

APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CUSTOS COMPLETOS E ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS: UM ESTUDO DE CASO NO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO¹

Application of total cost assessment and Data Envelopment Analysis: a case study at the energy sector

Denise Helena Lombardo Ferreira¹; Luciano Hideaki Fujita²; Carolina Baron³.

¹ Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Professora e Membro do Programa de Mestrado em Sustentabilidade da PUC-Campinas. *E-mail*: lombardo@puc-campinas.edu.br

² Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Graduação em Engenharia de Produção, PUC-Campinas. *E-mail*: lucianohideakifujita@hotmail.com

³ Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Graduação em Engenharia de Produção, PUC-Campinas. *E-mail*: carolbaron94@gmail.com

Data do recebimento: 27/10/2017 - Data do aceite: 28/06/2018

RESUMO: O presente artigo busca avaliar algumas usinas de geração de energia elétrica existentes no Brasil, dentre as quais, eólica, nuclear, termelétrica e hidrelétrica. Para isso foram usadas duas ferramentas – Avaliação de Custos Completos e Análise Envoltória de Dados - DEA (modelos CRS - Constant Returns to Scale e VRS - Variable Returns to Scale). A análise foi feita tendo em vista os parâmetros de custo e de produção anual de energia elétrica, tempo de construção, custo de manutenção e o tempo de retorno do investimento nas usinas de energia elétrica. Os resultados apontam que, por meio do modelo CRS da Análise Envoltória de Dados, considerando as usinas de energia elétrica selecionadas, a hidrelétrica mostrou ser a mais eficiente, enquanto que, pelo modelo VRS, as usinas eólica, termelétrica e hidrelétrica mostraram ser as mais eficientes. Entretanto, por meio da ferramenta Avaliação de Custos Completos, a usina eólica foi a que obteve a maior valoração e, portanto, a melhor opção dentre as analisadas.

Palavras-chave: Avaliação de custos completos. DEA. Usinas de energia elétrica. Eficiência.

ABSTRACT: The aim of this article is to evaluate some electricity generation plants existing in Brazil, including wind, nuclear, thermal and hydro types. In order to accomplish it, two tools were used – the Total Cost Assessment and Data Envelopment Analysis (CRS - Constant Returns to Scale and VRS - Variable Returns to Scale models). The analysis was made in view of the cost parameters and annual production of electricity; construction lead-time, maintenance cost and power plants investment payback. The results show that through the CRS model from the Data Envelopment Analysis, considering the power plants selected, the hydroelectric proved to be the most efficient, while through the VRS model, wind power plants, thermoelectric and hydroelectric proved to be the most efficient. However, through the Total Cost Assessment tool, the wind farm was the one that obtained the highest valuation and, therefore, was the best option among the ones analyzed.

Keywords: Full Cost Assessment. DEA. Electrical Energy Plants. Efficiency.

Introdução

A aceleração do desenvolvimento econômico e o crescimento populacional acarretam em altos níveis de demanda por energia, podendo impactar o meio ambiente. Jacobi (2007) assinala que os quadros social, político, econômico e ambiental que caracterizam as sociedades contemporâneas revelam que os impactos dos humanos sobre o meio ambiente estão se tornando cada vez mais complexos.

De acordo com Veiga (2008), a questão ambiental ganhou visibilidade pública a partir da Conferência de Estocolmo, em 1972. Desde então, ocorreram vários encontros no âmbito internacional para debater esse importante tema. Cada vez mais, é necessário que a sociedade encontre uma forma de desenvolver o equilíbrio entre os seres humanos e o mundo natural.

De acordo com Mariani et al. (2016), os países considerados mais desenvolvidos consomem a maior parte da energia produzida no mundo, já os países emergentes e

em desenvolvimento têm ocupado um papel importante na produção energética.

A falta de energia pode impactar diversos setores, como indústria, comércio e, por fim, a população, trazendo transtornos muitas vezes irreparáveis.

No período de 1950 a 1970 a geração e a produção de energia elétrica no Brasil desenvolveram-se rapidamente com custos relativamente baixos e com significativo progresso tecnológico, devido sobretudo à facilidade de obtenção de recursos financeiros internacionais e pela disponibilidade dos recursos hidrelétricos próximos aos mercados consumidores (IRFFI et al., 2009). Entretanto, os mesmos autores assinalam que, no período de 1980 a 2000, devido à perda da capacidade de financiamento dos investimentos estatais, o setor energético apresentou sinais de enfraquecimento.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), entre 1995 e 1999 a oferta interna de energia cresceu mais que o Produto Interno Bruto (PIB). O aumento do PIB possibilitou o início de um processo de

melhoria de distribuição de renda no país. Estes fatores reaquereram a economia brasileira na forma de bens e produtos mais elaborados e mesmo acesso a bens até então inacessíveis para parte da população. A taxa de crescimento do consumo das famílias (bens e serviços) aumentou mais que o número de domicílios no período de 1990 a 2000. Nesse mesmo período houve uma elevação considerável do consumo de eletrodomésticos, acarretando um significativo aumento do consumo de eletricidade.

No ano de 2001 a população brasileira foi forçada a mudar seus hábitos de consumo de energia devido à crise energética que assolava o país provocada pela ausência de investimentos em geração e distribuição de energia. Além disso, na época, a maior parte da energia elétrica do Brasil era proveniente de usinas hidrelétricas e no ano em questão houve escassez de chuva, inviabilizando o nível adequado dos reservatórios para a geração de energia elétrica. Adicionalmente, a ausência de linhas de transmissão impediu o governo de manejar a geração de energia.

O agravamento da situação ambiental demanda estudos e a elaboração de propostas alternativas de superação das contradições do atual cenário mundial, sendo prudente a busca por métodos que preservem os recursos naturais, o que muitas vezes requer a necessidade de tomar decisões das mais simples até as mais complexas. Nesse sentido, a elaboração de um modelo representando a realidade pode ajudar na escolha de decisões mais adequadas.

Os modelos matemáticos usam relações matemáticas para descrever ou representar um objeto ou problema de decisão, e podem, em seu processo de criação, auxiliar no entendimento do problema, e como consequência melhorar a análise de decisão. Assim, com a finalidade de avaliar algumas usinas de geração de energia elétrica existentes no Brasil, o presente artigo tem como objetivo apresentar

um estudo de caso sobre a avaliação dessas usinas com ferramentas que auxiliam no processo da tomada de decisão. Tais ferramentas são denominadas de Avaliação de Custos Completos - ACC e Análise Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis - DEA).

Método

A avaliação de usinas de energia elétrica existentes no Brasil pode ser feita levando em conta o custo de energia, a produção anual, o tempo de construção, o custo com manutenção e o tempo de retorno para cada usina. A seção análise dos resultados detalha o procedimento utilizado para a obtenção dos dados mencionados, bem como os resultados obtidos.

Aplicação - ACC

A ferramenta ACC baseia-se na identificação e avaliação de dados sobre impactos externos e custos/benefícios das atividades. Inicialmente a ACC foi desenvolvida para contabilizar os custos provenientes de impactos ambientais causados por um empreendimento (BURANI et al., 2004). Posteriormente, segundo Carvalho (2000), esse conceito foi utilizado para contabilizar todos os custos inerentes ao empreendimento, como fatores sociais, políticos e ambientais. Nas avaliações tradicionais, normalmente é feita uma avaliação econômica (considerando basicamente os custos internos), em que não são considerados os custos ambientais, sociais, culturais, ou quando considerados, são delegados a um segundo plano. Esta forma de avaliação é inconsistente dentro de um Planejamento Integrado de Recursos, pois, ao desconSIDERAR os custos externos, pode-se chegar à seleção de um determinado recurso que não é o mais adequado (BURANI et al., 2004).

Em relação ao tema geração de energia, para Boarati (2003) a ferramenta ACC revoluciona a forma de como avaliar a viabilidade de uma usina, pois normalmente eram considerados apenas aspectos ligados ao investimento, construção da usina e seu retorno financeiro, entretanto, há necessidade de considerar outros fatores relacionados sobre a viabilização ou não do empreendimento. Atualmente, o meio ambiente, a população, e as decisões políticas possuem importância fundamental e o “desenvolvimento a qualquer preço” não justifica a degradação do meio ambiente e da qualidade de vida. Como destacam Gimenes et al. (2004), por meio da ACC podem ser identificadas e tratadas algumas variáveis necessárias ao processo de decisão, direcionando à aplicação de metodologias com vistas ao desenvolvimento sustentável, por propiciar o tratamento de elementos que tradicionalmente não tomam parte nos planejamentos.

Os fatores necessários para um processo de tomada de decisão podem ser identificados e tratados, visando satisfazer os conceitos de desenvolvimento sustentável e planejamento de recursos, ao abordar os custos, o meio ambiente e a sociedade no processo decisório. Particularmente neste estudo, a análise foi feita apenas com o fator técnico-econômico, pois o intuito é comparar as ferramentas ACC e DEA para esse fator específico.

Por meio da ACC diversos elementos de análise são valorados a partir de dois tipos de ponderação: 1) alternativas de cada elemento de análise e 2) peso de cada elemento de análise. Segundo Boarati (2003), estes dois critérios possibilitam que cada elemento de análise seja avaliado de acordo com as opções disponíveis. As alternativas são consideradas por valores percentuais, variando da melhor (100%) à pior alternativa (25%), com a seguinte classificação: excelente (100%), satisfatória (75%), regular (50%) e insatisfatória (25%). O peso de cada elemento de análise

varia entre A, B, C , em ordem decrescente de importância.

Tendo em vista que os fatores considerados devem ter a mesma importância, a valoração máxima para todos eles é de 100 pontos de acordo com a Eq. 1.

$$A * X + B * Y + C * Z = 100 \quad (1)$$

Em que:

A, B e C são as valorações de cada Elemento de Análise [adimensionais] – Depende da importância atribuída ao Elemento de Análise dentro do Fator considerado, sendo $A =$ máxima importância ($A = 300$), $B = 2/3$ da máxima importância ($B = 200$) e $C = 1/3$ da máxima importância ($C = 100$);

X, Y e Z são os números de ocorrências dos Elementos de Análise com a valoração A, B ou C , respectivamente [adimensionais].

A partir da definição dos Elementos de Análise e de seus respectivos pesos (A, B ou C) é feito o cálculo do KFC (Constante do Fator Considerado) dado pela Eq. 2.

$$KFC = \frac{300 * X + 200 * Y + 100 * Z}{100} = 3 * X + 2 * Y + 1 * Z \quad (2)$$

A Eq. 3 apresenta o cálculo de VEA_i (Valoração do Elemento de Análise i).

$$VEA_i = \left\{ \frac{\text{peso}(A, B, C)}{KFC} \right\} * \text{alternativa} \quad (3)$$

Por fim é obtida a Eq. 4 para o cálculo de VF (Valoração do Fator).

$$VF = \sum VEA_i \quad (4)$$

Com o propósito de ilustrar a aplicação da metodologia ACC, a Tabela I destaca um exemplo numérico apresentando o Fator considerado com os Elementos de Análise, seus respectivos pesos e alternativas, a Valoração

do Elemento de Análise e a Valoração do Fator (BACHI JUNIOR et al., 2013).

As células preenchidas na Tabela I representam as opções selecionadas de acordo com as pesquisas realizadas sobre o presente tema.

No exemplo numérico da Tabela I, o valor do *KFC* é 15 ($3*3+2*2+1*2$, pois há três Elementos de Análise com Valoração *A*, dois Elementos de Análise com Valoração *B* e dois Elementos de Análise com Valoração *C*). É destacado o cálculo feito para a Valoração do Elemento de Análise 1 (Eq. 5).

$$VEA_i = \left(\frac{300}{15}\right) * 50\% = 10,00 \quad (5)$$

Aplicação - DEA

A DEA é uma ferramenta da estatística não paramétrica, que avalia a eficiência de unidades tomadoras de decisão, comparando entidades que realizam tarefas similares e se diferenciam pela quantidade de recursos (*inputs* ou insumos) e de bens (*outputs* ou produtos) envolvidos (MILIONI; ALVES, 2013). As unidades avaliadas são denominadas por DMU (*Decision Making Units*). A literatura apresenta dois modelos clássicos referentes à metodologia Análise Envoltória de Dados - DEA: CCR – Charnes, Cooper, Rhodes e BCC – Banker, Charnes, Cooper.

O modelo CCR (CHARNES et al., 1978), também conhecido por CRS - *Constant Returns to Scale*, adota como hipótese retornos constantes de escala. O modelo BCC (BANKER et al., 1984), também conhecido como VRS - *Variable Returns to Scale*, leva em conta situações da eficiência de produção com variação de escala e não admite proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*.

A DEA tem sido usada em diversas áreas como educação, administração, engenharia, para otimizar o resultado final por meio do estudo da eficiência relativa das unidades, permitindo avaliar diversos fatores: técnico, social, econômico e ambiental e, portanto, fazendo uma análise integrada. O intuito é calcular a eficiência das unidades produtivas, conhecendo-se os níveis dos recursos empregados e dos resultados obtidos. DEA otimiza cada observação individual, de modo a estimar uma fronteira eficiente (linear por partes), composta das unidades que apresentem as melhores práticas dentro da amostra em avaliação. Essas unidades servem como referência ou *benchmarking* para as unidades ineficientes (GOMES et al., 2009).

Na formulação matemática cada DMU_k é considerada como uma unidade de produção que utiliza *n inputs* x_{ik} ($i=1,2,\dots,n$) para produzir *m outputs* y_{jk} ($j=1,2,\dots,m$). O modelo CRS maximiza o quociente entre a com-

Tabela I - Exemplo numérico da tabela de custos completos

Fator Considerado	Peso do Elemento de Análise	<i>KFC</i>	25%	50%	75%	100%	Valoração do Elemento de Análise (VEA _i)
Elemento de Análise	Símbolo						
Elemento 1	<i>A</i>						10,00
Elemento 2	<i>B</i>						13,33
Elemento 3	<i>A</i>						20,00
Elemento 4	<i>C</i>	15					3,33
Elemento 5	<i>C</i>						1,66
Elemento 6	<i>A</i>						15,00
Elemento 7	<i>B</i>						10,00
Valoração do Fator (VF)							73,32

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Bachi Junior et al., (2013).

binção linear dos *outputs* e a combinação linear dos *inputs*, com a restrição de que para qualquer DMU esse quociente não pode ser maior que 1. Este problema de programação fracionária, mediante alguns artifícios matemáticos, pode ser linearizado e transformado em um Problema de Programação Linear mostrado no Modelo 1.

$$\text{Maximizar } h_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo}$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1 \quad \text{Modelo 1}$$

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} \leq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j$$

A formulação do modelo VRS utiliza, para cada DMU_k, o Problema de Programação Linear apresentado no Modelo 2.

$$\text{Maximizar } h_o = \sum_{j=1}^m u_j y_{jo} - u_*$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1 \quad \text{Modelo 2}$$

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} - u_* \leq 0 \quad \forall k$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j$$

$$u_* \in \mathbb{R}$$

Em que:

h_o é a eficiência da DMU_o em análise;

x_{ik} é o *input* i da DMU_k;

y_{jk} é o *output* j da DMU_k;

v_i é o peso do *input* i ;

u_j é o peso do *output* j ;

u_* é o fator de escala, quando positivo indica que a DMU está em região de retornos

decrecentes de escala; se negativo os retornos de escala são crescentes; se nulo, a região é de retornos constantes de escala.

O valor de h_o está no intervalo $[0, 1]$, caso h_o seja igual a 1, a DMU_o em análise é considerada eficiente. No modelo CRS uma DMU é eficiente se, na escala em que opera, é a que melhor aproveita os *inputs* de que dispõe. Por outro lado, para o modelo VRS, uma DMU é eficiente quando apresenta o melhor quociente de *outputs* com relação aos *inputs*, ou seja, aproveita melhor os *inputs* sem considerar a escala de operação da DMU (MELLO et al., 2008). As variáveis de decisão do Modelo 1 e do Modelo 2 são v_i e u_j .

Em geral, o modelo VRS tem como característica grande número de empates para DMUs eficientes se comparado ao modelo CRS. Conforme Ali (1993), no VRS aquelas DMUs com menor valor de um dos *inputs* ou o maior valor de um dos *outputs* são consideradas eficientes, mesmo quando as relações com as demais variáveis não sejam boas. Nesse caso, essas DMUs são denominadas de falsamente eficientes. Com a finalidade de contornar essa situação, Leta et al. (2005) propõem um modelo VRS baseado no uso da Fronteira Invertida, que consiste em inverter *inputs* com *outputs*.

De acordo com Casado; Siluk (2011), a Fronteira Invertida permite a identificação de unidades produtivas consideradas “falsas eficientes”, pois já que a Eficiência Invertida propõe a divisão da soma ponderada dos *inputs* pela soma ponderada dos *outputs* (o inverso da Fronteira Padrão), passa a indicar como mais eficientes aquelas unidades que gastam mais *inputs* e geram menos *outputs*, enquanto a Fronteira Padrão classifica como mais eficiente aquela que gera mais *outputs* gastando menos *inputs*. Assim, a Fronteira Invertida indica as unidades que pior trabalham seus recursos, sendo então chamada de “falsa eficiência”. Para o modelo VRS, devido ao elevado número de empates entre as

eficiências, torna-se conveniente a utilização da Fronteira Invertida.

O resultado da análise das duas fronteiras simultaneamente é conhecido como Eficiência Composta, definido com a média aritmética entre a Eficiência Padrão e o complemento da eficiência em relação à Fronteira Invertida (1- Eficiência Invertida). O uso do complemento justifica-se pelo fato da Fronteira Invertida ser uma medida de ineficiência. Para obter um índice em que as unidades eficientes tenham o valor 1, é feita a normalização da Eficiência Composta, dividindo-se seus valores pela maior de todas as Eficiências Compostas (CASADO; SILUK, 2011).

Análise de Resultados

Avaliação de Custos Completos

A seção em questão mostra a aplicação da ACC para a análise de quatro usinas de

geração de energia elétrica no Brasil: nuclear, eólica, termelétrica e hidrelétrica, tendo em vista apenas o fator técnico-econômico.

A ideia central da ACC em relação aos recursos energéticos do Brasil é estudar a possibilidade de construção e instalação de usinas, além de analisar a melhor opção de investimento. Os Elementos de Análise considerados nesse estudo foram: custo de energia, produção anual, tempo de construção, custo com manutenção e tempo de retorno.

Foram definidos os elementos de máxima importância (*A*), os elementos que ocupam 2/3 da máxima importância (*B*), e os elementos com 1/3 da máxima importância (*C*), para posteriormente calcular o *KFC* (Constante do Fator Considerado) (Eq. 2) e, por fim, obter a Valoração do Fator (Eq. 4). A Tabela II ilustra a aplicação da ACC para obter a Valoração do Fator para a usina eólica.

Analogamente, foram confeccionadas tabelas para as demais usinas. A Tabela III mostra a Valoração do Fator obtida para as

Tabela II - Valoração do Fator da usina eólica

Usina Eólica	Peso do Elemento de Análise		Alternativa Insatisfatória (25%)	Alternativa Regular (50%)	Alternativa Satisfatória (75%)	Alternativa Excelente (100%)	Valoração do Elemento de Análise (VEA)
	Elemento de Análise	Peso					
Custo energia [US\$/MW] [1]	A		> 50	40 a 50	30 a 40	< 29	6,81
Produção anual [milhões de MWh] [2]	B		> 12	7 a 12	2 a 7	< 2	18,18
Tempo construção [anos] [3]	C	11	> 6	4 a 6	2 a 4	< 1	9,09
Custo manutenção [US\$] [4]	A		Muito alto	Alto	Médio	Baixo	27,27
Tempo retorno [anos] [5]	B		> 12	8 a 12	2 a 7	< 2	18,18
Valoração do Fator (VF) - Usina Eólica							79,53

[1] <http://saude-231.blogspot.com.br/2010/05/o-custo-da-energia-nuclear.html>.

[2] Obtidos através dos cálculos: $143,47/365 = 0,3930684$ [GW] = 393,0684 [MW]. Potencial diário = $393,0684 \times 24 \times 365 \times 0,35 = 874970,2584$ [MWh].

[3] http://ecen.com/eee83/eee83p/viabilidade_energia_eolica.htm.

[4] Suposição com base em Rossi e Oliveira (2014).

[5] Carvalho (2012).

usinas elencadas e permite concluir que a usina eólica é a melhor opção de investimento referente ao fator técnico-econômico usando a ferramenta ACC, com Valoração do Fator de 79,53.

Tabela III - Valoração Final das usinas

Usina	Valoração do Fator
Eólica	79,53
Termelétrica	65,88
Hidrelétrica	61,34
Nuclear	43,16

Análise Envoltória de Dados

A ferramenta DEA foi aplicada para verificar a eficiência das usinas de geração de energia elétrica descritas na seção anterior. Para isso, foram consideradas como DMU as usinas, *inputs*: custo de energia, tempo de construção, custo de manutenção e tempo de retorno, e, *output*: produção anual.

Para calcular as eficiências e *benchmarks*, optou-se pelo uso do *Microsoft Excel*

DEA Frontier devido a sua praticidade. Entretanto, na versão gratuita esse *software* apresenta algumas limitações, pois não possui a opção de usar a Fronteira Invertida e também a Eficiência Orientada a *output*. Já o *software* Sistema Integrado de Apoio à Decisão - SIAD (ANGULO MEZA et al., 2005) contempla essas duas opções.

A Tabela IV sintetiza os dados trabalhados com a ferramenta DEA. Esses dados foram obtidos a partir das pesquisas realizadas para a construção das tabelas da ACC descritas na seção anterior. Vale salientar que o *input* custo de manutenção foi obtido atribuindo uma escala de zero a dez referentes aos valores utilizados nas tabelas ACC.

Em seguida, aplicou-se o programa *Microsoft Excel DEA Frontier* para obter a eficiência de cada usina e, posteriormente, a ferramenta SIAD para calcular a Eficiência Composta Normalizada. Para as unidades que não atingiram 100% de eficiência é possível fazer uso do *benchmarking*. Utilizando os dados de DMUs eficientes como referência,

Tabela IV - Valores dos *inputs* e *output* das usinas usados no *Microsoft Excel DEA Frontier* e SIAD

DMU	<i>Inputs</i>				<i>Output</i>
Usina	Custo de energia [US\$/MW]	Tempo de construção [Meses]	Custo de manutenção	Tempo de retorno [Meses]	Produção anual [MWh]
Nuclear	40,400	84	10	156	10.258.000
Eólica	66,200	18	2	6	874.970
Termelétrica	49,000	48	8	60	1.534.000
Hidrelétrica	30,000	60	2	156	28.270.350

Tabela V - Resultado das eficiências obtidas através do SIAD e alvos usando o modelo CRS.

Alvos					
Usina	Eficiência CRS	Custo de energia [US\$/MW]	Tempo de construção [Meses]	Custo de manutenção	Tempo de retorno [Meses]
Nuclear	0,524	10,886	21,771	0,726	56,605
Eólica	0,433	0,929	1,857	0,062	4,828
Termelétrica	0,076	1,628	3,256	0,109	8,465
Hidrelétrica	1,000	30,000	60,000	2,000	156,000

pode-se calcular os valores ideais teóricos para DMUs ineficientes. As Tabelas V e VI retratam os resultados e os alvos obtidos nas rodadas referentes aos modelos CRS e VRS, respectivamente.

As últimas quatro colunas das Tabelas V e VI apresentam os novos valores obtidos para os *inputs* usando os modelos CRS e VRS, respectivamente. Vale destacar que o *output* não sofre alteração, pois o objetivo é manter o *output* alterando-se o *input*, tendo como referência uma DMU já eficiente. É possível observar que os valores dos novos *inputs* contidos na Tabela V são bastante diferentes daqueles apresentados inicialmente na Tabela IV. Entretanto, os valores dos novos *inputs* apresentados na Tabela VI são similares aos da Tabela IV.

No modelo VRS as usinas eólica, termelétrica e hidrelétrica atingiram 100% da eficiência, e por esse motivo os respectivos alvos não indicam alterações de valores.

Conclusão

Esta pesquisa abordou a aplicação das ferramentas ACC e DEA para analisar, sob o ponto de vista técnico-econômico, as eficiências de algumas usinas do setor energético brasileiro.

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que, pela ferramenta DEA, a usina hidrelétrica mostrou ser a mais eficiente usando o modelo CRS com eficiência 100%, já a usina termelétrica acusou eficiência muito

baixa (7,6%) (Tabela V), enquanto que, pelo modelo VRS, as usinas eólica, termelétrica e hidrelétrica mostraram ser as mais eficientes, todas elas com eficiência 100%, já a usina nuclear obteve eficiência 85,4% (Tabela VI), isso ocorre pois o modelo CRS pressupõe que a fronteira de eficiência segue uma proporcionalidade, diferentemente do modelo VRS. Por meio da ferramenta ACC, a usina eólica foi a que obteve a maior pontuação (79,53), portanto a melhor opção dentre as demais, enquanto a usina nuclear obteve a menor pontuação (43,16) (Tabela III). Os resultados obtidos por meio da aplicação dos modelos tratados nesta pesquisa foram distintos, pois a seleção das alternativas e o preenchimento das tabelas utilizados na ACC foram construídos segundo o julgamento dos pesquisadores, enquanto para a aplicação da DEA foi necessário apenas fornecer os valores exatos dos dados associados.

A ferramenta ACC possibilita analisar diversos fatores: ambiental, social, político e técnico-econômico e a simplicidade na manipulação com os cálculos efetuados por meio do programa *Microsoft Excel* possibilita a aplicação da ACC em diversas áreas. Vale destacar que o particular estudo foi realizado apenas com ênfase para o fator técnico-econômico, mas é possível estender o mesmo tipo de análise para os aspectos ambientais e sociais.

A atribuição dos pesos e a escolha das alternativas, necessárias para a aplicação da ferramenta ACC, foram feitas pelos próprios pesquisadores, tornando um caráter subjetivo.

Tabela VI - Resultado das eficiências obtidas através do SIAD e alvos usando o modelo VRS

Alvos					
Usina	Eficiência VRS	Custo [US\$/MW]	Tempo de construção [Meses]	Custo de manutenção	Tempo de retorno [Meses]
Nuclear	0,854	34,503	57,155	3,423	133,237
Eólica	1,000	66,200	18,000	2,000	6,000
Termelétrica	1,000	49,000	48,000	8,000	60,000
Hidrelétrica	1,000	30,000	60,000	2,000	156,000

Uma possibilidade de contornar a subjetividade seria aplicar um questionário aos responsáveis pelas informações para auxiliar no preenchimento das tabelas ACC, entretanto isso demandaria demasiado tempo.

Assim com a ACC, a ferramenta DEA pode ser aplicada em diversas áreas, como educação, saúde, meio ambiente e engenharia. Dependendo do número de unidades a serem estudadas é possível fazer uso do programa *Microsoft Excel* (máximo 20) ou então do SIAD. Tendo em vista a vantagem da flexibilidade do manuseio com a DEA é bastante

oportuna a sua utilização na construção de protótipos, possibilitando definir rapidamente quais são as unidades eficientes dentro dos parâmetros considerados. Além disso, para as unidades ineficientes, por meio do *benchmarking*, é possível definir estratégias para alcançar metas eficientes.

A pesquisa realizada destacou a aplicação das ferramentas ACC e DEA no setor energético brasileiro, entretanto, com algumas adaptações é possível estender a aplicação de tais ferramentas em diversos outros temas de interesse.

NOTAS

¹ Um recorte deste trabalho foi apresentado no XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC – ELACAC 2015.

REFERÊNCIAS

- ALI, A.I. Streamlined computation for data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 64, n. 1, p. 61-67, 1993.
- ANGULO MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; RIBEIRO, P.G. SIAD v. 2.0. Sistema Integrado de Apoio à Decisão: Uma Implementação computacional de modelo de Análise Envoltória de Dados e um método Multicritério. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado, 2005. **Anais...** Gramado, 2005.
- BACHI JUNIOR, D.; TIAGO FILHO, G.L.; SEYDELL, M.R.R. Um modelo de análise do transporte de derivados de petróleo através dos custos completos. In: V Congresso Brasileiro de Energia. Itajubá, 2013. **Anais ...** Itajubá, 2013.
- BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER, W.W. Some models for estimating technical scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- BOARATI, J.R. **Um modelo para avaliação ponderada da hidreletricidade e termelétricidade com gás natural através dos custos completos**. Dissertação (Mestrado) – EDUSP, São Paulo, 2003.
- BURANI, G.F.; UDAETA, M.E.M.; FUJII, R.J.; GALVÃO, L.C.R. O cenário dos recursos energéticos distribuídos no estado de São Paulo. In: 5º Encontro de energia no meio Rural e Geração Distribuída, 2004, Campinas (SP). **Anais ...** Campinas (SP), 2004.
- CARVALHO, E.C. **A Análise do ciclo de vida e os custos completos no planejamento energético**. Dissertação (Mestrado) – EDUSP, São Paulo, 228 p. 2000.

CARVALHO, J. F. O espaço da energia nuclear no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 293-307, 2012.

CASADO, F. L.; SILUK, J. C. M. Avaliação da eficiência técnica de instituições públicas através da utilização de indicadores de governança. In: do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG, 2011.

CHARNES, A; COOPER, W. W; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, p. 429-444, 1978.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Estudo da Eficiência Energética**: consumo de energia no Brasil- análises setoriais, Rio de Janeiro, junho de 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

GIMENES, A. L. V.; UDAETA, M. E. M; GALVÃO, L. C. R.; REIS, L. B., Modelo de Integração de recursos para um planejamento energético integrado e sustentável. In: X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2004. **Anais ...** Rio de Janeiro, 2004

GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S. de; SOUZA, G. D. S.; ANGULO-MEZA, L.; MANGABEIRA, J. A. D. C. Efficiency and sustainability assessment for a group of farms in the Brazilian Amazon. **Annals of Operations Research**, v. 169, n. 1, p. 167-181, 2009.

IRFFI, G.; CASTELAR, I; SIQUEIRA, M. L.; LINHARES, F. C. Previsão da demanda por energia elétrica para classes de consumo na região Nordeste, usando OLS dinâmico e mudança de regime. **Economia Aplicada**. v.13, n. 1, 2009, p. 69-98. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502009000100004>. Acesso em: 15 jun. 2016.

JACOBI, P. R. Educar na sociedade de risco: o desafio de construir alternativas. **Pesquisa em Educação Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 49-65, 2007.

LETA, F. R.; MELLO, J. C. C. B. S. de; GOMES, E. G.; ANGULO-MEZA, L. Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. **Investigação Operacional**, v. 25, p. 229-242, 2005.

MARIANI, L.; GAURENGHI, M. M.; MITO, J. Y. L.; CAVALERO, C. K. N.; GALVÃO, R. R. A. Análise de oportunidades e desafios para o Nexso Água-Energia. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 37, edição especial, p. 9-30, 2016.

MELLO, J. C. C. B. S de; ANGULO-MEZA, L.; GOMES, E.G.; FERNANDES, A. J. S.; BONDI NETO, L. Estudo não paramétrico da relação entre consumo de energia, renda e temperatura. **IEEE Latin America Transactions**, v. 6, n. 2, p. 153-161, 2008.

MILIONI; A. Z.; ALVES, L. B. Ten years of research parametric data envelopment analysis, **Pesquisa Operacional**, v. 33, n. 1, p. 89-104, 2013.

ROSSI, P. H. J.; OLIVEIRA, C. P. **Perguntas frequentes sobre energia eólica**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=26>>. Acesso em: 05 dez. 2014.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento Sustentável**: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

