	Não inclui	2000 kWh/m ² .ano	1500 kWh/m ² .ano	2.464 kWh/m ² .ano	2.464 kWh/m ² .ano	1.657 kWh/m ² .ano	1.800 kWh/m ² .ano	2000 kWh/m ² .ano
Declividade máxima	1%	1%	4%	2% e 7% (SW a SE)	1%	1%	Não especificado	3%	3%
Área mínima requerida	2 km ²	2 km ²	Não especificado	4 km ²	8 km ²	5 km ²	Não especificado	10 km ²	Simulações no SAM
Subestações	Não inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Inclui

	Fluri (2009)	Gastli <i>et al.</i> (2010)	Clifton & Boruff (2010)	Bravo <i>et al.</i> (2007)	Anders <i>et al.</i> (2005)	Pletka <i>et al.</i> (2007)	Guimarães <i>et al.</i> (2010)	Martins <i>et al.</i> (2012)	Presente trabalho
Linhas de transmissão	Inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Inclui	Inclui	Inclui	Inclui	Não inclui
Faixa de servidão de linhas de transmissão	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui
UCs	Inclui	Não inclui	Inclui	Inclui	Inclui	Inclui	Não inclui	Inclui	Inclui
Terras indígenas	Não inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui	Inclui
Rodovias	Inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui	Inclui	Não inclui	Inclui
Reservatórios	Inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Inclui	Inclui	Inclui
Velocidade do vento	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui
Áreas urbanas	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui	Inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui
Uso do solo	Inclui	Não inclui	Inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui	Inclui

Após a etapa de exclusão de áreas inapropriadas para a instalação de plantas CSP no Brasil de acordo com os critérios adotados neste trabalho buscou-se identificar as localidades a serem simuladas no SAM, uma vez que este software possui um número limitado de localidades onde as simulações de geração de eletricidade de usinas CSP virtuais possam ser realizadas. Para identificar estas localidades utilizou-se uma ferramenta de geoprocessamento que calcula, para cada feição geográfica, a localidade do SAM mais próxima.

Uma vez identificadas as localidades disponíveis no SAM para as quais a geração de eletricidade por usinas CSP virtuais é simulada, definiu-se parâmetros técnicos das usinas para cada tecnologia CSP. As simulações no SAM tiveram como principais objetivos obter o valor de requerimento mínimo de área para plantas típicas CSP, analisando-se a tecnologia cilindro parabólico sem e com armazenamento térmico (6,0 horas) e a tecnologia torre solar com armazenamento térmico de 7,5 horas. Optou-se por adotar uma capacidade instalada para as três plantas de 100 MW. Os dados de custo para plantas incluídos no SAM tomam como base a planta de referência CSP cilindro parabólico de 100 MW, avaliada por Turchi (2010). No que tange as plantas CSP cilindro parabólico e torre solar com armazenamento térmico simuladas no SAM, foi necessário definir um perfil horário e mensal de despacho da energia térmica armazenada para o sistema de troca de calor e daí para o bloco de potência. Assumiu-se que, para todos os meses do ano, a energia térmica acumulada durante o período da manhã e início da tarde começa a ser despachada a partir das 14 horas até às 22 horas, visando o atendimento à demanda também no horário de pico, usualmente no início da noite. Os sistemas de resfriamento adotados nos três arranjos de tecnologia CSP simulados no SAM constituíram-se de sistemas de resfriamento úmido.

Como a avaliação do potencial para a tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil proposta neste trabalho é voltada para plantas CSP conectadas ao Sistema Interligado Nacional, é interessante otimizar o múltiplo solar para que o custo nivelado da energia (Levelized Cost of Electricity, LCOE) seja o menor possível. O múltiplo solar é um parâmetro técnico importante a ser definido no projeto de plantas CSP. Ele está diretamente relacionado ao tamanho do campo solar, pois define qual é a proporção entre a energia térmica gerada no campo solar em relação à capacidade nominal da turbina. A Fig. 2 apresenta um exemplo de simulação paramétrica para a planta CSP de cilindro parabólico sem armazenamento térmico situada na localidade de Petrolina. O múltiplo solar, representado pelo eixo horizontal, que minimiza o LCOE para este caso é igual a 1,29 (Fig. 2).

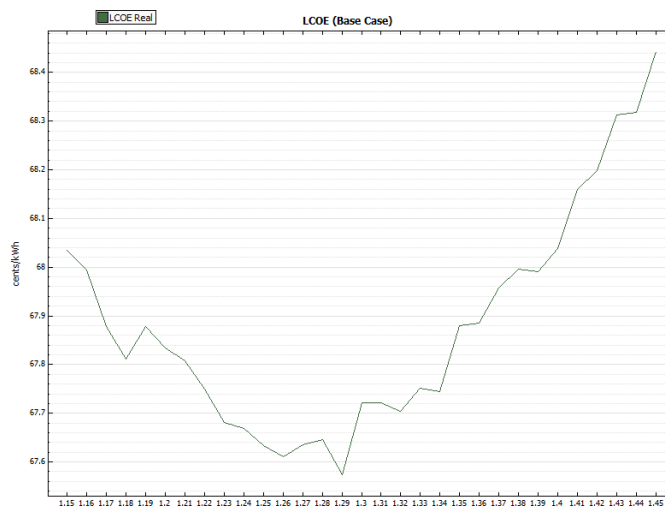


Figura 2 - Simulação paramétrica para a otimização do múltiplo solar em função do menor LCOE, Petrolina.

Para todas as tecnologias CSP consideradas neste trabalho, assim com para cada localidade do SAM considerada, realizaram-se simulações para métricas com vistas a identificar o múltiplo solar que viabiliza a produção de energia elétrica ao menor custo nivelado da energia.

Uma vez otimizado o múltiplo solar para cada tecnologia e cada localidade é possível simular a geração de energia elétrica para um ano obtendo-se resultados acerca do desempenho das usinas CSP consideradas neste trabalho para cada localidade, obtendo-se a área mínima necessária para a instalação de cada usina CSP considerada no presente trabalho.

A aplicação do critério de requerimento mínimo de área deriva das simulações das plantas CSP para as localidades identificadas na etapa anterior.

4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL TÉCNICO DE CSP PARA A GERAÇÃO ELÉTRICA INTERLIGADA NO BRASIL

Os valores de área demandada por MW instalado e área demandada por MWh gerado obtidos com as simulações no SAM foram aplicados a áreas remanescentes de acordo com a localidade do SAM situada mais próxima.

O potencial em termos de capacidade instalada identificado para as tecnologias cilindro parabólico sem e com armazenamento térmico, e para torre solar com armazenamento térmico foi de 346 GW, 166 GW e 85 GW, respectivamente (Tab. 3). O potencial em termos de energia produzida identificado foi de 602 TWh, 538 TWh e 303 TWh, respectivamente (Tab. 3).

Tabela 3 – Potencial, produção de eletricidade e área disponível, segundo unidades da federação e subsistemas do SIN.

	Potencial (MW)			Produção de eletricidade (GWh)			Área disponível (km ²)		
	CP	CP (6h)	TS (7,5h)	CP	CP (6h)	TS (7,5h)	CP	CP (6h)	TS (7,5h)
Maranhão	436	111	-	764	345	-	13	6	-
Tocantins	4.619	2.194	749	8.346	7.125	2.685	138	111	66
Subsistema Norte	5.055	2.305	749	9.110	7.470	2.685	151	117	66
Bahia	113.180	60.488	33.131	221.233	212.771	131.579	3.198	2.998	2.740
Ceará	127	-	-	203	-	-	4	-	-
Paraíba	18.101	9.241	5.812	29.027	28.691	19.188	595	560	532
Piauí	19.690	9.162	3.327	34.233	28.465	11.735	602	471	305
Subsistema Nordeste	151.098	78.891	42.271	284.696	269.928	162.503	4.399	4.029	3.577
Minas Gerais	33.273	13.670	5.781	56.267	42.789	19.900	1.059	759	540
São Paulo	6.084	1.542	595	6.221	3.255	1.321	209	100	58
Subsistema Sudeste	39.357	15.212	6.375	62.488	46.044	21.221	1.268	859	598
Mato Grosso	554	-	-	831	-	-	19	-	-
Goiás	47.341	20.566	9.414	78.855	63.941	31.594	1.573	1.187	900
Subsistema Centro-Oeste	47.895	20.566	9.414	79.686	63.941	31.594	1.592	1.187	900
Mato Grosso do Sul	103.285	49.625	26.760	166.498	150.634	85.897	3.248	2.799	2.399
Paraná	175	-	-	282	-	-	6	-	-
Subsistema Sul	103.460	49.625	26.760	166.780	150.634	85.897	3.253	2.799	2.399
Total	346.865	166.598	85.569	602.761	538.016	303.899	10.664	8.991	7.540

Nota: CP – Cilindro parabólico; CP (6h) – Cilindro parabólico com 6 horas de armazenamento térmico; TS (7,5h) – Torre solar com 7,5h de armazenamento térmico.

Os resultados indicam que vários estados do Brasil possuem áreas aptas à instalação de plantas CSP, mesmo aplicando-se os critérios de seleção de sítios aptos adotados neste trabalho.

A Bahia é o estado com maior potencial para a instalação de plantas CSP, conforme os três arranjos de plantas CSP considerados neste trabalho. A Fig. 3 apresenta as áreas aptas à instalação de usinas CSP da tecnologia cilindro parabólico sem armazenamento térmico, segundo os valores de radiação direta normal. Além disso, a Fig. 3 apresenta as linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional. As regiões caracterizadas como aptas à instalação de usinas CSP se localizam próximo a subestações, uma vez que a proximidade à subestações foi adotada como critério de exclusão de áreas. Municípios como Serra Dourada, Santana e Tanque Novo, situados no estado da Bahia, apresentam áreas com elevados valores de radiação direta normal, e, portanto, alta aptidão para a instalação das primeiras usinas CSP no Brasil.

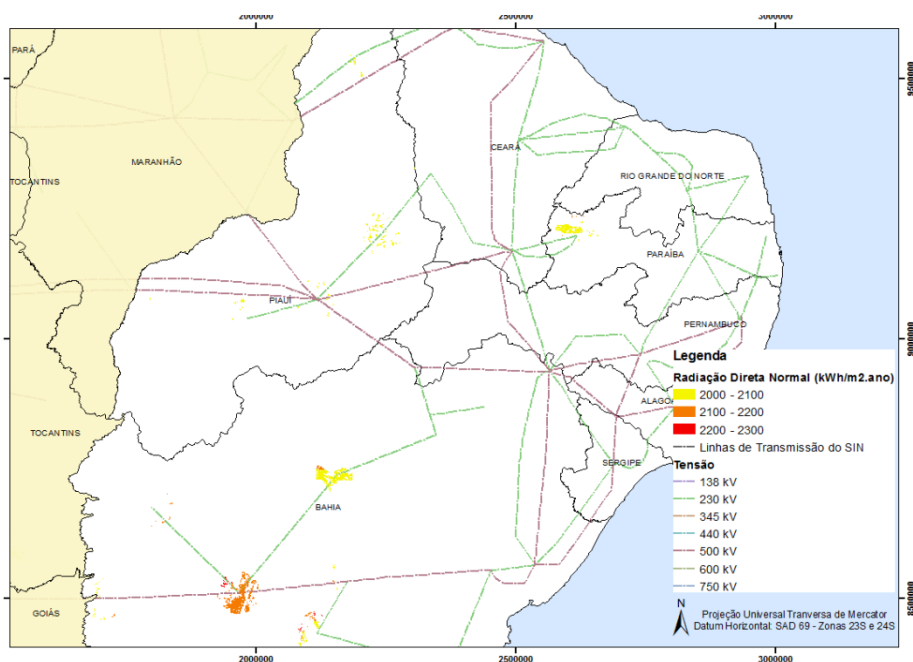


Figura 3 - Mapa com as áreas aptas para CSP no subsistema Nordeste do SIN.

O estado do Mato Grosso do Sul também apresenta elevado potencial e área disponível para a instalação de usinas CSP de grande escala conectadas ao SIN. A Fig. 4 apresenta as regiões, situadas em um raio de 40 km no entorno de subestações do SIN.

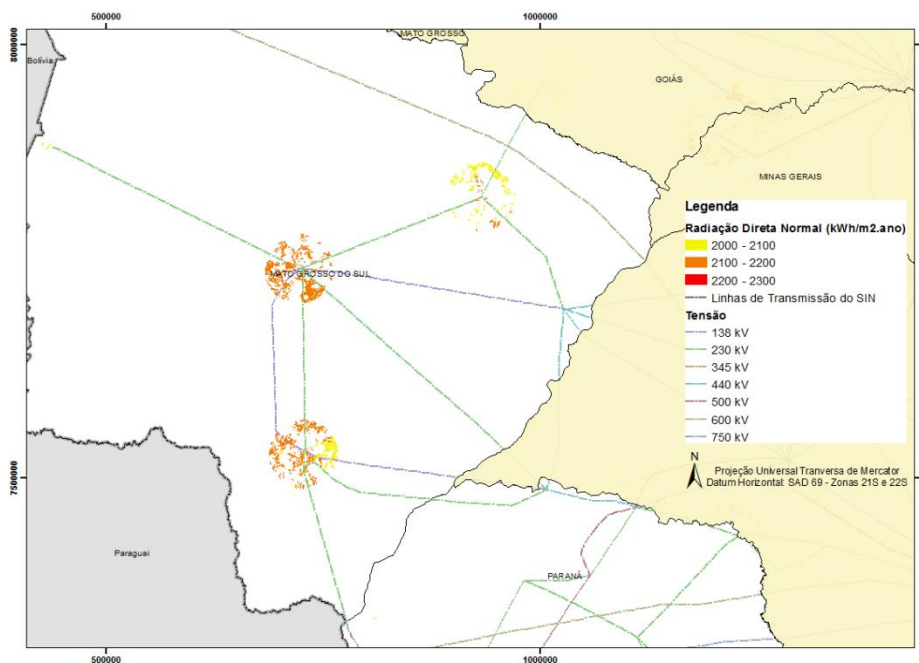


Figura 4 - Mapa com as áreas aptas para CSP no subsistema Sul do SIN.

Os resultados obtidos neste trabalho, além de evidenciarem o potencial no Brasil para as tecnologias CSP com e sem armazenamento térmico e para a tecnologia torre solar com armazenamento térmico, contribuem para a identificação das regiões no Brasil onde as usinas CSP a serem instaladas possuirão, possivelmente, o menor custo nivelado de geração de energia elétrica.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o potencial para a tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil a partir de uma abordagem metodológica que combina a análise com base em sistema de informações geográfica com simulação de

plantas CSP. Diversos mapas foram criados, sendo possível identificar as áreas no território brasileiro com alta aptidão para a instalação de usinas CSP de grande escala conectadas ao Sistema Interligado Nacional. Os resultados obtidos indicam o potencial para CSP no Brasil, levando-se em consideração dados georreferenciados e o desempenho de plantas CSP simuladas com dados climatológicos das localidades brasileiras incluídas no SAM.

Dessa maneira, a aplicação da etapa de simulação de plantas CSP de forma combinada e iterativa com a etapa de geoprocessamento no presente trabalho é responsável por um maior refinamento dos resultados acerca do potencial técnico para CSP obtidos.

O potencial para a tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil baseou-se em três arranjos de usinas CSP considerando duas tecnologias distintas. Sendo assim, é importante ressaltar que os resultados apresentados neste trabalho não consideram a combinação dos arranjos propostos, porém evidenciam, para cada arranjo isoladamente, o potencial em termos de capacidade instalada e em termos de geração de energia elétrica.

O potencial em termos de capacidade instalada para a tecnologia de concentração solar no Brasil calculado neste trabalho foi de 346 GW, 166 GW e 85 GW para as tecnologias cilindro parabólico sem armazenamento térmico, cilindro parabólico com 6,0 horas de armazenamento térmico e torre solar com 7,5 horas de armazenamento térmico, respectivamente. O potencial em termos de geração de energia elétrica para as mesmas tecnologias calculado neste trabalho foi de 602 TWh, 538 TWh e 303 TWh, respectivamente. Esses valores demonstram que a tecnologia CSP pode assumir participação significativa na matriz de geração de energia elétrica brasileira no longo prazo.

Os resultados possuem relevância para o planejamento energético nacional, uma vez que, além de apontar o potencial para a tecnologia CSP, indicam as melhores regiões para o desenvolvimento das primeiras plantas de grande escala conectadas ao grid.

Caso haja disponibilidade de dados climáticos para a simulação da geração de energia elétrica nos locais identificados como sendo aptos, aumentando-se o número de localidades no SAM para a realização das simulações, os resultados obtidos com aplicação da metodologia proposta neste trabalho demonstrariam elevado grau de precisão.

A metodologia desenvolvida para a avaliação do potencial para a tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil no presente trabalho pode ser aplicada a outras fontes renováveis utilizadas para a geração de energia elétrica.

A análise do potencial para tecnologia de concentração solar (CSP) no Brasil conduzida neste trabalho possuiu como foco a avaliação acerca de plantas CSP de grande escala conectadas ao Sistema Interligado Nacional. Porém, a tecnologia CSP também possui aplicação para a geração de energia elétrica de forma distribuída e para a geração de outra forma relevante de energia, o calor. Nesse sentido, existe um vasto campo para trabalhos futuros que visem aplicar análises com base em sistemas de informação geográfica para determinação do potencial ou da melhor localização de plantas CSP com outras características.

REFERÊNCIAS

- Anders, S. et al., 2005. Potential for Renewable Energy in the San Diego Region., s.l.: San Diego Regional Renewable Energy Group. San Diego, Estados Unidos.
- ANEEL, 2012. s.l.: Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico - SIGEL. Disponível em: <http://sigel.aneel.gov.br>. Acesso em março de 2012.
- Bravo, J. D., Casals, X. G. & Pascua, I. P., 2007. GIS approach to the definition of capacity and generation ceilings of renewable energy technologies. *Energy Policy* 35, pp. 4879-4892.
- Clifton, J. & Boruff, B. J., 2010. Assessing the potential for concentrated solar power development in rural Australia.. *Energy Policy* 38, pp. 5272-5280.
- EMBRAPA, 2012. s.l.: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Monitoramento por Satélite. Download do SRTM. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>. Acesso em março de 2012.
- Fluri, T. P., 2009. The potential of concentrating solar power in South Africa.. *Energy Policy* 37, pp. 5075-5080.
- Gastli, A., Charabi, Y. & Zekri, S., 2010. GIS-based assessment of combined CSP electric power and seawater desalination plant for Duqum - Oman.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 821-827.
- Guimarães, A. P. C. et al., 2010 Caracterização de localidades do semi-árido para implantação de um sistema piloto heliotérmico de geração elétrica. III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém, Brasil.
- IBGE, 2012. s.l.: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Download Geoestatística - Setores Censitários. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em junho de 2012.
- IEA, 2011. *World Energy Outlook 2011.*, s.l.: International Energy Agency. Paris, França.
- Lodi, C., 2011. Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada., s.l.: Dissertação de Mestrado. 127 p. Programa de Planejamento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Lucena, A. F. P. d., 2010. Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidrelétrico., s.l.: Tese de Doutorado. 196 p. Programa de Planejamento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

- Martins, F. R., Abreu, S. L. & Pereira, E. B., 2012. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy* 48, pp. 640-649.
- McDonald, A. & Schratzenholzer, L., 2011. Learning rates for energy technologies. *Energy Policy* 29, pp. 255-261.
- MMA, 2011. s.l.: Ministério do Meio Ambiente. i3Geo Data Download. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em outubro de 2011.
- Pletka, R. et al., 2007. Arizona Renewable Energy Assessment., s.l.: Black & Veatch Corporation. Final Report. B&V Project Number 145888. Kansas, Estados Unidos.
- REN21, 2012. Renewables 2012 - Global Status Report., s.l.: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. REN21 Secretariat, Paris, França.
- Soria, R. A. P., 2011. Cenários de Geração de Eletricidade a partir de Geradores Heliotérmicos no Brasil: A Influência do Armazenamento de Calor e da Híbridação., s.l.: Dissertação de Mestrado. 187p. Programa de Planejamento Energético. Instituto Luiz Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- SWERA, 2011. s.l.: Solar and Wind Energy Resource Assessment. United Nations Environment Programme - UNEP. Disponível em: <http://en.openei.org/wiki/SWERA/Data>. Acesso em outubro de 2011.
- Tiba, C. et al., 2010. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. *Renewable Energy* 35, pp. 2921-2932.
- Turchi, C., 2010. Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model (SAM)., s.l.: National Renewable Energy Laboratory - NREL. Technical Report NREL/TP-550-47605. Colorado, Estados Unidos.

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL POTENTIAL OF SOLAR THERMAL ELECTRICITY PRODUCTION IN BRAZIL BASED ON GIS MODELING AND SIMULATION OF VIRTUAL PLANTS

Abstract. *The global electricity production from renewables has been increasing in the last years. Concentrated Solar Power (CSP) should play an important role in the transition to a low-carbon electricity production system. However, CSP is not yet deployed in Brazil in commercial scale. Therefore, the assessment of the country's CSP potential by identifying geographically the best suitable areas for the development of CSP plants is an important task for the national energy planning. Hence, this dissertation evaluates the CSP technical potential in Brazil by applying both a geographic information system (GIS) and a simulation of virtual CSP plants. Several criteria to identify the suitability of areas to CSP plants installation are considered, such as adequate solar irradiation, environmental protected areas, among others. The CSP virtual plants simulation results feed the GIS-based assessment back with criteria such as the minimum land requirement, improving its findings. The identified technical potential in terms of installed capacity for the parabolic trough technology with and without thermal energy storage, and for the solar tower technology with thermal energy storage is 346 GW, 166 GW and 85 GW, respectively. The identified potential in terms of electricity production annually is 602 TWh, 538 TWh and 303 TWh, respectively.*

Key words: *Concentrated Solar Power, Energy Planning, Geographic Information System, Electricity Production Simulation.*