



TDSE - Texto de Discussão do Setor Elétrico n.º 57

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

Mauricio Dester

Rio de Janeiro

Janeiro de 2014

Sumário

Introdução.....	2
1- Análise Multicritério.....	4
2- Alternativas Adotadas e a determinação dos critérios.....	5
3- Análise de sensibilidade.....	9
4- Análise de cenários.....	11
Constatações e conclusões.....	13
Referências Bibliográficas.....	16

RESUMO

O objetivo do estudo, neste trabalho realizado, é obter um *ranking* das opções tecnológicas para produção de energia elétrica tendo como referência as fontes que o Brasil dispõe. Os resultados obtidos, em estudos como este realizado, podem ser utilizados como elementos que permitem orientar a elaboração de diretrizes e políticas públicas, necessárias para dar suporte ao planejamento da expansão da oferta de energia elétrica. Além disso, fornece subsídios para a construção de uma matriz de energia elétrica que atenda às necessidades brasileiras, e para que seja possível obter-se êxito na sustentabilidade do processo de expansão da geração.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento de Sistemas de Energia, Políticas Energéticas, Matriz de Energia Elétrica, Análise Multicritério, Fontes Renováveis de Energia

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 elétrica¹

Mauricio Dester²

INTRODUÇÃO

Os projetos ligados à infraestrutura, como aqueles destinados ao suprimento de energia elétrica, caracterizam-se por serem de longo prazo, em se considerando o tempo demandado desde a sua concepção até a finalização. Requerem, portanto, ações de ordem estratégica³ para que se possa obter êxito na sua implementação. A matriz de energia elétrica, elemento norteador nas etapas definição destes projetos, também deve ter sua construção baseada em estratégias de longo prazo e ancorada na sustentabilidade⁴. A avaliação comparativa das tecnologias para produção de eletricidade, sob as perspectivas socioambiental, econômica e técnica, busca maximizar a eficiência e eficácia na exploração das fontes de energia elétrica (FEE), permitindo fundamentar a proposição de diretrizes e políticas energéticas, assim como ações de planejamento, que culminem em uma matriz com as características desejadas. Estimular a predominância de fontes renováveis de energia (FRE) é desejável, em especial as fontes eólica, biomassa e solar (FEBS), para o caso brasileiro. Contudo, é preciso não perder de vista a existência de outras FEEs que devem, legitimamente, ser aproveitadas no sentido de prover a sociedade

¹ Artigo apresentado no XXII SNPTEE, Brasília, Outubro de 2013

² Mauricio Dester (Cosmópolis-SP, 1962) é doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos - Política Energética (Unicamp-FEM, 2012), mestre em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia Elétrica (Unicamp-FEEC, 2006) e graduado em Engenharia Elétrica (Unicamp-FEEC, 2001). Trabalha em Furnas na área de Sistemas de Energia Elétrica há 29 anos. E-mail: mauriciodester@gmail.com

³ Segundo Henry Mintzberg, estratégia é forma de pensar no futuro, integrada no processo decisório, com base em um procedimento formalizado e articulador de resultados. A estratégia tem caráter de longo prazo, é “o que fazer”.

⁴ O termo “sustentabilidade”, no contexto deste trabalho, deve ser entendido como a característica que um processo deve apresentar de poder se sustentar, no decorrer do tempo, dentro dos objetivos e estratégias originalmente traçados. Foram adotados três pilares sobre os quais se ancora a sustentabilidade: o socioambiental, o econômico e o técnico. Considerando o processo de expansão da oferta de energia elétrica e a construção da matriz de energia elétrica, deve ser possível ampliar a produção de energia elétrica respeitando estas três dimensões, de forma equilibrada. A ideia é atender aos requisitos socioambientais até tal ponto que não provoque a fragilização dos aspectos econômico e técnico.

brasileira, de forma segura, confiável e sustentável, com este elemento de infraestrutura indispensável, que é a eletricidade (DESTER, 2012). Trata-se de um problema decisório revestido de grande complexidade. Os critérios a serem adotados são numerosos, sendo que, tanto estes, como as alternativas tecnológicas podem estar interligadas. Alguns critérios são plenamente quantificáveis, enquanto outros somente podem ser qualificados, mesmo que por intermédio de níveis discretos de avaliação. Assim sendo, o uso de uma ferramenta de apoio agrega valor ao processo e permite decisões melhor fundamentadas. É um problema onde a decisão multicritério bem se aplica (GOMES, 2002; CHATZIMOURATIDIS e PILAVACHI, 2008; BROWNE *et al*, 2010). Os pilares socioambiental e econômico são classicamente utilizados para caracterizar a sustentabilidade. Neste trabalho foi acrescentada a dimensão técnica com o objetivo de contemplar um requisito imprescindível no tocante ao processo de expansão da oferta: o atendimento à carga com segurança e confiabilidade⁵. Os resultados obtidos neste estudo tem caráter exemplar, uma vez que pode haver variações significativas no que se refere à valoração dos critérios utilizados dependendo das premissas adotadas ou de outras condições de contorno do problema.

1 - ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Para problemas decisórios da classe a qual se relaciona este trabalho, ou seja, onde se busca um ranqueamento das alternativas, denominados problemas do tipo \square , podem ser utilizados alguns métodos multicritério de análise decisória (MMAD). Exemplos de MMAD: ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, PROMETHEE I, PROMETHEE II (ROY, 1985). O método PROMETHEE II (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) foi adotado neste trabalho devido três fatores principais que o caracterizam: i) por permitir, o que se

⁵ O significado das palavras “segurança” e “confiabilidade” são próximos; todavia, neste trabalho, o termo “segurança” foi adotado com o significado de disponibilidade do suprimento, enquanto o termo “confiabilidade” com o sentido da qualidade do suprimento.

denomina, um ordenamento completo das alternativas; ii) por se tratar de um método já consagrado na aplicação em pesquisa científica, o que traz segurança no que diz respeito à sua robustez e confiabilidade; iii) pela facilidade de uso. É importante ressaltar que os MMAD não se propõem a apresentar uma solução ideal e sim a solução mais satisfatória dentro do universo das alternativas adotadas e dos critérios utilizados (GOMES, 2002). Com o objetivo de oferecer uma visão geral do método, foi tomado, como referência, o capítulo do livro de Brans e Mareschal (2005) que trata especificamente do método PROMETHEE. Este MMAD baseia-se na comparação das alternativas existentes, par a par, considerando todos os k critérios e os respectivos pesos w_j associados a cada um dos critérios.

Assim, supõe-se $a, b \in A$, tal que:

$$\begin{cases} \pi(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^k F_j(a,b)w_j \\ \pi(b,a) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^k F_j(b,a)w_j \end{cases} \quad \text{Onde:} \quad W = \sum_{j=1}^k w_j$$

São computados os graus de sobreclassificação $\pi(a,b)$ e $\pi(b,a)$ para cada par do conjunto de alternativas A , de forma a obter a valoração de prioridades entre estes pares. A Figura 1 ilustra como este processo é realizado. A função de preferência F pode também ser definida dentro de um rol de possibilidades de maneira a ajustar a relação. Para a análise realizada neste trabalho foi adotada a função de preferência estrita (conhecida em Inglês como usual function).

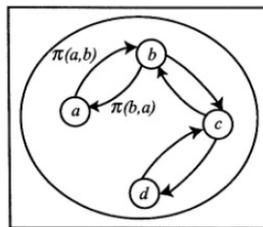


Figura 1 – Ilustração da valoração de prioridades em A
 Fonte: Brans e Mareschal (2005)

A seguir são calculados o índice de preferência positivo (ϕ^+) e o índice de preferência negativo (ϕ^-), resultando no índice de preferência geral ($\phi = \phi^+ - \phi^-$).

Onde:

$$\begin{cases} \phi^+ = \frac{1}{(n-1)} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \\ \phi^- = \frac{1}{(n-1)} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \end{cases}$$

O número de alternativas é representado por n . O índice de preferência positivo (IPP) está relacionado à força de uma alternativa e quanto maior o seu valor, melhor é a alternativa. Por outro lado, o índice de preferência negativo (IPN) representa a fraqueza da alternativa e quanto menor o seu valor, em módulo, melhor é a alternativa. O índice de preferência geral (IPG) permite ordenar as alternativas, a partir daquela que obteve a melhor performance, possibilitando estabelecer, assim, um *ranking*. Um exemplo numérico detalhado utilizando este MMAD pode ser encontrado em Almeida e Costa (2002).

2 - ALTERNATIVAS ADOTADAS E A DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS

O conjunto de alternativas tecnológicas utilizadas está listado na Quadro 1, onde consta a sigla e a descrição de cada uma delas. Estas alternativas foram selecionadas considerando sua aplicação às principais opções que o Brasil dispõe para produção de energia elétrica.

Quadro 1 – Siglas para as tecnologias analisadas

Abreviatura	Descrição da tecnologia	Abreviatura	Descrição da tecnologia
UHE-cr	Hidroelétrica com reservatório	EOL-on	Eólica <i>onshore</i>
UHE-fd	Hidroelétrica a fio d'água	EOL-of	Eólica <i>offshore</i>
UTE-gs	Termoelétrica a gás natural – ciclo simples	BIO	Termoelétrica a biomassa
UTE-gc	Termoelétrica a gás natural – ciclo combinado	SOL-fo	Solar fotovoltaica
UTE-ca	Termoelétrica a carvão mineral	SOL-te	Termosolar
UTE-ol	Termoelétrica a óleo combustível	PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UTE-nu	Termoelétrica nuclear		

Fonte: Elaboração própria

Os critérios utilizados, dentro de cada uma das dimensões Técnica, Econômica e Socioambiental, foram selecionados considerando cinco premissas:

- i) a representatividade do critério em relação à dimensão a qual está relacionado;
- ii) a valoração do critério em referências que consideram a realidade brasileira;
- iii) a disponibilidade na literatura científica;
- iv) a origem fidedigna dos dados; e
- v) um equilíbrio entre o número de critérios dentro de cada uma das dimensões consideradas.

No que se refere à disponibilidade, um fator de importância capital considerado é que, em uma mesma referência, exista valoração para todas as tecnologias adotadas como alternativas, ou pelo menos para a maioria delas. Desta forma minimiza-se o problema da variabilidade das metodologias utilizadas na valoração dos critérios. É importante ressaltar que nenhuma seleção prévia de critérios foi realizada e tão somente as premissas acima descritas foram consideradas na obtenção destes, buscando-se o atendimento à todas, com exceção da segunda premissa que não pode ser atendida para todos os critérios. A análise de sensibilidade realizada variando o peso destes critérios e verificando o

comportamento do *ranking* em comparação à condição de equilíbrio de peso atribuído, além de indicar tendências, permite mitigar a questão de distorções na valoração dos critérios. Em alguns casos o peso de cada dimensão foi reduzido a 10% de seu valor original, de forma a minimizar o seu impacto no ordenamento das alternativas e avaliar quanto sensível era a ordenação em relação a esta variação. Buscou-se, assim, verificar a robustez de cada uma das alternativas perante a variação no peso de cada uma das perspectivas consideradas. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os critérios utilizados, a dimensão a que pertencem, assim como a valoração destes critérios para cada uma das alternativas adotadas. No Quadro 2 estão detalhadas as descrições de cada um dos critérios, as fontes de onde se originaram os valores e também as unidades de medida utilizadas.

Tabela 1 – Critérios utilizados e sua valoração para cada uma das alternativas

	Critério / Opção	UHE-cr	UHE-fd	UTE-gs	UTE-gc	UTE-ca ¹	UTE-ol	UTE-nu
Dimensão Técnica	TEIF	2,0 ⁽⁶⁾	2,0 ⁽⁶⁾	4,0 ⁽⁷⁾	4,0 ⁽⁷⁾	4,5	3,0	3,0
	Fator de disponibilidade	0,91	0,8	0,85	0,85	0,85	0,85	0,9
	Fator de flexibilidade	5	5	5	5	3	5 ⁽⁵⁾	2
	Resposta aos picos de carga	1,5	1,5	5	5	1	5	0,5
	Fator de segurança de suprim.	5	5	0	0	3	1	4
	Fator de capacidade máximo	55,0 ⁽⁶⁾	55,0 ⁽⁶⁾	94,0 ⁽⁷⁾	94,0 ⁽⁷⁾	92,0	97,0	90,0
Dimensão Econômica	Custo de investimento	1.250 ⁽⁶⁾	1.250 ⁽⁶⁾	806 ⁽¹⁰⁾	900 ⁽¹⁰⁾	1.500	800	2.000
	Custo de O & M	11,3 ⁽⁶⁾	11,3 ⁽⁶⁾	57,5 ⁽⁷⁾	57,5 ⁽⁷⁾	57,8	28,0	138,0
	Custo Variável Unitário	1,5 ⁽⁶⁾	1,5 ⁽⁶⁾	108,6 ⁽⁷⁾	108,6 ⁽⁷⁾	37,5	300,0	25,2
	Sensibil. preço combustível ⁽⁴⁾	1	1	5	5	3	5	1
	Razão <i>payback</i> (média)	154	148,5	14	14 ⁽¹⁵⁾	13,5	21	56
	Custo de conexão	3	3	3	3	3	3	3
Dimensão Socioamb.	Emissão de CO2 (diretas) ⁽²⁾	0	0	530	350	725	505	0
	Emissão de CO2 (indiretas) ⁽²⁾	6	6	110	70	95	80	15
	Emissão de SO2	7	1	314 ⁽¹⁵⁾	314	5274	8013	3
	Emissão de NOx	23 ⁽⁶⁾	23 ⁽⁶⁾	1477	756	2986	5253	51
	Riscos a saúde	0,245	0,127	0,864	0,563	1,548	2,39	0,19
	Empregos diretos gerados	1,2	1,2	0,65	0,65	0,86	0,47	0,16

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 – Critérios utilizados e sua valoração para cada uma das alternativas
(continuação)

	Critério / Opção	EOL-on	EOL-of	BIO	SOL-fo	SOL-te	PCH
Dimensão Técnica	TEIF	2,5 ⁽⁸⁾	2,5 ⁽⁸⁾	12,0	1,0 ⁽⁹⁾	1,0 ⁽⁹⁾	2,0 ⁽⁶⁾
	Fator de disponibilidade	0,29	0,5	0,95	0,15	0,15	0,8
	Fator de flexibilidade	0	0	3	0	0	5
	Resposta aos picos de carga	0	0	0,5	0	0	1,5
	Fator de segurança de suprim.	5	5	5	5	5	5
	Fator de capacidade máximo	30,0 ⁽⁶⁾	30,0 ⁽⁶⁾	58,0	15,0 ⁽¹⁰⁾	20,0 ⁽¹⁰⁾	55,0 ⁽⁶⁾
Dimensão Econômica	Custo de investimento	1.740	3.625 ⁽¹¹⁾	1.100	10000 ⁽¹⁰⁾	4.909 ⁽¹⁰⁾	2.000
	Custo de O & M	46,0 ⁽⁸⁾	46,0 ⁽⁸⁾	46,0	1.000 ⁽⁹⁾	1.000 ⁽⁹⁾	11,3 ⁽⁶⁾
	Custo Variável Unitário	4,5 ⁽⁸⁾	4,5 ⁽⁸⁾	14,7	0,1 ⁽⁹⁾	0,1 ⁽⁹⁾	1,5 ⁽⁶⁾
	Sensibil. preço combustível ⁽⁴⁾	1	1	3	1	2	1
	Razão <i>payback</i> (média)	22	22 ⁽¹⁴⁾	4	7,5	7,5 ⁽¹³⁾	148,5 ⁽¹²⁾
	Custo de conexão	4	5	4	3	3	3 ⁽⁶⁾
Dimensão Socioamb.	Emissão de CO2 (diretas) ⁽²⁾	0	0	6	0	120	0
	Emissão de CO2 (indiretas) ⁽²⁾	11	14	25,5 ⁽³⁾	45	15	6
	Emissão de SO2	69	69 ⁽¹⁶⁾	26	24	24 ⁽¹⁷⁾	1 ⁽¹⁸⁾
	Emissão de NOx	32 ⁽⁶⁾	32 ⁽⁶⁾	1325	178 ⁽⁶⁾	178 ⁽⁶⁾	23
	Riscos a saúde	0,142	0,173	1,691	1,082	0,105	0,198
	Empregos diretos gerados	0,36	0,36	4,4	6,6	6,6	1,2

Fonte: Elaboração própria

Notas: (1) Combustão com carvão pulverizado; (2) As emissões diretas somadas às indiretas resultam nas emissões do ciclo de vida; (3) Média; (4) 1 - Muito baixo / 2 - Baixo / 3 - Médio / 4 - Alto / 5 - Muito alto; (5) Adotado o mesmo valor do GN devido características semelhantes neste quesito; (6) Adotado o mesmo valor para ambas tecnologias baseadas na mesma fonte primária; (7) Adotada a o mesmo valor para GN-CS e GN-CC; (8) Adotada o mesmo valor para EOL-on e EOL-of; (9) Adotada o mesmo valor para SOL-fo e SOL-te; (10) Adotada a relação entre as tecnologias utilizada por Graham e Williams (2003) cuja fonte primária seja a mesma; (11) Adotada a mesma relação entre EOL-on e EOL-of para o caso dos EUA constantes na referência IEA (2010); (12) Adotado o mesmo valor que a UHE-fd; (13) Adotado o mesmo valor que a SOL-fo; (14) Adotado o mesmo valor que a EOL-on; (15) Adotado o mesmo valor que a UTE-gs; (16) Adotado o mesmo valor da UTE-cc; (17) Adotado o mesmo valor da EOL-on; (18) Adotado o mesmo valor da SOL-fo; (18) Adotado o mesmo valor da UHE-fd.

Quadro 2 – Fontes de referência dos critérios e unidades utilizadas

	Critério	Descrição	Fonte	Unidade
Dimensão Técnica	Taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF)	Percentual de um período de tempo esperado em que não haverá produção de energia elétrica de forma não programada.	Hollauer, 2007	Percentual (0 a 100)
	Fator de disponibilidade	Indicador composto por um conjunto de outros indicadores baseados em fatores de carga típicos da tecnologia.	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	Percentual (0 a 1)
	Fator de flexibilidade	Capacidade, apresentada pela tecnologia, em responder a variações de demanda.	EPRI, 2011	Qualitativo (1 a 5)
	Resposta aos picos de carga	Reflete a capacidade da tecnologia em responder rapidamente a grandes variações de carga, tradicionalmente denominadas "pontas de carga".	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)
	Fator de segurança de suprimento	Expressa, em uma visão de longo prazo, a independência de fontes externas de energia elétrica, ou seja, avalia a autonomia da tecnologia.	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)
	Fator de capacidade máximo	Razão entre a produção efetiva e a capacidade total máxima de produção em um determinado período de tempo.	Hollauer, 2007	Percentual (0 a 100)
Dimensão Econômica	Custo de investimento	Custo de investimento por unidade de potência instalada.	Hollauer, 2007 / Sales, 2007 (EOL e PCH)	US\$ 2007 /kW
	Custo de O&M fixo	Custo fixo por unidade produzida.	Hollauer, 2007	R\$ 2007 /kW.ano
	Custo Variável Unitário	Custo variável por unidade produzida (inclui combustível).	Hollauer, 2007	R\$ 2007 /MWh
	Sensibil. preço combustível	Sensibilidade do custo médio à variação do preço do combustível.	UNEP, 2011	Qualitativo (1 a 5)
	Razão de <i>payback</i>	Razão entre a energia total produzida durante a vida útil da tecnologia usada em uma usina e a energia necessária para construí-la, operá-la e descomissioná-la.	IEA, 2000	Adimensional
	Custo de conexão	Expressa o custo de conexão de uma usina à rede.	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)
Dimensão Socioambiental	Emissão de CO ₂ (direta)	Emissões relacionadas diretamente com a produção de energia elétrica.	UNEP, 2011	Kg CO ₂ /MWh
	Emissão de CO ₂ (indireta)	Emissões relacionadas com as outras atividades econômicas relacionadas à tecnologia.	UNEP, 2011	Kg CO ₂ eq/MWh
	Emissão de SO ₂	Total das emissões de SO ₂ da tecnologia.	Gagnon <i>et al</i> , 2002	tCO ₂ /TWh
	Emissão de NOx	Total das emissões de NOx da tecnologia.	Chatzimouratidis e Pilavachi, 2008	mg/kWh
	Riscos a saúde	Valoração dos impactos na saúde humana.	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	€cent/kWh
	Empregos diretos gerados	Expressa a ordem de magnitude dos empregos gerados em cada tecnologia.	Streimikienea <i>et al</i> , 2012	Pessoas-ano/kWh

Fonte: Elaboração própria

3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi realizada uma análise de sensibilidade por intermédio de um conjunto de sete simulações⁶ alterando-se o peso dos critérios em cada uma delas. Na Tabela 3 constam os pesos utilizados em cada caso simulado. Na última linha da tabela foram atribuídas sequências mnemônicas de modo a facilitar a identificação dos casos.

Tabela 3 – Casos simulados e os respectivos pesos utilizados para cada perspectiva

Perspectivas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Técnica	0,33	0,60	0,20	0,20	0,10	0,45	0,45
Econômica	0,33	0,20	0,60	0,20	0,45	0,10	0,45
Socioambiental	0,34	0,20	0,20	0,60	0,45	0,45	0,10
Mnemônicos =>	<i>equ</i>	<i>tec⁺</i>	<i>eco⁺</i>	<i>amb⁺</i>	<i>tec⁻</i>	<i>eco⁻</i>	<i>amb⁻</i>

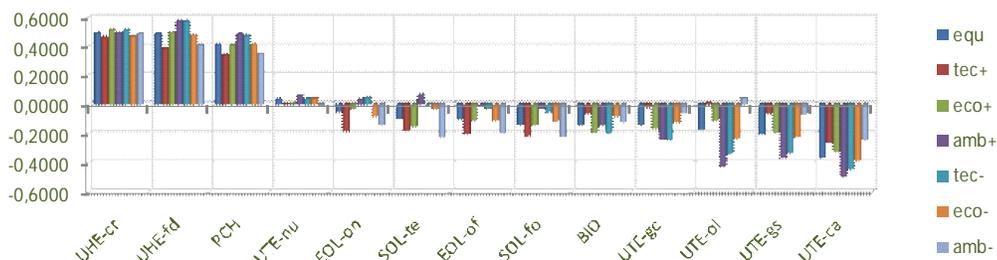
Fonte: Elaboração própria

Partiu-se de um caso de referência onde os pesos foram igualmente distribuídos pelos critérios. Para os outros seis casos, os pesos foram alterados de forma a identificar a influência dos critérios, no âmbito da dimensão a que pertencem, e verificar o impacto destas alterações no ordenamento das alternativas. O objetivo foi dar maior peso a cada um dos aspectos e verificar a respectiva repercussão na ordenação do *ranking*. O primeiro caso é aquele onde há equilíbrio (*equ*) entre o peso das perspectivas (dimensões). O peso dos aspectos técnico, econômico e socioambiental é aumentado nos casos *tec⁺*, *eco⁺* e *amb⁺*, respectivamente. Para os casos *tec⁻*, *eco⁻* e *amb⁻* foi realizado o oposto, ou seja, foi diminuído o peso das perspectivas técnica, econômica e socioambiental. Os resultados, no que se refere

⁶Para realizar as simulações foi utilizado o software Visual PROMETHEE. Disponível em: <<http://www.promethee-gaia.net>> Acesso em: 20/06/2012.

aos valores de IPG, são apresentados na Gráfico 1. As alternativas já se encontram ordenadas, em ordem decedente, considerando todos os IPG, ou seja levando em consideração todos os casos estudados.

Gráfico 1 – Valores de IPG resultantes da simulação dos seis casos



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 4 constam os resultados do “ranqueamento”, agora desagregados para cada caso simulado e para cada uma das alternativas de produção de energia elétrica estudada. Os números na coluna “ ΔR ” indicam a variação na posição do *ranking* em relação ao caso de equilíbrio nos pesos (*equ*). Por exemplo: -2 indica que houve queda de duas posições no *ranking* e +4 corresponde a subir quatro posições.

Tabela 4 – Ranqueamento das alternativas em cada caso avaliado

Opção	<i>equ</i>		<i>tec+</i>		<i>eco+</i>		<i>amb+</i>		<i>tec-</i>		<i>eco-</i>		<i>amb-</i>	
	IPG	R	IPG	ΔR										
UHE-cr	0,493	1	0,461	0	0,517	0	0,494	-1	0,517	-1	0,468	-1	0,488	0
UHE-fd	0,488	2	0,386	0	0,497	0	0,575	+1	0,574	+1	0,476	+1	0,408	0
PCH	0,413	3	0,342	0	0,408	0	0,486	0	0,474	0	0,415	0	0,347	0
UTE-nu	0,036	4	0,003	-1	0,003	0	0,064	-1	0,041	-1	0,041	0	-0,013	-1
EOL-on	-0,052	5	-0,186	-5	-0,031	0	0,036	-1	0,050	+1	-0,086	-2	-0,144	-4
SOL-te	-0,100	6	-0,181	-3	-0,153	-3	0,070	+2	-0,007	0	-0,031	+1	-0,226	-6
EOL-of	-0,103	7	-0,206	-4	-0,111	+1	-0,017	0	-0,029	0	-0,111	-1	-0,194	-3
UTE-gc	-0,142	8	-0,217	+2	-0,145	-2	-0,028	-2	-0,054	-2	-0,117	-2	-0,219	+2
SOL-fo	-0,144	9	-0,064	-3	-0,192	+1	-0,147	+1	-0,196	+1	-0,084	0	-0,123	-2
BIO	-0,142	10	-0,025	+3	-0,164	-1	-0,242	+1	-0,247	+1	-0,126	+4	-0,058	+2
UTE-ol	-0,172	11	0,011	+7	-0,111	+4	-0,428	-1	-0,340	-1	-0,233	-1	0,044	+7
UTE-gs	-0,208	12	-0,064	+4	-0,192	0	-0,370	+1	-0,335	+1	-0,223	+1	-0,068	+5
UTE-ca	-0,366	13	-0,261	0	-0,328	0	-0,495	0	-0,449	0	-0,390	0	-0,245	0

Fonte: Elaboração própria

4- ANÁLISE DE CENÁRIOS

Para verificar o comportamento do IPG frente a possíveis tendências futuras, foram simulados quatro cenários, variando, agora, a valoração dos critérios utilizados. Foi tomado o cenário de referência (*REF*) como ponto de partida, onde valoração dos critérios é a mesma adotada, na análise de sensibilidade, para o caso 1 (*equ*). Na Tabela 5 estão mostrados os resultados das simulações destes cenários. Os números na coluna " ΔR " indicam a variação na posição do ranking em relação ao caso *REF*. Para o cenário 1 (mnemônico *CT-FC+*) considerou-se uma tendência à redução nos custos de investimento e produção, assim como um aumento no fator de capacidade das seguintes alternativas: EOL-on, EOL-of, SOL-fo, SOL-te e BIO. Supõe-se, desta forma, que serão intensificados os investimentos em tecnologias, como por exemplo, de armazenamento, que possibilitarão aumentar o fator de capacidade destas alternativas. A queda nos custos pode ser atribuída à curva de aprendizagem das tecnologias. As alterações quantitativas foram: uma redução de 50% nos custos de investimento, O&M e CVU e um aumento de 40% no fator de capacidade. Para o cenário 2 (mnemônico *CO-*) simulou-se uma tendência à redução nas emissões de gases de efeito estufa para as opções: UTE-gs, UTE-gc, UTE-ca e UTE-ol. Esta redução pode ser atribuída à pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), tornando as opções mencionadas mais competitivas, aplicáveis em larga escala e com redução nos impactos ambientais. A alteração realizada foi uma redução de 90% nas emissões de CO₂ (diretas e indiretas), SO₂ e NO_x. No cenário 3 (mnemônico *MA+MI-*) foi suposta uma melhoria em todos os critérios para as alternativas: EOL-on, EOL-of, SOL-fo, SOL-te e BIO. Neste caso a ideia é que haverá tendência a grandes investimentos nestas fontes, em todos os aspectos, em função da crescente importância que os fatores ambientais vêm apresentando e as vantagens que estas fontes apresentam neste

aspecto. As alterações realizadas foram: uma redução de 30% para todos os critérios a serem minimizados e um aumento de 30% naqueles a serem maximizados. No cenário 4 (mnemônico *CO-MA+MI-*) foi considerada a ocorrência simultânea das tendências adotadas nos cenários 2 e 3 e, portanto, as alterações realizadas correspondem àquelas adotadas nos respectivos cenários de forma cumulativa.

Tabela 5 – Ordenação das tecnologias considerando os cenários 1, 2, 3 e 4

Opção	REF		CT-FC+		CO-		MA+MI-		CO-MA+MI-	
	IPG	R	IPG	ΔR	IPG	ΔR	IPG	ΔR	IPG	ΔR
UHE-cr	0,499	1	0,489	0	0,499	0	0,399	0	0,399	0
UHE-fd	0,484	2	0,474	0	0,484	0	0,384	0	0,384	0
PCH	0,416	3	0,397	0	0,416	0	0,326	0	0,326	0
UTE-nu	0,032	4	0,013	0	-0,006	0	-0,063	-4	-0,101	-4
EOL-on	-0,061	5	0,006	0	-0,113	-3	0,143	+1	0,124	+1
EOL-of	-0,111	6	-0,073	0	-0,168	-3	0,027	+1	-0,011	+1
SOL-te	-0,114	7	-0,095	0	-0,209	-5	-0,057	0	-0,123	-3
BIO	-0,136	8	-0,098	0	-0,202	-3	0,016	+2	-0,050	+2
SOL-fo	-0,138	9	-0,138	0	-0,195	-1	-0,067	0	-0,114	0
UTE-gc	-0,142	10	-0,161	0	-0,038	+5	-0,185	0	-0,090	+3
UTE-ol	-0,162	11	-0,209	0	-0,086	+5	-0,233	0	-0,166	0
UTE-gs	-0,206	12	-0,225	0	-0,097	+5	-0,249	0	-0,183	0
UTE-ca	-0,362	13	-0,381	0	-0,286	0	-0,443	0	-0,395	0

Fonte: Elaboração própria

CONSTATAÇÕES E CONCLUSÕES

As opções UHE-cr, UHE-fd e PCH tiveram melhor classificação que as outras alternativas em todos os casos estudados e são as únicas que apresentam IPG positivo para todos eles. Houve predominância da UHE-cr sobre a UHE-fd na maioria dos casos e da UHE-fd sobre a PCH em todos. Para o caso *tec+*, as tecnologias eólica e solar mostram baixo desempenho com vantagem para a biomassa. As tecnologias a gás natural e óleo combustível têm melhores resultados e avançam posições. A pior performance fica com o carvão mineral, contudo com melhoria no IPG. Isto indica que, privilegiando-se o aspecto técnico,

a melhor escolha fica por conta das fontes baseadas em combustíveis fósseis, com exceção do carvão mineral. Para o caso *eco+*, a UTE-nu seguida pela EOL-on mantiveram o seu posicionamento. As outras alternativas baseadas na energia solar, biomassa, EOL-of e combustíveis fósseis (exceto carvão) apresentaram comportamento semelhante. Embora a UTE-ol apresente custo de combustível elevado, seu custo de investimento é relativamente baixo, explicando sua ascensão no *ranking* para este caso. As tecnologias SOL-te e UTE-gc caíram de posição. A UTE-ca teve o IPG mais negativo, todavia ainda melhor que o caso de referência. Este fato sugere que, ao dar-se maior peso para o aspecto econômico, a fonte nuclear passa a ter preponderância, contudo a fonte eólica continua ocupando posição de destaque, assim como a UTE-ol. Para o caso *amb+*, as tecnologias UTE-nu e SOL-te têm valor de IPG próximos e acima do caso *equ*. Estão à frente da EOL-on, seguidas pela EOL-of e BIO. As tecnologias baseadas nos combustíveis fósseis apresentam desempenho bem abaixo, tendo a UTE-ca o pior desempenho com IPG ainda menor do que o do caso de referência, como era de se esperar. Mesmo considerando maior peso para o aspecto ambiental a fonte nuclear continua tendo posição de destaque e a tecnologia termossolar avança na escala de posicionamento. Um fator de destaque para este caso é que a UHE-fd sobrepuja a UHE-cr, embora ambas apresentem IPG bastante próximos. Para o caso *tec*, as tecnologias eólica e solar tiveram grandes melhorias nos valores de IPG.

As piores performances ficaram com os combustíveis fósseis. Ao dar-se menor peso para o aspecto técnico há a confirmação de que as fontes renováveis sobrepujam as fontes fósseis. A alternativa nuclear continua a destacar-se neste caso, sofrendo pouca alteração no valor de IPG frente ao caso *equ*, sendo ultrapassada somente pela EOL-on. O mesmo fato aqui se observa com as UHE-fd e UHE-cr em relação ao ocorrido no caso *amb+*. Para o caso *eco*, o desempenho foi semelhante para as fontes eólica, solar, biomassa e UTE-gc ficando a UTE-nu a frente destas.

As outras tecnologias baseadas nos combustíveis fósseis tiveram valores menores de IPG. Mesmo dando-se menor peso à perspectiva econômica, as fontes renováveis continuam à frente, contudo observa-se que a UTE-gc passa a ocupar lugar importante dentre as melhores opções.

Verifica-se uma elevação significativa no ranking da BIO, contudo seu IPG não varia muito em relação ao caso *equ*. Para o caso *amb*, verifica-se uma pior performance das fontes eólica, solar e biomassa, o que era esperado. Em seguida tem-se a UTE-nu, UTE-gc e UTE-gs, que são superadas pela UTE-ol com melhor IPG, apresentando grande elevação na posição do *ranking*. Assim, para este caso, há predomínio das fontes fósseis sobre a eólica, solar e biomassa, exceto o carvão mineral, que continuou apresentando o pior desempenho, contudo com melhor IPG do que para o caso *equ*.

A análise mostra que a UHE-cr apresenta pouca variação no que se refere à sua posição no *ranking*, assim como no valor de IPG, dentre um caso e outro, indicando elevada robustez frente à alteração nos pesos. A UHE-fd e a PCH tem aproximadamente o mesmo comportamento em relação à variação dos pesos para as perspectivas em questão, entretanto, com pior performance que a UHE-cr, mas melhor performance em relação a todas as outras alternativas. As outras alternativas apresentaram maior sensibilidade à alteração dos pesos.

Para as simulações de cenários de tendências há também algumas constatações e conclusões a tecer. No caso do cenário *CT-FC+* há variação nos valores do IPG, contudo não há alteração no ordenamento das alternativas. As tecnologias para as quais foram realizadas as alterações (EOL-on, EOL-of, SOL-fo, SOL-te e BIO) tiveram estes valores majorados enquanto que todas as outras apresentaram diminuição no valor de IPG, como esperado. Isto demonstra que se a tendência considerada neste cenário continuar ou se for intensificada, estas tecnologias subirão no *ranking* e poderão passar a ter preponderância sobre as alternativas que estão à sua frente. Em se tratando do cenário *CO-*, nota-se que as tecnologias

baseadas nos combustíveis fósseis, foco das alterações, com exceção da UTE-ca, passam a ocupar melhor posicionamento na escala ordenada, superando, inclusive, as fontes eólica e solar. Este fato indica que o investimento no desenvolvimento dos mecanismos de captura e armazenamento de carbono pode ser um fator decisivo no que diz respeito às estratégias de composição da matriz de energia elétrica, uma vez a crescente importância na participação das fontes fósseis no *mix* de geração. Em relação ao cenário *MA+MI-*, as alterações afetaram as alternativas envolvidas (EOL-on, EOL-of, SOL-fo, SOL-te e BIO) levando-as a ocupar melhores posições no *ranking*.

Desta forma, constitui-se um indício relevante o fato de que os investimentos em melhorias gerais nestas fontes, sob todos os aspectos mencionados, entretanto, sem significar grandes alterações tecnológicas, podem também ser eficientes para trazer estas fontes a patamares que possibilitem sua inserção na matriz de energia elétrica com menores riscos e ganhos de performance, considerando as três dimensões analisadas. No cenário *CO-MA+MI-* as fontes baseadas na energia eólica e biomassa passaram a ocupar posições superiores na escala ordenada. Este fato pode indicar que é mais vantajoso aplicar recursos em melhorias gerais nas fontes EOL-on, EOL-of e BIO, do que concentrar grandes esforços no aprimoramento dos mecanismos CCS destinados àquelas baseadas em combustíveis fósseis, apesar dos valores de IPG destas fontes apresentarem elevação em relação ao cenário de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. T., COSTA, A. P. C. S. Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método PROMETHEE. Gest. Prod. [online]. 2002, vol.9, n.2, pp. 201-214.

BRANS, J.P., MARESCHAL, B. PROMETHEE Methods. In: J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Verlag, Boston, Dordrecht: 2005, pages 163-196.

BROWNE, D., O'REGAN, B. MOLES, R. Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy*, v. 35, p. 518-528, 2010.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., PILAVACHI, P. A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, v. 36, p. 1074–1089, 2008.

DESTER, Mauricio. *Propostas para a construção da matriz de energia elétrica brasileira com foco na sustentabilidade do processo de expansão da oferta e segurança no suprimento da carga*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012, 261 pág., Tese (Doutorado).

GOMES, L. F. A. *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. São Paulo : Atlas, 2002.

ROY, B. *Méthodologie multicritère d'aide à la decision*. Paris: Economica, 1985.