

BEATRIZ NAOMI AIHARA

Análise da Eficiência de Usinas Hidrelétricas do Estado de São Paulo

Beatriz Naomi Aihara

Análise da Eficiência de Usinas Hidrelétricas do Estado de São Paulo

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Guaratinguetá - SP
2019

A289a	Aihara, Beatriz Naomi Análise da eficiência de usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo / Beatriz Naomi Aihara – Guaratinguetá, 2019. 43 f : il. Bibliografia: f. 41-43 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva 1. Usinas hidrelétricas. 2. Energia hidrelétrica. 3. Energia – Inovações tecnológicas. I. Título. CDU 621.311.21
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

BEATRIZ NAOMI AIHARA

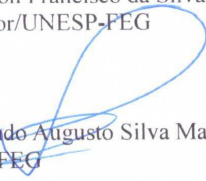
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
UNESP-FEG


Prof. Dra. Erica Ximenes Dias
Membro Externo

Dezembro 2019

DADOS CURRICULARES

BEATRIZ NAOMI AIHARA

NASCIMENTO	10.12.1995 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Marcelo Sussumu Aihara Ana Maria Yemiko Aghena Aihara
2014/2019	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha saúde, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva pelo todo apoio e orientação neste trabalho;

aos meus pais Ana e Marcelo, que sempre me apoiaram durante toda a graduação, me incentivando e me dando todas as condições para cursar a faculdade. A minha irmã, Gabriela, que sempre esteve presente. E a todos os meus outros familiares, em especial meus avós maternos e paternos, que acompanharam minha trajetória e incentivaram meus estudos;

às minhas amigas da República Puricanas, que sempre pude contar e se tornaram uma segunda família;

aos amigos que fiz durante a Faculdade, companheiros de classe que sempre me incentivaram;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só se pode alcançar um grande êxito
quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”
Friedrich Nietzsche

RESUMO

A cobrança pela sustentabilidade no mundo vem aumentando cada dia mais, principalmente se tratando da área de energia. A utilização de energia renovável vem se desenvolvendo e encontrando meios para gerar energia sem impactar o meio ambiente. Nesse âmbito avaliou-se a energia renovável predominante no Brasil, a energia hidrelétrica. As usinas hidrelétricas geram energia elétrica limpa, porém a sua construção afeta o ambiente próximo como as margens dos rios e os ribeirinhos impedindo assim, a construção de novas usinas. Por isso, avaliou-se a eficiência das usinas hidrelétricas existentes no estado de São Paulo com o objetivo de estabelecer metas para que elas se tornem eficientes e consigam gerar mais energia. Foram avaliadas cinco parâmetros de entrada e um parâmetro de saída de 28 Usinas no Estado de São Paulo por meio do método de Análise Envoltória de Dados baseado em folgas ou DEA - Aditivo CCR e BCC. Dessas 28 usinas, oito foram consideradas eficientes pelo método CCR e 16 foram consideradas eficientes segundo o método BCC, isso ocorreu devido ao segundo modelo considerar retornos variáveis de escala. Além disso, foram encontradas as metas pelas duas metodologias para transformar as usinas ineficientes em eficientes. Como conclusão foi possível observar que o DEA aditivo é aplicável para a área de energia, porém para que as usinas se tornem eficientes é necessário um estudo mais aprofundado dependendo das metas impostas e, além disso, serem favorecidas por fatores não controláveis como a vazão do rio e altura de queda nas usinas.

PALAVRAS-CHAVE: DEA. DEA Aditivo. Energia. Usinas Hidrelétricas. Energia hidrelétrica. Energia Renovável

ABSTRACT

The demand for sustainability in the world has been increasing more and more, especially in the area of energy. The use of renewable energy has been developing and finding ways to generate energy without impacting the environment. In this context we will evaluate the predominant renewable energy in Brazil, hydropower. Hydroelectric power plants generate clean electric power, but their construction affects the surrounding environment such as riverbanks and river communities, thus preventing the construction of new plants. Therefore, the efficiencies of existing hydroelectric plants in the state of São Paulo were evaluated in order to impose targets so that they become efficient and can generate more energy. Five input parameters and one output parameter from 28 plants in the state of São Paulo were evaluated by the CCR and BCC Additive DEA method. Of these 28 plants, eight were considered efficient by the CCR method and 16 were considered efficient by the BCC method, this was due to the second model considering variable returns to scale. In addition, targets were met according to the CCR model to transform inefficient plants into efficient ones. The owners of the plants were also analyzed and we were able to evaluate the most efficient owner. As a conclusion it was possible to observe that the additive DEA is applicable to the energy area, but for the plants to become efficient it is necessary a further study depending on the imposed goals and, besides, being favored by uncontrollable factors like the flow of the river and height of fall at the plants.

KEYWORDS: DEA. Slack Based. Energy. Hydro. Hydroelectric Plants. Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta Interna de Energia por Fonte.....	13
Figura 2 – Emissões de CO ₂ por setor entre os anos de 2005 e 2015.....	16
Figura 3 – Indicadores: consumo final de energia.....	16
Figura 4 – Porcentagem de emissões de gases por setor no ano de 2015.....	17
Figura 5 – Ilustração de emissão de CO ₂ no ano de 2015	17
Figura 6 – Emissões de gases por geração de energia hidrelétrica.....	18
Figura 7 – Emissões por diferentes tipos de combustíveis em Usinas Termelétricas	18
Figura 8 – Publicações sobre análise na área de Energia usando DEA.....	20
Figura 9 – Publicações sobre análise na área de Energia usando DEA Aditivo (Slack Based).....	21
Figura 10 – Perfil Esquemático de uma Usina Hidrelétrica	23
Figura 11 – Fronteiras DEA CCR e BCC	26
Figura 12 – Representação gráfica das três orientações do modelo DEA.....	27
Figura 13 – Quantidade de Usinas em São Paulo por Proprietárias.....	37
Figura 14 – Eficiência Média por Proprietárias.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de DMUs analisadas	31
Tabela 2 – Base de dados.....	32
Tabela 3 – Eficiências calculadas em DEA CCR e BCC	33
Tabela 4 – Metas para as DMUs calculadas por DEA CCR.....	34
Tabela 5 – Metas para as DMUs calculadas por DEA BCC.....	35
Tabela 6 – Relação entre os Proprietários, as usinas e as respectivas eficiências	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
DEA	Data Envelopment Analysis
DMU	Decision Making Units
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
PDE	Plano de Desenvolvimento Energético
SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões
SBM	Slacks-Based Measure
UHE	Usina Hidrelétrica
VBA	Visual Basic for Applications

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2	DELIMITAÇÃO	14
1.3	QUESTÕES DA PESQUISA E OBJETIVOS	14
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	15
1.5	JUSTIFICATIVA	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	USINAS HIDRELÉTRICAS	22
2.1.1	Estrutura de uma Usina Hidrelétrica	22
2.2	ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS	23
2.2.1	DEA – Modelo Multiplicadores	24
2.2.1.1	DEA CCR	24
2.2.1.2	DEA BCC	24
2.2.2	DEA – Modelo Envelope	25
2.2.3	DEA Modelo Aditivo ou Modelo Baseado nas Folgas – SBM	26
3	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	29
3.2	DESENVOLVIMENTO QUANTITATIVO	30
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	39
4.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E CONCLUSÕES	39
4.2	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

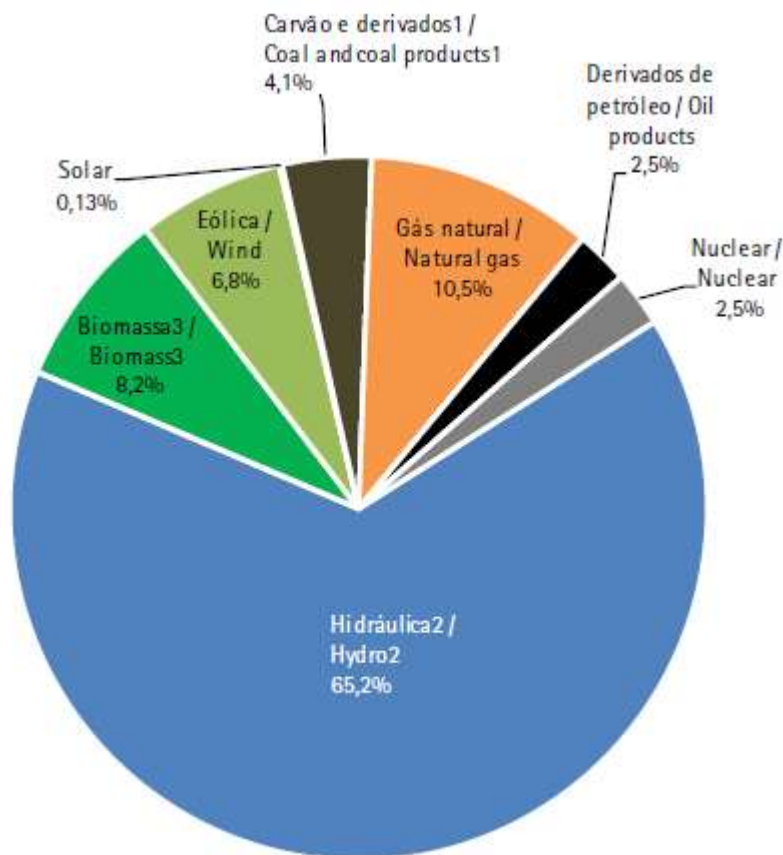
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A intensa utilização de combustíveis fósseis nas últimas décadas, tem causado impactos ambientais como o efeito estufa e o aquecimento global, assim também como seu consequente esgotamento. Devido a isso, existe uma grande pressão ambiental a utilização de fontes renováveis (VICHÍ; MANSOR, 2009).

Um dos setores que mais recebe importância neste panorama atual é a matriz energética. O crescimento mundial é acompanhado da necessidade energética e devem ser encontradas formas sustentáveis de geração de energia (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015).

No Brasil, a geração de energia é predominante renovável, 80,4 %. Sendo 65,2% devido a energia hidrelétrica, 8,2% da Biomassa, 6,8% da Eólica e 0,13% da Solar, conforme mostrado pela Figura 1 (EPE, 2018).

Figura 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018).

A energia hidrelétrica, foco desse estudo, é gerada pela força das águas. Para o seu aproveitamento são construídas usinas, com turbinas e geradores, que transformam a força da água em energia mecânica, e posteriormente, em energia elétrica (SINGH; SINGAL, 2017).

O Brasil construiu a primeira hidrelétrica durante o reinado de D. Pedro II, no município de Diamantina, na afluentes do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW (megawatt) de potência e linha de transmissão de dois quilômetros (ANEEL, 2008).

Conforme a necessidade de energia foi crescendo, foram construídas mais Usinas Hidrelétricas e, em pouco mais de 100 anos, a potência instalada das unidades aumentou. Como, por exemplo, a Usina binacional Itaipu, construída em parceria por Brasil e Paraguai, possuindo 20 máquinas com potência de 715MW cada uma, sendo considerada uma das maiores hidrelétricas em operação do mundo (ANEEL, 2008).

As estiagens no país, vem ameaçando a geração de energia, já que diminuem os níveis dos reservatórios e, conseqüentemente, a oferta de energia vinda das Usinas Hidrelétricas. Por esse motivo, existe importância da exploração e desenvolvimento de outras fontes de energia, como a energia eólica e solar (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015).

1.2 DELIMITAÇÃO

Neste trabalho foram analisadas as Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), que produzem mais de 30MW, existentes no Estado de São Paulo. Algumas usinas apesar de pertencerem ao Estado de São Paulo, o estado delimitado para o estudo, não foram consideradas em função de não possuírem dados suficientes disponíveis para análise. Como, por exemplo, a Usina de Alecrim e a de Fumaça. Além disso, dois parâmetros importantes no projeto de geração de energia, os tipos de turbinas e os tipos de operações, não foram avaliados na análise DEA porque estes dados não estavam disponíveis para todas as usinas escolhidas para a análise.

Os dados deste trabalho foram extraídos de sites governamentais e dos sites das próprias empresas que possuem concessão das usinas, garantindo assim a exequibilidade do trabalho.

1.3 QUESTÕES DA PESQUISA E OBJETIVOS

- Como avaliar a eficiência de usinas hidrelétricas?
- Como estimar metas para tornar usinas ineficientes em eficientes?

Objetivo geral: Obter as eficiências das usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo por meio do modelo Aditivo de Análise Envoltória de Dados.

O objetivo específico é:

- Propor metas para tornar as DMUs ineficientes em eficientes.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com estudos de fundamentação teórica nos temas de energias renováveis e da DEA - aditivo. Os dados para análise foram extraídos de sites governamentais e dos sites das empresas as quais possuem concessão das usinas, em função disso nem todas as usinas existentes puderam ser analisadas por não terem dados suficientes disponíveis. A modelagem e otimização do modelo DEA – aditivo foi realizada por meio da programação em VBA excel, utilizando o algoritmo simplex (HILIER; LIEBERMAN, 2001).

Conforme Bertrand e Fransoo (2002), o modelo de trabalho desenvolvido possui objetivos empíricos normativos, pois descreve as relações causais que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão de processos reais, sendo uma pesquisa aplicada. Além disso, a forma de abordar o problema é quantitativa, sendo o método de pesquisa a modelagem e simulação.

1.5 JUSTIFICATIVA

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), tem como objetivo apresentar as necessidades energéticas pela perspectiva do planejamento para permitir o desenvolvimento da economia nacional em relação aos próximos 10 anos.

De acordo com o PDE 2029, é esperado um crescimento econômico mundial médio de 3,3% ao ano para os próximos 10 anos e em relação a economia brasileira, espera-se uma recuperação gradual do país, onde, no curto prazo, o crescimento será beneficiado pelo excesso de capacidade ociosa da economia. No médio e longo prazo, a expectativa de uma retomada mais forte dos investimentos terá impactos importantes sobre a competitividade da economia brasileira e, conseqüentemente, sobre o crescimento.

Ainda de acordo com o plano, existe a expectativa de que o consumo total de eletricidade cresça cerca de 15% a mais que a economia no período, influenciado tanto pela

autoprodução clássica quanto pelo consumo na rede. Pela Figura 2 observa-se um crescimento do consumo final de energia comparando os dados e estimativas dos anos de 2019, 2024 e 2029.

Figura 2 - Indicadores: consumo final de energia

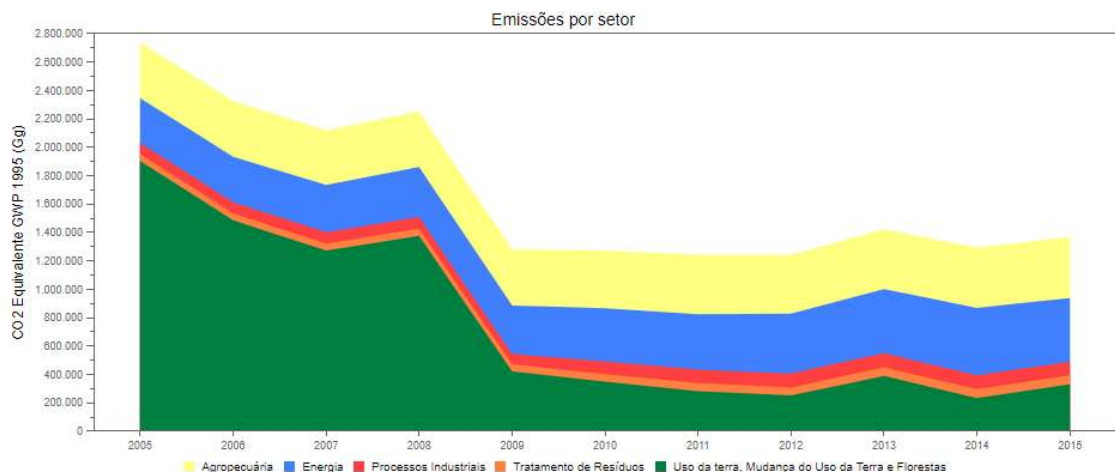
Indicador	2019	2024	2029
Consumo Final de Energia (10 ⁶ tep)	263	295	336
Consumo Final de energia per capita (tep/hab/ano)	1,25	1,35	1,50
Intensidade Energética da Economia (tep/10 ⁹ R\$ [2017])	0,064	0,062	0,061
Elasticidade-renda do consumo de energia (período)	0,82 (2019-2024)	0,88 (2025-2029)	0,85 (2019-2029)

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2019).

Além disso, existe uma pressão mundial para o uso de fontes renováveis de energia. Essa pressão provém da possibilidade de esgotamento de combustíveis fósseis e ao impacto ambiental que as mesmas estão causando (VICHÍ; MANSOR, 2009).

De acordo com dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), ilustrado na Figura 3, de 2005 a 2015, houve uma diminuição na quantidade de emissão de gás carbônico por ano, em torno de 50%. Porém, a emissão relacionada ao setor de energia aumentou 42% em relação a 2005 e possui 33% de participação na emissão total, comparada a 11,5% em 2005.

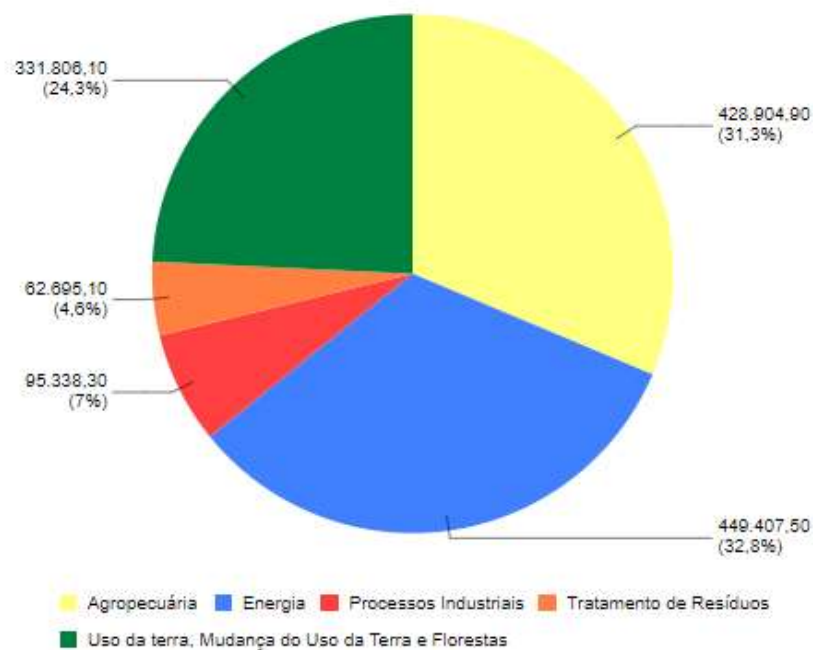
Figura 3 - Emissões de CO₂ por setor entre os anos de 2005 e 2015



Fonte: Sistema de Registro Nacional de Emissões (2019).

Ainda em 2015 e da mesma fonte, observa-se que 32,8% das emissões de gás carbônico (CO₂) no país foram emitidas pelo setor de Energia, conforme mostrado pela Figura 4, sendo 31% provenientes da queima de combustíveis fósseis, conforme contemplado pela Figura 5.

Figura 4 - Porcentagem de emissões de gases por setor no ano de 2015



Fonte: Sistema de Registro Nacional de Emissões (2015).

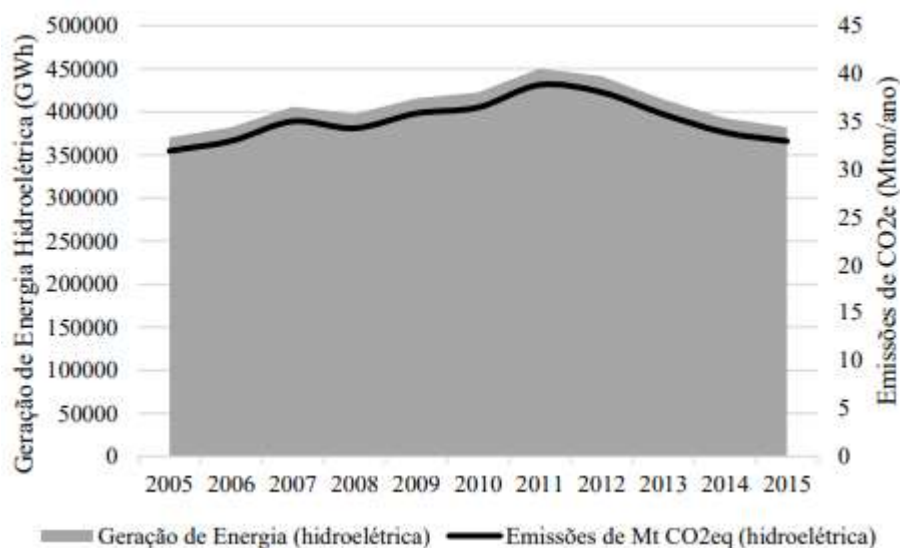
Figura 5 - Ilustração de emissão de CO₂ no ano de 2015



Fonte: Sistema de Registro Nacional de Emissões (2015).

De acordo com Lourenço (2016), considerando dados de geração de energia de 2005 a 2015, foi feita uma análise gráfica de quantidade de geração de energia por emissão de gás carbônico, considerado como um dos gases do efeito estufa (GEE), contemplado pela Figura 6.

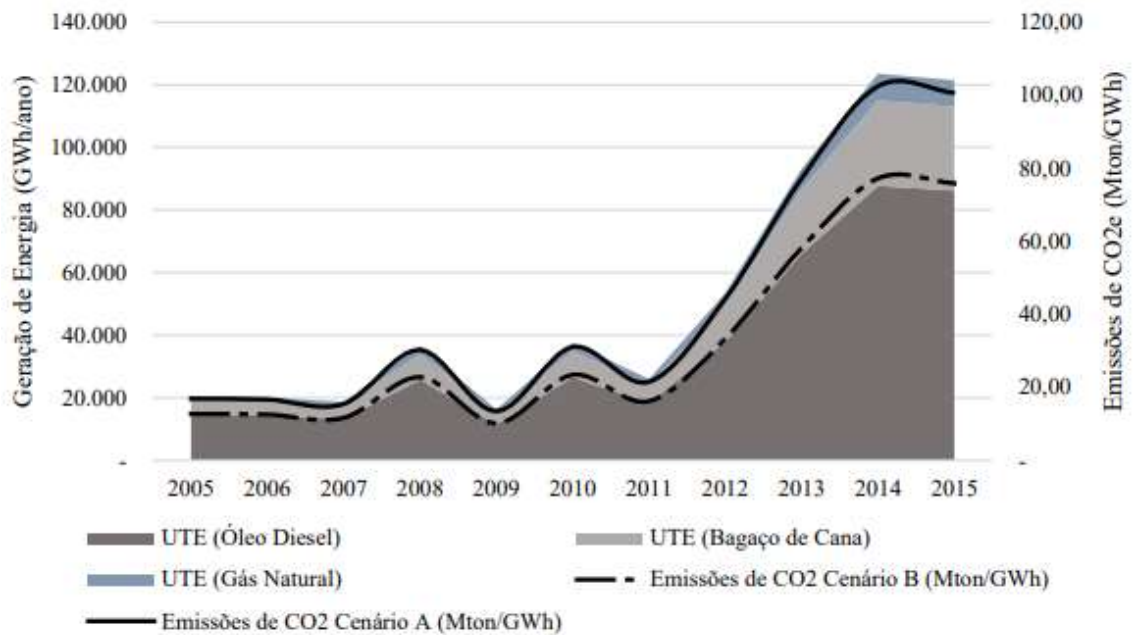
Figura 6 - Emissões de gases por geração de energia hidrelétrica



Fonte: Lourenço (2016).

Em sua pesquisa, também foi feita a análise, dos mesmos dez anos, para a emissão de gases provenientes de energia termelétrica, abordados pela Figura 7.

Figura 7 - Emissões por diferentes tipos de combustíveis em Usinas Termelétricas



Fonte: Lourenço (2016).

É possível analisar que as usinas termelétricas produzem mais emissão de gás carbônico por geração de energia do que as usinas hidrelétricas.

Para análise de dados foi utilizada a *Data Envelopment Analysis* (DEA), classificada como uma ferramenta de gestão que pode ser utilizada no processo de tomada de decisão (COOK; TONE; ZHU, 2014).

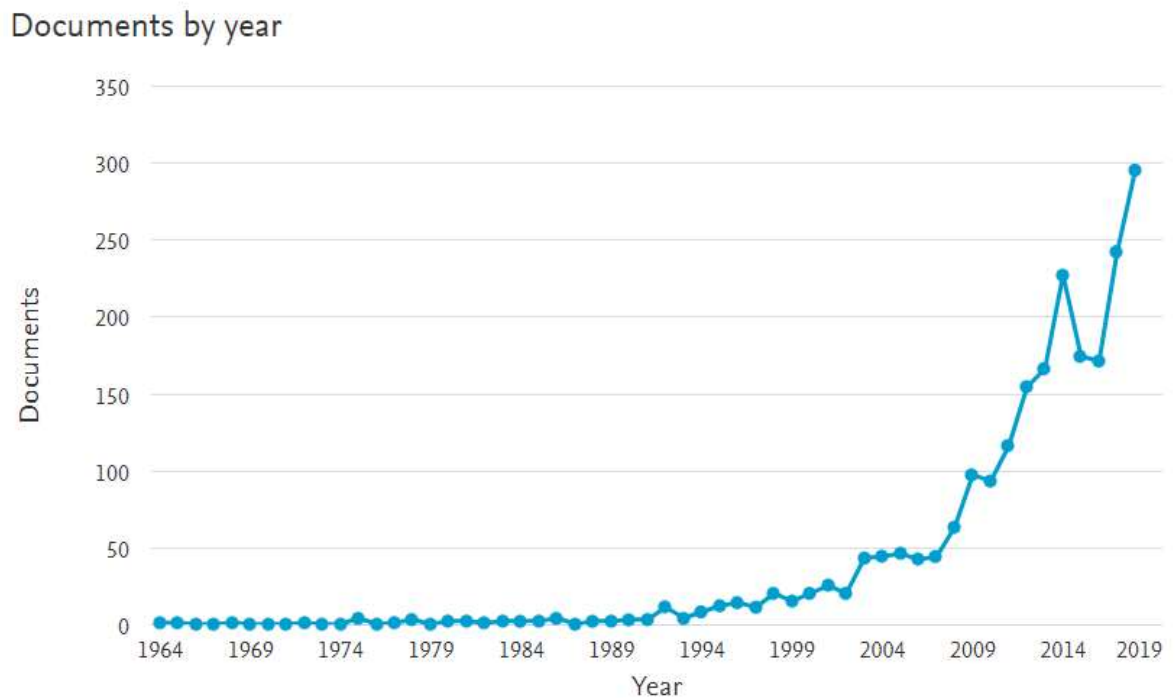
A DEA é um método não paramétrico de Programação Linear (PL) que por meio da análise de produtividade é capaz de medir a eficiência de um conjunto de Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units* – DMUs) (DOTOLI et al., 2015).

A DEA tem tido excelentes aplicações nas medidas de desempenho em diversas situações tais como aplicações em indústrias, hospitais, escolas, universidades, cadeia de suprimentos, restaurantes e bancos (JUBRAN, 2006).

Vários modelos para tratar de diferentes abordagens de medida de desempenho têm sido desenvolvidos pelos pesquisadores com a finalidade de potencializar as vantagens da DEA a diferentes aplicações (COOK e SEIFORD, 2009). É possível encontrar na literatura pesquisas relacionando DEA e a área de energia. Zhou, Ang e Poh (2008) analisaram as pesquisas relacionadas à energia e ao meio ambiente, discutindo os modelos DEA utilizados e classificando 100 publicações relacionadas a área. Procurando na plataforma *Scopus* as palavras chaves “DEA” e “energy”, observa-se pela Figura 8 que o número de artigos

relacionados aos dois temas vem crescendo, evidenciando a importância destes dois assuntos e como eles podem ser relacionados.

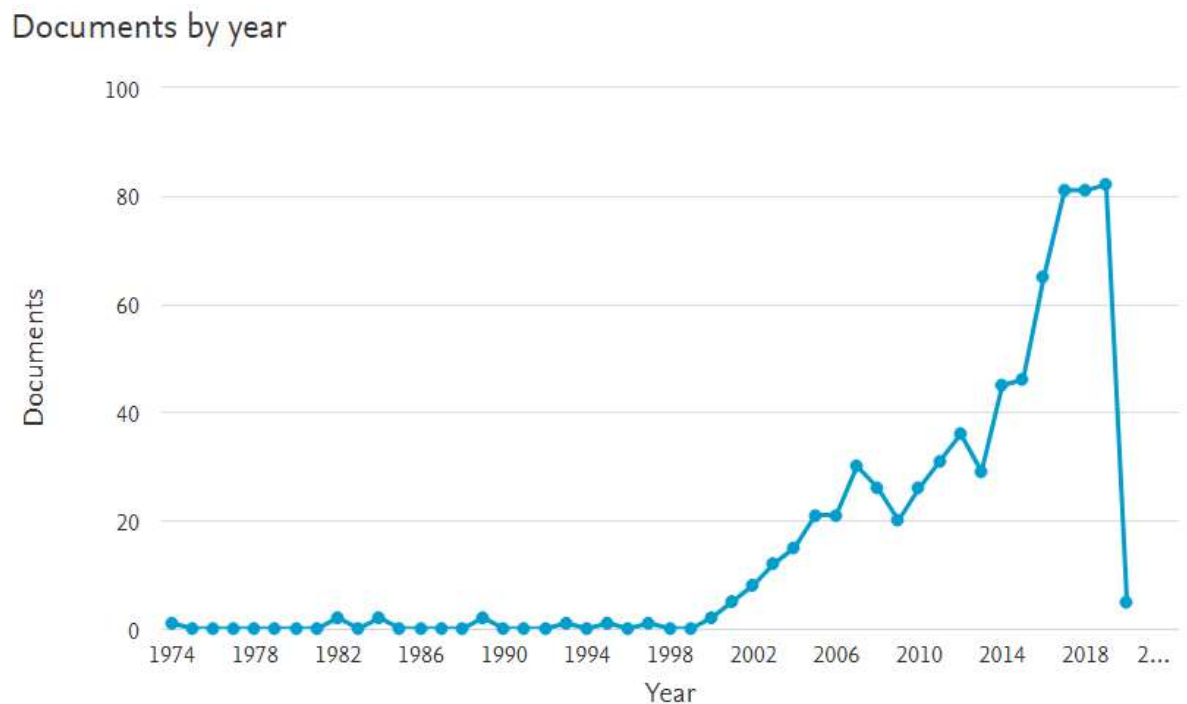
Figura 8 – Publicações sobre análise na área de Energia usando DEA



Fonte: Scopus (2019).

Buscando as palavras “energy” e “*Slack based*” (modelo aditivo em inglês) na plataforma *Scopus*, observa-se na Figura 9 uma curva de crescimento, indicando que o DEA aditivo vem sendo utilizado cada vez mais em análises de energia.

Figura 9 - Publicações sobre análise na área de Energia usando DEA Aditivo (Slack Based)



Fonte: Scopus (2019).

O estudo do trabalho justifica-se na intenção de investir em uma fonte renovável limpa, porém como outros fatores interferem na construção de novas usinas, o estudo foi feito para avaliar o rendimento de usinas hidrelétricas já existentes e observar quais aspectos podem melhorar o rendimento das mesmas, utilizando a Análise Envoltória de Dados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em mais três capítulos. O segundo capítulo contém a fundamentação teórica, onde serão descritas as energias renováveis e suas vantagens, a estrutura de uma hidrelétrica, os fatores que influenciam a sua eficiência e o DEA, método utilizado no trabalho. O Capítulo 3 apresenta a descrição e análise dos resultados. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões e em seguida as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 USINAS HIDRELÉTRICAS

As DMUs analisadas neste trabalho são Usinas Hidrelétricas. A seguir será apresentada a sua estrutura e funcionamento, explicando as entradas e saídas escolhidas para o desenvolvimento do problema.

2.1.1 Estrutura de uma Usina Hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é um sistema cujo objetivo é gerar energia elétrica por meio da energia hidráulica. Para que a energia seja produzida é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo (ANEEL, 2008)

Sua estrutura é composta, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. Os sistemas de captação e adução são formados por condutos metálicos que levam a água até a casa de força, onde se encontram as turbinas conectadas a um gerador (ANEEL, 2008)

Ao girar com o movimento das águas passando pela turbina, as mesmas convertem a energia cinética em energia elétrica por meio dos geradores que produzirão a eletricidade. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina tem suas características e devem ser adaptadas para funcionar em usinas com determinada altura de queda e vazão (ANEEL, 2008)

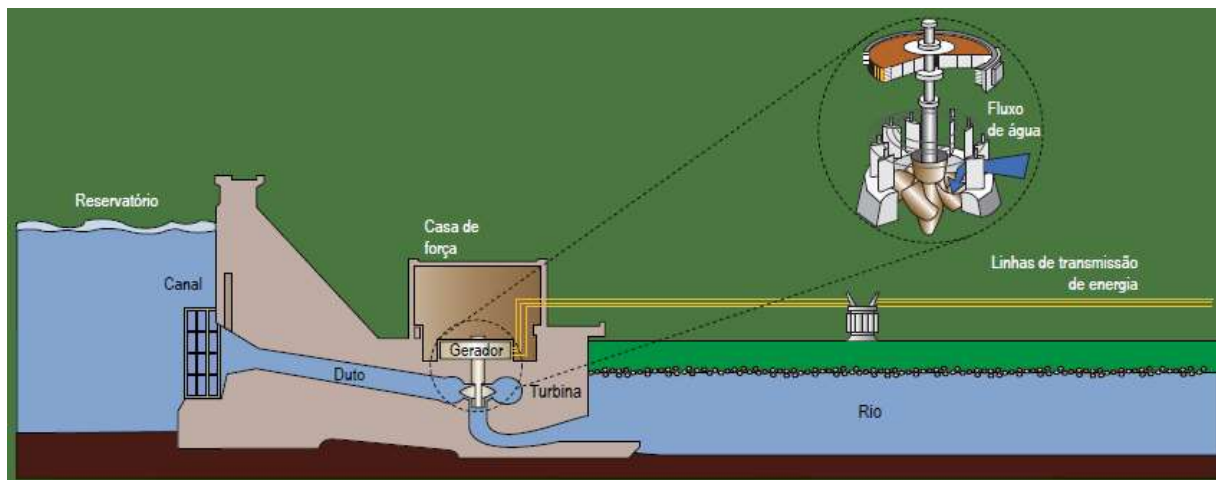
As principais variáveis em um projeto de usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, potência instalada, tipo de turbina utilizada, localização, tipo de barragem e reservatório. Todos são fatores interdependentes. Assim, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e determinarão qual será a capacidade instalada - que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório (ANEEL, 2008)

As usinas hidrelétricas também podem ser classificadas como usinas a fio d'água ou usinas com reservatório de acumulação. A primeira gera energia elétrica a partir do fluxo de água dos rios, permitindo regular a vazão de curto prazo, em base diária ou semanal. As usinas com reservatório de acumulação geram energia elétrica a partir da água acumulada, possuem a função de regularizar a vazão do rio, acumulando água durante os períodos úmidos e garantindo fluxo de água para geração nos períodos secos (GOMES, 2012)

As principais vantagens da utilização de usinas hidrelétricas para geração de energia são: o uso de fonte renovável, a não emissão de poluentes, o armazenamento de água da chuva, o excelente custo-benefício e a contribuição para desenvolvimento da população local (PUTINI, 2015).

De acordo com a Figura 10, observa-se um perfil esquemático de uma usina hidrelétrica e no detalhe, é possível observar dentro da casa de força a turbina interligada ao gerador.

Figura 10 – Perfil Esquemático de uma Usina Hidrelétrica



Fonte: ANEEL (2008)

As 28 usinas avaliadas (*Decision Making Units* – DMUs) selecionadas serão analisadas conforme o método de Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA).

2.2 ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS

A DEA é uma ferramenta analítica que busca medir a eficiência de unidades de produção com múltiplos produtos e insumos, fornecendo a identificação das melhores práticas no uso de recursos. O modelo expresso de (1) – (5) é não linear, sendo conhecido por Programação Fracionária.

$$\max \theta = \frac{\sum_{r=1}^S u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^S u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (4)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

Sendo θ é a eficiência da DMU que está sob análise (DMU₀); x_{i0} é o *input* i da DMU₀; y_{r0} é o *output* r da DMU₀, v_i é a variável de decisão associada ao *input* i , u_r é a variável de decisão associada ao *output* r , x_{ij} é o *input* i , e y_{rj} o *output* r da DMU j .

2.2.1 DEA – Modelo Multiplicadores

2.2.1.1 DEA CCR

O DEA CCR foi desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), linearizando o modelo DEA anterior, onde é possível admitir o retorno constante de escala e a orientação ao input, sendo representado abaixo por (6) - (10):

$$\max \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (9)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Sendo os parâmetros e variáveis análogos ao modelo (1) – (5).

2.2.1.2 DEA BCC

O DEA BCC foi proposto por Banker, Charnes e Cooper (1984), avalia a eficiência assumindo o retorno variável de escala ou *Variable Return to Scale* (VRS), a orientação ao input e utilizando a variável conhecida como fator de escala, C_0 , sendo essa variável irrestrita. O modelo é representado por (11) - (16).

$$\max \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + c_0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + c_0 \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (14)$$

$$v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$c_0 \in \mathbb{R} \quad (16)$$

As variáveis e parâmetros são análogos ao modelo (1) – (5).

2.2.2 DEA – Modelo do Envelope

O Modelo do Envelope permite determinar metas para tornar as DMUs não eficientes em eficientes, minimizando θ para orientação ao *input* e maximizando θ para a orientação ao *output*. A variável λ_j é chamada de variável de importância, identificando os *benchmarks* (TAMURA, 2016)

O Modelo de Envelope para o CCR com orientações ao *input* e ao *output*, estão representados por (17) - (24).

Para minimização de input:

$$\text{Min } \theta \quad (17)$$

$$\theta x_{i0} \geq \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j, i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$y_{r0} \geq \sum_{j=1}^n y_{ij} \lambda_j, r = 1, 2, \dots, s \quad (19)$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \quad (20)$$

Para maximização de output:

$$\text{Max } \theta \quad (21)$$

$$x_{i0} \geq \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j, i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

$$\theta y_{r0} \leq \sum_{j=1}^n y_{ij} \lambda_j, i = 1, 2, \dots, s \quad (23)$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \quad (24)$$

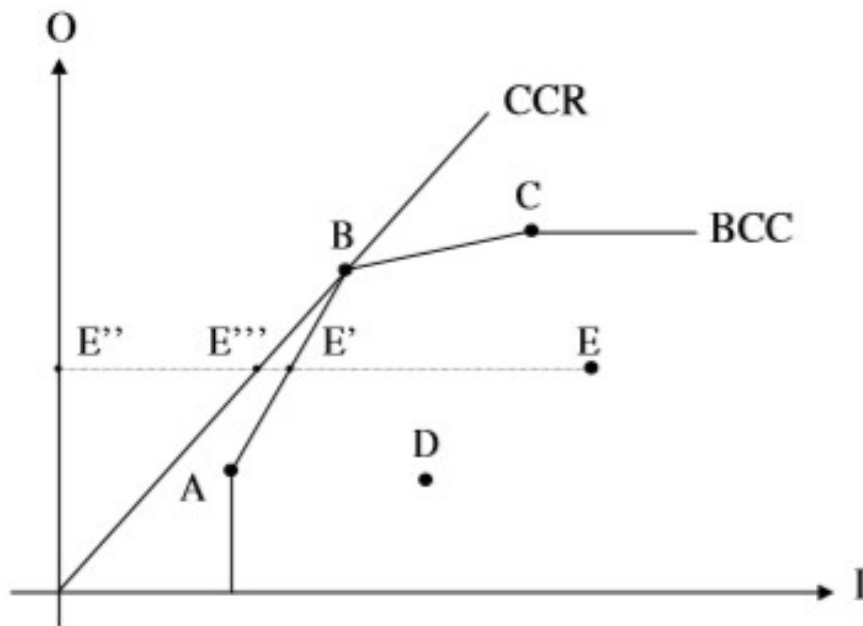
Os demais parâmetros e variáveis são análogos ao modelo (1) – (5).

O Modelo do Envelope para o DEA BCC segue as mesmas orientações do DEA CCR, com somente um detalhe, deve-se incluir a restrição (25).

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (25)$$

Ao incluir a restrição (25) na análise, a DEA BCC considera retornos variáveis de escala como é possível observar na Figura 11, enquanto a DEA CCR é baseada em retornos constantes de escala, ou seja, um aumento proporcional na entrada resulta em um aumento proporcional na saída (TOLOO; NALCHIGAR, 2009). Pela Figura 11, observa-se que o ponto B é eficiente conforme análise por DEA CCR, os pontos A, B e C são eficientes conforme o DEA BCC e os pontos D e E não são eficientes em nenhuma metodologia.

Figura 11 – Fronteiras DEA CCR e BCC



Fonte: Mello (2004).

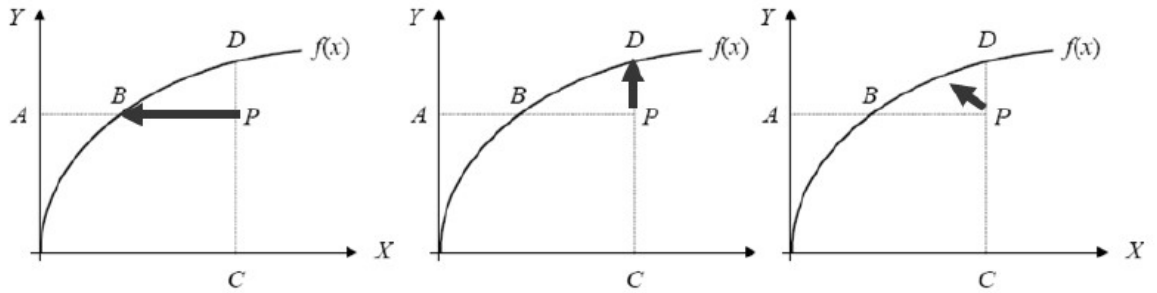
2.2.3 DEA Modelo Aditivo ou Modelo Baseado nas Folgas – SBM

Introduzida por Tone (2001), o modelo baseado nas folgas (SBM) lida diretamente com os excessos de entrada e os déficits de saída (folgas) da DMU. Enquanto um procedimento é orientado ao input, cujo objetivo é minimizar os inputs enquanto mantêm os níveis atuais de outputs, outro é orientado ao output, cujo objetivo é maximizar os níveis de outputs mantendo

o mesmo consumo atual de *inputs* e o modelo aditivo, então tenta combinar ambas as orientações (SANTOS, 2011). Os procedimentos podem ser observados na Figura 12.

Figura 12 – Representação gráfica das três orientações do modelo DEA

- | | | |
|--|---|---|
| 1. Fixar Produtos (Y)
Reduzir os Recursos (X) | 2. Fixar Recursos (X)
Aumentar os Produtos (Y) | 3. Reduzir Recursos (X)
Aumentar os Produtos (Y) |
|--|---|---|



Fonte: Santos (2011).

Devido à natureza contrária entre as duas orientações, os modelos baseados em folgas devem possuir atribuição de pesos ou coeficientes de importância relativa às parcelas a serem otimizadas, caso contrário os resultados do modelo podem indicar uma única orientação, ou para output ou input. (SANTOS, 2011)

O modelo pode ser representado por (26) - (30).

$$\max \theta = \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{i0}, i = 1, 2, \dots, m \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}, r = 1, 2, \dots, s \quad (28)$$

$$s_i^- \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

$$s_r^+ \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (30)$$

Sendo s_i^- a folga associada ao *input* i ; s_r^+ a folga associada ao *output* r .

Para DEA CCR, utiliza-se a restrição (31):

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

Para DEA BBC, utiliza-se a restrição (32):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (32)$$

O modelo aditivo é sensível em relação a grandeza escalar associada a cada parâmetro de entrada e saída. Por esse motivo, Cooper, Park e Pastor (1999) propuseram utilizar o inverso das amplitudes $w_i^- = \max(x_{0j}) - \min(x_{0j})$ e $w_i^+ = \max(y_{0j}) - \min(y_{0j})$ para tornar o processo de maximização da função objetivo independente das unidades de medidas das entradas e saídas, representado por (33):

$$\max \theta = \sum_{i=1}^m s_i^- \cdot w_i^- + \sum_{r=1}^s s_i^+ \cdot w_i^+ \quad (33)$$

A eficiência no modelo aditivo é representada por (34):

$$\min p = \frac{1 - \frac{1}{m} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s} \cdot \frac{\sum_{r=1}^s s_i^-}{y_{r0}}} \quad (34)$$

3 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme visto na literatura, a produção de energia tem sido uma preocupação para que ocorra o crescimento econômico no país, além disso existe a pressão para a utilização de fontes renováveis, que ocasionem impactos menores no meio ambiente.

Dessa forma, este trabalho buscou analisar usinas hidrelétricas que se encontram no estado de São Paulo. Os dados para análise foram obtidos por meio de sites governamentais e dos sites das empresas que tem a concessão atual das usinas. Devido a fonte das informações, algumas empresas não expõem as informações de suas usinas. Em função disto, nem todas as usinas existentes no Estado de São Paulo puderam ser analisadas.

Foram consideradas 28 Unidades de Tomada de Decisão (DMU's), examinando a geração de energia e as vazões disponíveis de março de 2017 a **fevereiro** de 2018. Observou-se cinco entradas e uma saída, sendo os *inputs* a potência por máquina em kW, o número de máquinas, a altura de queda em metros, a vazão afluente em m^3/s e a vazão turbinada em m^3/s . Já o *output* considerado foi a energia gerada em kW.

O estudo comparou as análises realizadas a partir dos modelos DEA Aditivo CCR e BBC, levando em consideração as amplitudes, utilizando o Solver, do Microsoft Excel. Além disso, buscou definir ações e metas para tornar as DMUs ineficientes em eficientes. Seguem as etapas realizadas na modelagem deste trabalho.

Etapas (a) – Identificação do Problema – O problema se baseia na aplicação do DEA Aditivo BCC e CCR na avaliação da eficiência de 28 Unidades de Tomada de Decisão (DMU), no setor energético.

Etapas (b) – Coleta de Dados – Os dados analisados foram baseados em um período de 12 meses, considerando março (2017) a Fevereiro (2018). As entradas (*inputs*) relevantes foram:

- **Altura de Queda** – Essa variável foi nomeada como *input* 1 e representa a altura em metros.
- **Potência por Máquinas** – Essa variável foi nomeada como *input* 2 e representa a potência em kW de cada máquina da usina analisada.
- **Número de Máquinas** – Essa variável foi nomeada como *input* 3 e representa o número de máquinas existentes na usina analisada.

- **Vazão Afluente** – Essa variável foi nomeada como *input 4* e representa a vazão afluente em m³/s do Rio onde se encontra a usina analisada.

- **Vazão Turbinada** – Essa variável foi nomeada como *input 5* e representa a vazão turbinada em m³/s por cada máquina da usina analisada.

É considerado como *output*:

- **Energia Gerada** – Essa variável foi nomeada como *output 1* e representa a energia média total, em kW, gerada no período de um ano na usina analisada.

Etapas (c) - Modelagem – Utilizou-se o software Solver, do Excel, para calcular a eficiência das DMUs e suas respectivas metas para se tornarem eficientes. Foi utilizado o modelo DEA Aditivo CCR e BCC.

3.2 DESENVOLVIMENTO QUANTITATIVO

A Tabela 1 mostra as DMUs contemplados nesse estudo.

Tabela 1 – Lista de DMUs analisadas

DMUs	
1	ÁGUA VERMELHA (José Ermirio de Moraes)
2	BARIRI
3	BARRA BONITA
4	CACONDE
5	CANOAS I
6	CANOAS II
7	CAPIVARA (Escola de Engenharia Mackenzie)
8	CHAVANTES
9	EUCLIDES DA CUNHA
10	IBITINGA
11	IGARAPAVA
12	ILHA SOLTEIRA
13	JAGUARA
14	JURUMIRIM (Armando Avellanal Laydner)
15	LIMOEIRO (Armando Salles de Oliveira)
16	LUIS CARLOS BARRETO
17	MARIMBONDO
18	PROMISSÃO (Mário Lopes Leão)
19	NOVA AVANHANDAVA
20	PARAIBUNA
21	PORTO COLÔMBIA
22	ROSANA
23	PORTO PRIMAVERA (Engenheiro Sérgio Mota)
24	SANTA BRANCA
25	JUPIÁ (Engenheiro Souza Dias)
26	TAQUARUÇU (Escola Politécnica da USP)
27	TRÊS IRMÃOS
28	VOLTA GRANDE

Fonte: O autor (2019).

A Tabela 2 apresenta os dados coletados de sites governamentais e sites das empresas donas das usinas que foram utilizados para a análise das DMUs, separados em entradas (x 's) e saída (y).

Tabela 2 – Base de dados

DMU	Altura de queda [m]	Potência por máquinas [kW]	Número de Máquinas	Vazão Afluente [m³/s]	Vazão Turbinada [m³/s]	Energia Gerada [kW]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1
1	57	232.700	6	1.328,6	1.387,3	611.333
2	24	47.700	3	449	421,1	77.167
3	23,5	35.190	4	366,4	348,9	65.583
4	105	40.200	2	27,8	37,7	31.500
5	16,8	27.500	3	674,5	509,3	75.167
6	14,8	24.000	3	617,2	505,0	62.583
7	48,8	154.750	4	1.702,9	989,1	388.917
8	75,3	103.500	4	458,2	424,0	267.417
9	92	27.200	4	58,4	60,1	41.833
10	24,3	43.830	3	527,1	480,8	85.250
11	17,4	42.000	5	629,4	657,2	98.500
12	46,9	172.200	20	3.314,3	3.529,0	1.380.750
13	45,9	106.000	4	571,4	592,6	232.333
14	35,8	50.478	2	276	256,8	77.417
15	25,5	16.000	2	54	55,3	12.250
16	64,7	175.000	6	564	597,0	302.000
17	63,5	180.000	8	1.087,5	1.122,8	488.167
18	27,4	88.000	3	640,9	620,4	130.833
19	29,7	115.800	3	699,7	659,8	177.417
20	87,6	43.510	2	50,3	66,5	42.750
21	23,8	80.000	4	739,2	767,1	156.167
22	20	88.500	4	1.869,1	1.544,7	277.917
23	20	110.000	14	5.903,7	5.893,8	1.021.250
24	42	21.000	2	87,6	74,0	20.333
25	21,3	110.800	14	4.741,5	4.617,0	823.750
26	25,5	105.000	5	1.680,2	1.481,3	316.167
27	44,55	161.500	5	911,5	682,7	272.583
28	27,6	95.000	4	707,3	723,5	157.000

Fonte: O autor (2019).

Como já descrito, as entradas consideradas foram Altura de Queda, Potência por Máquina, Número de Máquinas, Vazão Turbinada e Vazão Afluente. Sendo a saída considerada, Energia Gerada.

Foram realizadas duas análises, uma por DEA Aditivo CCR e outra por DEA Aditivo BCC, em ambos os casos foram consideradas as amplitudes das variáveis de entrada e saída. Os resultados estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Eficiências calculadas em DEA CCR e BCC

DMU	CCR	BCC
1	100%	100%
2	46%	86%
3	44%	87%
4	100%	100%
5	45%	100%
6	42%	100%
7	88%	100%
8	100%	100%
9	100%	100%
10	47%	86%
11	46%	90%
12	100%	100%
13	73%	93%
14	57%	100%
15	36%	100%
16	100%	100%
17	90%	92%
18	54%	90%
19	63%	100%
20	100%	100%
21	57%	85%
22	68%	100%
23	100%	100%
24	41%	100%
25	91%	96%
26	68%	94%
27	71%	85%
28	56%	79%

Fonte: O Autor (2019).

A partir da Tabela 3, verificou-se que o modelo CCR retorna oito DMUs eficientes (28,6% do total), enquanto o modelo BCC retorna 16 DMUs eficientes (57,1 % do total). Esse resultado é devido ao modelo BCC ser obtido por escalas variáveis, permitindo um envelopamento mais completo (ÂNGULO-MEZA et al., 2007). Além disso, todas as DMUs consideradas eficientes pelo DEA CCR são consideradas eficientes pelo DEA BCC, ou seja, não possuem nenhuma folga.

Foram calculadas as metas pelos modelos CCR e BCC para tornar as DMUs ineficientes em eficiente, conforme observado, respectivamente, na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4 – Metas para as DMUs calculadas por DEA CCR

DMU	Altura de queda [m]	Potência por máquina [kW]	Número de Máquinas	Vazão Afluente [m³/s]	Vazão Turbinada [m³/s]	Energia Gerada [kW]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1
2	13,31	28.662	3	317,11	309,16	77.167
3	12,86	21.685	3	261,91	258,27	65.583
5	9,68	18.437	3	427,46	350,68	75.167
6	8,46	15.903	2	383,71	332,48	62.583
7	41,37	146.382	4	1278,51	941,45	388.917
10	13,60	27.231	3	365,87	349,36	85.250
11	10,37	27.142	4	432,92	454,46	98.500
13	27,05	67.654	4	564,11	592,58	232.333
14	19,21	30.067	2	230,91	227,31	77.417
15	12,96	8.764	2	41,50	43,32	12.250
17	55,97	137.317	8	1085,44	1122,83	488.167
18	15,92	52.158	3	477,47	477,40	130.833
19	17,86	68.963	3	562,78	556,64	177.417
21	14,55	49.738	4	557,03	583,11	156.167
22	14,88	62.281	4	1267,48	1126,71	277.917
24	21,35	11.768	2	68,20	62,98	20.333
25	21,30	102.818	13	4144,44	4107,87	823.750
26	18,12	72.215	5	1219,56	1144,66	316.167
27	28,69	99.642	5	777,94	682,67	272.583
28	16,47	57.290	4	542,08	562,38	157.000

Fonte: O autor (2019).

A DMU menos eficiente é a DMU 15, Limoeiro, com uma eficiência de 36%. Analisando as entradas antes e depois da otimização, foi possível observar que é necessário realizar as seguintes modificações para obter o mesmo valor de saída:

- Diminuir a Altura de queda (x_1) de 25,5 m para 12,96 m;
- Diminuir a Potência por Máquina (x_2) de 16000kW para 8.764kW;
- Manter o Número de Máquinas (x_3) em 2;
- Diminuir a Vazão Afluente (x_4) de 54 m³/s para 41,5 m³/s;
- Diminuir a Vazão Turbinada (x_5) de 55,3 m³/s para 43,32 m³/s.

Tabela 5 – Metas para as DMUs calculadas por DEA BCC

DMU	Altura de queda [m]	Potência por máquina [kW]	Número de Máquinas	Vazão Afluente [m³/s]	Vazão Turbinada [m³/s]	Energia Gerada [kW]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1
2	24,00	35.802	3	377,21	355,84	77.167
3	23,50	28.917	4	328,27	309,52	65.583
10	24,30	34.640	3	429,15	397,99	85.250
11	17,40	34.850	5	626,72	598,11	98.500
13	39,97	90.663	4	557,12	581,52	232.333
17	59,76	139.860	8	1086,32	1122,83	488.167
18	27,40	68.172	3	584,97	551,61	130.833
21	23,80	56.705	4	646,23	650,62	156.167
25	21,30	102.965	13	4560,79	4491,89	823.750
26	25,50	92.616	5	1565,87	1384,70	316.167
27	39,42	111.912	5	779,84	682,67	272.583
28	27,60	63.777	4	556,05	575,42	157.000

Fonte: O autor (2019).

A DMU menos eficiente é a DMU 28, Volta Grande, com eficiência de 79%. Analisando as entradas antes e depois da otimização, foi possível observar que é necessário realizar as seguintes modificações para obter o mesmo valor de saída:

- Manter a Altura de queda (x_1) em 27,60 m;
- Diminuir a Potência por Máquina (x_2) de 95.000kW para 63.777kW;
- Manter o Número de Máquinas (x_3) em 4;
- Diminuir a Vazão Afluente (x_4) de 707,3 m³/s para 556,05 m³/s;
- Diminuir a Vazão Turbinada (x_5) de 723,5 m³/s para 575,42 m³/s.

Foi feita uma análise com relação as proprietárias das Usinas, a Tabela 6 relaciona as usinas analisadas com as suas respectivas proprietárias e a eficiência obtida na análise por DEA Aditivo CCR e BCC.

Tabela 6 – Relação entre as Proprietárias, as usinas e as respectivas eficiências

PROPRIETÁRIAS	USINA HIDRELÉTRICA	EFICIÊNCIA CCR	EFICIÊNCIA BCC
AES TIETE	ÁGUA VERMELHA	100%	100%
	BARIRI	46%	86%
	BARRA BONITA	44%	87%
	CACONDE	100%	100%
	EUCLIDES DA CUNHA	100%	100%
	IBITINGA	47%	86%
	LIMOEIRO	36%	100%
	(PROMISSÃO) MARIO LOPES LEÃO	54%	90%
	NOVA AVANHANDA-VA	63%	100%
	PARAIBUNA	100%	100%
COMPANHIA ENERGETICA DE SP	(PORTO PRIMAVERA) ENGENHEIRO SERGIO MOTA	100%	100%
ENGIE BRASIL	JAGUARA	73%	93%
ENEL GREEN POWER	VOLTA GRANDE	56%	79%
	LUIS CARLOS BARRETO	100%	100%
FURNAS	MARIMBONDO	90%	92%
	PORTO COLÔMBIA	57%	85%
	SANTA BRANCA	41%	100%
LIGHT ENERGIA	ILHA SOLTEIRA	100%	100%
	(JUPIÁ) ENGENHEIRO SOUZA DIAS	91%	96%
RIO PARANAPANEMA ENERGIA	CAPIVARA	88%	100%
	CHAVANTES	100%	100%
	JURUMIRIM	57%	100%
	ROSANA	68%	100%
	TAQUARUÇU	68%	94%
TIJOÁ	TRÊS IRMÃOS	71%	85%
MAIS DE UM PROPRIETÁRIO	CANOAS I	45%	100%
	CANOAS II	42%	100%
	IGARAPAVA	46%	90%

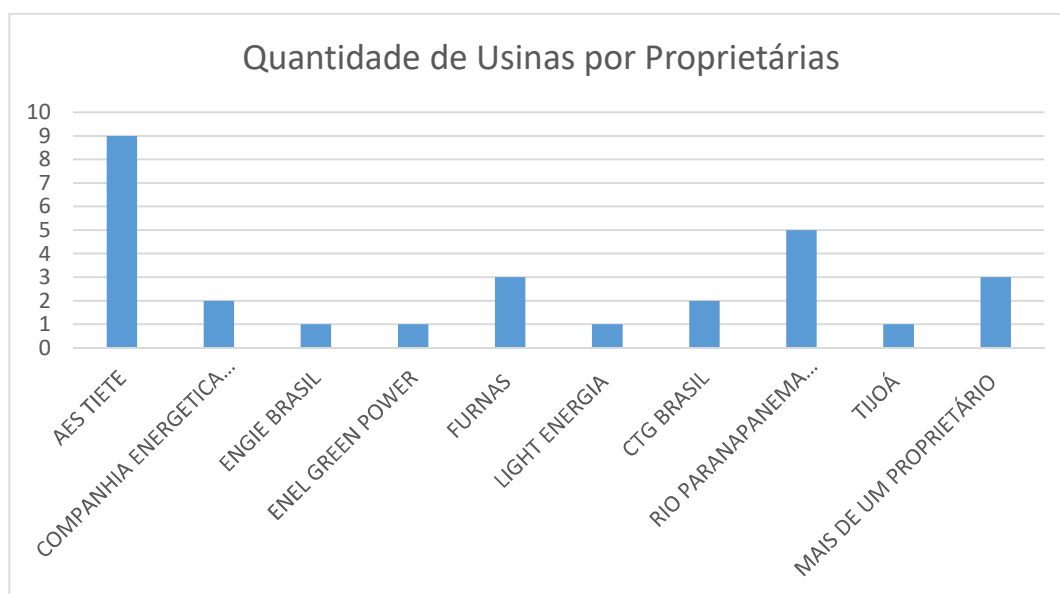
Fonte: O Autor (2019).

A Figura 13 ilustra graficamente quantas usinas de cada proprietária foram analisadas neste trabalho. Lembrando que o trabalho foi feito considerando o Estado de São Paulo e nem

todas as Usinas do Estado conseguiram ser analisadas por falta de informações das proprietárias.

É possível observar que conforme a Tabela 6 e a Figura 13, que a empresa AES Tietê é maior proprietária das usinas analisadas (9 Usinas), a segunda maior proprietária a Rio Parapanema Energia (5 Usinas) e as outras empresas possuem de três ou menos usinas em sua posseção.

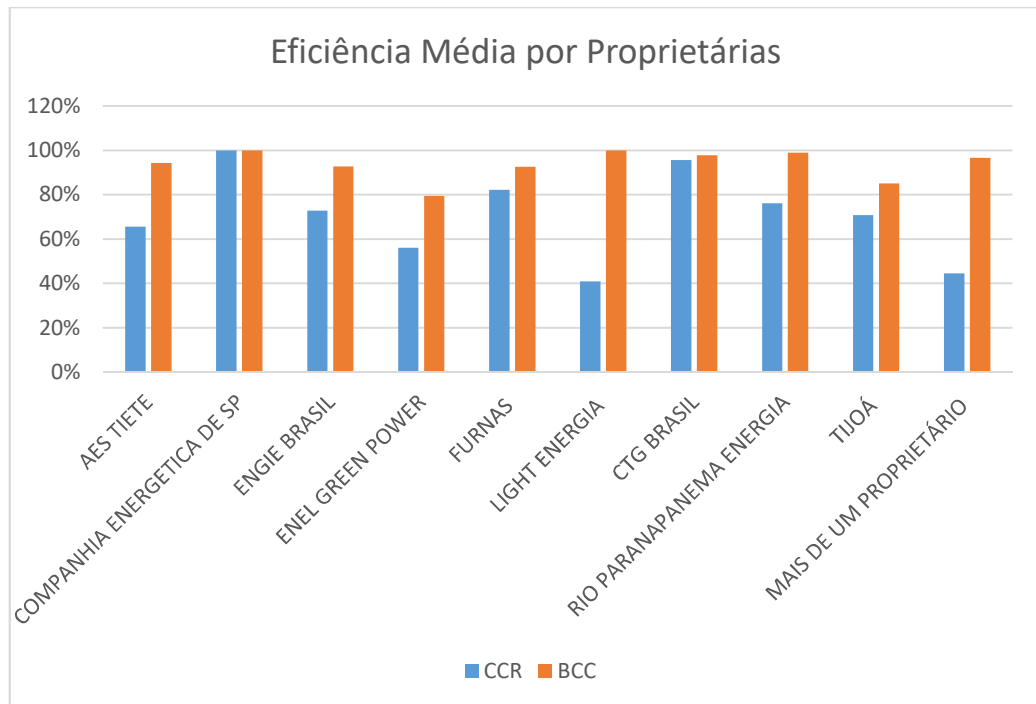
Figura 13 – Quantidade de Usinas em São Paulo por Proprietárias



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 14, foi analisada a eficiência média por Proprietárias. É possível observar que usando a metodologia DEA BCC, foram obtidas eficiências médias maiores do que ao utilizar a metodologia dela CCR. A única proprietária que manteve os mesmos resultados usando as duas metodologias foi a Companhia Energética de São Paulo que obteve uma média de 100% de eficiência com a concessão de duas usinas na análise. A Proprietária Light Energia foi a empresa que obteve maior diferença de resultados, pelo DEA CCR ela obteve a menor eficiência entre as proprietárias com 41% e pelo DEA BCC, obteve a máxima eficiência possível, 100%. A proprietária com a menor eficiência pelo DEA BCC foi a empresa Enel Green Power, com a concessão de uma usina, Volta Grande, e a eficiência de 79%.

Figura 14 – Eficiência Média por Proprietárias



Fonte: O Autor (2019).

Em todas as análises foi possível observar que a na metodologia DEA CCR, obtemos eficiências menores em relação a obtida pelo DEA BCC. Desta maneira, são obtidas metas mais agressivas no DEA CCR para obter a máxima eficiência.

Com a determinação das metas, é possível dirigir pesquisas e investimentos para descobrir as causas raiz de ineficiências e concentrar esforços para aprimorar a geração de energia na Usina estudada.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

4.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as eficiências de 28 Usinas Hidrelétricas do Estado de São Paulo. Para a análise, foi utilizado o DEA Aditivo em CCR e em BBC por meio da programação em VBA excel, utilizando o algoritmo simplex. Desta maneira, foram calculadas as eficiências em ambas as metodologias e também as respectivas metas para as DMUs não eficientes.

Na modelagem foram utilizados cinco *inputs*, Altura de Queda, Potência por Máquina, Número de Máquinas, Vazão Turbinada e Vazão Afluente, e um *output*, Energia Gerada. Os dados foram retirados de sites governamentais e dos sites das proprietárias das Usinas.

O DEA Aditivo foi utilizado com o intuito de minimizar as entradas e maximizar as saídas, porém na análise os valores de saída foram mantidos constantes e as entradas para as DMUs ineficientes tiveram como metas valores menores do que os valores originais.

Com as análises foi possível concluir que:

- Utilizando o modelo DEA CCR obteve-se menos DMUs eficientes do que ao utilizar o modelo DEA BCC, respectivamente, oito e 16 Usinas foram consideradas eficientes nesta análise.
- As oito usinas consideradas eficientes no DEA CCR também foram consideradas eficientes no DEA BCC, porém o contrário não acontece.
- A análise por DEA BCC resulta em eficiências numericamente maiores que as obtidas pelo DEA CCR.
- Na análise das proprietárias, somente uma empresa foi 100% eficiente nas duas análises, a Companhia Energética de São Paulo, com a concessão das usinas Paraibuna e Porto Primavera.

Apesar de termos utilizados os mesmos *inputs* e *output* para a realização da modelagem, o projeto de hidrelétrica permite diferentes tipos de turbinas, como turbinas Francis, Bulbo e Kaplan, e diversos tipos de operações do reservatório, como de Acumulação e a Fio D'Água, o que afeta na geração de energia. Por isso, a melhor metodologia a ser considerada é o DEA BCC, por este realizar a análise em retornos variáveis de escala e permitir uma análise no qual não há aumentos ou diminuições proporcionais dos valores. Portanto, considera-se neste trabalho que 16 usinas hidrelétricas foram consideradas eficientes: Água Vermelha, Caconde, Canoas I, Canoas II, Capivara, Chavantes, Euclides da Cunha, Ilha Solteira, Jurumirim,

Limoeiro, Luis Carlos Barreto, Nova Avanhandava, Paraibuna, Rosana, Sérgio Mota e Santa Branca.

Na análise é possível obter as metas para transformar as usinas ineficientes em eficientes. Apesar da Altura de Queda ser analisada neste trabalho e serem calculadas metas para torna-la eficiente, esse parâmetro é fixo e não pode ser modificado. Além disso, a Vazão Afluente é ocasionada devido a um fator externo e não pode ser controlada. Portanto, podemos ver o impacto desses dois parâmetros na eficiência das usinas e assim, realizar um estudo mais aprofundado de como realizar melhorias no projeto.

É importante recordar que as Usinas consideradas eficientes foram eficientes para o grupo de 28 DMUs anteriormente citado, caso venha a ser feita uma nova análise com diferentes DMUs e diferentes entradas e saídas, o resultado pode não ser o mesmo obtido neste trabalho.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Este trabalho visou a otimização por meio da modelagem DEA, buscando perceber a contribuição dessa ferramenta na análise de eficiências na área de geração de energia.

Como recomendações para futuras pesquisas, sugere-se próximos estudos considerando a aplicação do BIO-MCDEA, cujo objetivo não é encontrar uma solução ótima mas encontrar uma série de soluções que permite ao analista selecionar o mais viável (TAMURA, 2016), e o DEA Network, o qual tem como premissa considerar que dentro da DMU, existem processos internos, cada um com um conjunto de inputs e outputs que são relacionados entre si (TORRES, 2017).

Além disso, propõe-se a realização de análises com a utilização de mais DMUs, abrangendo a pesquisa em outras regiões e também a utilização de novas entradas e saídas, como por exemplo, a mão de obra utilizada, custo de manutenção e operação, impactos ambientais gerados pelas operações e tamanho do reservatório.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2008. Disponível em: www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf. Acesso em: 10 abr. 2019.
- BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiency in data envelopment analysis, **Management Science**, v.30 p. 1078–1092, 1984. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/mnsc.30.9.1078>. Acesso em: 12 jun. 2019
- BERTRAND, J. W.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, p. 214-264, 2002. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01443570210414338/full/html>. Acesso em: 12 jun. 2019
- 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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221778901388>. Acesso em: 12 jun. 2019
- COOK, W.D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA): thirty years on. **European Journal of Operational Research**, v. 192, p. 1-17, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221708001586>. Acesso em: 09 jul. 2019
- COOK, W.D.; TONE, K. ZHU, J. Data envelopment analysis: prior to choosing a model. **Omega-International Journal of Management Science**, v. 44, p. 1-4, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048313000947>. Acesso em: 09 jul. 2019
- COOPER, W.W.; PARK, K. S.; PASTOR, J. T., RAM: A range adjusted measure of inefficiency for use with additive models, and relations to other models and measures in DEA. **Journal of Productivity Analysis**, Boston, v. 11, p. 5-42, 1999.
- DOTOLI, M.; EPICOCO, N.; FALAGARIO, M.; SCIANCALEPORE, F. A cross-efficiency fuzzy data envelopment analysis technique for performance evaluation of decision making units under uncertainty. **Computers and Industrial Engineering**, v. 79, p. 103–114, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036083521400357X>. Acesso em: 09 jul. 2019.
- DUPONT, H.D; GRASSI, F; ROMITTI, L. Energias renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, v.19, n-1, ed. especial, p. 70-81, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf.
Acesso em: 10 abr. 2019

GOMES, Rafael de Oliveira. **Estudo do impacto da incorporação de usinas hidrelétricas a fio d'água no sistema interligado nacional**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução a Pesquisa Operacional**. São Paulo: Ed. Da USP, 1988. 805p.

JUBRAN, Aparecido Jorge. **Modelo de análise de eficiência na administração pública: estudo aplicado às prefeituras brasileiras usando a análise envoltória de dados**. 2006. 226 f. Tese (Doutorado em Sistemas Eletrônicos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LOURENÇO, Thuany Marra de Figueiredo. **Emissão de gases de efeito estufa na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoeletricas no Brasil**. 2016. 89 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Ambiental e Sanitária) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MELLO, J.C.C.B.S.; GOMES, E. G.; BIONDI NETO, L.; LINS, M. P. E. Suavização da fronteira DEA: O caso BCC tridimensional. **Investigação Operacional**, Lisboa, v. 24, p.89-107, 2004.

MEZA, L. A.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. A.; FERNANDES, A. J. S. Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica. **Investigação Operacional**, Lisboa, v. 27, n. 1, p. 21-36, 2007. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0874-51612007000100002&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 02 dez. 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano decenal de expansão de energia 2029**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

PUTINI, Ednei Pedro Gomes. **Análise de falhas por fadiga num rotor de hidrogerador vertical via método dos elementos**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SANTOS, M. A. R.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, A. Utilização da função arbitragem de Nash nos modelos DEA CCR: uma abordagem na orientação combinada input/output sob a ótica da teoria dos jogos de barganha. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2011, Ubatuba. **Anais [...]**. Ubatuba: XLIII SBPO, 2011. v. A. p. 521-532. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/88036.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019

SCOPUS. **Analyze search results**. Disponível em: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=a65766835cd6d3b569bc48faf7aaed94&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28dea+and+energy%29&sort=plf->

f&sdt=b&sot=b&sl=29&count=2534&analyzeResults=Analyze+results&txGid=7bc8919fd2ad325622f5d799fc83f7c5. Acesso em: 20 jun. 2019.

SCOPUS. **Analyze search results**. Disponível em:

<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=2637531837383bb8e06904ed52aae2c7&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28energy+and+slack+based%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=37&count=708&analyzeResults=Analyze+results&txGid=c0126a82c306910de611dd826eb1a5f7>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SINGH, V.K.; SINGAL, S.K. Operation of hydro power plants-a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 610–619, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116309200>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SISTEMA DE REGISTRO NACIONAL DE EMISSÕES - Sirene. **Emissões de GEE: estimativas anuais**. 4. ed. Brasília, 2015. Disponível em: <https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/infograficos/index.html>. Acesso em: 15 abr. 2019.

SISTEMA DE REGISTRO NACIONAL DE EMISSÕES - Sirene. **Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor**. Disponível em: https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/paineis/2018/08/24/Emissoes_em_dioxido_de_carbono_equivalente_por_setor.html. Acesso em: 12 abr. 2019.

TAMURA, Patricia Miyuki. **Combinação da análise por envoltória de dados multiobjetivo com a eficácia global dos equipamentos: um estudo em uma empresa do segmento automobilístico**. 2016. 54 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

TOLOO, M.; NALCHIGAR, S. A new integrated DEA model for finding most BCC-efficient DMU. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, p. 597–604, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000395>. Acesso em: 01 ago. 2019.

TONE, K.; A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 130, p. 498-509, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221799004075>. Acesso em: 01 ago. 2019

TORRES, B. G.; MELLO, J. C. B. S.; ALMEIDA, M. R. Representação bidimensional do Network DEA: um estudo de caso com avaliação de docentes. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 49., 2017, Blumenau. **Anais [...]**. Blumenau, 2017.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n.3, p.757-767, 2009.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. **European Journal of Operational Research**, Singapura, v. 189, p. 1-18, 2008.