

Estudo de localização de centrais termoelétricas solares de grande porte no estado de Minas Gerais

Chigueru Tiba^{1*}
Ruibran Januário dos Reis²
Melina Amoni Silveira Alves³

¹ Físico (USP). Mestre em Tecnologia Nuclear (USP). Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares (UFPE). Professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

² Meteorologista (UFRJ). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). Doutor em Geografia (PUC-Minas). Professor da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas).

³ Geógrafa (PUC-Minas). Mestre em Geografia (PUC-Minas). Doutoranda em Geografia (PUC-Minas).

Resumo A energia solar vem ganhando espaço no cenário mundial. Porém, no Brasil, ainda não é explorada em projetos de grande porte. Entretanto, sabe-se que o país dispõe de áreas com irradiação direta de alta intensidade e fator de sazonalidade baixa, sobretudo no semiárido e, particularmente, no Norte e Nordeste de Minas Gerais. Este artigo tem por objetivo avaliar a localização para instalação de centrais solares termoelétricas em Minas Gerais, utilizando a tecnologia de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Identificaram-se níveis de irradiação bastante promissores para geração de energia solar chegando ao valor de 2200-2400 kWh/m²/ano, nas regiões Norte e Nordeste do Estado. Estas regiões possuem áreas planas, disponibilidade de recursos hídricos, baixa aptidão agrícola e boa cobertura de linhas de transmissão. Considerando estas variáveis relevantes, chegou-se à classificação de seis áreas promissoras (região de Janaúba, Janaúria, Pirapora e Unaí, Pirapora e Paracatu, Curvelo e Três Marias, Patrocínio e Araxá). Cabe ressaltar, que esse potencial poderá ser explorado em médio prazo, com o esgotamento de outras fontes de energias.

Palavras-chave: energia solar; central termoelétrica solar; sistema de informações geográficas.

1. Introdução

O Estado de Minas Gerais já utilizou quase a totalidade dos grandes aproveitamentos hídricos para a geração de eletricidade, restando às opções de importação de energia, o aproveitamento das outras fontes renováveis locais (PCH, eólica e solar) ou a geração termoelétrica convencional com óleo combustível, gás, carvão ou nuclear. Os principais entraves da importação de energia ou da geração termoelétrica convencional e nuclear são: 1) hidroeletricidade da Amazônia com custo de transmissão muito maiores que o da geração, além de problemas ambientais que agregam incertezas aos empreendimentos; 2) combustíveis fósseis, que apresentam preços crescentes, problemas ambientais e subsídios "invisíveis" (externalidades), cada vez mais questionados pela sociedade; 3) no caso da energia nuclear o risco dos acidentes catastróficos.

Com a perspectiva da maturidade tecnológica e comercial da energia solar termoelétrica de grande porte na década de 2020, seria apropriado ao sistema elétrico mineiro acompanhar a evolução dessa tecnologia, realizar projetos de pesquisas com inovações de ponta e avaliar detalhadamente o potencial do recurso solar disponível no seu território. Além do seu aspecto renovável e com baixo impacto ambiental, a implantação de centrais termoelétrica solares é importante regionalmente pelos seguintes fatores: a) permite

melhorar o "mix" de geração do setor elétrico brasileiro e portanto aumentar a segurança do sistema elétrico; b) o recurso solar é mais intenso no período seco da região e portanto tem um caráter complementar ao sistema hidroelétrico regional; c) é uma geração caracteristicamente distribuída, outro fator de segurança do sistema elétrico; d) deverá ser instalado em regiões do semi-árido com baixa densidade populacional e terras não competitivas para outros usos mais nobres (agricultura, por exemplo); e) geração de emprego e rendas.

A utilização dos Sistema de Informações Geográficas (SIG) em energia renovável, começou a ser fortemente utilizado a partir da década de 1990, quando passou por um progresso considerável, no qual foram desenvolvidas diversas ferramentas específicas na área (Bravo, 2002). O Trabalho pioneiro utilizando o SIG para identificação de *Concentrated Solar Power* (CSP), foi desenvolvido por Broesamle et al. (2001), em que se analisou a região Norte da África fornecendo um ranking de locais em relação ao potencial e custo da eletricidade solar térmica para uma configuração usina particular.

Os procedimentos de avaliação e identificação de localidades utilizando SIG estão inovando os mecanismos de tomada de decisão no mundo e contribuindo decisivamente para o rápido crescimento da implantação da tecnologia CSP. Assim, nesse trabalho foi feita a identificação e o mapeamento dos locais mais promissores em Minas Gerais

* tiba@ufpe.br

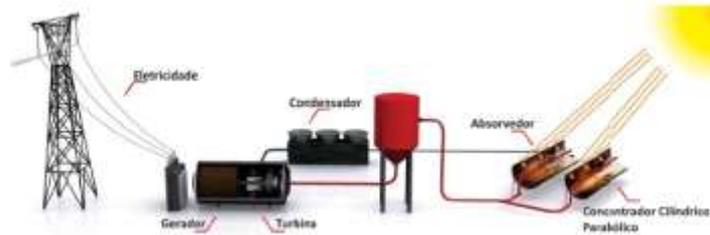
para que não só o Estado, mas o país possa iniciar rapidamente o processo de implantação da tecnologia solar CSP em larga escala.

2. Central termoeétrica solar - SEGS

Uma usina solar termoeétrica é formada pelos seguintes componentes principais: o coletor solar concentrador, que, mediante a reflexão ou difração da luz realiza a sua coleta e concentração; o absorvedor, que absorve a luz e transfere o calor para a um fluido térmico; sistema armazenador de calor;

sistema gerador de vapor; e sistema convencional de conversão de energia térmica em eletricidade (FIG.1). Nos quatro conceitos a seguir basicamente o que difere é o campo de coletores: as figuras 1a e 1b são concentradores bidimensionais ou lineares, e 1c e 1d são concentradores tridimensionais. Os concentradores 1b e 1d têm os componentes refletivos conhecidos como heliostatos, em que cada espelho reflete a luz para um recipiente linear ou volumétrico, enquanto os concentradores 1a e 1c são formadores de imagens.

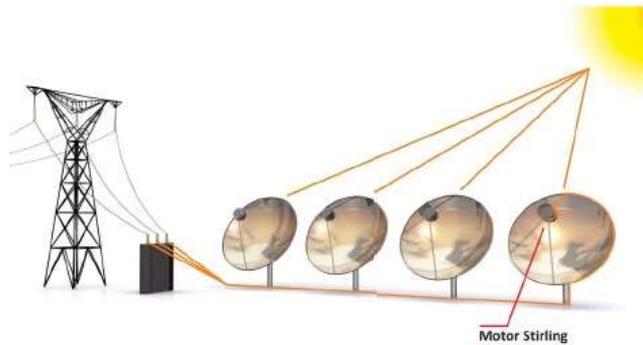
(a)



(b)



(c)



(d)

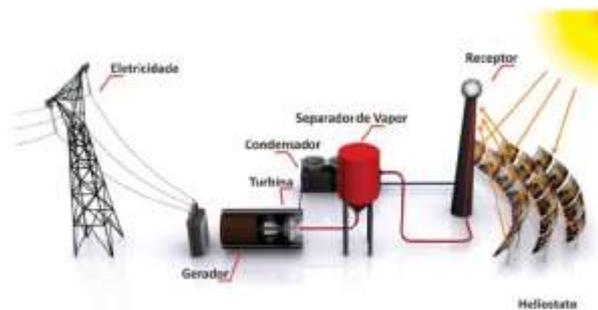


Figura 1 - Tipos de Concentradores Solares para geração de energia elétrica.
a) Concentrador cilíndrico parabólico, b) Concentrador linear de Fresnel,
c) Disco parabólico e d) Torre de potência

Fonte: CEMIG - Atlas solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

A história recente da evolução das usinas solares termoeletricas inicia-se na década de 1980, e pode ser resumida nos seguintes marcos principais, conforme CEMIG, 2012:

Década de 1980

- **1981** – As torres solares conhecidas como SOLAR I (10,0 MW, EUA), CESA I (1,2 MW Espanha), THEMIS (2,5 MW, França), EURELIOS (1,0 MW, Itália) e NIO (1,0 MW, Japão) foram conectados à rede elétrica.
- **1984** – *Solar Electric Generating System I* (SEGS) uma usina solar termoeletrica com concentrador cilíndrico parabólico com potência de 13,8 MWe entra em operação comercial.

Década de 1990

- **1990** – Nove centrais tipo SEGS estavam implantados, em bases comerciais (SEGS 1, 13,8 MWe; SEGS 2 a 7, 30 MWe e SEGS 8 e 9, 80 MWe) totalizando 354 MWe.
- **1991** – A principal construtora dos SEGS, a Luz Solar, entra em falência.
- **1996** – A torre solar, SOLAR II (Barstow, USA) de 10 MW entra em operação e demonstra a viabilidade de armazenamento com sais fundidos.
- **1990-2000** – Apesar da interrupção da instalação de sistemas comerciais de grande porte, as pesquisas básicas continuaram.

Década de 2000

- **2004** – Disco parabólico com motor *Stirling* de 150 kW foi implantado no Laboratório Sandia; o governo espanhol edita um decreto estimulando a compra de 200 MW de energia solar termoeletrica com tarifa garantida.
- **2006** – Implantação da usina de P&D (1 MW) da tecnologia cilíndrico parabólico em Saguro, nos EUA.
- **2007** – Implantação da planta comercial tipo torre PS10, na Espanha e Nevada I, de 60 MW com a tecnologia cilíndrico parabólico.
- **2008** – Andasol I (Espanha, 50 MW), a primeira usina termoeletrica cilíndrico-parabólicos com armazenamento térmico, é comissionada; também. Kimberlina (EUA, 5 MW), a primeira usina solar termoeletrica com concentrador linear de Fresnel, foi implantada.

- **2009** – Na Espanha foram construídos: PS20 (20 MW, torre solar), usinas termoeletricas cilíndricos parabólicos de Puertollano, Andasol II e La Risca todos com 50 MW e PE1 tecnologia Fresnel linear de 1,4 MW. Nos EUA foi construído Sierra Sun Tower (5 MW).

- **2012** – Em 2012 a quantidade acumulada de Usinas solar termoeletrica implantada no mundo era de 2.236 MW, com a predominância da tecnologia de concentração cilíndrico parabólico (95%).

As usinas SEGS (*Solar Electric Generation Systems*) constituíram-se no final do século passado, no maior (354 MWe instalados) e mais bem sucedido exemplo da tecnologia termoeletrica solar com o uso de concentradores cilíndricos parabólicos. As nove usinas SEGS foram construídas em três diferentes locais do deserto de Mojave, na Califórnia (EUA), entre 1984 e 1991, e estão em operação comercial ainda hoje, demonstrando a sua confiabilidade técnica e comercial. Após uma parada na instalação desse tipo de sistema por aproximadamente 15 anos, houve uma retomada vigorosa dessa tecnologia em meados da última década. Em 2012, a quantidade acumulada de Usinas solar termoeletrica implantada no mundo era de 2.236 MW, com a predominância da tecnologia de concentração cilíndrico parabólico (95%). As estimativas de usinas solares termoeletricas em construção ou anunciadas publicamente mostram discrepâncias devido ao uso de critérios diferentes, tais como períodos distintos em considerações e a não atualização das modificações no projeto em termos de potência. Conforme dados da *International Renewable Energy Agency* (2012) estavam em construção cerca de 2.590 MW e anunciadas 4508 MW nos EUA, 1.080 MW na Espanha e 4.386 MW no restante do mundo. Considerando os números apresentados, o ritmo de crescimento e a taxa de acumulação de experiência e ganho de escala nos próximos anos serão bastante significativos. Assim, conforme a curva de aprendizagem elaborada pela Sargent e Lundy (2003), é previsível que nos próximos 10 anos o custo da energia solar termoeletrica seja paritária com a da rede convencional (FIG.2).

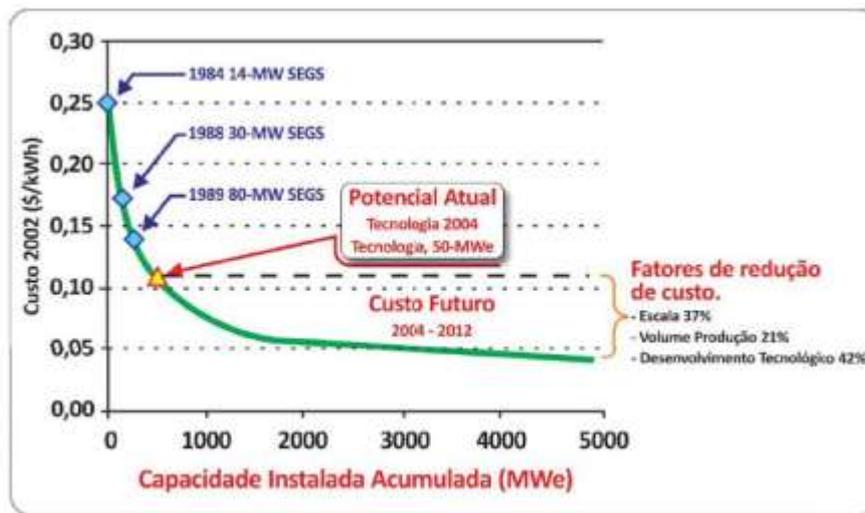


Figura 2 - Custo da eletricidade gerada em função da capacidade instalada acumulada (curva de aprendizado).
 Fonte: Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Impacts, 2003.

Como foi visto anteriormente, a tecnologia de geração solar termoeletrica baseada em concentrador cilíndrico parabólico é a que está nesse momento com maior quantidade acumulada de instalação, além de uma experiência operacional de décadas, demonstrando assim a sua confiabilidade técnica e comercial.

O campo de coletores lineares das SEGS tem como componente básico o sistema de captação SCA (*Solar Collector Assembly*), que são espelhos de vidro curvados formando uma cavidade cilíndrica parabólica onde a irradiação solar direta normal é focalizada. Cada SCA é composto por um coletor parabólico independente, estrutura metálica de suporte, tubos receptores e sistema de rastreamento solar. Os coletores são alinhados sobre o eixo

norte-sul, o que possibilita o rastreamento solar segundo o eixo leste-oeste, assegurando que o Sol esteja continuamente focalizado no tubo absorvedor.

A FIG. 3, indica um diagrama das configurações típicas de usinas do tipo SEGS. No campo de coletores da usina circula um fluido de transferência de calor (óleo com temperaturas da ordem de 400°C) que é aquecido e bombeado através de uma série de trocadores de calor, gerando vapor superaquecido. O fluido, então, retorna ao sistema. O vapor gerado aciona um conjunto convencional turbina-gerador para produzir energia elétrica. O vapor usado pela turbina é depois condensado e retorna aos trocadores de calor para ser transformado novamente em vapor, repetindo o ciclo.

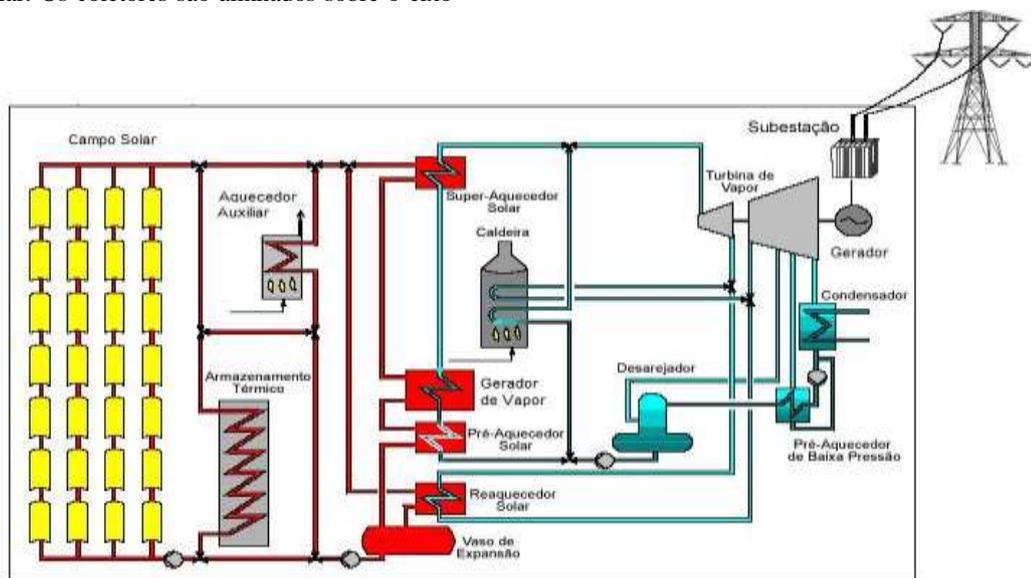


Figura 3 - Configuração típica de usinas tipo SEGS.
 Fonte: Solar Trough (2008).

3. Sistemas de informações geográficas

De acordo com Burrough e McDonnell (1998), um Sistema de Informações Geográficas (SIG) se caracteriza como um conjunto de técnicas implementadas em ambiente computacional que é capaz de manipular, armazenar e recuperar dados, objetivando simular situações e contextos

existentes no mundo real. Todo SIG deve atender as seguintes funcionalidades: (1) entrada de dados gráficos e descritivos; (2) armazenagem e gerenciamento dos dados; (3) interação com o usuário; (4) elaboração de análises dos dados; (5) saída e apresentação de informações (CÂMARA et al., 1996).

A entrada de dados gráficos e descritivos é um aspecto importante, e seleciona os planos de informação (unidades básicas de armazenamento de dados geográficos) a serem usados na aplicação em SIG. Esta etapa não deve ser realizada sem o conhecimento dos fundamentos cartográficos, evitando inconsistências decorrentes da conversão entre as plataformas CAD (*computer aided design*) e SIG, a exemplo da sobreposição de planos de informação em escalas incompatíveis, do uso de documentos oriundos de distintos Sistemas Geodésicos de Referência, entre outras.

O armazenamento e o gerenciamento dos dados são tratados pelo Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), que deve facilitar a entrada, a saída e a recuperação dos dados espaciais, controlando e restringindo o acesso. A interação com o usuário permite o contato com as funcionalidades do SIG. Esta interação deve ser de fácil interpretação, uma vez que as dificuldades advindas da mesma é uma das causas de desuso de sistemas. A análise dos dados é feita tanto na base gráfica, a partir das análises espaciais, quanto na descritiva por meio do uso de operações aritméticas e de Lógica Booleana, permitindo a geração de relatórios, gráficos, mapas, entre outros. A saída de informações pode ser realizada de forma temporária ou definitiva. A primeira se dá quando a informação é apresentada no monitor ou armazenada em mídia magnética. Quando impressa (mídia analógica) tem-se a saída definitiva.

Os dados descritivos são estruturados por listas sequenciais (registros) ou arquivos indexados e compreendem os atributos que descrevem as entidades destes objetos. Os dados descritivos qualificam os dados gráficos por meio dos atributos e são, em geral, armazenados em estruturas tabulares dos Bancos de Dados e controlados pelo SGBD.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), os dados espaciais possuem quatro características indissociáveis, a saber: (1) uma posição geográfica; (2) atributos associados; (3) relações topológicas; (4) uma referência temporal. A posição geográfica responde à questão “onde está?” e tem por objetivo identificar, univocamente; o atributo é a componente do dado espacial que tem por finalidade descrever e caracterizar a feição gráfica, respondendo a questão do tipo: “o que é? do que se trata?”; as relações topológicas descrevem as relações espaciais do objeto com seu entorno e a referência temporal para avaliação do comportamento do dado ao longo do tempo.

As aplicações de SIG tratam geralmente de dois grandes tipos de dados espaciais: (a) Geo-campos: usados para representar grandezas distribuídas espacialmente, tais como tipo de solo, topografia e teor de minerais; (b) Objetos geográficos: que são individualizáveis e têm identificação. Os objetos geográficos (ou geo-objetos) têm atributos não espaciais, armazenados em um banco de dados, podendo estar associado a várias representações gráficas como as escolas, municípios e fazendas.

O objetivo da análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos considerando a localização espacial do

fenômeno em estudo (GOODCHILD; HAINING, 2004). Um dos principais tipos de análise espacial é a álgebra de campos, também chamada de álgebra de mapas, que consiste em um conjunto de procedimentos de análise espacial em SIG com a produção de novos dados com base em funções de manipulação aplicadas a estes. Os elementos da álgebra de campos operam sobre mapas, associando cada local de uma determinada área de estudo a um valor quantitativo ou qualitativo. Os mapas são tratados como variáveis individuais, e as operações definidas sobre estas variáveis são aplicadas de forma homogênea a todos os pontos do mapa. Segundo Barbosa (1997), estas operações podem ser agrupadas em três grandes classes: pontuais, vizinhança e zonais.

As operações pontuais resultam em geo-campos, numérico ou temático, cujos valores são função dos valores associados ao mesmo local por uma ou mais representações de outros geo-campos. Estas operações operam sobre mapas (fatiar um Modelo Numérico de Terreno, por exemplo) ou sobre conjuntos espaciais (operações booleanas, por exemplo), podendo ser do tipo matemáticas ou de transformações (ponderação, fatiamento, entre outros).

As operações de vizinhança atuam sobre um geo-campo influenciado pela dimensão e forma da vizinhança (máscara). Durante a operação a máscara se desloca, aplicando ao geo-campo os valores do atributo delimitados pela máscara. No ambiente computacional, o formato de máscara mais usado é o de uma matriz de células. A filtragem espacial de geo-campos usando representação imagem e cálculo de declividades a partir de um geo-campo de altimetria são exemplos de operações de vizinhança que usam máscara no formato matriz de células (BARBOSA, 1997).

Nas operações zonais em álgebra de campos, o valor de cada posição geográfica do geo-campo destino depende do valor do atributo em todas as posições geográficas que compõem a região no geo-campo origem. Diferente das transformações de vizinhança, em que cada posição geográfica possui sua própria vizinhança representada por uma máscara que se desloca sobre os dados, nas transformações zonais as regiões são estáticas e não se deslocam sobre a região geográfica de estudo. Exemplos de operações zonais são as operações de maioria zonal e as de diversidade zonal.

4. Metodologia

A identificação dos locais mais favoráveis para a instalação de centrais elétricas solares de grande porte, exige os procedimentos conforme esquematizados na FIG. 4. Os procedimentos são aplicados com as informações documentais existentes previamente e por isso é recomendado em uma segunda fase, que sejam feitas visitas em campo para a ratificação ou não dessas informações. Para o conjunto de locais resultantes dessa filtragem, é interessante iniciar imediatamente as medições da irradiação nesses locais, uma vez que, a radiação solar é a variável de maior peso na economicidade do futuro empreendimento.



Figura 4 - Fluxograma de procedimentos para a identificação dos locais mais favoráveis para a instalação de centrais elétricas solares de grande porte.
Fonte: CEMIG - Altas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

Com as irradiações medidas em pelo menos 1 ano (o ideal seria mais de 3 anos) e levando em consideração todos os outros itens mencionados a escolha de onde deverá ser o empreendimento é feita. No caso de centrais solares para produção de eletricidade utilizando de médias ou altas concentrações são imprescindíveis locais com alto nível de irradiação solar direta.

Em estudos de localização de usinas solares de grande porte, entre outras as seguintes variáveis são ponderadas: recurso solar (global ou direta conforme a tecnologia solar a ser utilizada: fixo ou com concentração), disponibilidade de terrenos de forma não conflituosa (terras agriculturáveis, reservas ou parque nacionais, reservas indígenas são excludentes), proximidade de acessos para transporte de equipamentos de porte ou delicados (espelhos), proximidade de linhas de transmissão disponibilidade local de água de boa qualidade (prescindíveis para sistemas fotovoltaicos). De forma individual, o conhecimento do recurso solar é a variável de maior peso nas incertezas associadas a um projeto de sistema energético solar.

O conjunto das informações mencionadas acima é padronizada em planos de informação (mapas geo-referenciados) que são cruzados, resultando assim em informações novas e úteis para identificação dos locais mais promissores. Os seguintes planos de informações foram utilizados para identificação inicial das regiões mais promissoras do Estado: irradiação solar direta normal (SWERA, 2005); declividade (SRTM); recurso hídrico; linha de transmissão (CEMIG); uso e ocupação do solo (EMBRAPA).

5. Análise e diagnósticos

5.1. Recurso solar

Uma central termoeletrica solar com concentração requer alta incidência de irradiação solar direta normal por que utiliza, praticamente, a parcela direta da irradiação solar que incide em sua superfície. De acordo com a equação indicada

abaixo, a irradiação solar incidente no plano de coleção do concentrador (I_c) é determinada pela componente direta normal (I_b) somada a componente difusa (I_d) dividida pela concentração (C). Então, nas centrais solares onde existe uma razão de concentração de $50 < C < 100$, típico por exemplo, das centrais comerciais de tecnologia cilíndrico parabólico, a contribuição da componente difusa é desprezível ou seja, $I_c \sim I_b$. Por isso, para o estudo da localização ótima destas centrais faz-se imprescindível o conhecimento da irradiação solar direta normal.

$$I_c = \frac{I_b + I_d}{C}$$

Para sistemas de baixa concentração ou plano, esse fator é menos crítico mas, mesmo assim, o pré-requisito ainda é um bom nível de irradiação solar global, o que normalmente ocorrem em regiões também de alta incidência da irradiação solar direta.

Uma central solar para a produção de eletricidade exige alta concentração de irradiação solar, superior a 2100 kWh/m² ano, ou seja maior que 5,75 kWh/m² dia, conforme a média anual. Tais valores são um pouco acima do que usualmente são utilizados para a elaboração dos estudos de viabilidade da instalação de centrais termoeletricas no mundo.

Minas Gerais dispõe de vastas regiões que preenchem os critérios mencionados acima. No que concerne à radiação solar global (FIG. 5) verifica-se que a metade do Estado, mais precisamente que todo o lado ocidental, possui radiação solar global diária, média anual entre 5,5 a 6,5 kWh/m² dia Quanto à radiação solar direta normal diária, média anual, também coincide com a mesma região (FIG. 6).



Figura 5 - Irradiação solar diária global, média anual para o Estado de Minas Gerais.
Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

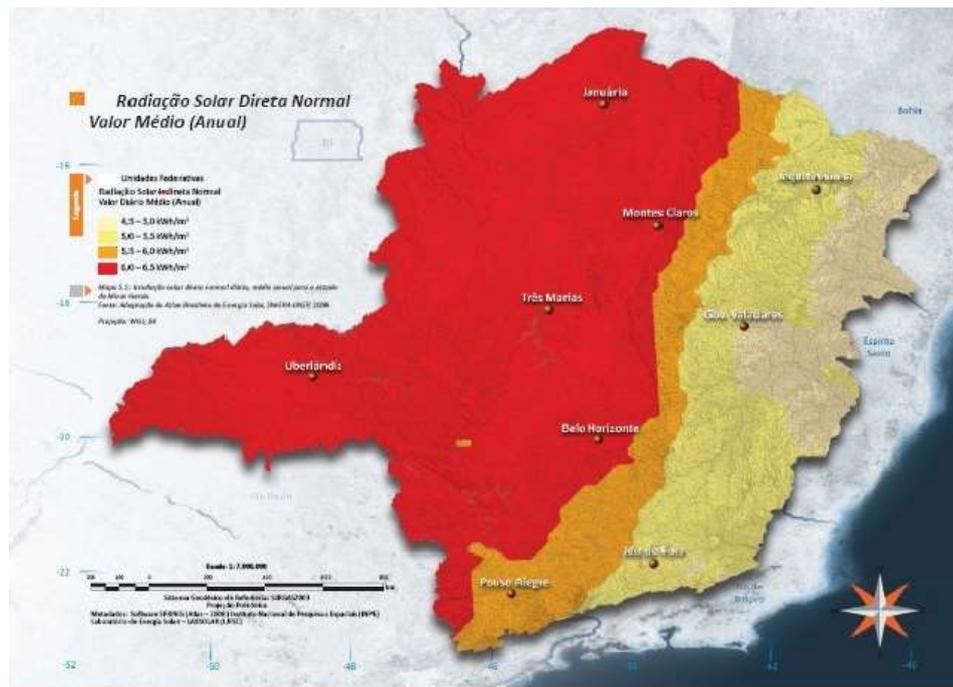


Figura 6 - Irradiação solar direta diária, média anual para o Estado de Minas Gerais.
Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

5.2. Disponibilidade e topografia do terreno

Os concentradores cilíndricos parabólicos têm demanda por áreas relativamente grandes. Uma central solar constituída de uma usina de 80 MWe requer uma área de cerca de 500.000m² (sem considerações de armazenamento térmico) de arranjo de coletores. O fator de escala derivado das experiências de construção de centrais solares mostra que

é vantajoso instalar várias usinas adjacentes, constituindo um parque solar. Assim, a disponibilidade mínima de área poderia ser 2-8 km², para a instalação sucessiva e modular dessas centrais.

A topografia do terreno onde será implantada a central solar determina a aceitabilidade do local segundo seu impacto no custo relativo à preparação e nivelamento do terreno. Esse local deve ser o mais plano possível (com

declividade menor que 2%), porém, o suficiente para permitir uma drenagem natural do terreno. Em relação ao horizonte visual do campo de coletores somente são permitidas obstruções, morros, árvores, torres ou outras com ângulos visuais menores que 10°. A FIG. 7, representa as declividades

do terreno do Estado. É possível identificar regiões contínuas (“manchas”) de baixa declividade (<3%) no Noroeste de Minas Gerais, na região de Januária, Janaúba e Capão Redondo.

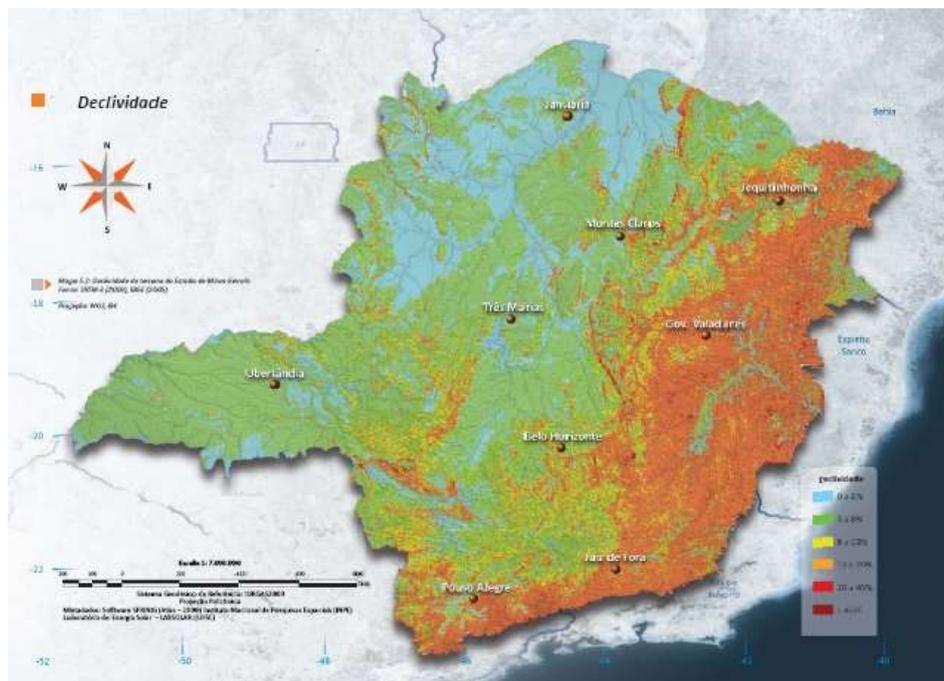


Figura 7 - Declividade do terreno no Estado de Minas Gerais.
Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

5.3. Uso e ocupação do solo

Na implantação de uma central solar devem ser consideradas as permissões e eventuais restrições de utilização do solo. As permissões referem-se às questões de relação contratual estabelecida entre os proprietários da terra e os desenvolvedores do projeto, ao passo que a restrição refere-se à utilidade destinada ao solo. Neste sentido, observa-se que regiões de áreas urbanas ou expansão urbana, Áreas de Proteção Ambiental (APP), áreas de produção de alimentos (cultiváveis), territórios quilombolas e territórios indígenas, por exemplo, são consideradas regiões inadequadas para a instalação das centrais solares. As regiões secas e áridas são consideradas típicas para a implantação destas centrais.

Também, o histórico dos desastres naturais tais como tremor de terra, rajadas de vento muito forte, tempestades de areia, granizo, raios, entre outros são fatores potenciais de

danos ou de interrupção do funcionamento das centrais solares. Também deve ser considerada a qualidade do solo.

5.4. Conexão com a rede elétrica

Os requisitos de conexão com a rede elétrica para uma central solar que usa coletores cilíndricos parabólicos são semelhantes aos de outras usinas a vapor. Uma usina que produz 80 MWe de potência, por exemplo, deve dispor de linhas de transmissão de 230kV. Além de capacidade de carga, deve-se considerar outro aspecto importante: distância entre a central solar e as linhas de transmissão. Os custos efetivos com a construção de novas linhas de transmissão são, em geral, muito altos e dependem do nível de voltagem da linha e de seu comprimento. Assim, a central solar deve estar posicionada o mais perto possível de linhas de transmissão. Na FIG. 8, abaixo, estão representadas as linhas de transmissão presentes no Estado de Minas Gerais.



Figura 8 - Linhas de Transmissão existentes no Estado de MG.
Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

5.5. Suprimento de água

Uma usina cilíndrico parabólico de 50 MWe operando durante 350 dias no ano e 10 horas por dia, por exemplo, usa cerca de 500.000m³ de água ou 1.500 m³/dia. Esta água é necessária para as torres de refrigeração (cerca de 90%), geração de vapor no ciclo de potência (8%) e para a limpeza dos espelhos (2%). O fluxo típico para a torre de refrigeração é de 320m³/h. A água deve ter também qualidade adequada para evitar incrustações e oxidações dos equipamentos.

A disponibilidade de água é uma questão importante na região do semi-árido, haja vista que se conhece a relativa escassez de mananciais hídricos de superfície, o que põe em evidência a importância das águas subterrâneas. De forma geral o Estado de Minas Gerais é bem suprido de água. Como consequência, esse aspecto não será restritivo para a instalação de grandes centrais solares.

5.6. Disponibilidade de combustível e outros energéticos para Backup

Combustíveis ou outros energéticos para *backup* são necessários para a operação híbrida da central solar (recurso solar +combustível). Nas centrais solar cilíndrico parabólicos

existente no exterior são usados o gás natural como combustível de *backup*. Na região do semi-árido mineiro anúncios recentes mostram uma boa ocorrência de gás, o que é muito promissor.

5.7. Acesso

O acesso ao local é relevante pela necessidade de transportar equipamentos de grande porte e frágeis (espelhos de vidro). Os critérios para classificar o acesso são as larguras das rodovias, qualidade da superfície da estrada e possibilidades de manobras de veículos de grande porte. De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER/MG, 2010), o Estado tem 8.957 km de rodovias federais (apenas 667 km não pavimentados) e 26.604 km de rodovias estaduais (7.238 km não pavimentados). Já no que diz respeito à malha ferroviária, Minas Gerais conta com 5.080 km de ferrovias e as principais empresas que atuam no setor são a Ferrovia Centro-Atlântica, a MRS Logística S.A. e a Estrada de Ferro Vitória-Minas. Ainda, Minas Gerais apresenta rios navegáveis, a exemplo dos rios Paranaíba, Paracatu, das Velhas, Paraopeba e São Francisco (FIG. 9).



Figura 9 - Acessos no Estado de Minas Gerais.
 Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

6. Identificação e priorização de locais

Considerando os aspectos mais relevantes mencionados anteriormente, e tomando como referência os limites das microrregiões definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), chegou-se à classificação das

áreas mais promissoras no Estado de Minas Gerais, conforme a FIG. 10: (microrregião de Janaúba, Januária, Pirapora e Unaí, Pirapora e Paracatu, Curvelo e Três Marias, Patrocínio e Araxá).

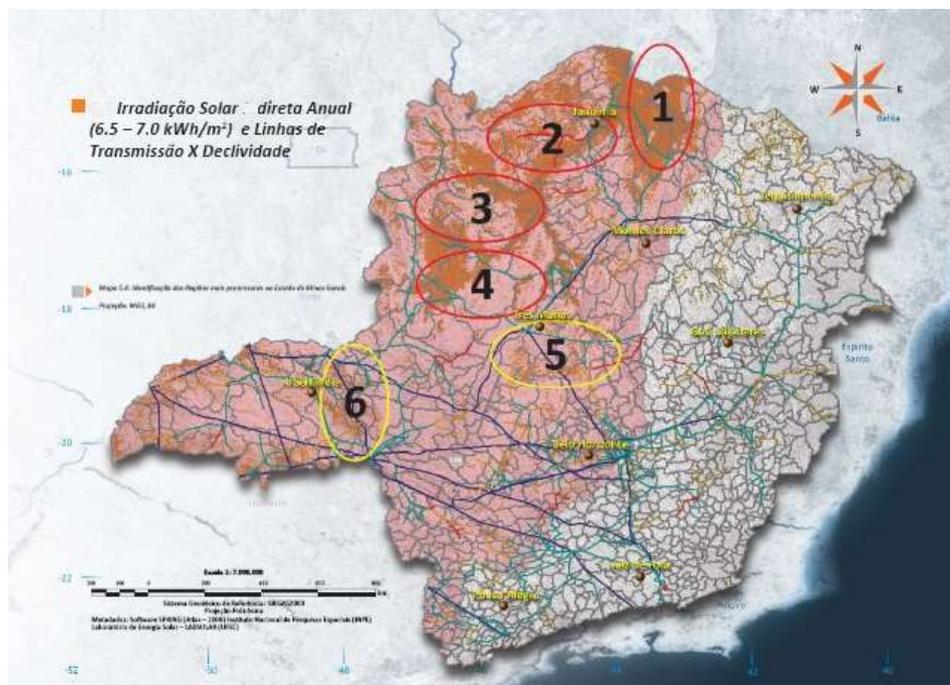


Figura 10 – Regiões promissoras do Estado de Minas Gerais conforme o cruzamento da irradiação solar diária direta, média anual, declividade e linhas de transmissão.
 Fonte: CEMIG - Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

Área 1 – Microrregião Janaúba

A microrregião de Janaúba pertence à mesorregião Norte de Minas. Sua população, de acordo com o Censo demográfico de 2010, era de 273.275 habitantes e está dividida em treze municípios com destaque para Janaúba, Jaíba e Espinosa, possuindo uma área total de 15.155,227 km² (IBGE, 2011). É a área mais bem dotada de irradiação solar direta normal em Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 – 2.400 kWh/m², atingindo no verão a 2500-2.700 kWh/m². A maior parte do território tem baixa aptidão agrícola, baixa declividade e ausência de unidades de conservação. Os municípios de Espinosa e Mocimbuinho, localizados nessa microrregião, apresentam os maiores valores da irradiação solar direta normal no Estado. Os maiores centros consumidores da Área 1 estão nos municípios de Janaúba, Jaíba e Espinosa, com aproximadamente 66 mil, 33 mil e 31 mil habitantes (IBGE, 2011), respectivamente. A microrregião de Janaúba, teve um consumo faturado pela Cemig, em 2010, de 240 GWh (CEMIG, 2011). Nas proximidades dessa Área localiza-se também o importante centro consumidor de Montes Claros, um dos principais pólos do Estado.

Área 2 – Microrregião de Januária

A microrregião de Januária pertence à mesorregião Norte de Minas. Sua população, de acordo com o Censo demográfico de 2010, era de 254.055 habitantes e está dividida em dezesseis municípios, onde se destacam Januária e São Francisco. Possui uma área total de 33.169,626 km² (IBGE, 2011), sendo também uma área bem dotada de irradiação solar direta normal em Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 – 2.400 kWh/m², atingindo em partes do seu território no verão a 2500-2.700 kWh/m². É importante ressaltar que nesta região encontram-se áreas de média a alta aptidão agrícola, além de possuir unidades de conservação em seu território. Quanto ao aspecto da declividade, as regiões que apresentam continuidade inferior a 3% de declividade são menores, se comparado à Área 1. Já na porção Norte de Januária há menores restrições quanto aos aspectos mencionadas anteriormente. Também é importante frisar que o município de Montalvânia, localizado ao Norte dessa microrregião, apresenta os maiores valores da irradiação solar direta normal. Os maiores centros consumidores da Área 2 estão nos municípios de Januária e São Francisco, com aproximadamente 65 mil e 53 mil habitantes (IBGE, 2011). A microrregião de Januária teve um consumo faturado pela Cemig, em 2010, de 147 GWh (CEMIG, 2011).

Área 3 – Microrregião de Pirapora e Unaí

A Área 3 identificada compreende duas microrregiões: a porção Sul da microrregião de Unaí e a porção Norte da microrregião de Pirapora, ambas pertencentes à mesorregião Norte de Minas. A microrregião de Pirapora possui uma área total de 23.071,697 km². Os principais municípios são Pirapora e Várzea da Palma. A população total da microrregião em 2010 de acordo com o Censo Demográfico era 164.941 habitantes (IBGE, 2011). A microrregião de Unaí, em 2010, de acordo com o censo demográfico, tinha uma população de 148.829 habitantes e está dividida em nove municípios. Possui uma área total de 27.383,810 km². Os

principais municípios são Unaí e Buritis com aproximadamente 77 mil e 22 mil habitantes, respectivamente. A área 3 possui radiação solar direta normal com valores anuais de 2.200 – 2.400 kWh/m², sendo que grande parte do território apresenta baixa ou muito baixa aptidão agrícola e ausências de Unidades de Conservação e Território indígena. Quanto ao aspecto da declividade, é pior em relação a Área 1, na medida em que a densidade de regiões contínuas de declividades baixas, menores que 3%, é menor. Ainda assim, é uma região com declividades razoáveis. Cabe ressaltar novamente que o município de São Romão, que localiza-se ao Norte da microrregião de Pirapora, é uma das regiões com maiores níveis de irradiação solar total. Juntas essas duas microrregiões tiveram um consumo faturado pela Cemig no ano de 2010 de 2.989 GWh (CEMIG, 2011).

Área 4 – Microrregião de Pirapora e Paracatu

A Área 4 identificada compreende parte de duas microrregiões: a porção Sul da microrregião de Pirapora e a microrregião de Paracatu. A microrregião de Paracatu pertence à mesorregião Noroeste de Minas e possui uma área total 34.997,251 km² e, de acordo com o Censo, possuía em 2010 cerca de 217.555 habitantes. Os principais municípios são Paracatu e João Pinheiro, com aproximadamente 84 mil e 45 mil habitantes, respectivamente (IBGE, 2011). Essas regiões possuem uma irradiação solar direta normal no Estado de Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 – 2.400 kWh/m². A maior parte da área 4 possui baixa ou muito baixa aptidão agrícola, ausências de unidades de conservação e territórios indígenas. A declividade principalmente na microrregião de Paracatu é bastante favorável tanto pelo extensão como pela continuidade. Juntas essas duas microrregiões tiveram um consumo faturado pela CEMIG em 2011, de 3.323 GWh.

Área 5 – Microrregião de Curvelo e Três Marias

A Área 5 identificada compreende parte de duas microrregiões: a microrregião de Curvelo e a microrregião de Três Marias, ambas pertencentes a mesorregião Central Mineira. A microrregião de Curvelo possui uma área total 13.749,120 km² e cerca de 150.661 habitantes. Os principais municípios são Curvelo e Corinto. A microrregião de Três Marias possui uma área total 10.509,238 km² e cerca de 95.900 habitantes (IBGE, 2011). Os principais municípios são Três Marias e Pompéu. Essas regiões possuem uma irradiação solar direta normal em Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 – 2.400 kWh/m². A microrregião de Curvelo possui locais de média e alta aptidão agrícola porém, ausências de unidades de conservação e território indígena. Existem sítios onde as declividades são baixas, mas, tanto no que concerne à área total como também pela descontinuidade, são piores do que as outras áreas anteriormente analisadas. A microrregião de Três Marias também segue esse padrão; porém, é perceptível a existência de áreas maiores de baixa declividade. No entanto, essas microrregiões apresentam uma densidade maior de linhas de transmissão e estão muito mais próximos de grandes centros consumidores como, por exemplo, Sete Lagoas e Belo Horizonte (distante 170 Km de Belo Horizonte). Os principais centros consumidores locais compreendem os

municípios de Diamantina (44 mil habitantes, 39 GWh) e Curvelo (72 mil habitantes, 78 GWh). A região é atravessada por linhas de transmissão de 138 kV e 34,5 kV e pelas rodovias BR-259, BR-367 e MG-220.

Área 6 – Microrregião de Patrocínio e Araxá

A Área 6 compreende parte de duas microrregiões: a microrregião de Patrocínio e a microrregião de Araxá, ambas pertencentes a mesorregião Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. A microrregião de Patrocínio possui uma área total 11.980,072 km² e cerca de 197.806 habitantes. Os principais municípios são Patrocínio e Monte Carmelo. A microrregião de Araxá possui uma área total 14.103 km² e cerca de 201.585 habitantes. Os principais municípios são Araxá e Sacramento (IBGE, 2011). Essas regiões possuem uma irradiação solar direta normal no Estado, com valores anuais entre 2.200 – 2.400 kWh/m². A microrregião de Patrocínio possui locais de média e alta aptidão agrícola e ausências de unidades de conservação e território indígena, já a microrregião de Araxá possui unidades de conservação. De maneira geral, existem regiões onde as declividades são baixas, mas tanto no que diz respeito à área total como quanto à descontinuidade são similares à Área 5. Também deve ser ressaltado que essa microrregião tem uma densidade maior de linhas de transmissão e estão muito mais próximos de grandes centros consumidores como Uberlândia e Uberaba (154 km de Uberlândia, por exemplo). As microrregiões 5 e 6 possuem menos regiões planas, mas têm a grande vantagem de estarem situadas mais próximas dos grandes centros consumidores da energia elétrica e no interior de uma região com maior densidade de linhas de transmissão.

7. Conclusão

O estudo identificou um potencial bastante promissor de geração de energia solar termoelétrica de grande porte, chegando a uma irradiação solar direta anual de 2700 kWh/m² no verão e de cerca de 2200-2400 kWh/m² em bases anuais, que compreende uma vasta região a Norte/Nordeste do Estado de Minas Gerais. Também é possível observar nessas regiões áreas bastante planas e contínuas, com declividades menores que 3% e disponibilidade de recursos hídricos de boa qualidade (abundante e bem distribuídas). Além disso, a porção Norte e Nordeste do Estado possui relativamente poucas áreas com alta aptidão agrícola e uma quantidade reduzida de unidades de conservação. No entanto, de uma maneira geral, a cobertura de linhas de transmissão na região é adequada, sendo de maior densidade na região Sul e Sudoeste do Estado.

A presente análise tratou-se de uma primeira abordagem macro-espacial visando à identificação das localidades mais promissoras. Uma análise de viabilidade econômica mais detalhada necessita da medição local da irradiação solar por pelo menos 3 anos, e um vasto trabalho de campo para o aprofundamento e detalhamento dos outros aspectos envolvidos dentre os requisitos para possíveis instalações futuras.

Além das áreas citadas existem outras, de extensões menores, porém suficientes para instalação de grandes centrais solares. Tais empreendimentos poderiam estar mais bem localizados quanto ao acesso, proximidades das linhas

de transmissão e de centro de consumo, embora piores do ponto de vista da declividade e da concorrência com terrenos com média e alta aptidão agrícola. Uma análise mais detalhada do custo-benefício para centrais localizadas nessas regiões deverá ser feita no futuro.

Finalmente, cabe ressaltar que esse potencial poderá ser explorado gradativamente a médio prazo, conforme o esgotamento de outras fontes energéticas, da prontidão crescente dessas tecnologias e com criação de um complexo gerador constituídos de sistemas híbridos solar-eólico, na medida que se observou uma forte complementariedade temporal desses recursos.

REFERÊNCIAS

- [1] BARBOSA, C. C. **Álgebra de Mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, 1997.
- [2] BRAVO, J. D. **Los sistemas de información geográfica en la planificación e integración de energías renovables**. Madrid: Editorial CIEMAT, 2002.
- [3] BROESAMLE, H.; SCHILLINGS, C.; TRIEB, F. Assessment of Solar Electricity Potentials in North Africa Based on Satellite Data and a Geographic Information System. **Solar Energy**, v. 70, n. 1, p. 1-12, 2001.
- [4] BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Clarendon Press, 1998.
- [5] CÂMARA, G. et al. **Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas**. Rio de Janeiro: Cartógraf LTDA, 1996.
- [6] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **25º Balanço Energético de Minas Gerais**, 2011.
- [7] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**, 2012.
- [8] GOODCHILD, M. F.; HAINING, R. P. GIS and spatial data analysis: covering perspectives. **Papers in Regional Science**, v. 83, p. 363-385, 2004.
- [9] IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010 - Resultados do Universo**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo>. Acesso em: out. 2011.
- [10] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Concentrating solar power – Renewable Energy Technologies, Cost Analysis Series, **IRENA Working Paper**. Disponível em: <http://costing.irena.org/media/2794/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf>. Acesso em: jun. 2012.
- [11] SARGENT & LUNDY LLC CONSULTING GROUP. **Assessment of Parabolic Trough and Power Tower**

Solar Technology Cost and Performance Impacts.

Disponível em: < <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34440.pdf>>. Acesso em: jun. 2012.

[13] **SWERA**. Disponível em: <<http://www.swera.unep.net>> Acesso em: jun. 2012.

[12] **SOLAR TROUGH**. Disponível em: <http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf> Acesso em: mai. 2012.

Localization study of solar thermoelectric plant in Minas Gerais state, Brazil

Chigueru Tiba¹
Ruibran Januário dos Reis²
Melina Amoni Silveira Alves³

¹ Physicist (USP). Master in Nuclear Technology (USP). Ph.D in Nuclear and Energy Technologies (UFPE). Professor at UFPE.

² Meteorologist (UFRJ). Master in Environmental Engineer (UFMG). Ph.D in Geography (PUC-Minas). Professor at PUC-Minas.

³ Geographer (PUC-Minas). Master in Geography (PUC-Minas). Graduate Student in Geography (PUC-Minas).

Abstract Solar energy is gaining space in world's context, however, in Brazil, is not yet explored in large projects. Although, it is known that the country has areas with direct irradiation of high intensity and low seasonality factor, especially in semiarid and particularly in the North and Northeast of Minas Gerais. This article aims to assess the location for installation of thermal power plants in the state, using the technology of Geographical Information System. We identified levels of irradiation promising for generating solar energy reaching the value of 2200-2400 kWh/m²/year for the semiarid region of Minas Gerais. These regions have flat areas, availability of water resources, low agricultural potential and good coverage of transmission lines. Considering these relevant variables to the classification we found six promising regions (Janaúba, Januária, Pirapora e Unaí, Pirapora e Paracatu, Curvelo e Três Marias, Patrocínio e Araxá). It should be emphasized that this potential can be exploited in the medium term, with the depletion of other energy sources.

Keywords: solar power; solar thermal power; geographic information system.

Informações sobre o autor

Chigueru Tiba (UFPE)

Endereço para correspondência: Avenida Professor Luiz Freire, 1000, Cidade Universitária, Recife – PE, 50740-540.

E-mail: tiba@ufpe.br

Link para o currículo lattes: <http://lattes.cnpq.br/9914659189514029>

Ruibran Januário dos Reis (PUC-Minas)

Endereço para correspondência: Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte – MG, 30535-901.

E-mail: ruibrandosreis@gmail.com

Link para o currículo lattes: <http://lattes.cnpq.br/8900649523524906>

Melina Amoni Silveira Soares (PUC-Minas)

Endereço para correspondência: Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte – MG, 30535-901.

E-mail: geomelina@yahoo.com.br

Link para o currículo lattes: <http://lattes.cnpq.br/6946557457020174>

Artigo Recebido em: 01-08-2014

Artigo Aprovado em: 12-10-2014