



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4754
GES/19

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

Mapeamento geográfico da viabilidade da implantação de Usinas Heliotérmicas CSP por Cilindro-parabólicos nas diversas regiões brasileiras

EDUARDO CHIARANI(1); DANIELLE DRAGO(1); KRISTIE KAMINSKI KUSTER(1); LUIS ALEXANDRE CATUSSI PASCHOALOTTO(2); ANA PAULA OENING(1); LACTEC(1);CESP(2);

RESUMO

A geração de energia elétrica pela fonte solar tem crescido significativamente no Brasil. Entretanto, usinas de produção em larga escala, como plantas termossolares, ainda necessitam de maiores estudos e incentivos para sua consolidação e viabilização no país. Neste estudo do LACTEC em conjunto com a CESP, são mapeadas e analisadas as condições de regiões do Brasil, verificando o seu potencial e reiterando que o Brasil contém parâmetros com viabilidade à implantação de usinas termossolares.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas termossolares, Viabilidade, DNI, Análise Multicritério, AHP, SIG

1.0 - INTRODUÇÃO

A matriz energética no Brasil é composta principalmente de fontes renováveis de geração de energia, representando em torno de 85% da produção total, enquanto 15% da geração é composta por combustíveis fósseis (1). Apesar deste índice favorável, 77% se concentram em geração hidráulica, representando 65,5% da geração total. Essa dependência, perante a possíveis racionamentos de água nos sistemas de usinas hidrelétricas, causa a necessidade de compensação energética por usinas termelétricas com o uso de combustíveis fósseis, poluentes e com custo maior em relação às hidrelétricas, afetando a economia brasileira (8). Desta forma, propõe-se uma maior diversificação de fontes renováveis de geração de energia. A energia heliotérmica ou termossolar é uma das alternativas, tendo em vista que, além de utilizar energia solar, é considerada uma forma despachável (controlável) de geração através do armazenamento do calor produzido (4)(6).

Entre as tecnologias termossolares, destaca-se a Concentração de Energia Solar (CSP) por meio de Coletores Cilindro-parabólicos (CCP). Este é o subsistema com maior crescimento nos últimos anos, sendo a Espanha e os Estados Unidos líderes em produção, enquanto China, Índia, Chile, África do Sul e países do Oriente-Médio, investem significativamente na tecnologia devido ao alto potencial de irradiância solar direta (DNI) encontrado nos países (7).

Para detectar a viabilidade da implantação de usinas termossolares é aconselhado o uso de estratégias de auxílio a tomada de decisão, analisando as condições geográficas necessárias, como os valores de DNI, em comparação com as encontradas nos locais de possível instalação (4).

Neste estudo, visa-se desenvolver uma metodologia de análise multicritério geoespacial como instrumento de apoio à determinação da viabilidade de locais à instalação de uma usina CSP por CCP, na qual será inserida o processo de Análise Hierárquica (AHP), como forma de Análise de Decisão Multicritério (MCDA), e álgebra de mapas por Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Desta forma, pretende-se selecionar os critérios que afetam a instalação e operação da tecnologia, processar dados geoespaciais de cada critério quanto ao panorama geográfico dos locais de instalação, classificar e definir as ponderações dos critérios nas camadas de informação, e, por fim, obter os resultados de viabilidade dos locais geográficos à implantação de usinas termossolares.

2.0 - USINAS TERMOSSOLARES CSP POR CCP E ANÁLISE MULTICRITÉRIO BASEADA EM SIG

2.1 Tecnologia CSP por coletores cilindro-parabólicos

A geração heliotérmica é descrita como a produção de energia elétrica a partir de um ciclo termodinâmico pela concentração de energia solar. Sendo composto por três subsistemas: campo solar; armazenamento térmico; e bloco de potência (4). A tecnologia CSP utilizada no estudo é a CCP, que compõe cerca de 93,7% do potencial total mundial de concentração solar entre as tecnologias disponíveis, sendo a mais utilizada. O sistema de geração de energia por CCP é composto por três fases: campo solar; bloco de potência; e armazenamento térmico. Na Figura 1, é representado o ciclo básico de uma planta de geração termossolar, em que:

- a. Campo solar compreende um sistema de espelhos em formato cilíndrico com concavidade parabólica que concentram a componente direta da irradiação solar (DNI) em uma linha focal, ocupada por um tubo metálico com fluido térmico de transferência de calor (óleo sintético ou sal fundido). O fluido térmico é então conduzido aos blocos de armazenamento térmico e blocos de potência;
- b. No sistema de armazenamento térmico, o fluido aquecido é armazenado, possibilitando a flexibilidade de geração de energia pelo controle do despacho deste aos blocos de potência.
- c. Nos blocos de potência, o calor do fluido entra em contato com um sistema de resfriamento e produz vapor, que passa através de um sistema de turbinas, produzindo energia mecânica e posteriormente eletricidade;

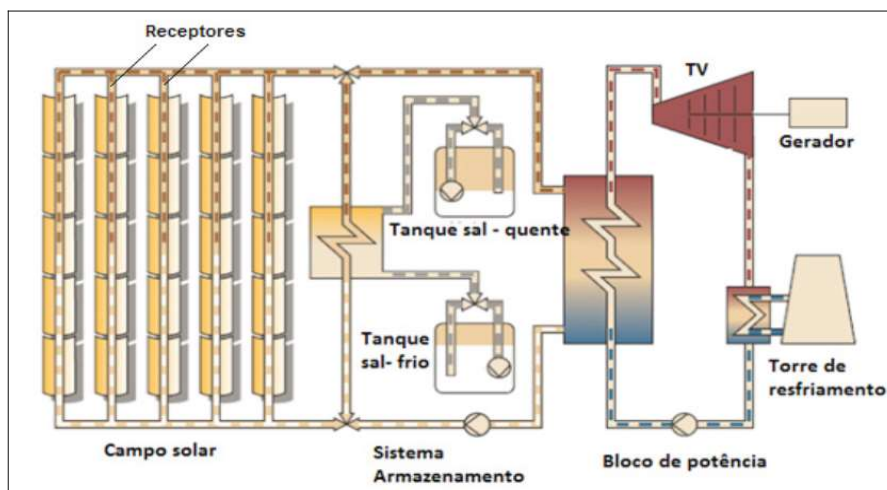


FIGURA 1 – Esquema básico de uma planta de geração termossolar por CCP (4).

Segundo Pereira et. al. (2014), na cadeia de valor de planejamento de usinas heliotérmicas, dois elementos iniciais são: a viabilidade técnica e econômica e a escolha do local da instalação. Assim, destaca-se a importância da análise de parâmetros técnicos, econômicos e geográficos, para avaliação da viabilidade da instalação de uma usina termossolar. Para tanto, sugere-se o uso de métodos de auxílio a tomada de decisão através da análise de condições geográficas locais como critérios que contribuem ao estudo (4)(6).

2.2 Análise de decisão multicritério (AHP baseado em SIG)

Os métodos MCDA permitem avaliar a potencialidade de alternativas pela ponderação de múltiplos critérios, mensuráveis e imensuráveis, através de regras de decisão. Um dos processos mais conhecidos é o AHP, que a partir de um objetivo, pondera os critérios de forma pareada a partir de matrizes de pareamento, para avaliar as alternativas de decisão (5). Enquanto a finalidade do SIG é inserir a componente espacial como alternativas de decisão, através das condições representadas por camadas de informações e das interações entre estas camadas. Quando utilizados em conjunto, os métodos são chamados de AHP baseado em SIG (2)(3). O SIG também pode ser utilizado na criação e gerenciamento do banco de dados geográficos (BDG), e no tratamento das camadas de informação por geoprocessamento. Uma das formas de manipulação de dados realizada no geoprocessamento em softwares SIG é a álgebra de mapas, que consiste na utilização de operadores algébricos e modelagem cartográfica na combinação de duas ou mais informações ou dados espaciais distintos, como pelo método de Combinação Linear Ponderada (CLP), que utiliza a combinação de valores de pixels de dados na estrutura raster (3).

Estes métodos já foram utilizados em conjunto em uma série de estudos, porém, neste se diferencia devido a escolha dos critérios e aos métodos de geoprocessamento, que são empregados de forma a conservar as premissas das condições e permitir que a única inferência seja advinda das ponderações do método AHP.

3.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo visa um modelo de solução abrangente a diferentes regiões do Brasil, porém, para determinar e avaliar uma metodologia, foi definido como estudo de caso o estado de São Paulo. A escolha do estado foi embasada no fato do estudo estar envolvido no projeto da construção da primeira usina termossolar no Brasil, pela Companhia Energética de São Paulo (CESP), nas acomodações da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, na cidade de Rosana, estado de São Paulo.

3.1 Precondições geográficas

As precondições geográficas foram inicialmente definidas em critérios de: Qualidade da irradiância normal direta (DNI); Topografia; Proximidade à elementos da rede elétrica; Proximidade à recursos hídricos; Proximidade à infraestrutura de transporte; Propriedades do solo; Impacto ambiental; Condições climáticas; Sismologia; Fornecimento de combustível; Aceitação social; Permissões e licenças (4).

Para cada critério foi avaliada a relevância perante ao estudo e definido em critério classificatório ou restritivo. Com isso, para alguns critérios foram definidos subcritérios e outros foram desconsiderados (Fornecimento de combustível; Condições climáticas; Sismologia, Aceitação social; Permissões e Licenças). Vale destacar o critério de DNI, que foi definido como classificatório, devido a variação no índice nas diferentes regiões do estado de SP, e como restritivo pois foi definido, em etapa paralela do projeto CESP, que valores de DNI abaixo de 1784 kWh/m²/ano não são aconselhados para um funcionamento viável de usinas termossolares.

Posterior à definição dos critérios e subcritérios, e da região de estudo de caso, foi criado o BDG, em que foram obtidas as camadas de informação para cada critério, através de fontes oficiais e com metadados.

4.0 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

A partir da metodologia AHP baseada em SIG, foi desenvolvida uma abordagem para aplicação no projeto. Na Figura 2 é apresentada a esquematização das etapas de processamento.

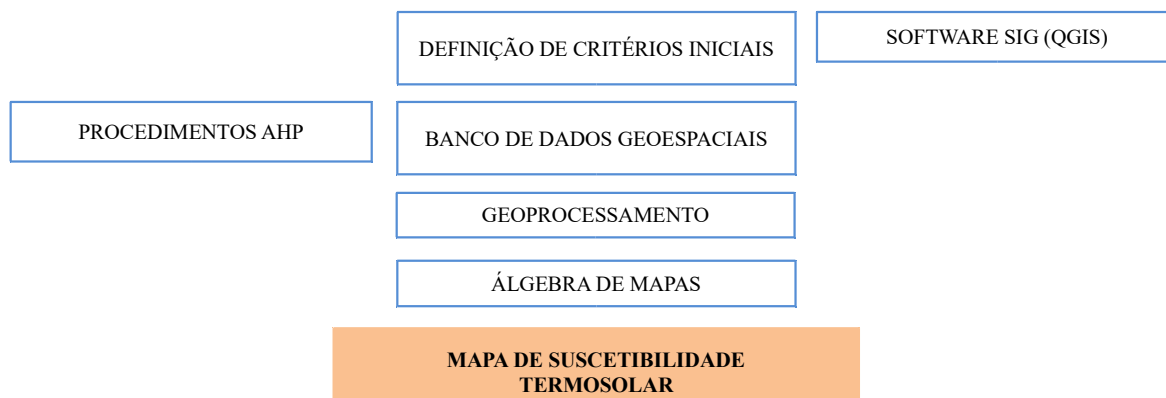


FIGURA 2 – Esquematização das etapas de processamento

4.1 Procedimentos AHP

A partir da definição das precondições em critérios e subcritérios, foi determinada a hierarquização conforme processo AHP. Para construção das matrizes de pareamento e consistência, foi gerado um formulário online contendo 5 Questionários, pela plataforma *JotForm* e enviados a profissionais especializados ou que trabalham com energia termossolar, para seu devido preenchimento. Com as respostas dos Questionários, as matrizes foram construídas no *Microsoft Excel*, que por meio de cálculos do processo AHP, foi determinada a consistência e a ponderação (pesos) dos critérios. As etapas podem ser classificadas em 4 itens, apresentados a seguir e conforme Figura 3 e 4:

- Hierarquização dos critérios e subcritérios;
- Questionários online;
- Definição das matrizes de pareamento;
- Obtenção da consistência e pesos dos critérios e subcritérios.

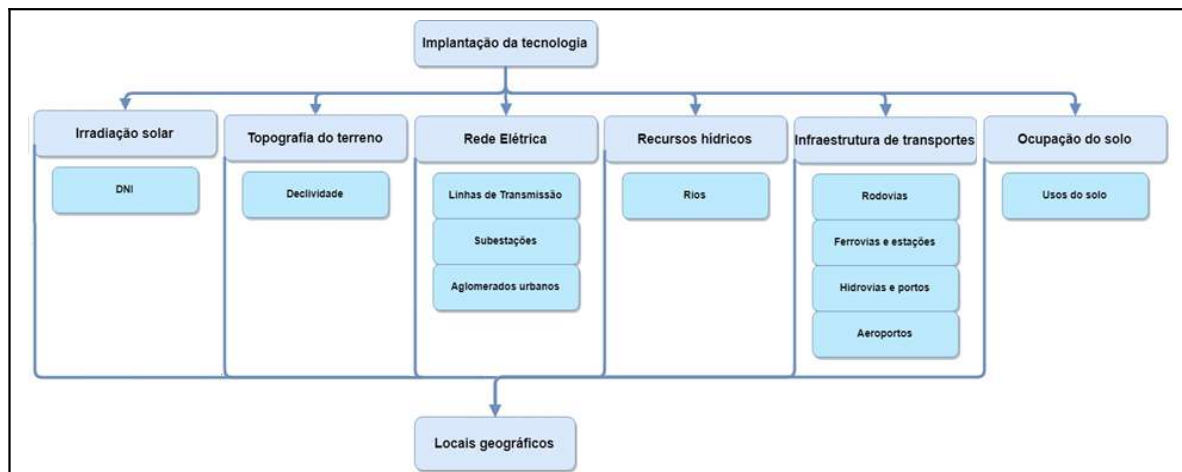


FIGURA 3 – Hierarquização AHP dos critérios definidos

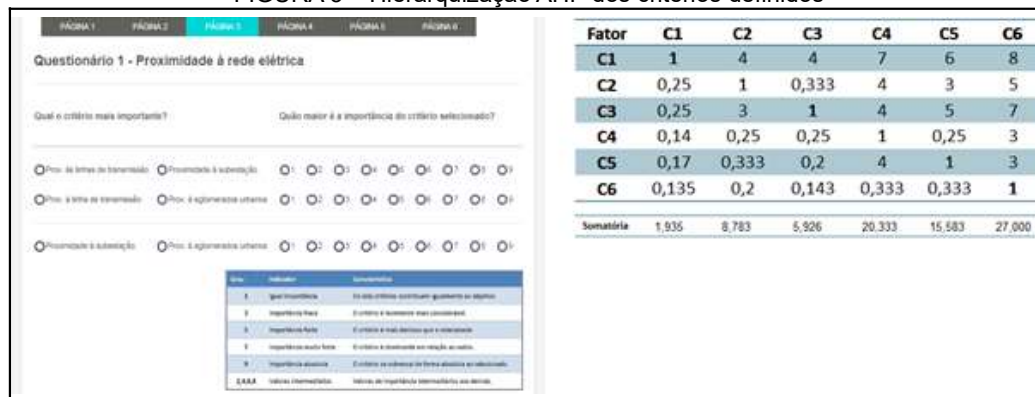


FIGURA 4 – Questionário 1 (à esquerda), matriz de pareamento 1 (à direita)

4.2 Geoprocessamento

O geoprocessamento foi realizado no software *QGIS*, com o uso das bibliotecas *GDAL* e *SAGA*, e desenvolvimento na linguagem de programação *Python* via console do *QGIS*. Inicialmente, os dados em estrutura vetorial foram transformados para estrutura raster. Parte dos critérios foram tratados conforme a sua distância aos possíveis locais de instalação, com isso foi determinada a proximidade entre cada pixel, pelo cálculo da distância euclidiana. Em seguida, os dados foram padronizados em intervalos de 0 a 1, desta forma possibilitou a inserção dos valores de ponderação obtidos pelos procedimentos *AHP*, e posterior sobreposição dos dados (camadas) pela álgebra de mapas.

As etapas foram definidas em 5 itens:

- Transformação de dados na estrutura vetorial para estrutura raster;

- b. Cálculo da distância euclidiana entre os pixels;
- c. Padronização dos dados;
- d. Ponderação conforme pesos *AHP*;
- e. Álgebra de mapas *CLP*.

Na Figura 5, tem-se o exemplo do geoprocessamento realizado no critério de Rede elétrica, correspondente aos subcritérios de Proximidade à Subestações de Energia, Linhas de Transmissão, e Aglomerados Urbanos. As etapas c. e d. foram omitidas pois alteram o intervalo numérico sem alterar o valor.

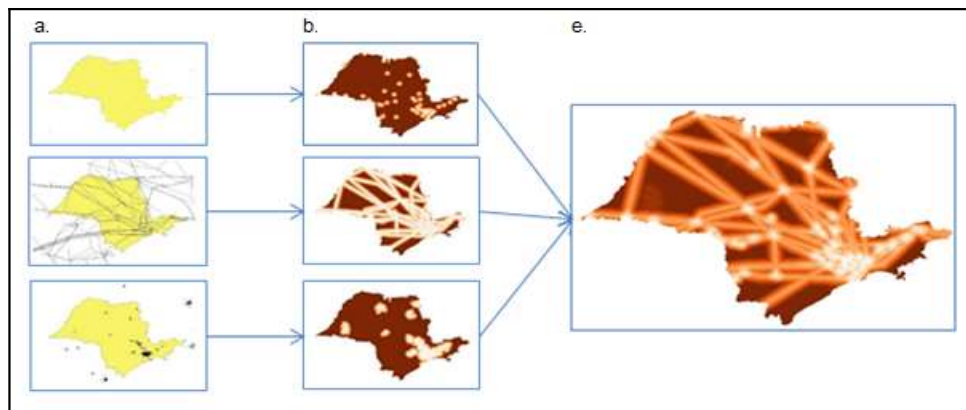


FIGURA 5 – Ilustração das etapas de geoprocessamento

5.0 - MAPEAMENTO DE VIABILIDADE

Empregando a metodologia *AHP*, os valores pareados foram determinados como consistentes, obtendo-se os seguintes valores de ponderação para cada critério:

- Irradiância Direta Normal DNI = 44,5%
- Topografia do local = 14,6%
- Proximidade à Infraestrutura de Rede elétrica = 23,6%
- Proximidade à Recursos Hídricos = 5,3%
- Proximidade à Infraestrutura de transportes = 8,8%
- Uso e ocupação do solo = 3,2%

Aplicando as ponderações pelo geoprocessamento, gerou-se uma figura com os locais de viabilidade à implantação de Usinas Termosolar. Nesta figura, cada pixel possui um valor de viabilidade que é apresentado através da diferença na escala de cor, do verde representando baixa viabilidade, ao vermelho como alta viabilidade, e o preto como áreas restritas (Figura 6).

Na Figura 6, à esquerda foram aplicados somente critérios ambientais de restrição. À direita, foi aplicado o critério de restrição para valores de DNI menores que 1784 kWh/m²/ano, logo, tem-se a exclusão de grande parte do estado.

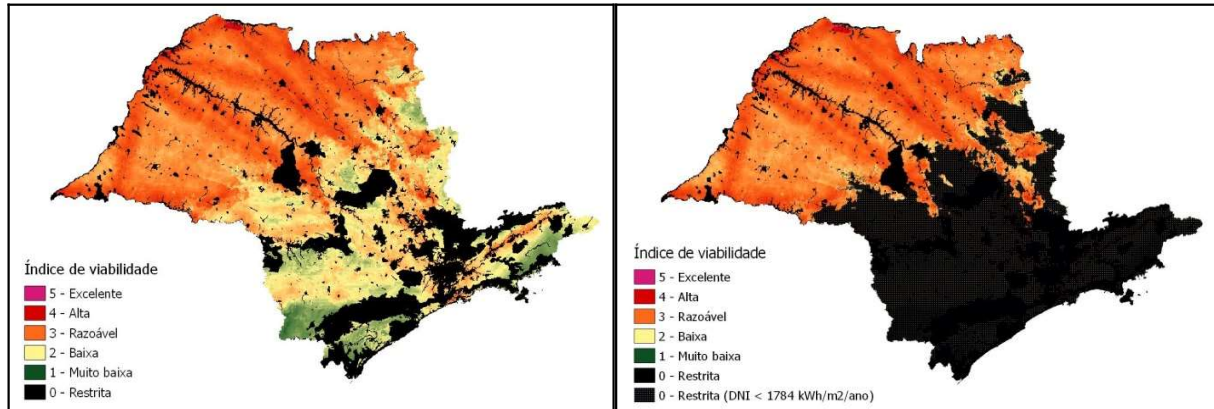


FIGURA 6 – Viabilidade das regiões do estado de São Paulo

Segundo os índices obtidos, as cidades que apresentam maior viabilidade são Mira Estrela, Indaiaporã e Catiguá. Na escala de ponderação de 0 (restritivo) a 5 (excelente), possuem os valores conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Cidades do estado de São Paulo com índices de viabilidade mais representativos

Município	Índice de viabilidade
Mira Estrela	3,94
Indaiaporã	3,91
São José do Rio Preto	3,50

6.0 - CONCLUSÃO

As usinas termossolares CSP por CCP são alternativas consistentes de geração de energia elétrica através de uma fonte renovável, a energia solar, podendo beneficiar a matriz energética do Brasil. Conforme indicado no estudo, o estado de São Paulo, apresenta valores de viabilidade positivos para implantação desta tecnologia.

Nos resultados obtidos, a região noroeste apresenta os maiores valores de viabilidade. Estes, estão diretamente vinculados ao conjunto de condições necessárias analisadas no estudo. Porém, é importante destacar que das ponderações indicadas por especialistas e obtidas pelo método AHP, identificou-se que o critério DNI apresentou a maior ponderação dos dados, cerca de 45%, comparado a segunda maior ponderação de 23% dos valores de subcritérios da Rede Elétrica. Logo, a condição de DNI é a que apresenta maior impacto positivo na implantação de usinas termossolares, sendo a região Noroeste de São Paulo a mais afetada por esta condição, o que condiz com seus valores altos de viabilidade.

As restrições tornam a parte central e sul do estado inviáveis a implantação da tecnologia. Em parte devido às restrições ambientais, como unidades de conservação permanente, mas principalmente causada pela falta da condição principal de geração de energia, o DNI, que foi restringido ao valor mínimo de 1784 kWh/m²/ano, em torno de 4,88 kWh/m²/dia. Pesquisas na área de energia termossolar, principalmente de coletores e armazenamento de calor, tendem a diminuir o valor de DNI necessário, assim como o preço dos equipamentos, aumentando as áreas de viabilidade à tecnologia ao longo dos anos.

Contudo, identifica-se que a metodologia AHP baseada em SIG é um método eficiente no auxílio a tomada de decisão para mapeamento da viabilidade de locais à implantação de usinas termossolares, podendo ser aplicada nas diversas regiões brasileiras.



7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Boletim de Informações Gerenciais. , p. 1131–1141, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-gerenciais>> Acesso em: Agosto 2019.
- (2) GREENE, R.; DEVILLERS, R.; LUTHER, J. E.; EDDY, B. G. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, v. 5, n. 6, p. 412–432, 2011.
- (3) MALCZEWSKI, Jacek. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. , v. 4, n. 1, p. 1–9, 2000.
- (4) PEREIRA, Elizabeth Marques Duarte; CHARBEL, Andrea; AROREIR Isabela; MESQUITA, Lúcio Cesar de Souza. Mapeamento básico das condições gerais para tecnologias heliotérmicas no Brasil. 2014
- (5) SAATY, T.L. J. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering* (2004). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>> Acesso em: Novembro, 2018.
- (6) SCHLECHT, M.; MEYER, R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*, p. 91–119, 2012.
- (7) SHI, Meiling. Market Analysis of Israeli CSP Technologies in the Chinese Market. Masters project submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Environmental Management degree in the Nicholas School of the Environment Duke University 2015. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/37750723.pdf>> Acesso em: Novembro, 2018.
- (8) SOUZA, L. E. V. DE S.; CAVALCANTE, A. M. G. Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Eduardo Chiarani.

Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Mestrando em Ciências Geodésicas pela UFPR.

Pesquisador bolsista no LACTEC

Danielle Drago.

Bacharel em Engenharia Cartográfica pela UFPR, Mestre em Engenharia Florestal pela UFPR e MBA em Gerenciamento de Projetos pela UVV.

Pesquisadora no LACTEC

Kristie Kaminski Küster.

Bacharel em Engenharia Elétrica pela UTFPR, Mestre em PPRE - Postgraduate Programme Renewable



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

4754
AB/XXX/YY

Energy pelo Carl von Ossietzky Universität Oldenburg – Alemanha.
Pesquisadora no LACTEC.

Luís Alexandre Catussi Paschoalotto.

Bacharel em Engenharia Mecânica pela UNESP, Especialista em Gerenciamento da Manutenção pela Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros – Brasil, Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia pelos Institutos LACTEC.

Gerente de Engenharia Elétrica e Mecânica da Companhia Energética de São Paulo (CESP) – Matriz.

Ana Paula Oening.

Bacharel em Matemática Industrial pela UFPR, Mestre na área de otimização não linear e doutora na área de previsão de carga, ambos pelo Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) da UFPR.

Pesquisadora no LACTEC.