

Avaliação de fontes renováveis de energia utilizando o Apoio Multicritério à Decisão

Luiza dos Santos
luiza-s1@hotmail.com
UFF

Luís Gustavo Macedo Ribeiro
lgmr81@gmail.com
UFF

Luís Alberto Duncan Rangel
luisduncan@id.uff.br
UFF

Resumo: Atualmente, tem-se na energia elétrica uma das formas mais nobres de energia, sendo esta essencial para o desenvolvimento das atividades socioeconômicas. A produção de energia elétrica com origem em fontes renováveis de energia mostrou um expressivo crescimento ao longo dos últimos anos. O Brasil possui destaque na utilização de fontes renováveis de energia, principalmente de origem hídrica. A fim de assegurar uma matriz energética sólida e confiável faz-se necessário uma análise complexa, incluindo muitos fatores, por vezes conflitantes. Esse estudo propõe a utilização do método PROMÉTHÉE II de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) para a avaliação de fontes de energia renováveis no Sudeste brasileiro, considerando aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos.

Palavras Chave: PROMÉTHÉE II - AMD - Energia Renovável - -

1. INTRODUÇÃO

A energia é um dos mais importantes elementos na vida das pessoas, em termos bioquímicos, é através de processos de conversão de energia que os seres humanos se mantêm vivos. Analisando-se em termos econômico-industriais, é por meio do uso da energia que se obtém os bens e serviços consumidos. Portanto, a energia é um pilar da sociedade fundamental ao seu desenvolvimento e, assim, assegurar uma matriz energética sólida e confiável é também assegurar a manutenção do desenvolvimento dessa e das próximas gerações.

Tecnicamente a energia pode ser definida como a capacidade de um sistema realizar trabalho e pode ter várias formas: potencial, mecânica, química, elétrica, entre outras (EIA, 2015). As diferentes formas de energia podem ser transformadas umas nas outras através dos processos de conversão de energia. A energia elétrica é um exemplo de energia resultante de um processo de conversão, onde estão envolvidas cargas elétricas (HINRICHS et al., 2014).

A energia elétrica pode ter sua origem em fontes renováveis de energia ou não renováveis de energia. Acredita-se que as fontes renováveis de energia terão um papel cada vez mais importante na matriz energética mundial nos próximos anos. O aumento da conscientização sobre as questões ambientais tem estimulado novas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos na área energética, melhorando a eficiência e reduzindo os custos dos processos de geração de energia (MME, 2016).

O Brasil possui destaque na utilização de fontes renováveis de energia, a maior parte da energia elétrica gerada – 81,23% segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL – é produzida a partir de fontes renováveis, principalmente de origem hídrica (66,65% do total ofertado).

Em 2015, o Brasil, especialmente a região Sudeste, enfrentou uma das piores secas dos últimos tempos. Os reservatórios das usinas hidrelétricas passaram a operar com volumes muito baixo do normal e a população se viu diante do desafio de lidar com a escassez de água que por si só já seria um grande problema, porém outro problema surgiu em decorrência deste, a geração de energia elétrica, devido à grande dependência dos recursos hídricos para geração de eletricidade, como explicitado anteriormente. Como consequência, a população passou a lidar com as bandeiras tarifárias de energia, que representaram um significativo aumento nas contas de luz devido ao uso de termelétricas para suprir a demanda energética.

Considerando esse e outros episódios, faz-se necessário pensar em diversificação da matriz energética brasileira, procurando-se investir em meios de geração de energia que sejam capazes de suprir a demanda sem altos custos para o consumidor. Essa, portanto, é uma decisão com critérios conflitantes entre as diversas formas de energia existentes no mercado. Torna-se possível então a aplicação de métodos de Apoio Multicritério à Decisão nesse problema, conforme apresentado em STEIN (2013) e STREIMIKIENE *et al.* (2012).

O Apoio Multicritério à Decisão permite a análise de problemas complexos, envolvendo aspectos (critérios) qualitativos e quantitativos que, por vezes, são conflitantes. Os métodos de apoio multicritério visam auxiliar nesse tipo de situação, na qual se deseja atender múltiplos objetivos da melhor forma. Os métodos do Apoio Multicritério à Decisão têm um caráter científico e, ao mesmo tempo, subjetivo (GOMES *et al.*, 2011). Esses métodos dependem diretamente do decisor, ou do grupo de decisores, pois este avaliará a importância de cada critério de acordo com seus objetivos, dessa forma não há uma solução única para um

problema de multicritério e, sim, uma solução que se ajuste melhor as necessidades do decisor.

Existem diversos métodos para solucionar esse tipo de problema, neste trabalho tem-se o foco no método PROMÉTHÉE II. Utilizando-se o método citado, propõe-se a avaliação de diferentes formas de geração de energia na região Sudeste do Brasil.

1.1.MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL, em outubro de 2016, o Brasil possuía um total de 4.597 empreendimentos em operação, totalizando uma potência instalada superior a 148 GW. Ainda de acordo com BIG, há previsão da instalação de mais 25.981.795 kW na capacidade de geração brasileira. Essa potência será provida pelos 858 empreendimentos que se encontram em fase de construção ou com construção não iniciada, atualmente. Na Figura 1, tem-se a composição da matriz energética brasileira, por origem das fontes.

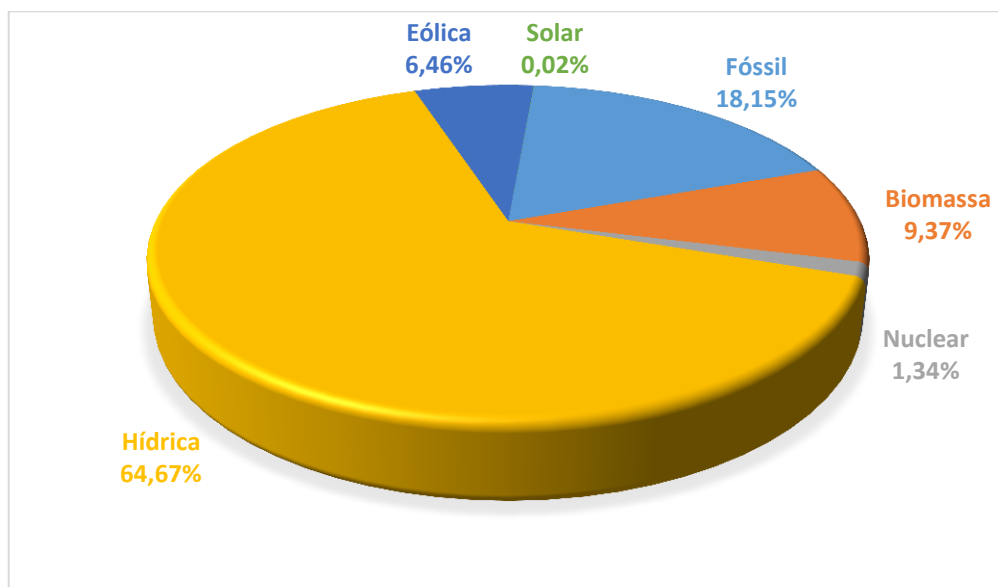


Figura 1: Porcentagem de energia elétrica gerada por fonte. Fonte: BIG, 2016

Observa-se que a maior parte da matriz energética do Brasil é de origem renovável, 81,28%, com destaque para a hidroeletricidade, que corresponde a 66,3% do total gerado. Fontes de energia como a solar ou eólica, ainda ocupam pouco espaço no país, porém, há total de 135 empreendimentos eólicos em fase de construção no país e 3 de origem solar.

Somadas as fases de construção e construção não iniciada, essas representam um aumento superior a 260% no número de empreendimentos solares e de mais de 90% nos eólicos. Esses dados mostram que o Brasil segue uma tendência mundial de aumento da participação das fontes renováveis de energia na matriz energética.

1.1.1. MATRIZ ENERGÉTICA DO SUDESTE BRASILEIRO

De acordo com os dados do Banco de Geração da ANEEL, acessado em outubro de 2016, tem-se:

- Rio de Janeiro: o estado possui um total de 179 empreendimentos em operação, gerando 8.447.434 kW de potência. Para os próximos anos está prevista uma adição de 1.866.115 kW na capacidade de geração do estado, que será fornecida pelos 4 empreendimentos em

construção e 13 com construção não iniciada. No estado, 61,16% da potência gerada tem origem nas usinas termelétricas que, em sua grande maioria operam a base de óleo diesel e gás natural. Em todo estado, há somente um empreendimento de origem eólica, no município de São Francisco de Itabapoana, no norte fluminense, que representa apenas 0,33% da potência gerada no estado.

Dentre os empreendimentos em construção e com construção não iniciada, todos têm origem hídrica ou térmica (nuclear, gás natural, diesel, biogás e licor negro).

- São Paulo: O estado de São Paulo possui no total 1009 empreendimentos em operação, gerando 23.001.346 kW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de 568.142 kW na capacidade de geração do Estado, proveniente dos 2 empreendimentos atualmente em construção e mais 48 em construção não iniciada. Somente 1 empreendimento eólico e 6 fotovoltaicos, todos com uma participação irrisória na geração do estado. Porém, entre os empreendimentos com construção não iniciada está prevista a adição de 245.000 kW através da geração fotovoltaica, além de empreendimentos termelétricos com a utilização de bagaço de cana-de-açúcar.
- Minas Gerais: o estado mineiro possui ao todo 694 empreendimentos em operação, gerando 15.773.898 kW de potência, sendo grande parte de origem hídrica. Está prevista para os próximos anos uma adição de 1.199.897 kW na capacidade de geração do Estado, proveniente dos 9 empreendimentos atualmente em construção e mais 69 em construção não iniciada. 1 empreendimento eólico e 3 fotovoltaicos em operação, ambos com pequena participação. Previsão de instalação de 569.880 kW provenientes de energia solar, além de termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos florestais.
- Espírito Santo: o Espírito Santo é o estado com menor expressão na geração energética da região possuindo no total 56 empreendimentos em operação, gerando 1.539.823 kW de potência, sendo grande parte (65,71%) com origem em termelétricas à base de diesel, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. O restante da energia gerada possui origem hidrelétrica. Está prevista para os próximos anos uma adição de 46.992 kW na capacidade de geração do Estado, proveniente dos 4 empreendimentos em construção não iniciada – três pequenas centrais hidrelétricas e uma termelétrica com utilização de óleo diesel.

1.2. ENERGIA RENOVÁVEL

1.2.1. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Entende-se por energia solar aquela proveniente do Sol e que chega à Terra sob a forma de energia térmica e luminosa, sendo a última possível de ser captada e convertida em energia térmica ou elétrica (ANEEL, 2005).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007) a irradiação solar – quantidade de energia solar incidente por unidade de superfície durante um período definido de tempo (ALONSO et al, 2013) – incidente por ano na superfície terrestre é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia do mundo. Entretanto, essa irradiação varia de acordo com a latitude, umidade do ar, estação do ano, entre outros. Tornando algumas localidades mais ou menos favoráveis à implementação da energia fotovoltaica. Ainda assim, a participação dessa fonte de energia é pouco expressiva na matriz energética mundial, apesar de apresentar um grande crescimento nos últimos anos (ANEEL, 2005).

O Brasil, por se localizar em uma zona intertropical, mostra-se um país privilegiado em termos de radiação solar, possuindo grande potencial de aproveitamento durante todo o ano (PEREIRA, 2006).

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, 2006), os valores máximos de irradiação ocorrem no norte da Bahia, enquanto os menores valores são encontrados no litoral norte catarinense. De um modo geral, os valores médios de irradiação solar encontrados no país são significativamente superiores aos da maioria dos países europeus, como Alemanha, Itália e Grécia, onde a utilização de energia solar é amplamente difundida e recebe amplos incentivos governamentais (PEREIRA, 2006) – nesses países a participação da energia solar corresponde a 6,4%, 7,8% e 6,5% da demanda por eletricidade dos mesmos, respectivamente (REN21, 2016).

A geração de eletricidade a partir da radiação solar ocorre através da utilização de células fotovoltaicas, que são dispositivos constituídos de materiais semicondutores que permitem o fluxo de cargas a partir da incidência da radiação.

Uma célula solar tradicional é composta por silício (semicondutor) dopado com materiais que apresentam excesso ou defeito de elétrons com relação ao silício. Assim, se em um dos lados da célula forem introduzidos átomos doadores, isso é, com excesso de elétrons, como poderia ser o fósforo, obtém-se a chamada capa n da célula, ou seja, uma área com densidade de elétrons maior. Se em outro lado forem introduzidos átomos receptores, isso é, com defeito de elétrons, como poderia ser o boro, obtém-se uma área com densidade de lacunas maior do que o resto do dispositivo. A diferença de concentrações entre elétrons e a lacuna cria um campo elétrico, e o conjunto assim formado se denomina união p-n. A maioria das células solares estão formadas a partir de uma união p-n, a qual se adicionam contatos metálicos para poder extrair a corrente até o exterior.

A fim de obter os valores de tensão e corrente desejados, as células fotovoltaicas são associadas, formando os módulos fotovoltaicos. Os módulos de silício mono e multicristalinos são os mais comuns no mercado, tendo esses uma eficiência entre 13% e 15% – entende-se como eficiência a relação entre a energia obtida e a energia incidente no módulo.

Com o intuito de aumentar o rendimento dos sistemas de geração fotovoltaicos, utiliza-se os sistemas de concentração, que são células associadas a dispositivos óticos de modo a concentrar a radiação solar incidente.

Esses sistemas de concentração, geralmente, possuem rastreamento solar, que ajustam o posicionamento dos módulos, obtendo-se um melhor ângulo de incidência da radiação e, conseqüentemente, aumentando o aproveitamento da energia.

1.2.2. ENERGIA HIDRELÉTRICA

Chama-se energia hidrelétrica aquela originária do aproveitamento do fluxo das águas em para a geração de eletricidade.

Pode-se identificar dois tipos de usina hidrelétrica: com reservatório de acumulação e a fio d'água. As hidrelétricas com reservatório são aquelas que permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. As unidades a fio d'água geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, com pouco ou nenhum acúmulo do recurso hídrico.

O principal argumento contrário à construção das hidrelétricas é o impacto provocado sobre o modo de vida da população, flora e fauna locais, pela formação de grandes lagos ou reservatórios, aumento do nível dos rios ou alterações em seu curso após o represamento.

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007), nos últimos 30 anos, a oferta primária mundial de energia hidráulica teve sua evolução concentrada em duas regiões: Ásia, com destaque para a China, e América Latina, com destaque para o Brasil.

O Brasil possui um potencial hidrelétrico significativo, estimado em cerca de 260 GW, destes, pouco mais de 30% já se transformaram em usinas construídas ou outorgadas. Destaca-se que grande parte desse potencial está localizado na região Norte do país, seguida pela região Sudeste (ANEEL, 2005).

Como citado anteriormente, a hidroeletricidade é a energia elétrica proveniente do aproveitamento do fluxo das águas. Para tanto, faz-se necessário o uso de usinas hidrelétricas que, basicamente, são compostas por: uma barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro (ANEEL, 2005).

A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Além de “estocar” a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. Algumas usinas hidroelétricas são chamadas “a fio d’água”, ou seja, próximas à superfície e utilizam turbinas que aproveitam a velocidade do rio para gerar energia. Essas usinas fio d’água reduzem as áreas de alagamento e não formam reservatórios para estocar a água, ou seja, a ausência de reservatório diminui a capacidade de armazenamento de água, única maneira de poupar energia elétrica para os períodos de seca (HINRICHS et al., 2014; ANEEL, 2005; EPE, 2007).

Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força. A casa de força abriga as turbinas, que convertem a energia cinética em mecânica, e os geradores, que convertem a energia mecânica em eletricidade. A água conduzida à turbina faz com que esta gire juntamente com um gerador a ela mecanicamente acoplado, realizando as transformações das diversas formas de energia. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão (HINRICHS et al., 2014; ANEEL, 2005; EPE, 2007).

Por último, há o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados.

1.2.3. BIOMASSA

Denomina-se biomassa qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo) (ANEEL, 2005).

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado externo quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética. Dela é

possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina.

A produção em larga escala da energia elétrica e dos biocombustíveis está relacionada à biomassa agrícola e à utilização de tecnologias eficientes. O Brasil, além da grande quantidade de terra agriculturável, apresenta solo e condições climáticas favoráveis a agricultura.

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007), o maior potencial de produção de eletricidade encontra-se na região Sudeste, particularmente no Estado de São Paulo, e é estimado em 609,4 milhões GJ por ano. Na sequência estão Paraná e Minas Gerais (ANEEL, 2005).

Se utilizada para produção de energia pelos meios tradicionais, como cocção e combustão, a biomassa se apresenta como fonte energética de baixa eficiência e alto potencial de emissão de gases. Entretanto, na utilização sustentável do bagaço da cana para a produção de eletricidade por meio de usinas termelétricas, o balanço de emissões de CO₂ é praticamente nulo, pois as emissões resultantes da atividade são absorvidas e fixadas pela planta durante o seu crescimento. Os principais aspectos negativos são a interferência no tipo natural do solo e a possibilidade da formação de monoculturas em grande extensão de terras – o que competiria com a produção de alimentos.

Existem diferentes métodos para obtenção da energia elétrica a partir da biomassa. Todas consistem a conversão da matéria-prima em um produto intermediário que será utilizado como combustível. Este será utilizado para produzir a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica.

1.2.4. ENERGIA EÓLICA

Define-se por energia eólica a energia obtida da energia cinética gerada pela movimentação das massas de ar provocada pelas diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta (ANEEL, 2005).

A história do aproveitamento das forças dos ventos pelo homem remete à Antiguidade, entretanto, foi entre as décadas de 1980 e 1990, em países como Dinamarca e Alemanha e no estado da Califórnia, que o aproveitamento eólico atingiu uma escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico (AMARANTE, 2001).

O principal problema ambiental associado às turbinas, a mortandade de aves, praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores. Já com relação à poluição auditiva, as turbinas eólicas satisfazem todos os requisitos ambientais. Esses aspectos contribuem para que energia eólica apresente o mínimo impacto ambiental (AMARANTE, 2001).

O Brasil, devido sua grande extensão territorial, é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (ANEEL, 2005; EPE, 2007). Estima-se, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001), que o país tenha um potencial de geração de energia eólica de 143 GW.

Dentre as áreas de maior potencial gerador no Brasil, encontram-se o litoral do Nordeste; o Vale do Jequitinhonha no Sudeste e a região Sul como um todo, região onde se

encontra instalado o segundo maior parque eólico do país, o de Osório, no Rio Grande do Sul (ANEEL, 2005).

Os grandes argumentos favoráveis à fonte eólica são, além de ser uma fonte de energia renovável, perenidade, grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para obtenção de suprimento. O principal argumento contrário é o custo que, embora seja decrescente, ainda é elevado na comparação com outras fontes (ANEEL, 2005).

A geração eólica ocorre pelo contato do vento com as pás da turbina, elementos integrantes da usina. Ao girar, essas pás dão origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, que produz a eletricidade. A quantidade de energia mecânica transferida – e, portanto, o potencial de energia elétrica a ser produzida – está diretamente relacionada à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento.

As turbinas eólicas apresentam sistemas de controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores que captam todos os parâmetros relevantes para o funcionamento do sistema de geração.

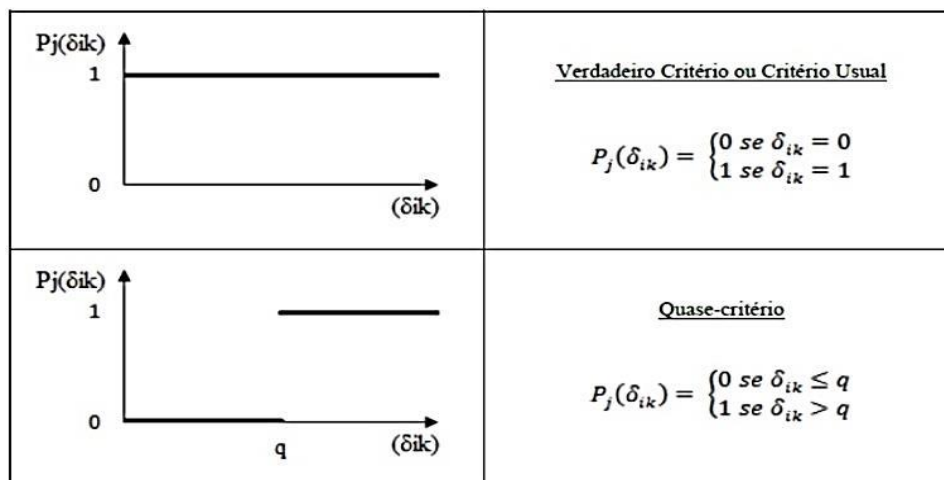
2. METODOLOGIA

Numa primeira fase da pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre energia, obtendo-se um maior conhecimento sobre o assunto e levantando as fontes a serem avaliadas, os critérios e os dados para a avaliação. Já num segundo momento, iniciou-se o processo de coleta dos dados e, com estes, foi realizada a avaliação com o método PROMÉTHÉE.

2.1. MÉTODO PROMÉTHÉE

O método PROMÉTHÉE é um método da escola francesa de Apoio Multicritério à Decisão, desenvolvido para tratar de problemas discretos, ou seja, com um número finito de alternativas, e foi proposto para solucionar problemas nos quais há a necessidade de gerar uma ordenação das alternativas, ou seja, cria-se um “ranking” das possíveis soluções.

Neste método utiliza-se uma das funções de preferência existentes – Figura 2 – para classificar uma alternativa a como preferível à b em relação a determinado critério (aPb), quando é possível dizer que a é estritamente melhor do que b nesse critério, ou para classificar a como indiferente à b (aIb), quando não há diferenças significativas entre ambas.



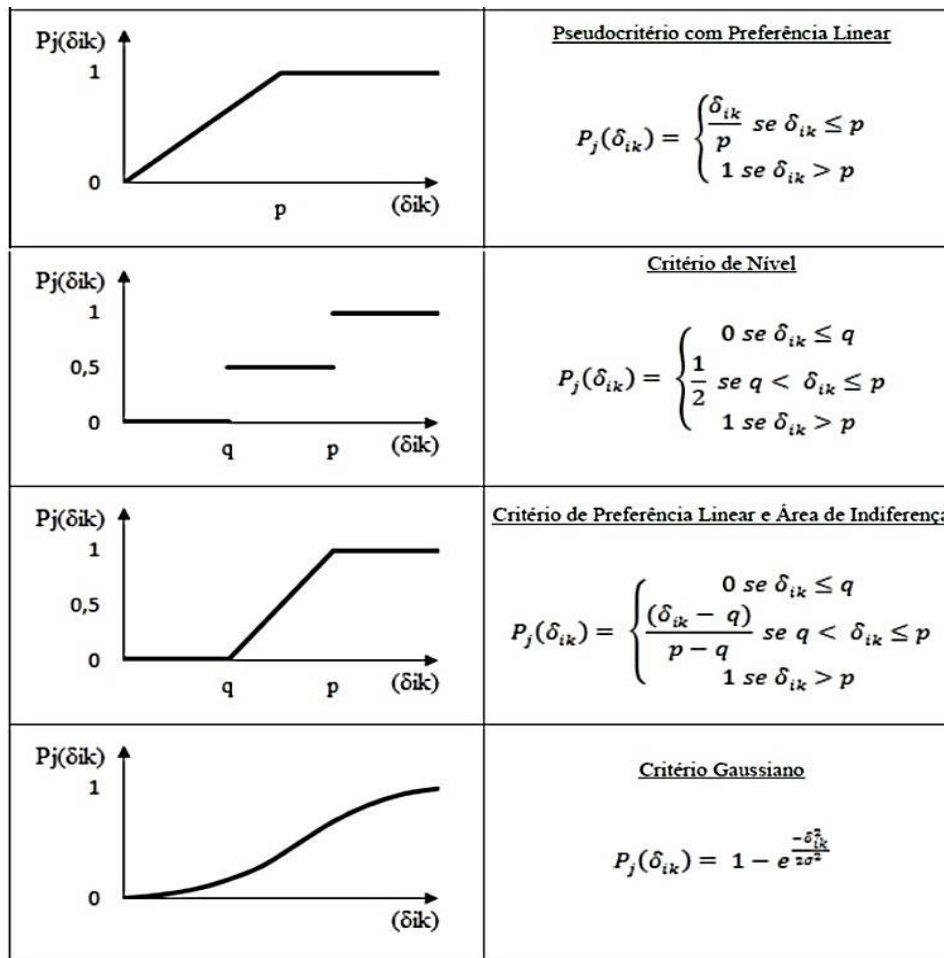


Figura 2: Funções de preferência do Método PROMÉTHÉE. Fonte: GOMES, 2011

Observa-se na Figura 2 que q se refere ao limite de indiferença: se $\delta_{ik} < q$, as alternativas x_i e x_k são indiferentes em relação a este critério. Enquanto p corresponde ao limite de preferência: se $\delta_{ik} > p$, há uma preferência restrita por x_i , em relação a este critério.

Para a utilização do método, inicialmente, determina-se qual função de preferência relativa será utilizada para comparar cada critério j . Então se calcula a função de preferência de cada critério j , para cada par de alternativas x_i e x_k , através da equação:

$$P_j(x_i, x_k) = P_j(u_j(x_i) - u_j(x_k)) = P_j(\delta_{ik}) \quad (1)$$

onde:

P_j : função de preferência escolhida para comparar o critério j ;

$u_j(x_i)$ e $u_j(x_k)$: valor do critério j para as alternativas i e k , respectivamente;

$\delta_{ik} = u_j(x_i) - u_j(x_k)$.

A segunda etapa é calcular o índice de preferência (s_{ik}) da alternativa x_i comparada à alternativa x_k , isto é, fazer uma soma das P_j 's nas quais x_i é preferível à x_k . Esta soma é ponderada pelos pesos de cada critério (w_j). O índice de preferência é dado pela Equação 2, abaixo.

$$S_{ik} = \frac{\sum_j w_j P_j(x_i, x_k)}{\sum_j w_j} = \frac{\sum_j w_j P_j(\delta_{ik})}{\sum_j w_j} \quad (2)$$

Por último, calculam-se os fluxos de superação positivos e negativos de cada alternativa x_i . O fluxo de superação positivo se refere a como x_i supera as demais alternativas, desse modo representa a média de todos os graus de sobreclassificação de x_i , com respeito a todas as outras alternativas, de modo que quanto maior esse fluxo melhor será a alternativa. Já o fluxo de superação negativo está associado a como x_i é superado pelas mesmas, logo é representado pela média de todos os graus de sobreclassificação de todas as alternativas sobre x_i .

Através do fluxo de superação pode-se obter a pré-ordem parcial das alternativas, onde cada relação, para existir, deve respeitar, no mínimo, uma das condições citadas.

- x_i supera x_k se:

$$\Phi_i^+ > \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- < \Phi_k^-$$

$$\Phi_i^+ > \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- = \Phi_k^-$$

$$\Phi_i^+ = \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- < \Phi_k^-$$

- x_i é indiferente a x_k se:

$$\Phi_i^+ = \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- = \Phi_k^-$$

- x_i é incomparável a x_k se:

$$\Phi_i^+ > \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- > \Phi_k^-$$

$$\Phi_i^+ > \Phi_k^+ \text{ e } \Phi_i^- < \Phi_k^-$$

O fluxo total, utilizado na obtenção da pré-ordem total no método PROMÉTHÉE II, é dado pela Equação (3).

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^- \quad (3)$$

3. ESTUDO DE CASO

Como já explicitado anteriormente, esta pesquisa objetiva avaliar a utilização de fontes de energia renováveis na região Sudeste do Brasil. Esta avaliação teve como decisor a autora da pesquisa, definindo os critérios, pesos e alternativas a serem utilizadas nesse processo decisório. Os mesmos encontram-se determinados nas subseções a seguir.

3.1. ALTERNATIVAS

Para este estudo, escolheu-se como alternativas as seguintes fontes de energia renovável (previamente descritas):

- Hidroeletricidade;
- Solar Fotovoltaica;
- Eólica;

- Biomassa (cana-de-açúcar).

Essas fontes de energia foram escolhidas para a pesquisa por apresentarem um nível tecnológico consolidado, e já serem utilizadas com sucesso no país e na região.

3.2.CRITÉRIOS

Através de uma revisão bibliográfica sobre energia e da análise de estudos similares a este, foram selecionados sete critérios que fossem capazes de mensurar e descrever diferentes aspectos e dimensões relacionadas à produção energética na região. São estes:

- **Relação Potencial/Demanda:** Mostra a relação entre o potencial de geração de energia da região a demanda energética da mesma. Reflete a capacidade de atendimento da demanda pela fonte. Critério de maximização. Qualitativo.
- **Disponibilidade:** Mostra a possibilidade de obtenção da energia no momento desejado, traduz a possibilidade de atendimento da demanda. Critério de maximização. Qualitativo.
- **Potencial Produtivo:** Mostra o potencial de produção da energia elétrica na região a partir da fonte avaliada. Critério de maximização. Qualitativo.
- **Emissão de CO₂ direta:** Quantidade de emissões relacionadas diretamente com a produção de energia elétrica. Critério de minimização. Qualitativo.
- **Impacto implantação:** Mede os impactos (ambientais, econômicos e sociais) relacionados a implantação da tecnologia. Critério de minimização. Qualitativo.
- **Custo Nivelado de Energia:** Engloba todos os custos de investimento, combustível, operação e manutenção, ao longo da vida útil do empreendimento. Critério de Minimização. Quantitativo.
- **Eficiência Conversão:** Mostra a eficiência dos dispositivos de conversão energética implementados. A eficiência pode ser entendida como uma menor necessidade de energia primária para obtenção da elétrica ou como um maior aproveitamento das fontes pelas tecnologias de produção. Critério de Maximização. Quantitativo.

Observa-se que os critérios definidos como qualitativos foram avaliados segundo uma escala numérica de 1 a 9, capaz de transcrever os juízos de valor do decisor. Uma exceção é critério Emissão de CO₂, onde foi feita uma avaliação binária (0 – não há emissão; 1 – há emissão). Os dados utilizados na avaliação foram obtidos a partir da revisão de livros e relatórios energéticos nacionais e internacionais, e estes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados utilizados na avaliação

Critérios	Alternativas			
	Hydroeletricidade	Solar Fotovoltaica	Eólica	Biomassa (cana-de-açúcar)
Relação Potencial/Demanda	9	8	7	8
Disponibilidade	9	5	5	8
Potencial Produtivo	8	7	7	8
Emissão de CO ₂ direta	0	0	0	1
Impacto implantação	8	1	2	3

Custo Nivelado de Energia Médio (US\$/MWh)	166,50 ²	87,00 ¹	77,00 ²	37,00 ¹
Eficiência Conversão Média (%)	84 ³	17 ³	42 ³	20 ³

¹ TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

² LAZARD. LAZARD'S Levelized Cost Of Energy Analysis - Version 9.0. Lazard: 2015.

³ HINRICH, R. A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. B. Energia e Meio Ambiente, Tradução da 5ª ed. americana. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

3.3. PESOS

Neste trabalho, para a implementação do método PROMÉTHÉE II, considerou-se todos os critérios com pesos iguais, ou seja, cada critério tem um peso de aproximadamente 14,29%.

3.4. FUNÇÃO DE PREFERÊNCIA

Para a avaliação das alternativas, optou-se pela utilização da função de preferência de verdadeiro critério ou critério usual, descrita pelo método PROMÉTHÉE II. Nessa função de preferência, a mínima diferença entre as alternativas é suficiente para determinar que uma é preferível à outra. Desse modo, essa função capta e transfere para os resultados todas as sutis diferenças entre as alternativas do problema.

3.5. IMPLEMENTAÇÃO

Para a aplicação do método PROMÉTHÉE foi realizada com auxílio do *software* Visual PROMÉTHÉE 1.4, disponibilizado gratuitamente em versão acadêmica. Ressalta-se que este *software* foi desenvolvido sob a supervisão dos autores da metodologia PROMÉTHÉE.

3.6. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO

Na Tabela 2, tem-se a pré-ordem total obtida com a implementação do método PROMÉTHÉE II. Observa-se que a primeira posição do *ranking* é ocupada pela Hidroeletricidade, fato este já esperado, dado que essa tecnologia já se encontra bastante consolidada, apresentando sistemas eficientes de produção de energia, além do alto potencial hidráulico da região Sudeste. O segundo lugar, foi ocupado pela Biomassa, tendo-se em vista que esta possui um baixo custo nivelado e alto potencial de produção na região, além de baixo impacto ambiental – no caso do uso de rejeitos da indústria sucroalcooleira.

Energias como a Fotovoltaica e a Eólica, ainda se apresentam com custos mais elevados e sistemas produtivos menos eficientes. Além disso, a produção de eletricidade a partir dessas, está sujeita a disponibilidade momentânea energia primária utilizada nesses processos – energia solar e energia cinética dos ventos –, não havendo possibilidade de estocagem das mesmas.

Tabela 2: Resultado Método PROMÉTHÉE

Ranking	Alternativa	Φ	Φ^+	Φ^-
1	Hidroeletricidade	0,2857	0,5714	0,2857
2	Biomassa	0,0476	0,4762	0,4286

3	Eólica	-0,1429	0,3333	0,4762
4	Fotovoltaica	-0,1905	0,2857	0,4762

3.6.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade permite avaliar como a variação no peso de um dos critérios impacta os resultados iniciais, mostrando até que ponto o *ranking* gerado é estável.

Na Figura 3, tem-se o gráfico de análise de sensibilidade para o critério Custo Nivelado de Energia Médio. Nota-se que a partir do momento que este critério adquire um peso maior que 23,4%, o primeiro lugar do *ranking* passa a ser ocupado pela Biomassa, em detrimento da Hidroeletricidade.

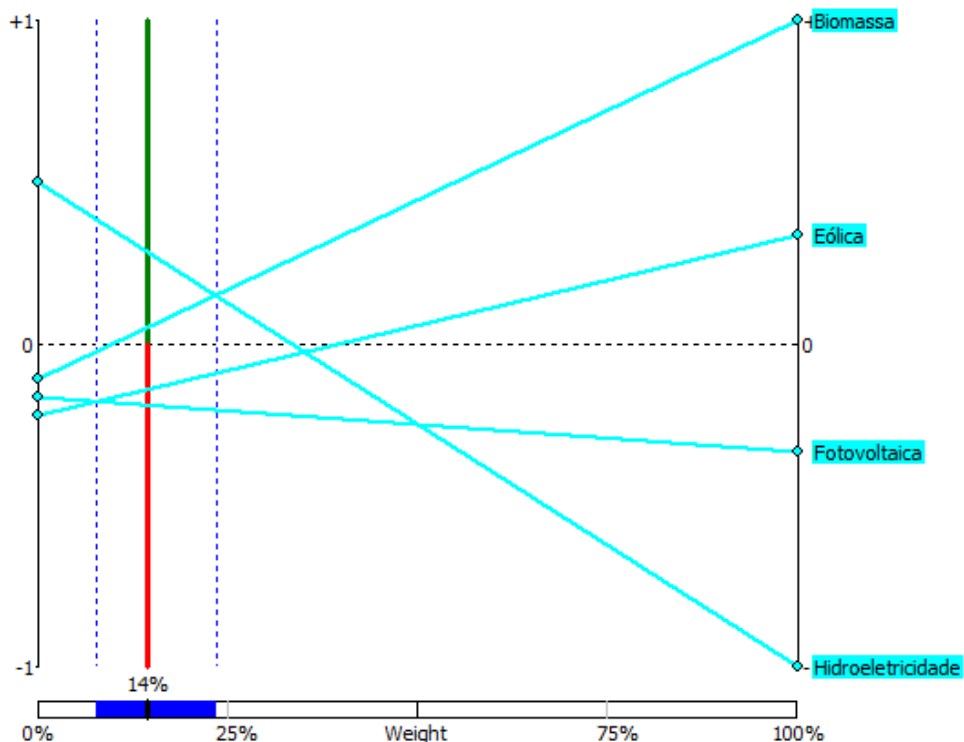


Figura 3: Análise de Sensibilidade para o Custo Nivelado de Energia

Já na Figura 4, encontra-se a análise de sensibilidade para o critério impacto de implantação. Novamente, quando este adquire um peso igual o superior a 20%, a Hidroeletricidade perde espaço para a energia Fotovoltaica.

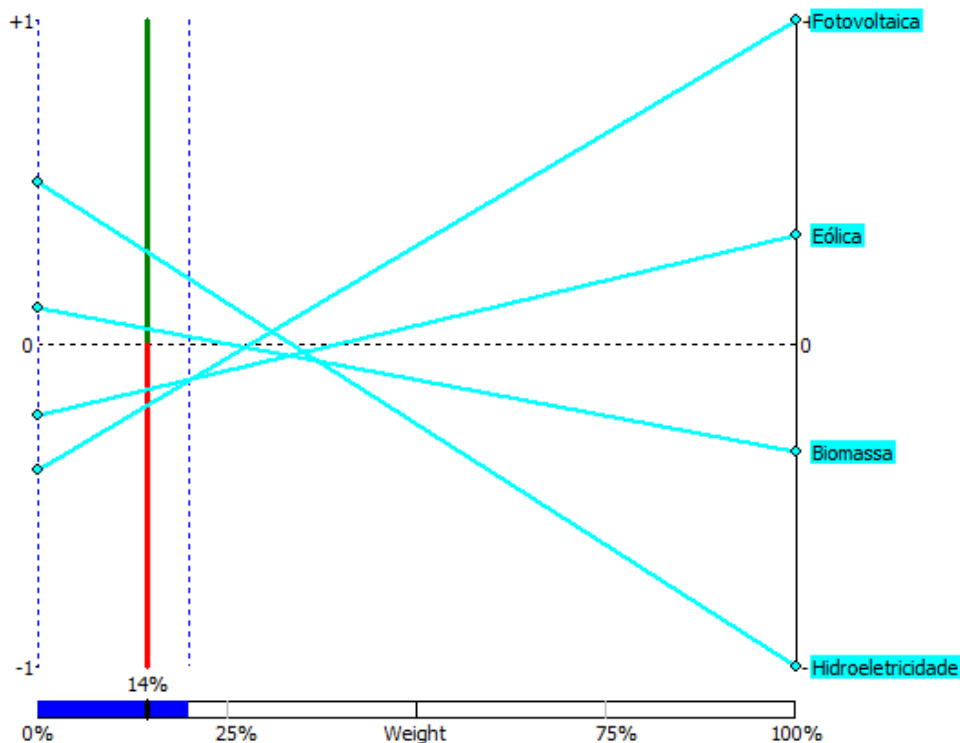


Figura 4: Análise de Sensibilidade para o Impacto de Implantação

Essas análises mostram que resultados aqui obtidos estão condicionados aos parâmetros utilizados no processo decisório. Havendo variação de acordo com o modelo implementado pelo decisor.

4. CONCLUSÃO

Sabe-se que a energia é um tema recorrente em muitas pesquisas, devido a sua grande importância para os países. Pois, a energia é a base do desenvolvimento industrial e social.

Num cenário de avaliação de diferentes fontes de energia renováveis muitos são os critérios conflitantes de avaliação das mesmas, assim, a necessidade de uma metodologia de avaliação que possibilite a incorporação em seu modelo matemático desses diferentes critérios, justifica o emprego do Apoio Multicritério à Decisão.

Com o estudo, observou-se que fontes de energia mais tradicionais como a hidrelétrica e a termelétrica à biomassa ainda se mostram mais competitivas que energias como a fotovoltaica e a eólica, ambas com um desenvolvimento e crescimento mais recente. Entretanto, observa-se que a ordenação obtida está sujeita aos parâmetros utilizados na implementação do método, ou seja, está sujeita as preferências do decisor.

Através da análise de sensibilidade, notou-se que com uma variação relativamente pequena nos pesos de alguns critérios, a ordenação obtida foi modificada, mostrando que em situações onde o custo nivelado e o impacto ambiental tenham uma maior importância, a energia de origem hídrica deixa de ser a melhor alternativa para o problema.

Sendo este um tema de relevada importância, recomenda-se que outros estudos sejam desenvolvidos sobre o mesmo futuramente. Levando-se em consideração dados mais atualizados sobre a situação das diferentes formas de energia na região, outros critérios que

possam se mostrar relevantes a esse tipo de estudo e, também, outros métodos de Apoio Multicritério à Decisão.

5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.T. Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério. São Paulo: Atlas, 2013.

ALMEIDA, A.T. O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010.

ALONSO, M.C., GARCÍA, F.S. E SILVA, J.P. Energia Solar Fotovoltaica. ONUDI - Programa de Capacitação em Energias Renováveis, 2013.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. Atlas do potencial eólico brasileiro. Eletrobrás, 2001.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª ed. Brasília: ANEEL, 2005.

BALEZENTIENE, L.; STREIMIKIENE, D.; BALEZENTIS, T. Fuzzy decision support methodology for sustainable energy crop selection. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013: 83-93.

BIG - Banco de Informações de Geração. Fontes de Energia. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 13 Janeiro 2016.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). Management science, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European journal of operational research, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1986.

CONDE, F. Q. AVALIAÇÃO DE CALL CENTERS: Uma Abordagem Multicriterial Baseada nas Preferências Probabilísticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense: Niterói, 2009.

DESTER, M. Estudo comparativo das tecnologias para produção de energia elétrica utilizando análise multicritério e seu uso como ferramenta de apoio no planejamento da expansão da oferta de energia elétrica. Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ, 2014.

EIA, Energy Information Administration. What is energy. Disponível em: <http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=about_home>. Acesso em: 3 Junho 2016.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Plano nacional de energia 2030. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica - Setembro 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

GOMES, L.F.A.M.; ARAYA, M.C.G.; CARIGNANO, C. Tomada de Decisões em Cenários Complexos. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. B. Energia e Meio Ambiente, Tradução da 5ª ed. americana. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

LAZARD. LAZARD'S Levelized Cost Of Energy Analysis - Version 9.0. Lazard: 2015.

MME - Ministério de Minas e Energia. Energias Renováveis no Brasil. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfra/menu/programa/Energias_Renovaveis.html> Acesso em: 10 jun 2016.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. INPE: São José dos Campos, 2006. ISBN 978-85-17-00030-0.

REN21. Renewables 2016 Global Status Report. REN21 Secretariat: Paris, 2016. ISBN 978-3-9818107-0-7.

SLIOGERIENE, J.; TURSKIS, Z.; STREIMIKIENE, D. Analysis and choice of energy generation technologies: The multiple criteria assessment on the case study of Lithuania. Energy Procedia, 2013: 11-20.

STEIN, E. W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013: 640-654.

STREIMIKIENE, D.; BALEZENTIS, T.; KRISCIUKAITIENE, I.; BALEZENTIS, A. Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012: 3302-3311.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TREVIZANO, W. A. *Ferramenta Computacional Multiusuário Para Auxílio À Tomada De Decisão Multicritério*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Do Norte Fluminense: Campos dos Goytacazes, 2007.

VISUAL PROMÉTHÉE: PROMÉTHÉE Methods software. Versão 1.4 - Acadêmica. VPSolutions, 2013.