

# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

## ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA EM UM DOMICÍLIO URBANO NO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ<sup>1</sup>

LUIZ FERNANDO ROSA MENDES<sup>2</sup>, HELISA MOREIRA PEIXOTO PEREIRA<sup>3</sup> &  
MARCELO SILVA STHEL<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Publicado no Ano de 2019;

<sup>2</sup>Doscente no Instituto Federal Fluminense, *Campus* Guarus, lfmendes@iff.edu.br;

<sup>3</sup>Gruadauda em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense, *Campus* Guarus;

<sup>4</sup>Doscente na Universidade Estadual do Norte Fluminense.

### Resumo

Dada atual crise hídrica e energética brasileira que vem contribuindo para o aumento das tarifas de eletricidade e a intensificação das emissões de gases efeito estufa (GEE), a utilização da geração distribuída (GD) por meio de fontes renováveis de energia (FRE) nos domicílios torna-se uma alternativa interessante para o cidadão. Nesse sentido, o presente trabalho tem o objetivo de selecionar a melhor FRE para GD em domicílio situado na zona urbana do município de Campos dos Goytacazes/RJ a partir de análise multicritério, considerando para a tomada de decisão aspectos quantitativos e qualitativos. Para isso, utilizou-se Analytic Hierarchy Process (AHP) para a tomada de decisão tendo como ferramenta de apoio o software IPÊ versão 1.0. Assim, o problema foi formulado com duas alternativas - energia solar fotovoltaica e energia eólica - e os critérios considerados foram: econômico com subcritérios aquisição de equipamentos e manutenção; técnico com subcritérios de produção de energia, vida útil e espaço físico; ambiental com subcritérios de emissão de CO<sub>2</sub> e potencial energético; e, social com os subcritérios preferência e criação de empregos. O julgamento foi realizado por especialistas de energia. Após a análise foi concluído que a energia solar fotovoltaica era a

melhor solução para o domicílio em questão, tendo o decisor (dono da residência) posteriormente instalado o sistema proposto pela análise multicritério.

**Palavras-chave:** Geração distribuída. AHP. Energia solar fotovoltaica. Energia eólica.

### **Abstract**

Given the current Brazilian water and energy crisis that has contributed to the increase in electricity tariffs and also intensifying climate problems, the use of distributed generation (DG) through renewable energy sources (RES) in households becomes an interesting alternative for the citizen. In this sense, the present work has the objective of selecting the best RES for DG in a domicile located in the urban area of the city of Campos dos Goytacazes/RJ, based on multicriteria analysis, considering quantitative and qualitative aspects for decision making. For that, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was used for the decision making having as tool of support the software IPÊ version 1.0. So, the problem was formulated with two alternatives (solar photovoltaic and wind energy) and the criteria considered were: economic with subcriteria acquisition of equipment and maintenance; with subcriteria of energy production, life and physical space; with subcriteria of CO<sub>2</sub> emission and energy potential; and social with subcriteria preference and job creation. The trial was conducted by energy experts. And after the analysis it was concluded that solar photovoltaic energy was the best solution for the domicile in question, and the decision maker (owner of the residence) later installed the system proposed by the multicriteria analysis.

**Keywords:** Distributed Generation. AHP. Photovoltaic Solar Energy. Wind Energy.

## **1. Introdução**

Entre os anos de 2013 a 2015, o Brasil passou por um ciclo de intensa estiagem, que reduziu a participação da geração hidroelétrica na matriz elétrica brasileira. Atualmente esse tipo de geração de eletricidade corresponde a 64% dessa matriz. Essa redução impactou negativamente na economia brasileira com o aumento percentual de usinas térmicas em operação, e conseqüentemente maiores custos da energia elétrica para os consumidores finais (VALOR, 2017a).

Além disso, esta última crise hídrica tem como características às emissões de gases de efeito estufa (G.E.E.) e impactos na saúde humana e no ambiente, formando um ciclo energético-ambiental vicioso, uma vez que o suprimento das usinas termoeletricas brasileiras é predominantemente realizado por combustíveis fósseis (gás natural – G.N. e carvão). A queima desses combustíveis emite para atmosfera gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) e compostos orgânicos voláteis (COVs) que juntamente com o NO<sub>x</sub> contribuem para geração do ozônio troposférico (O<sub>3</sub>) (MENDES; STHEL, 2017).

Todavia, as outras fontes renováveis, em especial as usinas eólicas, vêm contribuindo para minimizar os efeitos da crise hídrica na matriz elétrica brasileira. Um exemplo disso foi observado no dia 18 de outubro de 2017, quando a geração de energia eólica alcançou 9,6% na matriz elétrica nacional e 51% da energia gerada na região Nordeste, região assolada por essa crise (VALOR, 2017b).

Dentro do contexto, a solar fotovoltaica e eólica, para uso residência ou comercial, vêm se configurando como alternativas renováveis para geração de eletricidade e cumprindo aos objetivos energéticos com impactos ambientais infinitamente menores que os combustíveis fósseis e com significativo potencial para proteger os consumidores de variações tarifárias (VILLALVA, 2015; BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Na maioria dos casos de implantação de sistemas renováveis de energia surge a dúvida sobre qual é o melhor a ser instalado em uma determinada situação. Essa dúvida permeia tanto o usuário interessado em implantar tal sistema quanto a empresas especializadas que têm o desafio de apresentar para seu cliente a melhor solução de projeto de geração de energia.

Neste sentido, Çolak e Kaya (2017) afirmam que mesmo a seleção de fontes renováveis de energia (FRE) sendo um processo fácil, principalmente para as empresas especializadas, é necessária uma avaliação ampla das soluções energética e desta forma, levar em consideração no estudo os aspectos técnicos, econômicos, tecnológicos, socioeconômicos, políticos e ambientais.

Para Goldemberg e Lucon (2008), a busca por uma solução energética requer entender quais as alternativas existentes e escolher a mais adequada. Mediante essa afirmação, os métodos do Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) tornam-se ferramentas importantes na resolução de problemas na área energética (MENDES; ERTHAL JÚNIOR; HOSKEN, 2013).

Desta forma, o trabalho versa num estudo sobre a seleção da melhor FRE para geração distribuída (GD) em domicílio situado na zona urbana do município de Campos dos

Goytacazes/RJ a partir de análise multicritério, considerando para a tomada de decisão aspectos quantitativos e qualitativos.

## **2. Fundamentação teórica**

### **2.1. Geração distribuída (GD)**

A GD é uma solução tecnológica emergente no setor de distribuição de energia brasileira.

Na literatura existem diversas definições sobre GD. Uma delas define a GD como uma maneira de geração de energia elétrica, em que o sistema de produção dessa energia está conectado de forma direta com a rede de distribuição (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

Carley (2009), Kuhl-Thalfeldt e Valtin (2011) corroboram com Ackermann, Andersson e Söder (2001) no que diz respeito a um tipo de geração de energia elétrica conectada junto à rede de distribuição, no entanto Carley (2009) acrescenta em sua definição afirmando que esse tipo de sistema pode ser característico quanto a sua localização, tamanho e aplicação. A localização está relacionada com a conexão à rede elétrica no lado do cliente e próximos à carga (situação mais frequente). O tamanho é definido pela potência dos sistemas, pois os mesmos, em sua maioria, variam entre 1 kW e 5 MW. E quanto à aplicação, esses sistemas podem ser utilizados como: plantas emergenciais, energia de reserva, unidades combinadas de calor e energia, sistemas de microgeração, aplicações remotas e localizadas em plantas elétricas convencionais.

Já a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostra que “*o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade*”. Dessa forma, a GD pode ser feita tanto por fontes renováveis de energia quanto por cogeração qualificada<sup>1</sup>, ou seja, até mesmo por fontes não renováveis de energia, como por exemplo, o gás natural (GN) (ANEEL, 2017a). Entretanto, nesse trabalho optou-se por abordar as energias eólica e solar fotovoltaica como alternativas para uma determinada residência.

---

<sup>1</sup> Para a ANEEL (2017b), a cogeração qualificada é um atributo concedido aos cogeneradores que atendem aos requisitos definidos pela resolução normativa nº 235/ 2006, levando em consideração aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração.

## 2.2. Resoluções Normativas

A resolução normativa (RN) da ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012 é considerada um marco para utilização das FREs, porque a partir dessa RN foram instituídas as condições de acesso da microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia (ANEEL, 2012).

Segundo o capítulo III da RN nº 482/2012, o consumidor ao instalar um sistema de microgeração ou minigeração aderiria ao sistema de compensação de energia elétrica, também conhecido como *net metering tariff*. Nessa modalidade de tarifação, o excedente de energia produzida pelo sistema é trocado por créditos no consumo de energia elétrica ativa acumulada (ANEEL, 2012).

No entanto, haviam críticas a RN nº 482/2012, entre elas, o tempo para utilização dos créditos (36 meses após o faturamento) e a cobrança de imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS) incidida sobre a energia excedente. Esta última, com o entendimento de que o consumidor estava produzindo energia.

Para sanar as lacunas da primeira RN, algumas discussões e audiências públicas foram realizadas. Em função disso, foi publicada a RN nº 687 de 25 de novembro de 2015 alterando a RN nº 482/2012. Segundo a IEPUC (2016), a nova RN trouxe mudanças mais atrativas para os consumidores, sendo as principais descritas como:

- A criação de modalidades de autoconsumo remoto e geração compartilhada;
- A possibilidade de compensação de créditos de energia entre matrizes e filiais de grupos empresariais;
- Os sistemas de geração distribuída condominiais (pessoas físicas e jurídicas);
- A ampliação da potência máxima de 1 MW para 5 MW;
- A ampliação da duração dos créditos de energia elétrica de 36 meses para 60 meses;
- A redução dos prazos dos trâmites administrativos para concessão da conexão à rede junto às distribuidoras.

Outro avanço para a expansão da GD foi dado pelo Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) a partir do Convênio ICMS nº 16 de 22 de abril de 2015. Esse Convênio autorizou a concessão de isenção do ICMS para a energia excedente produzida na GD sob regência RN nº 482/2012 (CONFAZ, 2016).

O Ministério de Minas e Energia (MME), por sua vez, vem contribuindo para a expansão da geração distribuída. No final do ano de 2015 o MME lançou o Programa de

Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) com o intuito de ampliar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia, em especial a solar fotovoltaica (MME, 2016).

### **2.3. Analytic Hierarchy Process (AHP)**

O ato de tomar decisões é próprio da atividade humana. Nas gestões de empresas públicas ou privadas ou até mesmo no dia a dia do cidadão comum o ato de tomar decisões torna-se imprescindível (FREITAS; MARINS; SOUZA, 2006).

Um exemplo disso pode ser entendido na escolha da melhor FRE para GD em um domicílio. Nesse momento o proprietário do imóvel, na maioria das vezes, não tem subsídios para tomar decisão. Ele tem seu olhar mais direcionado para o ponto de vista econômico. Por outro lado, as empresas especializadas, acabam se condicionando a trabalhar com apenas uma tecnologia de geração de energia e, às vezes, não colocando em análise outras possibilidades de geração de eletricidade para o cliente.

Mesmo se deparando com algumas alternativas para geração de eletricidade, como decidir sobre a melhor? Sob qual ótica a tomada de decisão deve ser analisada?

Ishizaka e Labib (2011) afirmam que o método de *Analytic Hierarchy Process* (AHP) pertence aos métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) e sendo assim, o AHP auxilia os tomadores de decisão a resolver problemas complexos com múltiplos critérios conflitantes e subjetivos.

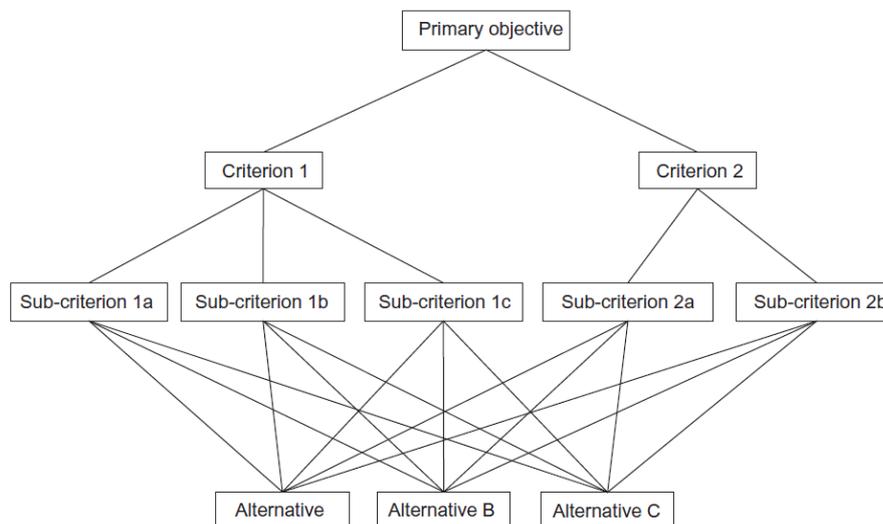
Dentre os métodos de AMD, o AHP é o mais conhecido e utilizado em diversas áreas do conhecimento. Na área de escolhas de fontes de energia, foco desse trabalho, esse método é o mais utilizado (MENDES; PEREIRA, 2017).

O AHP foi desenvolvido nos Estados Unidos na década de 70 por Thomas L. Saaty. A teoria desse método foi apresentada por ele, pela primeira vez, no *Journal of Mathematical Psychology* em 1977 (ISHIZAKA; LABIB, 2011).

De acordo com Costa (2006), a primeira etapa para utilização do método AHP na resolução de qualquer problema é formular o mesmo deixando claro:

- O foco principal do problema;
- As alternativas viáveis a serem analisadas;
- Os critérios a serem adotados;
- Os especialistas que analisaram o problema;
- O responsável por tomar a decisão final (decisor).

Na segunda etapa, tem-se a divisão do problema em níveis hierárquicos, com a criação da árvore hierárquica (Figura 1). A vantagem da construção da árvore está na melhor visualização do problema, além de desmembrar o problema em subgrupos (BRUNELLI, 2014).



**Figura 1** – Modelo de árvore hierárquica. Fonte: BRUNELLI (2014).

A terceira etapa é a comparação par a par de cada alternativa e critérios em questão, o que torna mais fácil e mais preciso a opinião dos especialistas. Nessa etapa, eles analisam apenas sobre duas alternativas ao invés de analisar simultaneamente sobre todas elas (ISHIZAKA; LABIB, 2011).

Dessa forma, as comparações pareadas criam uma matriz de decisão a partir de uma escala predefinida e que tem como axioma a homogeneidade. As preferências (pesos) declaradas são representadas por uma escala limitada que varia de um a nove e baseia-se na ideia de observações psicológicas que mostram que os indivíduos têm, no máximo, condições de julgar corretamente  $7 \pm 2$  pontos (Tabela 1) (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005).

**Tabela 1** – Escala fundamental de Saaty

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Forte importância	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Extrema importância	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptada de Saaty (1990).

As preferências entre cada alternativa ou critério comparado tomam como referência o elemento de um nível imediatamente superior e gerando assim, a matriz de decisão quadrada descrita na Figura 2 (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

$$\begin{array}{cccccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn}
 \end{array}$$

**Figura 2** – Matriz de decisão genérica. Fonte: Elaboração própria.

Dessa maneira, cada julgamento representa o quanto um elemento da coluna a esquerda é mais importante que o elemento da linha.

Outro axioma do método está baseado na condição de reciprocidade, onde a tomada decisão deve ser capaz de fazer comparações e manifestar a força de sua preferência. Sendo assim, se a é  $\alpha x$  + preferível que b, então b é  $\frac{1}{\alpha}$  mais preferível que a (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Da matriz de decisão retira-se as matrizes de autovetor ( $W_i$ ) a partir da Equação 1. As matrizes  $W_i$  constituem na ordenação das prioridades ou hierarquias de acordo com as características estudadas (COSTA, 2006).

$$W_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad \text{Eq. 1}$$

Após a matriz de  $W_i$ , é realizado o cálculo de Normalização dos autovetores. A partir da Equação 2 é possível realizar a comparabilidade entre os critérios e alternativas (COSTA, 2006).

$$T = \left| \frac{W_1}{\sum W_i}; \frac{W_2}{\sum W_i}; \frac{W_3}{\sum W_i} \right| \quad \text{Eq. 2}$$

Para relacionar os critérios da matriz de consistência e os pesos dos critérios é realizada a estimativa do autovetor a partir da Equação 3 (GOMES, ARAYA e CARIGNANO, 2004).

$$\lambda_{\text{máx.}} = T \cdot W_i \quad \text{Eq. 3}$$

De posse do valor de  $\lambda_{\text{MÁX}}$ , calcula-se o índice de consistência (IC) de acordo com a Equação 4. Esse índice permite avaliar o grau de inconsistência da matriz de julgamentos pareados (ISHIZAKA; LABIB, 2011).

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{(n-1)} \quad \text{Eq. 4}$$

Para avaliar a consistência em função da ordem da matriz de julgamentos é realizado o cálculo de razão de consistência (RC) descrito pela Equação 5. A RC está baseada no índice de consistência (IC) pelo índice de consistência aleatória (CA) (ISHIZAKA; LABIB, 2011).

$$RC = \frac{IC}{CA} \quad \text{Eq. 5}$$

A CA pode ser obtida a partir da Tabela 2, onde a mesma demonstra o valor do CA de acordo com o número de critérios analisados no problema.

**Tabela 2** – Índice de CA

	Número de critérios analisados no problema									
Quantidade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptada de (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005).

Saaty (1990) destaca que caso a relação do  $RC \leq 0,10$ , a estimativa de  $W_i$  é aceitável, pois a matriz de decisão é consistente. Porém, caso a  $RC > 0,10$  o decisor deve rever o modelo de pesos atribuídos para melhorar a consistência.

### **3. Material e Métodos**

#### **3.1. Material**

O material de estudo deste trabalho foi uma residência unifamiliar situada no perímetro urbano do município de Campos dos Goytacazes/ RJ, região Norte do estado do Rio de Janeiro, estando a mesma localizada geograficamente nas coordenadas com latitude de 21°77' Sul e longitude de 41°29' Oeste, sendo o consumo médio mensal de eletricidade estipulado em 200 kWh.

#### **3.2. Métodos**

O procedimento metodológico proposto neste trabalho visou auxiliar na escolha do melhor sistema renovável de geração de eletricidade por meio de GD, à luz de multicritérios. Para isso, o trabalho foi norteado pelos estudos de Mendes, Erthal Júnior, Hosken (2013) e Mendes (2013).

No trabalho de Mendes, Erthal Júnior e Hosken (2013) foi realizada uma análise multicritério como ferramenta para a tomada de decisão na seleção de sistema de fornecimento de energia elétrica para propriedades rurais litorâneas localizadas no Norte do Estado do Rio de Janeiro. Os autores propuseram uma árvore hierárquica tendo como alternativas o fornecimento convencional da concessionária de energia elétrica local, o sistema eólico, o sistema fotovoltaico e o sistema híbrido (fotovoltaico e eólico). Nesse trabalho, eles utilizaram para seleção das melhores fontes de fornecimento de energia os critérios: custo dos equipamentos, instalação e manutenção, custo mensal da energia elétrica, impacto ambiental, eficiência do sistema, vida útil, continuidade do fornecimento e área útil disponível.

Mendes (2013) utilizou o mesmo problema e a mesma metodologia do trabalho descrito anteriormente, no entanto realizou um aprimoramento do método AHP a partir da integração com o método Borda.

De acordo com os dois estudos citados, o presente trabalho foi dividido em:

- Formulação do problema;
- Levantamento dos critérios;
- Análise de especialistas;
- Modelagem do problema utilizando o método AHP;
- Resultado final.

##### **3.2.1. Formulação do problema**

O problema em estudo foi estruturado da seguinte forma:

- Foco principal – a melhor fonte renovável para geração de eletricidade em um domicílio unifamiliar situado na zona urbana do município de Campos dos Goytacazes/RJ levando em consideração a RN nº 687/2015 da ANEEL.
- Alternativas viáveis – tipo de fonte de geração de eletricidade em função das características locais, sendo a energia solar fotovoltaica a alternativa 1 (A1) e a energia eólica a alternativa 2 (A2).
- Critérios – parâmetros que foram considerados para a escolha da melhor alternativa viável.
- Especialistas – grupo de profissionais que faz análise das alternativas viáveis frente aos critérios estabelecidos.
- Decisor – responsável por tomar a decisão final sobre o melhor tipo de geração de eletricidade a ser utilizado na residência.

### 3.2.2. Levantamento dos critérios

Os critérios adotados nesse trabalho foram estabelecidos mediante pesquisa elaborada por Mendes e Pereira (2016). Nele, os autores observaram que os critérios comumente aplicados para esse tipo de problema, são: técnico, econômico, ambiental e social, tendo os mesmos subdivididos em subcritérios.

O critério econômico levou em consideração os subcritérios relacionados ao custo de aquisição dos equipamentos, em reais (R\$), e o nível de manutenção dos sistemas eólico e solar fotovoltaico (baixo, médio ou alto). Sendo que, para estimar o custo dos sistemas foram realizados orçamentos em três empresas especializadas em instalação de sistemas renováveis de energia. O nível de manutenção foi levantado a partir de técnica de *Brainstorming*<sup>2</sup> com dois especialistas em energia que atribuíram níveis de exigência de manutenção (baixa exigência, média exigência e alta exigência de manutenção) para cada tecnologia de GD (solar fotovoltaica e eólica).

O critério técnico foi dividido em três subcritérios: produção de energia (kWh/mês); vida útil (anos); e necessidade de espaço físico para implantação dos sistemas (m<sup>2</sup>). A produção de energia foi estabelecida a partir de informações das empresas especializadas. A vida útil foi posta a partir dos manuais dos equipamentos. A necessidade de espaço físico foi verificada *in loco*.

---

<sup>2</sup> Em língua portuguesa “*tempestade de ideias*”. É uma técnica de melhoria onde pequenos grupos de pessoas são formados para discutir e explorar ideias de maneira livre e criativa (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

O critério ambiental foi distribuído em dois subcritérios: emissão de CO<sub>2</sub>, em gCO<sub>2</sub>/kWh; e potencial energético local, em W/m<sup>2</sup>. A emissão de CO<sub>2</sub> por energia elétrica gerada levou em consideração o trabalho de Ahmad e Tahar (2014). Já o potencial energético foi mensurado a partir do *website* do *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) de acordo com as coordenadas geográficas do trabalho em questão (NREL, 2017).

Por fim, o critério social levou em consideração a preferência por determinada fonte de geração de energia e a geração de empregos, em n° de empregos/MW. Para a preferência por determinada fonte de energia foi aplicado um questionário estruturado com pergunta fechada sobre “*Dentre as energias solar fotovoltaica e eólica, qual é a sua preferência?*” e aplicado a um grupo de 78 docentes dos cursos técnicos de Meio Ambiente, Eletrônica e Eletromecânica e da graduação em Engenharia Ambiental numa instituição federal de ensino. O número de empregos por MW em cada tipo de geração de eletricidade foi estabelecido a partir do trabalho de Hashimura (2012).

### **3.2.3. Análise de especialistas**

A análise das alternativas e a atribuição de pesos aos critérios e subcritérios foram realizadas por dois especialistas na área de energia a partir da técnica *Brainstorming*.

### **3.2.4. Modelagem do problema utilizando o método AHP**

Esta etapa visou o desenvolvimento da árvore da estrutura hierárquica do problema e posterior escolha da melhor solução em termos de sistema renovável (eólico e solar fotovoltaica) para geração distribuída no domicílio. Para isso, foi utilizado o método AHP clássico com o auxílio do *software* IPÊ, versão 1.0<sup>3</sup>.

A ferramenta computacional IPÊ versão 1.0 é um *software* que foi desenvolvido pelo professor Helder Gomes Costa da Universidade Federal Fluminense (UFF) no ano de 2004 e possibilita o desenvolvimento e implementação de modelos de AMD fundamentados no método AHP. É uma ferramenta que apresenta uma *interface* amigável e de fácil utilização. A Figura 3 mostra um das telas do *software* IPÊ 1.0 (COSTA, 2017).

---

<sup>3</sup> O *software* possibilita o desenvolvimento e implementação de modelos de AMD fundamentado no método AHP (COSTA, 2017).

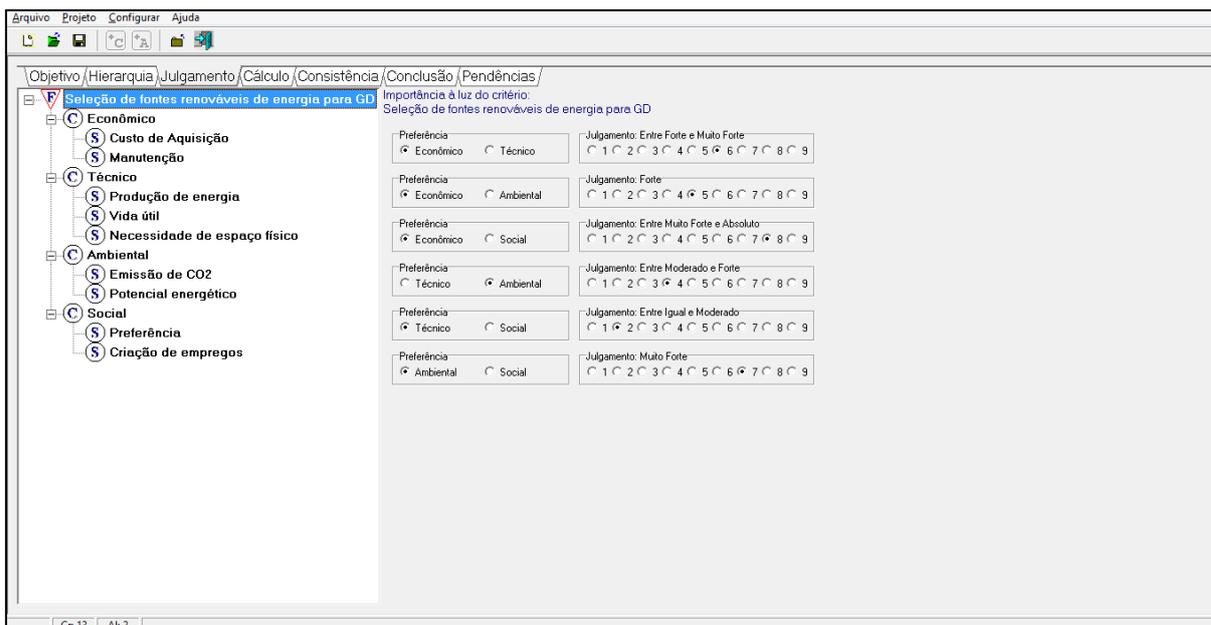


Figura 3 – Tela do software IPÊ 1.0. Fonte: Elaboração própria.

#### 4. Resultados e Discussão

Diante do levantamento bibliográfico realizado, da formulação do problema e do consumo médio mensal de eletricidade foram estabelecidos os critérios econômicos (custo de aquisição dos equipamentos, em R\$, e manutenção), ambientais (emissão de CO<sub>2</sub>/kWh e potencial energético, em W/m<sup>2</sup>), sociais (geração de emprego e preferência) e técnicos (produção de energia, vida útil e necessidade de espaço físico). A partir disso, foi montada a árvore hierárquica (Figura 4).

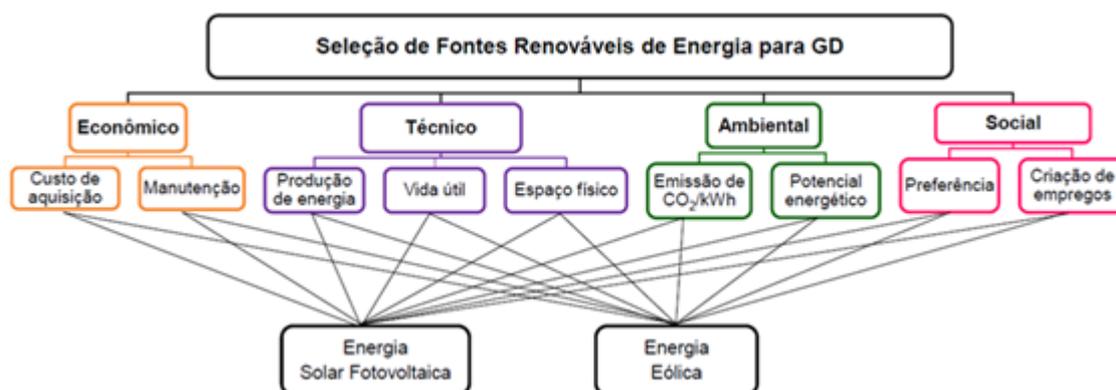


Figura 4 – Árvore hierárquica do problema de seleção de FRE para GD. Fonte: Elaboração própria.

Com os critérios e subcritérios constituídos, foram realizadas pesquisas de campo e levantamento das características técnicas dos sistemas solar fotovoltaico e eólico que

atendessem ao domicílio e ao seu respectivo consumo de energia elétrica, formando uma tabela de pagamentos, conforme mostra a Tabela 3.

**Tabela 3** – Tabela de pagamento obtida para os critérios avaliados.

Critérios de escolha	Subcritérios de escolha	Alternativas	
		ESFV (A1)	Eólica (A2)
C1 – Econômico	S1.1 – Custo de aquisição (R\$)	19.000,00	30.800,00
	S1.2 - Manutenção	Baixo	Baixo
C2 – Técnico	S2.1 – Produção de energia (kWh/mês)	180	450
	S2.2 – Vida útil (anos)	25	20
	S2.3 – Espaço físico	Baixo	Alto
C3 - Ambiental	S3.1 – Emissão de CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /kWh)	98,3	57
	S3.2 – Potencial energético (W/m <sup>2</sup> )	996	361
C4 – Social	S4.1 – Preferência (%)	88,46	11,54
	S4.2 – Criação de empregos (emprego/MW)	13,48	7,24

Fonte: Elaborado a partir de Energia Pura (2017); SWERA (2017); CE-Eólica (2017); Varun; Bhat; Prakash (2009); Hashimura (2012).

Com a tabela de pagamento montada (Tabela 3), foi realizado um *Brainstorming* com dois especialistas na área de energia para realização do julgamento par a par entre os critérios e subcritérios com a atribuição dos referidos pesos com auxílio do *software* IPÊ versão 1.0. Na Figura 5 pode-se observar a matriz com o julgamento realizada pelos especialistas à luz dos critérios estabelecidos.

	C1	C2	C3	C4
C1	1	6	5	8
C2	1/6	1	4	2
C3	1/5	1/4	1	7
C4	1/8	1/2	1/7	1

**Figura 5** – Matriz de julgamento da seleção da FRE para GD à luz dos critérios.

Após o julgamento dos especialistas, obteve-se o resultado do cálculo de prioridades à luz dos critérios, conforme a Tabela 4.

**Tabela 4** – Resultado do cálculo das prioridades à luz dos critérios.

<b>Cálculo das prioridades à luz dos critérios</b>	
<b>Critério</b>	<b>Valor</b>
C1	<b>0,605</b>
C2	0,087
C3	0,257
C4	0,051

Fonte: Elaboração própria.

Pela Tabela 4 nota-se que, os especialistas atribuíram maior peso ao critério econômico (C1) em relação aos demais critérios, ficando o C1 com valor de 0,605 (valor em negrito). Isso porque, incluso ao C1 havia os subcritérios custo de aquisição (S1.1) e manutenção do sistema (S1.2). Nesses subcritérios foram atribuídos, pelos especialistas, o julgamento “Entre muito forte e absoluto” (peso 8) ao S1.1 em relação ao S1.2.

Sendo assim, a aquisição dos equipamentos (S1.1) entre “muito forte e absoluto” em comparação a manutenção dos sistemas (S1.2) mostra que o valor dos equipamentos teve significativa influência sobre o critério C1 (Figura 6).

	<b>S1.1</b>	<b>S1.2</b>			<b>S2.1</b>	<b>S2.2</b>	<b>S2.3</b>
<b>S1.1</b>	1	8		<b>S2.1</b>	1	8	4
<b>S1.2</b>	1/8	1		<b>S2.2</b>	1/8	1	4
RC = 0				<b>S2.3</b>	1/4	1/4	1
				RC = 0,082			
	<b>S3.1</b>	<b>S3.2</b>			<b>S4.1</b>	<b>S4.2</b>	
<b>S3.1</b>	1	4		<b>S4.1</b>	1	3	
<b>S3.2</b>	1/4	1		<b>S4.2</b>	1/3	1	
RC = 0				RC = 0			

**Figura 6** – Matriz de julgamento dos subcritérios à luz dos critérios. Fonte: Elaboração própria.

O subcritério referente a produção de energia realizada pelos sistemas de geração também teve significativa influência sobre os subcritérios do critério técnico (Figura 6).

A emissão de CO<sub>2</sub> (S3.1) proveniente do ciclo de vida dos sistemas de geração de eletricidade obteve o peso “entre moderado e forte” em relação ao potencial energético local. Tal resultado mostra a preocupação com o ambiente por parte dos especialistas.

Por fim, no subcritério S4.1 foi atribuído um peso “moderado” em relação ao S4.2, indicando uma sutil tendência ao verificar o olhar das pessoas pesquisadas no subcritério S4.1.

Em seguida, foi realizado pelos especialistas, no *software* IPÊ o julgamento das alternativas à luz dos subcritérios, sendo os pesos mostrados na Figura 7.

<p>S1.1 – Custo de aquisição</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1/5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	5	A2	1/5	1	<p>S2.1 – Produção de energia</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>1/8</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>8</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	1/8	A2	8	1	<p>S3.1 – Emissão de CO<sub>2</sub></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>1/5</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	1/5	A2	5	1	<p>S4.1 – Preferência</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1/8</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	8	A2	1/8	1
	A1	A2																																					
A1	1	5																																					
A2	1/5	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	1/8																																					
A2	8	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	1/5																																					
A2	5	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	8																																					
A2	1/8	1																																					
<p>S1.2 – Manutenção</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	1	A2	1	1	<p>S2.2 – Vida útil</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	1	A2	1	1	<p>S3.2 – Potencial energético</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1/5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	5	A2	1/5	1	<p>S4.2 – Criação de empregos</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1/5</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	5	A2	1/5	1
	A1	A2																																					
A1	1	1																																					
A2	1	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	1																																					
A2	1	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	5																																					
A2	1/5	1																																					
	A1	A2																																					
A1	1	5																																					
A2	1/5	1																																					
	<p>S2.3 – Espaço físico</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td>1</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>1/7</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		A1	A2	A1	1	7	A2	1/7	1																													
	A1	A2																																					
A1	1	7																																					
A2	1/7	1																																					

**Figura 7** – Matrizes de julgamentos das alternativas à luz dos subcritérios. Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5 mostra os valores obtidos pelas alternativas em cada subcritério, sendo o resultado das matrizes de julgamentos das alternativas à luz dos subcritérios (Figura 7).

**Tabela 5** – Matriz das prioridades das alternativas em cada subcritério.

Alternativas	Subcritérios								
	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S2.3	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2
A1	<b>0,833</b>	0,5	0,125	0,5	<b>0,875</b>	0,167	<b>0,833</b>	<b>0,889</b>	<b>0,833</b>
A2	0,167	0,5	<b>0,875</b>	0,5	0,125	<b>0,833</b>	0,167	0,111	0,167

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se na Tabela 5 que, a alternativa A1 (ESFV) obteve maior prioridade em cinco dos nove subcritérios (valores em negrito na Tabela 5), vencendo a alternativa A2 (energia eólica).

O resultado final obtido na aplicação do AHP no *software* IPÊ 1.0 foi que a ESFV alcançou 63,25% e a energia eólica 36,75% com RC de 0,093 (valor de  $RC \leq 0,10$ ). O valor de RC mostrou que o julgamento realizado pelos especialistas foi aceitável.

Após o julgamento dos especialistas mostrando que a ESFV seria a melhor solução para o referido domicílio urbano, o decisor (proprietário da residência) concordou com o resultado dado e contratou uma empresa especializada para instalação do sistema de ESFV (Figura 8a e 8b).



(a) Instalação dos módulos fotovoltaicos.



(b) Inversor C.C./ C.A.



(c) Vista frontal da residência com o sistema de ESFV.

**Figura 8** – Etapas de instalação de módulos fotovoltaicos no telhado (a), inversor C.C/C.A. instalado em 09 de junho de 2017 (b) e vista frontal da residência com módulos fotovoltaicos instalados sobre o telhado. Elaboração própria.

O sistema da Figura 8 foi conectado à rede elétrica da concessionária no dia 08 de agosto de 2017, entrando imediatamente em operação.

## 5. Considerações finais

Assim, após a aplicação do método AHP através do *software* IPÊ versão 1.0 pôde-se concluir que a melhor solução para geração de eletricidade por geração distribuída para a residência em questão foi a Energia Solar Fotovoltaica.

O resultado desse trabalho reforça a tendência nacional no que diz respeito a expansão da utilização da ESFV em GD em residências como forma de investimento para redução da fatura mensal de energia elétrica.

Além disso, a energia solar fotovoltaica conectada à rede elétrica é uma alternativa renovável com considerável potencial energético no território nacional, com pouca necessidade de pouco espaço físico (a maioria das instalações é realizada em telhados) e que também contribui com o ambiente.

Por fim, como desdobramento deste trabalho pretende-se analisar as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com a implantação do sistema estudado e o seu retorno do investimento.

## Agradecimentos

Os autores do artigo agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), a FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) e ao IFFluminense (Instituto Federal Fluminense) pelo apoio financeiro concedido.

## Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Geração distribuída. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Disponível em: 03 nov. 2017a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências. Resolução normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>>. Acessado em: 03 nov. 2017b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Resolução Normativa 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acessado em: 11 jul. 2012.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 2001, v. 57, n. \_\_, p. 195-204.

AHMAD, S; TAHAR, R. M. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 2014, v. 63, p. 458-466.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. *Geração de energia Elétrica – fundamentos*. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2012.

BRUNELLI, M. *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. New York: Springer, 2014.

CARLEY, S. Distributed generation: an empirical analysis of primary motivators. *Energy Policy*. 2009, v. 37, n. \_\_, p. 1648–1659.

CE-EÓLICA. Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=26>>. Acessado em: 12 abr. 2017.

CONSELHO NACIONAL FAZENDÁRIO (CONFAZ). Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Convênio ICMS nº 16, de 22 de abril de 2015. Disponível em: <[https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/cv016\\_15](https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/cv016_15)>. Acessado em: 03 jun. 2016.

COSTA, H. G. IPÊ 1.0: guia do usuário. Disponível em: <<http://www.producao.uff.br/conteudo/rpep/volume42004/publicacao2004.htm>>. Acessado em: 12 abr. 2017.

COSTA, H. G. *Auxílio Multicritério à Decisão: método AHP*. Rio de Janeiro: ABREPRO, 2006.

ÇOLAK, M.; KAYA, İ. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, n. \_\_, p. 840-853, 2017.

ENERGIA PURA. Produtos. Disponível em: <<http://www.energiapura.com/ produtos>>. Acessado em: 12 abr. 2017.

FIGUEIRA, J., GRECO, S., EHRGOTT, M. (org.). *Multiple criteria decision analysis – state of the art surveys*. New York: Springer Science+Business Media, 2005.

FREITAS, A. L. P.; MARINS, C. S.; SOUZA, D. O. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. *Revista GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas*. 2006, v. \_\_, n. 2, p. 51-60.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. *Tomada de Decisões em Cenários Complexos*. São Paulo: Thomson, 2004.

HASHIMURA, L. M. M. Aproveitamento do potencial de geração de energia elétrica por fontes renováveis alternativas no Brasil: instrumentos de política e indicadores de progresso. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTE OF ENERGY-PUC (IEPUC). *Atlas Rio Solar*. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2016.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*. 2011, v. 38, n. \_\_, p. 14336–14345.

KUHI-THALFELDT, R.; VALTIN, J. The potential and optimal operation of distributed power generation in Estonia. *Oil Shale*. 2011, v. 28, n. 1S, pp. 240–252.

MENDES, L. F. R.; STHEL, M. S. Thermoelectric Power Plant for Compensation of Hydrological Cycle Change: Environmental Impacts in Brazil. *Case Studies in the Environment*, v. \_\_, n. \_\_, p. 1-7, 2017.

MENDES, L. F. R.; PEREIRA, H. M. P. Investigação de critérios adotados para seleção de geração distribuída a partir de fontes renováveis de energia com o método AHP. *In: Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 3. 2016, Campos dos Goytacazes/ RJ.

MENDES, L. F. R. Análise multicritério para universalização dos serviços elétricos em domicílios rurais isolados da região Norte Fluminense. 2013. 161p. Dissertação (Mestrado em engenharia de Produção) – Universidade Candido Mendes, 2013.

MENDES, L. F. R.; ERTHAL JÚNIOR, M.; HOSKEN, L. A. L. Seleção de sistema de fornecimento de energia elétrica para propriedades rurais litorâneas localizadas no norte do estado do Rio de Janeiro. *Revista eletrônica Produção & Engenharia*, v. 4, n. 1, p. 338-345, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030)>. Acessado em: 06 nov. 2016.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. SWERA – maps. Disponível em: <<https://maps.nrel.gov/swera/#/?aL=0&bL=groad&cE=0&IR=0&mC=-21.77530735863058%2C-41.29561185836792&zL=18>>. Acessado em: 11 ago. 2017.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, v. \_\_, n. 48, p. 9-26, 1990.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON. *Administração da Produção*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VALOR. Custo da energia terá impacto sobre retomada em 2018. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/5162808/custo-da-energia-tera-impacto-sobre-retomada-em-2018>>. Acessado em: 21 out. 2017a.

VALOR. Em meio à seca, vento move mais de 50% da energia no Nordeste. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/5161278/em-meio-seca-vento-move-mais-de-50-da-energia-no-nordeste>>. Acessado em: 21 out. 2017b.

VARUN; BHAT, I. K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 5, p. 1067–1073, jun. 2009.

VILLALVA, M. G. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.