



Avaliação da eficiência dos municípios do estado do Amazonas na geração de energia elétrica pela análise envoltória de dados

Elizandro Prata da Silva¹, João Caldas do Lago Neto², Sandro Dimy Barbosa Bitar³.

Resumo

O Estado do Amazonas tem uma dimensão logística e geográfica complexa para atuação por empresas responsável pela geração e distribuição de energia elétrica nos municípios do interior do estado. Nessas regiões a geração de energia elétrica não é assistida por hidrelétricas, mas por grupos geradores instalados na sede de cada município. Os principais insumos energéticos utilizados para geração de energia, nessa região, são óleo diesel e óleo lubrificante. Há uma exigência para o gerenciamento de controle aos respectivos custos relativos à produção. O estudo aqui proposto foi baseado num levantamento de dados disponibilizados pela empresa AMAZONAS ENERGIA responsável pela geração e distribuição de energia elétrica para a região, com o objetivo de avaliar a eficiência dos municípios do interior do estado do Amazonas com respeito à produção dessa energia elétrica. A metodologia proposta pela Análise Envoltória de Dados (AED), identificará os municípios cujas unidades geradoras são ineficientes ou eficientes quanto à produção. Os resultados obtidos para o ano de 2004 e 2009 indicaram que a maioria dos municípios avaliados apresentaram ineficiências nos modelos de avaliação utilizados nesse estudo, com atribuição de ineficiência relacionada tanto de gestão como também de escala (variações no processo de produção), a ineficiência de gestão é quando a unidade produtora não conseguiu gerenciar corretamente os recursos disponíveis para a geração eficiente de produtos.

Palavras-Chave: Geração de Energia Elétrica, Análise Envoltória de Dados, Eficiência.

Evaluation of the efficiency of the municipalities of the state of Amazonas in the generation of electric energy by the data envelope analysis. The State of Amazonas has a complex logistic and geographic dimension to act by companies responsible for the generation and distribution of electric power in the municipalities of the interior of the state. In these regions the generation of electric energy is not assisted by hydroelectric plants, but by generating groups installed in the headquarters of each municipality. The main energy inputs used for power generation in this region are diesel oil and lubricating oil. There is a requirement for the management of control to the respective costs related to the production. The study proposed here was based on a survey of data provided by the company AMAZONAS ENERGIA responsible for the generation and distribution of electric power for the region, with the objective of evaluating the efficiency of the municipalities of the interior of the state of Amazonas with respect to the production of this electric energy. The methodology proposed by the Data Envelopment Analysis (AED) will identify municipalities whose generating units are inefficient or efficient in production. The results obtained for 2004 and 2009 indicated that most of the evaluated municipalities presented inefficiencies in the evaluation models used in this study, with attribution of inefficiency related to both management and scale (variations in the production process), inefficiency of management is when the producing unit was unable to properly manage the resources available for efficient product generation.

Key-words: Electric Power Generation, Data Envelopment Analysis, Efficiency.

¹ Bacharel em Matemática Aplicada, UFAM, Departamento de Matemática ICE, Manaus, Amazonas e-mail: elizandroprata@hotmail.com

² Professor Dr. UFAM, Departamento Engenharia Mecânica, FT, Manaus, Amazonas, e-mail: jcaldas@ufam.edu.br.

³ Professor Dr. UFAM, Departamento de matemática, ICE, Manaus, Amazonas, e-mail: sandrobitar@ufam.edu.br.



1. Introdução

O setor elétrico brasileiro depois das privatizações ocorridas no final do século XX corroborou com a consolidação da lógica de "Estado mínimo", em que o mercado adquire centralidade e hegemonia, sendo instrumento capaz de orientar com eficiência a alocação dos recursos e distribuir com equidade os benefícios. Tal concepção beneficia a esfera privada em detrimento da esfera pública para o provimento dos serviços públicos, reservando nesse novo rearranjo o papel de mediador e regulador ao Estado (Leme, 2005).

A experiência internacional relata um número significativo de metodologias com diferentes abordagens e métodos para caracterizar essa eficiência (Jamash e Pollitt, 2001).

Do ponto de vista empírico, a fronteira (que é constituída pelas unidades que determinam a superfície envolvente, ou seja, é o conjunto de unidades eficientes) é determinada através de ferramentas estatísticas, como os mínimos quadrados ordinários corrigidos (COLS) e a análise de fronteira estocástica (SFA), juntamente com as técnicas de programação linear como as utilizadas na análise de envoltória de dados (AED). Em todas essas metodologias, a fronteira é definida pelas unidades mais eficientes da amostra.

A diferença fundamental entre elas reside no fato de que nos modelos paramétricos existe a necessidade de especificar uma forma funcional para a fronteira, enquanto ou Data Envelopment Analysis (DEA) tal exigência não existe. Foi justamente esta característica, aliada a facilidade de tratar DMU's, neste caso pequenas unidades independentes de geração de energia, com múltiplos insumos e múltiplos produtos que motiva a escolha da DEA.

Nos últimos anos, a DEA tornou-se um dos métodos de benchmarking preferidos. É importante ressaltar que o DEA é utilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, para cálculos relacionados ao custo de capital de empresas de referência (ANEEL, 2010).

Diferente de outros setores, o setor elétrico (geração, distribuição e transmissão) tem características muito semelhantes entre seus agentes, empresas e projetos, o que facilita e viabiliza a aplicação da DEA (*Data Envelopment Analysis*), face a necessidade das unidades tomadoras de decisão estejam trabalhando sob condições idênticas de atuação. Neste contexto, Pessanha et al (2010) fazem uma avaliação do modelo DEA proposto pela ANEEL na primeira revisão tarifária das novas instalações de transmissão comparando os resultados com um modelo DEA alternativo, gerado a partir de uma adaptação do modelo DEA da ANEEL, em que são considerados os níveis de tensão das linhas de transmissão e as restrições aos multiplicadores no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Sales (2011), utilizando DEA, propôs uma nova implementação da regulação por comparação de desempenho para definir as metas dos indicadores DER e FER, que expressam a declaração equivalente de reclamação e a frequência equivalente de reclamação, nas distribuidoras do SIN. É oportuno observar que até o momento em que este estudo foi realizado, não há registro de trabalho acadêmico utilizando a metodologia de avaliação DEA para dados da geração de energia elétrica do sistema elétrico isolado do Estado do Amazonas.

Frota (2010) destaca que a geração de energia elétrica nos municípios do Estado do Amazonas é realizada por meio da queima do óleo diesel por motores de combustão interna tendo como consequência um elevado custo para operacionalização dessas usinas e impactos ambientais agressivos ao meio ambiente.

Lago Neto (2010) enfatiza que o modelo SARIMA representa uma ferramenta útil para descrever o consumo de energia elétrica e o consumo de óleo diesel nos sistemas elétricos isolados no interior do Amazonas quando a quantidade de dados for coerente com essa metodologia.

Porém, para análise dos custos médios devido a especificidade existentes nesse mercado de energia, há a necessidade de avaliar outra metodologia que permita a inserção de um espectro de variação para

potenciais candidatos ao verdadeiro custo do produtor com aquisição de combustível. Uma proposta para essa metodologia é discutida por Neto et al (2011).

Face carência de estudos referentes avaliação técnica da eficiência no serviço de geração de energia elétrica prestada nas unidades geradoras localizadas nos municípios do Estado do Amazonas. Neste artigo, uma aplicação da metodologia DEA é conduzida para determinar a fronteira de eficiência no serviço de geração de energia elétrica no ano de 2004 e 2009 nas unidades que compõem o sistema elétrico isolado no Estado do Amazonas. As seções deste artigo estão organizadas como segue. A metodologia da DEA é apresentada e descrita na seção 2. Na seção 3 os resultados e discussões para cada modelo DEA utilizado nos anos de 2004 e 2009 no sistema isolado de geração termoelétrica do Estado do Amazonas e a seção 4 conclui o artigo com algumas direções para trabalhos futuros nessa área.

2. Material e Método

Os modelos clássicos do DEA, modelo de retorno constante denotado por CCR e o modelo de retorno variável denotado por BCC foram utilizados no presente estudo. O modelo CCR avalia o desempenho com produtividade constante, enquanto que o modelo BCC avalia o desempenho com produtividade variável.

A avaliação de eficiência por esses modelos é feita em dois formatos: orientação a insumo e orientação a produto. A *orientação a insumo* ocorre quando se tem interesse numa avaliação sob redução da quantidade de insumos, mantendo-se o mesmo nível de produção. Enquanto a *orientação a produto* estabelece a eficiência aumentando o nível de produção, mantendo-se constante a quantidade de insumos.

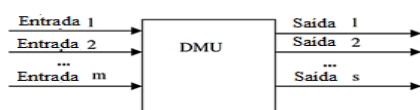


Figura 1 – Elementos da DMU (Decision Making Unit).

A unidade a ser avaliada por esses modelos, é que denominamos de DMU (**Decision Making Unit**). Possui entradas, que se referem em princípio aos insumos empregados no processo produtivo, e as saídas que se referem à produção obtida, como pode ser visualizado na Figura 1.

Considere então que cada uma das n DMU's a ser analisada, transforma seus m entradas em s saídas. Matematicamente, tem-se:

- $x_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}] \in \mathbb{R}_+^m$ – conjunto de entradas observadas consumidos pela j -ésima DMU, $j=1, \dots, n$
- $y_j = [y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{js}] \in \mathbb{R}_+^s$ – conjunto de saídas observadas produzidos pela j -ésima DMU, $j=1, \dots, n$

As informações disponibilizadas pelas empresas distribuidoras de energia elétrica do Estado do Amazonas, relativo aos anos de 2004 e 2009, resultaram na seleção de três variáveis submetidas à análise exploratória de dados objetivando a classificação do grupo de variáveis "insumos" e o grupo de variáveis "produtos". As variáveis são as seguintes:

- **ENERGIA REQUERIDA BRUTA**: Representa o quanto a concessionária conseguiu produzir, ou seja, o montante de tudo que foi produzido sem considerar as perdas de energia elétrica.
- **ÓLEO DIESEL**: corresponde ao montante anual do consumo de óleo diesel, em mil litros, realizado pela concessionária de energia.
- **LUBRIFICANTE**: corresponde ao montante anual de lubrificante, em mil litros, utilizado pela concessionária de energia.

A metodologia DEA exige a definição de uma matriz de variáveis de insumo e de produto. No presente estudo, o grupo de variáveis insumos são óleo diesel (mil l), óleo lubrificante (mil l) e o grupo produto constituído apenas pela variável energia requerida bruta (Mwh). Os grupos insumos e produto são fixos tanto para o ano de 2004 quanto para o ano de 2009 variando apenas os valores observados. Esta composição adveio da consulta realizada a três especialistas da área de energia elétrica/economia.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência dos municípios do interior do estado do Amazonas na geração de energia elétrica, referentes à sua escala e capacidade de produção, utilizamos a metodologia da DEA descrita por BANKER et. al (1984) e o software SIAD (Sistema de Integrado de Apoio a Decisão descrito em MEZA et al (2005). DEA é uma técnica de pesquisa operacional que tem como base a Programação Linear cujo objetivo é avaliar a eficiência comparando unidades independentes no que se refere ao seu desempenho operacional fornecendo uma medida para avaliar a eficiência relativa de um conjunto de unidades de tomada de decisão, denotada por DMUs, que no presente estudo são os municípios do Estado do Amazonas. Para o cálculo de eficiência DEA das equações formuladas tanto para o modelo CCR quanto BCC, que veremos a seguir utilizou-se o software *Siad*.

MODELO CCR: ORIENTAÇÃO A PRODUTO

A formulação clássica dos modelos DEA com orientação ao produto usa para cada DMU0 um Problema de Programação Linear (PPL). O modelo CCR orientado a produto maximiza a eficiência do(s) produto(s) mantendo-se inalterados os insumos, este modelo é apresentado matematicamente em (1). As variáveis de controle do modelo são os pesos v_i , que quando multiplicado pelos insumos diesel e lubrificante corresponde à quantidade utilizada, e u_j referente à energia requerida bruta.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m v_i x_{0i} = \theta_0$$

Sujeita a

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{0j} = 1 \quad (1)$$

$$-\sum_{i=1}^m v_i x_{ki} + \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} \leq 0$$

$$k=1, \dots, n$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall x, y$$

O Modelo CCR com orientação ao produto deve dar resultados equivalentes ao Modelo com orientação aos insumos. Neste caso, apenas as unidades eficientes no Modelo anterior alcançarão o coeficiente igual a um ou 100%. As unidades ineficientes terão um índice que será o inverso do indicador calculado pelo Modelo

com orientação aos insumos. Assim, o índice da unidade será $\frac{1}{\theta_0}$.

A primeira restrição assegura que a função objetivo nunca é maior que um. A segunda restrição refere-se ao ajuste de produção de todas as DMU's.

DEA atribui $\theta_0=1$ (100% de eficiência) a DMU que em comparações com as demais não evidencia a ineficiência no uso de qualquer insumo e na geração de qualquer produto. Um valor de eficiência menor que um ($\theta < 1$) significa que, algebricamente, a existência de uma combinação linear $\sum_{r=1}^s u_j y_{jk}$ das outras k DMU's que resulta em um vetor \vec{Y} de produto maior usando o mesmo vetor \vec{X} de insumo em relação a DMU0 sob análise. Desta forma, o conjunto $T = \{(X, Y) / X \geq \sum_{i=1}^n \lambda_k X_i, Y \leq \sum_{j=1}^n \lambda_k Y_j, \sum_{k=1}^n \lambda_k = 1, \lambda_k \geq 0\}$ a segura todas as possibilidades de produção que a DMU0 avaliada pode exercer, sem que ultrapasse os limites de sua capacidade produtiva.

O dual do modelo CCR, descrito na equação (2) é empregado para avaliar as possíveis modificações assegurando um plano ótimo de produção ao município ineficiente, e também pelo motivo de que, o modelo linear apresentado em (1) não resulta no coeficiente de eficiência diretamente. A eficiência é dada por θ_0 ; x_{ik} representam os insumos e y_{jk} são os produtos, λ_k representam a contribuição da DMU'k para a projeção da DMU0 na fronteira.

$$\text{(Dual) } \text{Max } \theta_0 + \varepsilon * (\sum_{i=1}^n s_i^- + \sum_{j=1}^m s_j^-)$$

Sujeita a:

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} \lambda_k + s_j^- = x_{0i}, \forall i \quad (2)$$

$$-\theta_0 y_{0j} + \sum_{k=1}^n y_{kj} \lambda_k - s_i^- = 0,$$

$\forall r$

$$s_i^-, s_j^- \geq 0$$

$$\lambda_k \geq 0 \forall k, \text{ e } \varepsilon \rightarrow \text{Erro.}$$

Onde λ_k a variável correspondente a unidade de referência eficiente, a qual determinará o peso de medida a unidade ineficiente. As variáveis de folga s_i^- e s_j^- são incrementadas no modelo para evitar que ocorra a inclusão "falsos eficientes" entre as unidades eficientes, isso ocorre quando estas unidades são projetadas na fronteira de eficiência, mas existe uma outra unidade

Engenharia

produzindo mais com a mesma quantidade de insumos.

MODELO BCC: ORIENTAÇÃO A PRODUTO

Este modelo quando *orientado a produto*, maximiza (o)s produto(s) mantendo-se inalterados os insumos, onde as variáveis de controle do modelo são os pesos v_i que quando multiplicado pelos insumos diesel e lubrificante corresponde quantidade utilizada, e u_j referente à energia requerida bruta, e podem ser obtidas utilizando-se de técnicas de programação linear.

$$MinW = \sum_{i=1}^m v_i x_{oi} + v_* = h_o$$

Sujeita a:

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{oj} = 1 \quad (3)$$

$$-\sum_{i=1}^r v_i x_{ki} + \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} - v_* \leq 0 \quad k=1, \dots, n$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall x, y \text{ e } v_* \in \mathbb{R}$$

Percebe-se, que o PPL (3) se distingue das formulações do Modelo CCR pela existência da variável fator de escala v_* , que representam os retornos variáveis de escala.

Essa tecnologia permite que a DMU opere em escala de produção crescente, decrescente e constante. Quando positivo $v_* > 0$ é retorno decrescente, quando negativo $v_* < 0$ retorno crescente e quando for igual a zero $v_* = 0$ é retorno de escala constante conforme visualizado na Figura 2.

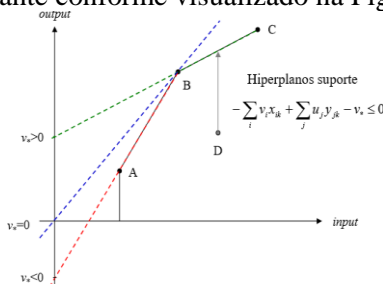


Figura 2 - ilustração do modelo BCC orientado ao produto fator de escala.

O dual deste PPL (3) que é apresentado em (4), como já mencionado para o modelo CCR *orientado a produto* é empregado para avaliar as possíveis modificações assegurando um plano ótimo de produção ao município ineficiente.

No PPL (4), para a DMU0 em análise a eficiência é dada por h_o ; x_{ik} representam os insumos e y_{jk} são os produtos, λ_k que representam a contribuição da DMU'k para a projeção da DMU0 na fronteira. Esta projeção na fronteira de eficiência é o alvo a determinar.

$$(Dual)Max h_o + \varepsilon * (\sum_{i=1}^n s_i^- + \sum_{j=1}^m s_j^-)$$

Sujeita a

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} \lambda_k = x_{oi}, \forall i \quad (4)$$

$$-h_o y_{oj} + \sum_{k=1}^n y_{kj} \lambda_k = 0, \forall j$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$$

$$s_i^-, s_j^- \geq 0$$

$$\lambda_k \geq 0 \forall k, \text{ e } \varepsilon \rightarrow \text{Erro.}$$

A Figura 3 mostra a fronteira do modelo CCR e a fronteira variável do modelo BCC, ao considerar os retornos variáveis de escala, modelo BCC, é possível decompor a ineficiência total em duas componentes, uma denominada ineficiência de escala (Esc.) e a outra de ineficiência de gestão (Gest.).

No modelo BCC com retornos variáveis de escala (VRS) que constitui uma fronteira convexa, para que a DMU ineficiente centrada no círculo azul (ilustrado na figura abaixo) alcance a eficiência na *orientação a produto*, é necessário que, esta, percorra uma distância radial r , fixando X' e variando Y até o ponto (X', Y) localizado na fronteira do modelo BCC.

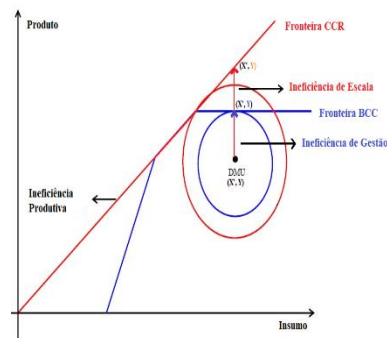


Figura 3 - Ineficiência Produtiva, Técnica e de Escala.

Entretanto, caso esta DMU ineficiente deseje alcançar a fronteira de eficiência do modelo CCR com retorno constante de escala (CRS), na *orientação a produto*, a mesma terá que percorrer uma distância ainda maior. Porém essa distância

não pode ser o raio r do círculo vermelho, pois este não alcança a fronteira CCR na *orientação a produto*. Portanto, a DMU ineficiente percorrerá uma distância euclidiana para alcançar a eficiência de produção a partir do ponto ordenado (X', Y) que calcula a distância fixando X' e variando Y até o ponto $P(X', Y)$ localizado na fronteira de eficiência CCR.

Para uma unidade em avaliação, podem ocorrer três eventuais tipos de eficiência; essa unidade pode possuir eficiência produtiva, eficiência de gestão ou eficiência de escala, e é possível também determinar (quando existe) que tipo de ineficiência reside em uma determinada unidade avaliada. Essa última se reporta tanto para ineficiência de gestão quanto de escala (a ineficiência de gestão é quando a unidade produtora não conseguiu gerenciar corretamente os recursos disponíveis para a geração eficiente de produtos e nem conseguiu atingir esse objetivo mesmo variando as escalas de produção, configurando assim uma ineficiência também de escala). Para obter esses três tipos de medidas são necessários que a unidade esteja sendo avaliada em conjunto, pelos dois modelos CCR e BCC.

Eficiência produtiva é definida como sendo a capacidade de uma unidade opera na sua fronteira (limite) de possibilidades. Isso ocorre quando a produção de um bem é obtida ao menor custo possível e neste caso essa eficiência é medida pelo modelo CCR. O qual o resultado está representado pela sigla **EF. θ_0 CCR** na tabela 1 a seguir

A eficiência de gestão é definida com sendo à habilidade gerencial da organização (unidade): que é medida a partir da eficiência técnica realizado pelo modelo BCC com retornos variáveis, representada pela sigla **EF. h_0 BCC** na tabela 1.

O indicador de eficiência de escala é associado a variações da produtividade decorrentes de mudanças na escala de produção, que por sua vez corresponde à razão entre o indicador de eficiência CCR (produtiva) e o indicador de eficiência BCC (gestão);

$$EF.ESC. = \frac{EF.\theta_0 CCR}{EF.\theta_0 BCC} = \frac{Dual \rightarrow CCR}{Dual \rightarrow BCC} = \frac{\theta_0}{h_0}$$

A eficiência de porte de escala: reporta-se a eficiência produtiva com retornos constantes de escala, denotada por; **EF. θ_0 CCR**. Tais relações de medidas para os dois modelos estão descritas na Figura 3.

A Figura 4 sintetiza a seleção do modelo DEA para avaliar a eficiências da DMU descritas na seção 3.



Figura 4 – Fluxograma para seleção do modelo AED.

3. Resultados e Discussão

O “Sistema Interior” se estende aos demais municípios, numa área de 1,57 milhão de quilômetros quadrados, contemplando suas localidades, entre as quais 61 sedes municipais. Para o presente estudo selecionou-se 58 municípios para o ano de 2004, atendendo 154.428 consumidores, e 57 municípios que atende 193.824 consumidores correspondentes ao ano de 2009.

A geração de energia requerida bruta no ano 2004 foi de 697.648,7 Mwh, enquanto que a energia faturada foi de 379.134 Mwh representando uma perda de energia elétrica com índice de 54,34% no período, o que pode relaciona-se a uma possível ineficiência, uma vez que quanto mais longa as redes de distribuição, maiores também serão as perdas do sistema.

Para o ano de 2009 a geração de energia requerida bruta foi de 970.652,5 Mwh e a energia faturada foi de 617.857,6 Mwh, com perda de 63,65%. A principal fonte de renda resulta dos repasses governamentais às prefeituras, grandes provedoras do emprego e poder aquisitivo local dos consumidores.

As variáveis utilizadas como insumos e produto foram escolhidas com base em consultas a três especialistas da área do setor elétrico que adotaram a metodologia de segurança.

Conforme a figura 4, os modelos BCC de retornos variáveis de escala e CCR de retornos constante de escala, foram

Engenharia

analisados para avaliar o mais adequado a mensurar a eficiência dos municípios.

A tabela 1 apresentam a seguir os coeficientes de eficiência para todos os municípios, e também o tipo de ineficiência caso o mesmo seja qualificado como ineficiente. Tais medidas foram obtidas a partir dos modelos de avaliação CCR e BCC, conduzida à orientação ao produto no ano 2004, os quais estes dividem a eficiência de cada município analisado em eficiência produtiva, eficiência de gestão e eficiência de escala. Considera-se eficiente na geração de energia elétrica o município que apresenta coeficiente de eficiência igual $\theta = 1$ (100%) e ineficientes aqueles que apresentam coeficientes $\theta < 1$ (100%).

Os municípios apresentaram coeficientes de eficiência variando de 24,32% a 100% no modelo CCR e de

27,33% a 100% no modelo BCC como se pode observar no gráfico 1.

A análise da Tabela 1 indica que 56 municípios foram ineficientes nos modelos de avaliação, sendo que destes 53 apresentam portes inapropriado uma vez que têm eficiências de escala inferiores a 1, e também apresentam ineficiência de gestão pelo mesmo motivo

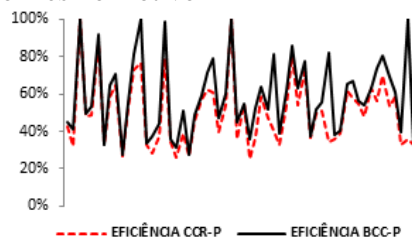


Gráfico 1 - Variações dos escores de eficiência dos modelos.

Tabela 1 - Eficiência Produtiva, Gestão e de Escala com Orientação a Produto ano 2004.

| MUNICÍPIOS | EF. θ_0 CCR | EF. h_0 BCC | EF. Escala | TIPO DE INEF. |
|------------------|-----------------------|------------------|---------------|------------------|
| Alvarães | 0.42 | 0.45 | 0.93 | Porte Esc. |
| Amaturá | 0.32 | 0.41 | 0.78 | Porte Esc. |
| Anamá | 1 | 1 | 1 | ----- |
| Anori | 0.50 | 0.50 | 1 | Gestão |
| Apuí | 0.49 | 0.52 | 0.94 | Porte Esc. |
| Atalaia do Norte | 0.87 | 0.92 | 0.94 | Porte Esc. |
| Autazes | 0.32 | 0.32 | 1 | Gestão |
| Barcelos | 0.58 | 0.64 | 0.90 | Porte Esc. |
| Barreirinha | 0.64 | 0.70 | 0.91 | Porte Esc. |
| Benjamin C. | 0.26 | 0.27 | 0.96 | Porte Esc. |
| Beruri | 0.52 | 0.55 | 0.94 | Porte Esc. |
| Boa Vista do R. | 0.72 | 0.81 | 0.88 | Porte Esc. |
| Boca do Acre | 0.76 | 1 | 0.76 | Escala |
| Borba | 0.32 | 0.33 | 0.96 | Porte Esc. |
| Caapiranga | 0.28 | 0.37 | 0.75 | Porte Esc. |
| Canutama | 0.37 | 0.43 | 0.86 | Porte Esc. |
| Carauari | 0.78 | 0.98 | 0.79 | Porte Esc. |
| Careiro C. | 0.34 | 0.35 | 0.97 | Porte Esc. |
| Careiro da V. | 0.26 | 0.31 | 0.83 | Porte Esc. |
| Coari | 0.39 | 0.50 | 0.78 | Porte Esc. |
| Codajás | 0.26 | 0.27 | 0.96 | Porte Esc. |
| Eirunepé | 0.45 | 0.49 | 0.91 | Porte Esc. |
| Envira | 0.57 | 0.59 | 0.96 | Porte Esc. |
| Fonte Boa | 0.62 | 0.71 | 0.87 | Porte Esc. |
| Humaitá | 0.60 | 0.78 | 0.76 | Porte Esc. |
| Ipixuna | 0.39 | 0.47 | 0.82 | Porte Esc. |
| Iranduba | 0.53 | 0.59 | 0.90 | Porte Esc. |
| Itacoatiara | 1 | 1 | 1 | ----- |
| Itamarati | 0.36 | 0.45 | 0.80 | Porte Esc. |
| Itapiranga | 0.54 | 0.55 | 0.98 | Porte Esc. |
| Japurá | 0.25 | 0.36 | 0.69 | Porte Esc. |

| | | | | |
|--------------------|------|------|------|------------------|
| Juruá | 0.36 | 0.52 | 0.69 | Porte Esc. |
| Jutaí | 0.58 | 0.64 | 0.90 | Porte Esc. |
| Lábrea | 0.47 | 0.52 | 0.90 | Porte Esc. |
| Manacapuru | 0.40 | 0.81 | 0,49 | Porte Esc. |
| Manaquiri | 0.33 | 0.38 | 0.80 | Porte Esc. |
| Manicoré | 0.54 | 0.61 | 0.88 | Porte Esc. Porte |
| Maraã | 0.80 | 0.85 | 0.94 | Esc. |
| Maués | 0.54 | 0.63 | 0.85 | Porte Esc. Porte |
| Nhamundá | 0.71 | 0.77 | 0.92 | Esc. |
| Nova Olind. do N. | 0.36 | 0.37 | 0.97 | Porte Esc. |
| Novo Airão | 0.49 | 0.52 | 0.94 | Porte Esc. |
| Novo Aripuanã | 0.51 | 0.55 | 0.92 | Porte Esc. Porte |
| Parintins | 0.34 | 0.81 | 0.41 | Esc. |
| Pauini | 0.35 | 0.37 | 0.94 | Porte Esc. |
| Stá Isab. do Rio N | 0.38 | 0.40 | 0.95 | Porte Esc. |
| Sto Antônio do Içá | 0.61 | 0.65 | 0.93 | Porte Esc. |
| São Gab. Da C. | 0.57 | 0.67 | 0.85 | Porte Esc. |
| São Paulo de Oliv. | 0.54 | 0.56 | 0.96 | Porte Esc. |
| São Sebast. do U. | 0.48 | 0.54 | 0.88 | Porte Esc. |
| Silves | 0.62 | 0.63 | 0.98 | Porte Esc. |
| Tabatinga | 0.56 | 0.73 | 0.76 | Porte Esc.. |
| Tapauá | 0.69 | 0.80 | 0.86 | Porte Esc. |
| Tefé | 0.53 | 0.69 | 0.76 | Porte Esc. |
| Tonantins | 0.58 | 0.61 | 0.95 | Porte Esc. |
| Uarini | 0.32 | 0.39 | 0.82 | Porte Esc. |
| Urucará | 0.33 | 0.33 | 1 | Gestão |
| Urucurituba | 0.38 | 0.41 | 0.92 | Porte Esc. |

Mudanças na gestão possibilitariam a esses municípios operarem com a produtividade máxima observada. Todavia, mudanças na escala isoladamente não levam a operações eficientes. Os municípios de Anori, Autazes e Urucará tem portes apropriados de escala, mas com ineficiência de gestão. Somente o município de Boca do Acre possui eficiência de gestão com porte de escala inapropriado.

Portanto, é tecnicamente eficiente, mas tem sua parcela de ineficiência produtiva (ineficiência de porte de escala) totalmente atribuída a fatores da escala de produção, ou seja, esse município é eficiente no modelo BCC, neste caso, a ineficiência indicada pelo modelo CCR, é explicada pela variação de escala permitida no modelo BCC.

Por fim, temos que no ano de 2004 somente os municípios de Anamá e Itacoatiara foram produtivamente eficientes, ou seja, operam com a produtividade máxima observada. Portanto, a produtividade deles não pode ser aumentada com mudança no porte ou na gestão.

A Tabela 2 enfatiza que o modelo BCC, com base nas variáveis selecionadas, identificou um número estritamente maior de municípios eficientes, $\theta = 1$, na avaliação da geração e distribuição de energia elétrica, totalizando 03 municípios eficientes, o que corresponde a 5,17% do total de 58 municípios. Enquanto o modelo CCR identificou somente 2 municípios eficientes contabilizando 3,44 % desse total.

A Tabela 3 mostra a contribuição de cada uma das variáveis para o cálculo da eficiência dos municípios eficientes. Em termos da análise dos resultados dos municípios eficientes, tais coeficientes permitem a identificação de variáveis que poderiam tornar esta unidade ineficiente, uma vez que pesos muito pequenos ou iguais a zero mostram que se estes mesmos pesos fossem “forçados” a serem maiores, os resultados finais do coeficiente de eficiência poderiam ser menor.

Engenharia

Tabela 2 - Comparando os Números dos Modelos de Avaliação ano 2004.

| MODELOS | EF | INF | TOTAL |
|---------|----|-----|-------|
| BCC-P | 03 | 55 | 58 |
| CCR-P | 02 | 56 | 58 |

EF = Eficiente, INF = Ineficiente

Tabela 3 - Contribuição dos pesos das variáveis para os municípios eficientes no ano de 2004 no MODELO CCR.

| MUNICÍPIOS | DIESEL | LUBRIFICANTE | ENERGIA R. BRUTA |
|-------------|--------|--------------|------------------|
| ANAMÃ | 0,001 | 0,000475 | 0,00034 |
| ITACOATIARA | 0,004 | 0,000018 | 0,000013 |

No município de Anamã o peso atribuído a variável Lubrificante foi de 0,000475 tendo contribuição menor que o da variável diesel que foi de 0,0010. Isto significa que se o insumo lubrificante utilizado no processo produtivo fosse "forçado" a ter um peso maior poderia tornar o município de Anamã ineficiente. O mesmo comentário pode ser feito em relação ao modelo BCC da Tabela 4.

No ano de 2009, os coeficientes de eficiência dos modelos de avaliação serão apresentados na tabela 5 onde se observa que 55 foram ineficientes, dos quais 39 apresentam portes inapropriados de escala e ineficiência de gestão. Mudanças na gestão possibilitariam a esses municípios operarem com a produtividade máxima observada. Todavia, como já mencionamos mudanças na escala

isoladamente não levam a operações eficientes da produtividade máxima observada. Os municípios de Apuí, Atalaia do Norte, Autazes, Barcelos, Boca do Acre, Carauari, Careiro Castanho, Eirunepé, Humaitá, Ipixuna, Lábrea, Manicoré, Nova Olinda do Norte, São Gabriel da Cachoeira, Tabatinga e Tefé tem portes de escala apropriados, mas com ineficiência de gestão. Desta forma, dos 57 municípios avaliados no ano de 2009, somente os municípios de Anori e Itacoatiara foram eficientes operando com a produtividade máxima observada, com destaque para Itacoatiara, único município eficiente, nos anos 2004 e 2009, tanto no modelo de retornos variáveis de escala quanto no de retornos constantes de escala.

Tabela 4 - Contribuição (pesos) das variáveis para os municípios eficientes no ano de 2004 MODELO BCC.

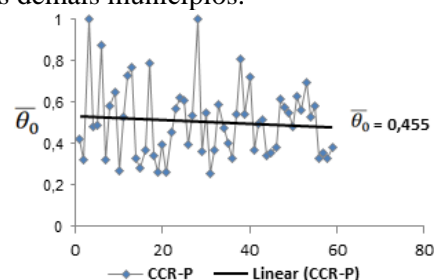
| MUNICÍPIOS | DIESEL | LUBRIFICANTE | ENERGIA R.BRUTA |
|-------------|---------|--------------|-----------------|
| ANAMÃ | 0,01039 | 0,000475 | 0,000345 |
| BOCA DO AC. | 0 | 0,000089 | 0,000056 |
| ITACOATIARA | 0,00004 | 0,000018 | 0,000013 |

No ano 2004, o modelo CCR apresentou média $\bar{\theta}_0$ de eficiência do "sistema" alcançou $\bar{\theta}_0 = 0,455$ conforme visualizado no gráfico 2. Enquanto no modelo BCC, a eficiência média do "sistema" foi de $\bar{h}_0 = 0,586$ descrito no gráfico 3.

Em 2009, o modelo CCR indica para a eficiência média valor igual $\bar{\theta}_0 = 0,690$ conforme destacado no gráfico 4. Enquanto no modelo BCC, a eficiência média do sistema foi de $\bar{h}_0 = 0,736$ como ilustrado no gráfico 5.

Os pontos dispersos nos gráficos 4 e 5 foram os municípios que tiveram os menores

coeficientes de eficiência em relação aos demais municípios, indicando a necessidade de realizar um estudo mais aprofundado a respeito desse comportamento em relação aos demais municípios.



Engenharia

Gráfico 2 - Eficiência média λ do sistema para o ano de 2004 no modelo CCR.

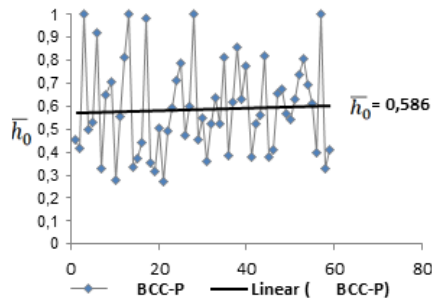


Gráfico 3 - Eficiência média λ do sistema para o ano de 2004 no modelo BCC.

A Tabela 6 sintetiza os valores obtidos para a média da eficiência do conjunto dos municípios que compõem sistema de energia

Tabela 5 - Eficiência Produtiva, Gestão e de Escala com Orientação a Produto ano 2009.

| MUNICÍPIOS | EF. θ_0 CCR | EF. h_0 BCC | EF. Escala | TIPO DE INEF. |
|------------------|--------------------|---------------|------------|---------------|
| Alvarães | 0.83 | 0.88 | 0.94 | Porte Esc. |
| Amaturá | 0.76 | 0.87 | 0.87 | Porte Esc. |
| Anamá | 0.79 | 0.89 | 0.88 | Porte Esc. |
| Anori | 1 | 1 | 1 | ----- |
| Apuí | 0.63 | 0.63 | 1 | Gestão |
| Atalaia do Norte | 0.72 | 0.72 | 1 | Gestão |
| Autazes | 0.67 | 0.67 | 1 | Gestão |
| Barcelos | 0.76 | 0.76 | 1 | Gestão |
| Barreirinha | 0.70 | 0.74 | 0.94 | Porte Esc. |
| Benjamin C. | 0.62 | 0.64 | 0.96 | Porte Esc. |
| Beruri | 0.64 | 0.67 | 0.95 | Porte Esc. |
| Boa Vista do R. | 0.59 | 0.65 | 0.90 | Porte Esc. |
| Boca do Acre | 0.60 | 0.60 | 1 | Gestão |
| Borba | 0.60 | 0.62 | 0.96 | Porte Esc. |
| Caapiranga | 0.76 | 0.83 | 0.91 | Porte Esc. |
| Canutama | 0.67 | 0.73 | 0.91 | Porte Esc. |
| Carauari | 0.72 | 0.72 | 1 | Gestão |
| Careiro C. | 0.62 | 0.62 | 1 | Gestão |
| Careiro da V. | 0.70 | 0.73 | 0.95 | Porte Esc. |
| Coari | 0.67 | 0.81 | 0.82 | Porte Esc. |
| Codajás | 0.61 | 0.63 | 0.96 | Porte Esc. |
| Eirunepé | 0.63 | 0.63 | 1 | Gestão |
| Envira | 0.73 | 0.76 | 0.96 | Porte Esc. |
| Fonte Boa | 0.67 | 0.69 | 0.97 | Porte Esc. |
| Humaitá | 0.63 | 0.63 | 1 | Gestão |
| Ipixuna | 0.50 | 0.50 | 1 | Gestão |
| Itacoatiara | 1 | 1 | 1 | ----- |
| Itamarati | 0.68 | 0.76 | 0.89 | Porte Esc. |
| Itapiranga | 0.69 | 0.73 | 0.94 | Porte Esc. |
| Japurá | 0.64 | 0.74 | 0.86 | Porte Esc. |
| Juruá | 0.78 | 0.88 | 0.88 | Porte Esc. |
| Jutaí | 0.64 | 0.69 | 0.92 | Porte Esc. |
| Lábrea | 0.72 | 0.72 | 1 | Gestão |
| Manacapuru | 0.76 | 0.97 | 0.78 | Porte Esc. |
| Manaquiri | 0.72 | 0.76 | 0.94 | Porte Esc. |
| Manicoré | 0.69 | 0.69 | 1 | Gestão |

elétrica isolado do Estado do Amazonas em 2004 e 2009.

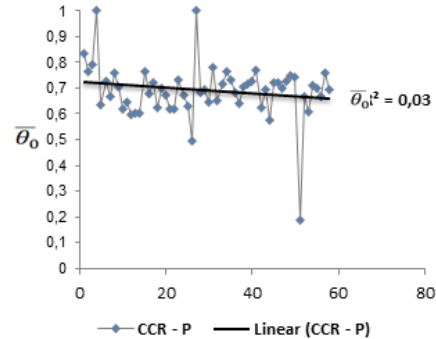


Gráfico 4 - Eficiência média λ do sistema para o ano de 2009 no modelo CCR.

Engenharia

| | | | | |
|---------------------|------|------|------|------------------|
| Maraã | 0.64 | 0.70 | 0.91 | Porte Esc. Porte |
| Maués | 0.70 | 0.72 | 0.97 | Esc. |
| Nhamundá | 0.71 | 0.75 | 0.94 | Porte Esc. |
| Nova Olinda do N. | 0.72 | 0.72 | 1 | Gestão |
| Novo Airão | 0.76 | 0.78 | 0.97 | Porte Esc. |
| Novo Aripuanã | 0.62 | 0.65 | 0.95 | Porte Esc. Porte |
| Parintins | 0.69 | 0.84 | 0.82 | Esc. |
| Pauini | 0.57 | 0.64 | 0.89 | Porte Esc. |
| Sta Isab. do Rio N. | 0.72 | 0.77 | 0.93 | Porte Esc. |
| Sto Antônio do Iça | 0.71 | 0.74 | 0.95 | Porte Esc. |
| São Gab. Da C. | 0.70 | 0.70 | 1 | Gestão |
| São Paulo de Oliv. | 0.72 | 0.76 | 0.94 | Porte Esc. |
| São Sebast. do U. | 0.74 | 0.80 | 0.84 | Porte Esc.. |
| Silves | 0.74 | 0.82 | 0.90 | Porte Esc. |
| Tabatinga | 0.18 | 0.18 | 1 | Gestão |
| Tapauá | 0.66 | 0.69 | 0.95 | Porte Esc. |
| Tefé | 0.60 | 0.60 | 1 | Gestão |
| Tonantins | 0.71 | 0.74 | 0.95 | Porte Esc. |
| Uarini | 0.69 | 0.76 | 0.90 | Porte Esc. |
| Urucará | 0.75 | 0.77 | 0.97 | Porte Esc. |
| Urucurituba | 0.69 | 0.73 | 0.94 | Porte Esc. |

4. Conclusão

O presente artigo analisou a eficiência técnica produtiva dos municípios do interior do estado do Amazonas, com respeito à geração de energia elétrica. A estratégia de analisar em dois períodos diferentes permitiu a análise e comparação temporal das tecnologias DEA utilizadas neste trabalho.

O modelo BCC apresentou um número maior de municípios eficientes em relação ao modelo CCR, isso pode ser atribuído às variações que o modelo permite nas escalas de produção. Por ser uma técnica não paramétrica, não permite a extrapolação de suas conclusões, que estão restritas às empresas e às variáveis em análise.

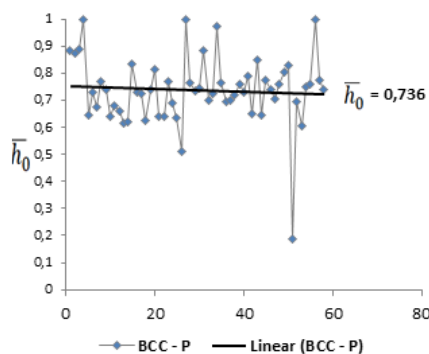


Gráfico 5 - Apresentação da eficiência média λ do sistema para o ano de 2009 no modelo BCC.

Tabela 6 - Eficiência média do sistema isolado do AM.

| MODELO | ANO 2004 | ANO 2009 |
|--------|--------------------------|--------------------------|
| CCR | $\bar{\theta}_0 = 0,455$ | $\bar{\theta}_0 = 0,690$ |
| BCC | $\bar{h}_0 = 0,586$ | $\bar{h}_0 = 0,736$ |

Baseado nos resultados de eficiência obtidos, vimos que há um número alto de municípios ineficientes na geração de energia. Ressaltando que estes resultados estão sendo observados, segundo os modelos aqui utilizados CCR e BCC ambos orientados ao produto.

Fatores como, a grande extensão territorial do Estado e a baixa densidade populacional, dificultam uma manutenção eficiente dos sistemas, pois o alto custo operacional dos geradores, aliado à grande distância a ser coberta pelos meios de transporte tendem a encarecer ainda mais esse modelo, que se baseia na utilização do óleo diesel e óleo lubrificante.

Portanto, mostra-se a viabilidade da ferramenta de otimização matemática DEA, (que é uma técnica ainda recente, quase que restrita às áreas de pesquisa operacional e engenharia, e necessita de ambientação dos usuários leigos para utilização em outras áreas do conhecimento), empregada na avaliação da eficiência de municípios, que compõem o sistema elétrico isolado no Estado do Amazonas, oferecendo subsídios aos gestores dos municípios para realizarem um diagnóstico de eficiência de insumos



Engenharia

energéticos (óleo diesel e óleo lubrificante) para obtenção do produto denominado energia elétrica. É importante ressaltar que a análise e sugestões, decorrentes desta metodologia, estão condicionadas às unidades (municípios) e variáveis incluídas no estudo. Qualquer unidade e/ou variável acrescentada ou excluída da análise modificarão os resultados.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido durante o estágio curricular obrigatório no Grupo de Pesquisa em otimização Matemática e Sistemas Fuzzy do Departamento de Matemática da UFAM.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. Os autores e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

Desempenho e Eficiência das Firms de Energia Elétrica no Brasil: Uma Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) – 2016

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NO CONSUMO DE ENERGIA DOS ESTADOS BRASILEIROS – 2016

Avaliação da eficiência econômica das distribuidoras brasileiras de energia elétrica por meio da análise envoltória de dados (DEA) – 2014

Neto, J. C. do L., Costa Junior, C. T., Bitar, S. D. B. and Barra Junior, W. (2011).

Forecasting of energy and diesel consumption and the cost of energy production in isolated electrical systems in the Amazon using a fuzzification process in time series models, *Energy Policy*, Vol. 39, nº 9, 4947 - 4955.

GALVÃO, Paulo José Lopes Normande. DEA como ferramenta de gestão regulatória da eficiência de transmissoras de energia brasileiras. 2016. 60 f. Monografia de Pós-Graduação (Especialização MBA em Gestão Empresarial) - Programa FGV Management, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2016

Jamasb, T and Pollitt, M. "Benchmarking and regulation of electricity distribution and transmission utilities: Lessons from international experience", in *DAE Working Paper*. Cambridge, U.K.: Department of Applied Economics, Univ. Cambridge, 2001

SALES, Gustavo Manguera de Andrade. Proposta de um modelo utilizando análise envoltória de dados - DEA na definição das metas dos indicadores da qualidade comercial das distribuidoras de energia elétrica - DER e FER. 2011. 91. Dissertação de Mestrado em Regulação – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SIAD - <http://www.uff.br/decisao/> acessado em Agosto de 2018.

SANTOS, M. A.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. P. Utilização da Função Arbitragem de Nash nos Modelos DEA CCR: Uma abordagem na orientação combinada entrada/saída sob a ótica da Teoria dos Jogos de Barganha. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO, 44., 2012. Rio de Janeiro. Anais... SOBRAPO, 2012.