

Measuring the Eco-efficiency of Brazilian Energy Companies using DEA and Directional Distance Function

R. G. G. Caiado, M. C. Heymann, C. L. R. Silveira, L. A. Meza and O. L.G. Quelhas

Abstract—This paper aims to measure the eco-efficiency of Brazilian energy companies in the period 2012-2017. Eco-efficiency is an indicator that reflects the maximization of economic returns and minimization of environmental impacts. The models that will be used are the classical data envelopment analysis (DEA) and the directional distance function (DDF) which has some advantages when including undesirable variables in efficiency calculations. The comparison between the results of the two models allows a comparative evaluation of the eco-efficiency of companies of the electric sector, combining desirable and undesirable outputs and shows that several companies have experienced significant changes in their efficiency scores as well as in their rankings considering the undesirable output. This indicates the importance of including the number of emissions as representative of the undesirable result in the calculation of the sustainable performance of the companies analyzed.

Index Terms — Data Envelopment Analysis, Directional distance function, Eco-efficiency, Undesirable Outputs, Carbon footprint.

I. INTRODUÇÃO

O tema sustentabilidade, vem crescendo significativa-mente, especialmente, a partir dos anos 90, indicando crescente interesse organizacional na adoção de práticas sustentáveis [1]. Esse interesse é estimulado pelos benefícios potenciais trazidos pela adoção dessas práticas, tais como: melhoria nas relações com *stakeholders*, incentivo a inovação, vantagem competitiva e resiliência quanto às adversidades [2].

Para avaliar a sustentabilidade são utilizados indicadores em geral extraídos de relatórios gerencias [3], nos quais as organizações apresentam os impactos econômicos, ambientais e sociais de suas atividades, em conformidade com as dimensões do conceito *Triple Bottom Line – TBL*, medindo, compreendendo e comunicando seu desempenho quanto à sustentabilidade.

O conceito do *TBL* busca o equilíbrio entre o incremento econômico, gestão ambiental e igualdade social, para alcançar o desenvolvimento sustentável, correspondendo aos resultados de uma organização medida segundo as três dimensões[4].

R. G. G. Caiado, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, rodrigogcaiado@gmail.com

M. C. Heymann, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, mozart.mch@gmail.com

C. L. Rey, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, celso.rey@gmail.com

L. A. Meza, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, lidia.angulo.meza@gmail.com

O. L.G. Quelhas, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, osvaldoquelhas@id.uff.br

Nessa ótica o *Global Reporting Initiative (GRI)* é a estrutura de comunicação voluntária globalmente mais disseminada do desempenho ambiental e social das organizações [5]. Tais relatórios representam uma importante fonte de informação, que pode ser utilizada para a avaliação comparativa do desempenho organizacional.

Nesse contexto a ecoeficiência surgiu como resposta da gerência aos problemas de desperdício de processos de produção e é utilizada como uma perspectiva para avaliar o desenvolvimento sustentável [3]. É considerada uma medida estratégica e consistente que reflete a relação entre os retornos econômicos e impactos ambientais, no âmbito empresarial [6].

Entre as diversas metodologias utilizadas para realizar comparações de desempenho, a Análise Envoltória de Dados (do inglês *Data Envelopment Analysis - DEA*) desponta como uma ferramenta que vem sendo empregada para analisar diversas questões corporativas, regionais e nacionais, ligadas à aplicações de sustentabilidade na ecoeficiência [7].

Cabe destacar também que DEA é uma metodologia importante na avaliação de desempenho do setor elétrico brasileiro, considerando a sua utilização pelo órgão regulador – Agência Nacional de Energia Elétrica - (ANEEL) para análise da eficiência das empresas distribuidoras de energia, servindo de base para o cálculo das revisões tarifárias periódicas [8].

DEA é um método não paramétrico baseado em modelos de programação linear, que avaliam a eficiência de unidades produtivas (DMUs) através de variáveis de input e output. DEA inicialmente determina uma “fronteira eficiente” de produção, composta pelas unidades que apresentam as melhores práticas (eficientes) [9].

Os modelos tradicionais de DEA podem apresentar dois tipos de objetivos: orientação a input ou orientação a output. No primeiro caso, o objetivo é minimizar os níveis de consumo (input) mantendo-se os mesmos níveis de produção (output). No segundo caso, busca-se maximizar a produção, mantendo-se os mesmos níveis de consumo.

Em algumas situações, os objetivos descritos anteriormente podem não ser necessariamente atingidos de forma simples. No caso de resíduos ou gases poluentes, o objetivo passa a ser sua minimização, pois se tratam de produtos indesejáveis da atividade operacional. Portanto, o decisor deve analisar se no processo há variáveis indesejáveis, a fim de garantir que a análise das DMUs seja realizada considerando seu comportamento diante destas variáveis [10]. Na presença de variáveis indesejáveis, a análise DEA requer um tratamento especial para o correto cálculo das eficiências das DMUs.

Nas seções seguintes serão descritas algumas das principais aplicações de DEA, incluindo variáveis indesejáveis, mas também com foco para uma abordagem distinta, denominada

Função de Distância Direcional, ou simplesmente DDF (do inglês *Directional Distance Function*).

Por sua vez, a minimização da produção de resíduos e poluentes (produtos indesejáveis) é também um importante objetivo das organizações orientadas à sustentabilidade, dado que o tratamento de produtos indesejáveis, em geral, encarece de forma significativa os processos produtivos, sendo a melhor estratégia minimizar a quantidade de produtos indesejáveis, reduzindo simultaneamente os custos de tratamento e de mitigação de seus efeitos [6].

Apesar da ampla utilização de DEA para avaliação da performance das empresas do setor elétrico, incluindo a análise de produtos indesejáveis [10], não se identificou a existência de muitos artigos que abordam o desempenho corporativo sustentável [3]. Também são poucos os artigos [11] que utilizam o modelo DDF para análise de outputs indesejáveis sob a ótica da sustentabilidade, e menos ainda diretamente relacionados a avaliação da ecoeficiência na indústria de energia [12].

Diante disso, o presente artigo tem por objetivo avaliar a ecoeficiência das empresas de energia elétrica do Brasil, no período de 2012 a 2017, sendo considerados fatores ambientais indesejáveis, incluindo a utilização do modelo DDF com outputs indesejáveis [13] e, para fins comparativos, também o modelo DEA clássico CCR. As variáveis utilizadas na modelagem como inputs e outputs, inclusive aquelas que são consideradas outputs indesejáveis, foram obtidas através dos relatórios de sustentabilidade, publicados pelas empresas engajadas no âmbito da GRI, que é considerado um bom ponto de partida para coleta de dados confiáveis de indicadores ambientais [14].

Essa pesquisa possui diversas contribuições, tais como: Do ponto de vista teórico, é uma extensão dos trabalhos anteriores de DEA que avaliam a eficiência de empresas de energia [15], [16], [17], [18], considerando neste trabalho, também a variável emissões de CO₂. No que concerne a metodologia da pesquisa, permite uma avaliação comparativa, com foco em sustentabilidade, utilizando modelos DEA clássico e DDF, considerado mais flexível, pois combina resultados desejáveis e indesejáveis [19], na apuração da ecoeficiência de empresas do setor elétrico. De acordo com [20] a revelação da ecoeficiência de diferentes empresas de energia em um determinado período, pode ajudar a analisar as razões das mudanças desse indicador em empresas de outros segmentos e, com isso fornecer recomendações correspondentes. Sob o ponto de vista prático, possibilita identificar oportunidades para o abatimento de emissões de CO₂ da indústria de energia, utilizando a ótica do desenvolvimento sustentável em busca de não apenas aumentar o crescimento econômico, mas também reduzir impactos ambientais e sociais.

O artigo está estruturado como segue: a seção 2 descreve as metodologias empregadas no estudo apresentando o modelo DEA clássico CCR e DDF e a forma de lidar com fatores indesejáveis; a seção 3 detalha o estudo de caso; a seção 4 apresenta a discussão dos resultados, e finalmente, a seção 5 descreve as conclusões, destacando importantes implicações gerenciais e políticas da pesquisa.

II. METODOLOGIA

Esta seção descreve cinco formas comuns de lidar com

resultados indesejáveis na metodologia não paramétrica, quatro com DEA clássico e uma com DDF.

Dentre os modelos clássicos de DEA nesse estudo será abordado o conhecido modelo CRS (do inglês *Constant Returns to Scale*), também nomeado com as iniciais de seus autores, modelo CCR (Charnes, Cooper e Rhodes), cuja principal característica deste modelo é o retorno constante de escala, ou seja, a variação das saídas é proporcional à variação dos insumos [9]. Os modelos em DEA ao serem elaborados e posteriormente calculados, para obtenção das eficiências das DMUs, têm como premissa básica a maximização dos produtos, outputs, ou a minimização dos insumos, inputs. Mas nem sempre as variáveis tem o comportamento descrito, pois podem ocorrer resultados não desejáveis, e assim, a produção deve ser minimizada, ao invés de ser maximizada, sendo tais variáveis denominadas outputs indesejáveis [21], [22].

Como exemplo notório de output indesejável tem-se a emissão de gases poluentes em processos industriais. Nesses casos para executar o cálculo da eficiência das unidades produtivas de forma correta é necessário realizar o tratamento adequado dessas variáveis, e as quatro técnicas mais utilizadas para adequação dessas variáveis, de forma assertiva, em uma modelagem DEA [10], são: (i) incorporar os outputs indesejáveis como inputs (INP) [21]; (ii) trocar o sinal dos valores dos outputs indesejáveis, ou seja, multiplicar essas variáveis por (-1), transformando-os em outputs desejáveis, técnica conhecida como Inverso Aditivo (ADD) [23]; (iii) utilizar o inverso do output indesejável, ou seja, colocá-lo sob a forma (1/u), e tratá-lo segundo a regra de maximização de output, abordagem denominada Inverso Multiplicativo (MLT) [24]; (iv) adicionar ao output indesejável, com sinal invertido (ADD), um número escalar positivo, de grande valor, na forma $(-u + \beta = S^+)$, de modo que essa soma resulte em valores positivos para todas DMUs, método conhecido como Translação (TR β), cuja utilização é restrita para determinados modelos [25]. Embora, [21] tenha feito uma comparação entre as eficiências destas quatro abordagens, a INP ainda é considerada a mais usual, com uma abordagem sem operações matemáticas complexas, conseqüentemente com maior facilidade na aplicação do tratamento de variáveis indesejáveis dentro dos pressupostos do modelo DEA clássico CCR. Nesse sentido, para a aplicação do modelo DEA clássico foi escolhida o enfoque INP, no qual se deseja minimizar recursos e emissões. Tal decisão foi reforçada pela escolha da orientação ser a input.

Outra alternativa, corresponde ao modelo DDF, que é um método não paramétrico, assim como DEA clássico. A principal diferença entre os modelos é que o DEA move apenas as variáveis de saída ou entrada seja desejada ou indesejada, dependendo da orientação estabelecida, enquanto o DDF tem o diferencial de ser mais flexível, por permitir mover em conjunto saídas desejadas e indesejadas, bem como as entradas, a fim de alcançar a fronteira de eficiência [20]. A partir disso, alguns autores [11] consideram o DDF mais apropriado para lidar com variáveis ambientais, sendo comum quando as saídas indesejáveis estão presentes, [26], [27], [28] e entre as principais vantagens desta abordagem são [29]:

- Estima os escores de eficiência incorporando todos os tipos de entradas e saídas;
- Examina os níveis de eficiência dos agentes de

produção (empresas) mesmo quando a produção consiste em produtos desejáveis e indesejáveis;

- Permite avaliar/medir os níveis de eficiência em qualquer direção a partir dos pontos de observação (alterando o valor do vetor de direção);

A solução para um modelo DDF, ilustrada pela Fig. 1 [30], captura a distância entre a unidade decisória observada e a fronteira da DMU com melhor desempenho ao longo de uma direção pré-especificada.

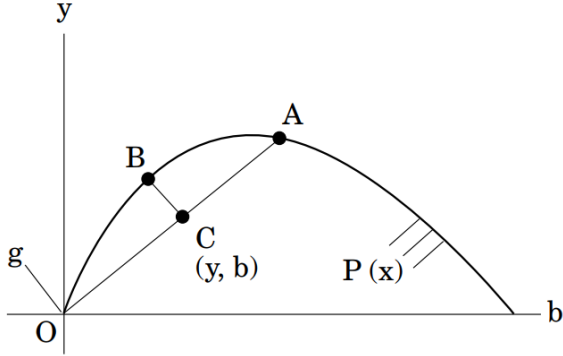


Fig. 1. Função de Distância Direcional

Dada a tecnologia de produção ($P(x)$), e o vetor de direção (g), a função de distância direcional produz a expansão máxima viável de saída desejável (y) e a contração de saída indesejável (b).

De acordo com [29], um escore DDF mais alto indica que a DMU está longe de ser eficiente, ou seja, a DMU observada é mais ineficiente, enquanto uma pontuação DDF zero significa que a DMU observada apresenta melhor desempenho. Assim, a partir da Fig. 1, percebe-se que se a observação estiver na fronteira de produção, o valor da função de distância de saída direcional é zero e a observação é a mais eficiente. Conforme o valor aumenta, a observação se torna menos eficiente.

Este estudo considerou um modelo que utiliza um input representado por (O) e três outputs representados por (C , D e E). Seguindo [13], [28], [31], definiu-se o modelo DDF da Eq. (1) para estimar a eficiência das empresas que serão objeto deste estudo.

$$\begin{aligned} & \bar{D}_0^w(O, C, D, E; g_C, g_D, g_E) \\ & = \max(\beta: (C, D, E) + \beta(g_C, g_D, g_E) \in T(O)) \end{aligned} \quad \text{Eq.(1)}$$

Devido à produção conjunta da saída indesejável com a saída desejável, a saída indesejável é tratada assimetricamente em comparação com a saída desejável. Como uma direção apropriada tem que ser seguida para assegurar este tratamento assimétrico, o vetor de direção do DDF na Eq. (1) é especificado como $g = (g_O, g_C, g_D, -g_E)$ que procura a expansão simultânea no produto desejado e a contração máxima do resultado indesejável.

Suponha que haja $j = 1, 2, \dots, n$ DMUs e para a DMU j o vetor de entrada, saída desejável e saída indesejável é (O_j, C_j, D_j, E_j) , sendo (E) a saída indesejável. O seguinte modelo DDF é empregado [13]:

$$\bar{D}_0^w(O_0, C_0, D_0, E_0; g_{C_0}, g_{D_0}, -g_{E_0}) = \max \beta = \beta^* \quad \text{Eq.(2)}$$

Sujeito a

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \lambda_j O_j \leq O_0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j C_j \geq (1 + \beta) C_0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j D_j \geq (1 + \beta) D_0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j E_j \geq (1 - \beta) E_0 \\ & \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad \text{Eq.(3)}$$

Na Eq. (3), o subscrito "0" refere-se a empresa sob observação, e λ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) refere-se ao nível de intensidade em que as empresas realizam atividades de produção. A Eq. (3) é estimada sob o pressuposto de retorno constante de escala.

O valor ótimo β^* na Eq. (3) representa o índice de ineficiência. Portanto, um β^* maior implica que a DMU específica é ineficiente ou atinge um nível mais baixo de eficiência. Um escore β^* igual a zero significa que o aumento e a redução simultânea de saída desejável e indesejável respectivamente não é possível, portanto representa uma DMU eficiente. Caso contrário, isso implica que a saída desejável pode ser expandida e a saída indesejável pode ser contraída quando β^* é multiplicado pelos valores originais.

Para tornar as pontuações DDF comparáveis com a pontuação DEA-CCR, é utilizada a Eq. (4) [13], que denota a eficiência da DMU observada, pois a saída desejada se torna $(1 + \beta^*)$ vezes e a saída indesejável se torna $(1 - \beta^*)$ vezes os valores originais.

$$(1 - \beta^*) / (1 + \beta^*) \quad \text{Eq. (4)}$$

III. ESTUDO DE CASO

Neste artigo será apurada a ecoeficiência das principais empresas que atuam no setor elétrico brasileiro, no período de 2012 a 2017, com a aplicação de DEA - CCR e DDF, considerando aspectos operacionais e ambientais relacionados com fornecimento de energia [10]. A utilização de variáveis que medem a eficiência operacional de empresas do setor [ANEEL – audiência pública 040/2010] em conjunto com variável ambiental, pode ser considerada, um termômetro que possibilita indicar se a empresa opera de forma sustentável [8].

Dessa forma, buscaram-se empresas do setor que apresentassem histórico de publicação das informações do seu desempenho, em termos de sustentabilidade corporativa. Por esse motivo foram selecionadas empresas incluídas na carteira do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE), divulgado anualmente pela BM&F BOVESPA, e que também fossem aderentes ao GRI, cujos indicadores encontram-se evidenciados nos relatórios anuais dessas empresas.

O ISE foi criado em dezembro de 2005, objetivando atuar como indutor de boas práticas em sustentabilidade no meio empresarial brasileiro, e ser uma referência para o investimento

socialmente responsável, em empresas de capital aberto listadas na BM&FBOVESPA [32].

Sete empresas do setor estiveram presentes no ISE durante o período sob estudo, e, por conseguinte foram selecionadas.

A Tabela I mostra as características destas sete empresas de Energia (EE).

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DAS EMPRESAS

Empresas	Características
CEMIG EE ₁	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, além de distribuição de gás natural, serviços em telecomunicações e eficiência energética. Na área de geração de energia conta com 121 usinas (86 hidrelétricas, 3 termelétricas e 32 eólicas), com capacidade instalada de 8,5 GW.
COPEL EE ₂	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, além de serviços em telecomunicações. Na área de geração de energia conta com 20 usinas (sendo, 18 hidrelétricas, 1 termelétrica e 1 eólica), com capacidade instalada de 4,8 GW em operação.
CPFL EE ₃	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, além de serviços em telecomunicações e em eficiência energética. Na área de geração de energia conta com 9 usinas (sendo 46 hidrelétricas, e 9 termelétricas, 33 eólicas e 1 solar), com capacidade instalada de 7GW.
EDP EE ₄	Empresa de energia atuante nas áreas de geração e distribuição de energia, além de serviços em soluções de energia elétrica no país. Na área de geração de energia conta com 16 usinas (sendo 7 hidrelétricas, 8 pequenas centrais hidrelétricas e 1 termelétrica), com capacidade instalada de 3,7 GW.
ELETRORAS EE ₅	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, além de serviços em eficiência energética. Na área de geração de energia conta com 180 usinas (sendo 45 hidrelétricas, e 125 termelétricas, 8 eólicas e 2 nucleares), com capacidade instalada de 43 GW.
ELETRORAS O EE ₆	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, distribuição e comercialização de energia, além de prestar serviços de soluções de energia. Na área de geração de energia conta com 12 usinas hidrelétricas, com capacidade instalada de 2,7 GW em operação.
LIGHT EE ₇	Empresa de energia atuante nas áreas de geração, distribuição e comercialização de energia, além de prestar serviços de soluções de energia. Na área de geração de energia conta com 6 usinas hidrelétricas e 1 usina eólica, com capacidade instalada de aproximadamente 1,0 GW em operação.

É importante ressaltar, que essas sete empresas, além de aderirem ao GRI, também são signatárias do Pacto Global, que se trata de uma iniciativa proposta pelas Nações Unidas, no ano 2000, sendo implementado no Brasil através do Instituto Ethos de Empresas e Responsabilidade Social, que conduziu o processo de participação das empresas brasileiras ao programa, com a criação em 2003, do Comitê Brasileiro do Pacto Global, impulsionando diversas empresas do país a serem adeptas das boas práticas de gestão cidadã nos seus negócios, de tal forma que a Rede Brasil do Pacto Global, ao fim desses 15 anos, se tornou a terceira maior do mundo em empresas signatárias [33]. Estas sete empresas, juntamente com cada um dos seis anos

selecionados para estudo, serão definidas no modelo DEA e DDF, como as DMUs, assim sendo serão consideradas quarenta e duas (42) DMUs.

Desta forma, esta pesquisa busca comparar a ecoeficiência destas DMUs, utilizando variáveis operacionais e ambientais, constantes dos indicadores do GRI nas dimensões do TBL. A seleção das variáveis operacionais privilegiou aquelas ligadas diretamente com as operações da empresa [15], [16], [17], [18], sendo o input, o custo operacional - OPEX (O), e os outputs, respectivamente, o número de consumidores (C) e a energia demandada (D). Esta escolha das variáveis também encontra amparo em [34] onde a partir da compilação de dados de 20 estudos de análise de eficiência em empresas de energia elétrica, os autores listam as variáveis mais empregadas na modelagem DEA, que corresponde as mencionadas acima, cujas descrições são: OPEX é uma sigla derivada da expressão inglesa *Operational Expenditure*, que significa o capital utilizado para manter ou melhorar os bens físicos de uma empresa, são os custos e despesas operacionais, portanto uma variável econômica, que em consonância com os estudos citados acima corresponde a um input; outra variável Número de Consumidores representa o número de consumidores atendidos pela empresa no período determinado, o que é uma variável de dimensão operacional, que corresponde a um output [16], [17], [35], [36]; e finalmente a Quantidade de Energia Demandada que representa a quantidade de energia despendida aos consumidores pela empresa em um determinado período, também considerado na dimensão operacional, expresso em GWh (Gigawattshora), corresponde a um output.

No que concerne a variável ambiental, considerou-se para esta análise a quantidade de Emissões Diretas de Gases do Efeito Estufa - GEE (E), expresso em tCO₂e (toneladas de carbono equivalente). As emissões desses gases são danosas ao meio ambiente e aos seres vivos, oriundas de fontes de propriedade ou controlada pela empresa [37], [38], como é um produto resultante das operações das empresas trata-se de uma variável output, entretanto o objetivo é reduzir a sua produção, portanto não desejável, assim sendo, esta variável de cunho ambiental, será tratada como um output indesejável [10].

Observa-se que, além das variáveis selecionadas estarem no âmbito da sustentabilidade, há uma ligação causal entre elas, pois variam de acordo com o nível operacional das empresas, cumprindo assim, uma das características essenciais para uma boa modelagem em DEA [39] [40]. A coleta dos dados referentes as variáveis selecionadas foi realizada por meio de análise documental dos relatórios anuais de sustentabilidade das empresas descritas na Tabela I, no período compreendido entre 2012 e 2017, e através do site da ANEEL. Os valores encontram-se elencados na Tabela II.

TABELA II
VARIÁVEIS SELECIONADAS PARA CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS DAS DMUS

Empresas - Anos	DMUS	INPUT	OUTPUTS		
			Indesejável	Consumidores (Número)	Energia Demandada (TWh)
	Ordem	OPEX (MRS)	Emissões (tCO ₂ e)		
LIGHT-2012	1	6.114	7.827	3.486.678	24.997
Eletropaulo-2012	2	8.470	7.324	6.922.106	45.557
COPEL-2012	3	7.501	195.061	3.687.521	24.652
CEMIG-2012	4	11.528	53.567	6.762.619	59.584
Eletroras-2012	5	20.478	8.169.468	3.808.063	207.422

CPFL-2012	6	12.556	227.500	8.319.163	56.498
EDP-2012	7	5.475	5.249	2.877.680	24.923
LIGHT-2013	8	6.111	10.105	3.516.715	25.717
Eletropaulo-2013	9	7.412	7.158	6.761.717	46.216
COPEL-2013	10	8.068	196.960	3.602.820	27.088
CEMIG-2013	11	11.232	146.101	6.688.556	61.521
Eletrobras-2013	12	23.268	10.270.407	3.653.076	186.092
CPFL-2013	13	12.264	299.698	8.166.939	58.462
EDP-2013	14	5.920	6.202	2.821.885	25.880
LIGHT-2014	15	7.958	37.994	3.457.772	26.493
Eletropaulo-2014	16	9.501	6.564	6.660.716	46.415
COPEL-2014	17	12.351	175.306	3.531.829	24.208
CEMIG-2014	18	14.451	617.717	6.543.935	63.470
Eletrobras-2014	19	29.116	9.358.352	3.458.586	175.706
CPFL-2014	20	14.766	678.399	8.010.192	59.854
EDP-2014	21	8.073	1.836.108	2.778.034	26.443
LIGHT-2015	22	9.885	31.557	3.403.146	26.446
Eletropaulo-2015	23	12.093	6.156	6.522.904	44.237
COPEL-2015	24	12.912	231.519	3.437.021	24.043
CEMIG-2015	25	18.318	164.537	6.382.796	56.904
Eletrobras-2015	26	31.026	8.413.812	3.353.822	166.108
CPFL-2015	27	17.954	798.633	7.801.799	57.559
EDP-2015	28	8.975	4.529.463	2.685.324	25.713
LIGHT-2016	29	8.268	38.727	3.327.065	25.849
Eletropaulo-2016	30	10.123	22.690	6.388.821	42.826
COPEL-2016	31	11.279	282.745	3.320.114	26.151
CEMIG-2016	32	15.903	15.462	6.195.904	55.592
Eletrobras-2016	33	45.910	6.954.216	3.229.964	170.917
CPFL-2016	34	16.589	527.117	7.544.571	46.578
EDP-2016	35	10.680	5.218.273	2.591.752	24.425
LIGHT-2017	36	8.870	40.419	3.246.202	25.846
Eletropaulo-2017	37	11.071	10.763	6.242.404	42.982
COPEL-2017	38	11.985	227.022	3.196.468	24.374
CEMIG-2017	39	18.817	48.849	5.973.483	55.277
Eletrobras-2017	40	35.575	5.803.061	3.097.234	182.116
CPFL-2017	41	23.723	759.900	7.061.752	53.376
EDP-2017	42	13.596	5.432.087	2.495.160	24.703

A partir da obtenção dos dados foi realizada a aplicação da metodologia DEA utilizando o modelo CCR, com o incremento da técnica de fatores indesejáveis, no caso a variável emissões de GEE, que corresponde a um output indesejável, e será incorporado ao modelo como input, adotando assim a primeira técnica (INP), apresentada no tópico da matéria de fatores indesejáveis. A modelagem foi realizada com orientação a input, pois o objetivo das empresas é reduzir as suas despesas operacionais, mantendo o atendimento a carteira de clientes [41], e também reduzir as emissões de GEE, que está sendo tratado como input. Para efetuar o cálculo dos modelos DEA, contemplando as 42 DMUs, foi utilizado o pacote LINDO *Systems - Optimization Software*.

Na Tabela III encontram-se representados os resultados dos cálculos das eficiências das DMUs no modelo CCR. Para facilitar a análise, esta tabela foi disposta em forma de matriz, destacando-se em cinza claro as DMUs Eficientes (1,0000) e em cinza escuro aquelas com menores índices de eficiência.

TABELA III
EFICIÊNCIAS - MODELO CCR

EMPRESAS	2012	2013	2014	2015	2016	2017
LIGHT	0,6989	0,7300	0,5307	0,4276	0,4985	0,5218
ELETROPAULO	0,9792	1,0000	1,0000	1,0000	0,6918	0,6302
COPEL	0,5575	0,5232	0,3140	0,2956	0,3711	0,3268
CEMIG	1,0000	1,0000	0,6611	0,4920	0,8224	0,6697
ELETROBRAS	1,0000	1,0000	0,6440	0,6030	0,7672	1,0000
CPFL	0,7433	0,7598	0,6257	0,4975	0,5199	0,3471
EDP	1,0000	0,7010	0,4602	0,4017	0,7634	0,4484

Na sequência foi realizada a apuração das eficiências através do método DDF, objetivando obter resultados com melhor discriminação. Aplicou-se o modelo expresso pela Eq. (3), para calcular o índice DDF das 42 DMUs, utilizando o pacote "nonparaeff" do software R Project [42], cujos valores encontram-se na Tabela IV. E os valores da eficiência final usando a Eq. (4), estão demonstrados na Tabela V. Para auxiliar a análise dessas Tabelas, também foram destacados alguns resultados: em cinza claro as DMUs Eficientes e, em cinza escuro aquelas com menores índices de eficiência.

TABELA IV
ÍNDICE DDF

EMPRESAS	2012	2013	2014	2015	2016	2017
LIGHT	0,3557	0,4384	0,8071	0,7883	0,8178	0,8286
ELETROPAULO	0,0117	0,0000	0,0000	0,0000	0,4449	0,2696
COPEL	0,8483	0,8640	0,9622	0,9715	0,9743	0,9704
CEMIG	0,2115	0,1563	0,4682	0,9000	0,3270	0,7206
ELETROBRAS	0,0000	0,2068	0,3634	0,4403	0,7656	0,4025
CPFL	0,3573	0,3302	0,5822	0,9489	0,9703	0,9804
EDP	0,1780	0,2381	0,9409	0,9983	0,9987	0,9987

TABELA V
EFICIÊNCIAS - MODELO DDF

EMPRESAS	2012	2013	2014	2015	2016	2017
LIGHT	0,4752	0,3904	0,1068	0,1184	0,1002	0,0937
ELETROPAULO	0,9768	1,0000	1,0000	1,0000	0,3841	0,5754
COPEL	0,0821	0,0730	0,0193	0,0145	0,0130	0,0150
CEMIG	0,6509	0,7297	0,3623	0,0526	0,5072	0,1624
ELETROBRAS	1,0000	0,6573	0,4669	0,3886	0,1327	0,4261
CPFL	0,4736	0,5035	0,2640	0,0262	0,0151	0,0099
EDP	0,6978	0,6154	0,0305	0,0009	0,0007	0,0006

Evidencia-se que houve variação no nível de eficiência técnica entre os métodos DEA - CCR e DDF. A análise e discussão dos resultados demonstrados nestas Tabelas estão na seção seguinte.

IV. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados de eficiência demonstrados nas Tabelas III e V expressam a ecoeficiência corporativa. Constata-se nas referidas Tabelas que o modelo DDF, apresentou um número menor de DMUs eficientes em relação ao modelo CCR, consequentemente com melhor discriminação. Haja vista que o modelo DDF denota 4 DMUs eficientes, 10% do total de DMUs, enquanto que pelo modelo CCR resulta em 9 DMUs eficientes, correspondendo a 21% de DMUs. Várias DMUs ineficientes no modelo DDF, apresentaram índice de desempenho baixo, cerca de 17 DMUs ficaram abaixo de 12%.

Aparentemente se deve ao método de cálculo da eficiência através da Eq. 4, na qual há considerável influência da variável indesejável. A comparação dos resultados dos modelos CCR e DDF, se fundamenta pela ocorrência de proporcionalidade entre as variáveis, conforme [13], que também utilizou variáveis operacionais e indesejáveis.

Para facilitar o entendimento da análise sobre a influência das variáveis, objeto deste estudo nos modelos, foi gerada a Tabela VI, na qual as DMUs encontram-se ordenadas de acordo com os respectivos valores de cada variável. Para os inputs,

incluindo as emissões de GEE, iniciou-se da DMU com o menor valor para o maior registrado na Tabela II e para os outputs da DMU de maior para a de menor valor constante da Tabela II, ou seja, em todas as situações do valor mais favorável para o desfavorável em relação a cada variável.

Adotou-se para cada empresa a mesma cor.

TABELA VI
ORDENAÇÃO DAS DMUS DE ACORDO COM A INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS

Posição	VARIÁVEIS			
	OPEX menor->maior	EMISSOES menor->maior	CONSUMIDOR maior->menor	ENERGIA maior->menor
MAIS FAVORÁVEL	EDP-2012	EDP-2012	CPFL-2012	Eletrobras-2012
	EDP-2013	Eletropaulo-2015	CPFL-2013	Eletrobras-2013
	LIGHT-2013	EDP-2013	CPFL-2014	Eletrobras-2017
	LIGHT-2012	Eletropaulo-2014	CPFL-2015	Eletrobras-2014
	Eletropaulo-2013	Eletropaulo-2013	CPFL-2016	Eletrobras-2016
	COPEL-2012	Eletropaulo-2012	CPFL-2017	Eletrobras-2015
	LIGHT-2014	LIGHT-2012	Eletropaulo-2012	CEMIG-2014
	COPEL-2013	LIGHT-2013	CEMIG-2012	CEMIG-2013
	EDP-2014	Eletropaulo-2017	Eletropaulo-2013	CPFL-2014
	LIGHT-2016	CEMIG-2016	CEMIG-2013	CEMIG-2012
	Eletropaulo-2012	Eletropaulo-2016	Eletropaulo-2014	CPFL-2013
	LIGHT-2017	LIGHT-2015	CEMIG-2014	CPFL-2015
	EDP-2015	LIGHT-2014	Eletropaulo-2015	CEMIG-2015
	Eletropaulo-2014	LIGHT-2016	Eletropaulo-2016	CPFL-2012
	LIGHT-2015	LIGHT-2017	CEMIG-2015	CEMIG-2016
	MEDIANA	Eletropaulo-2016	CEMIG-2017	Eletropaulo-2017
EDP-2016		CEMIG-2012	CEMIG-2016	CPFL-2017
Eletropaulo-2017		CEMIG-2013	CEMIG-2017	CPFL-2016
CEMIG-2013		CEMIG-2015	Eletrobras-2012	Eletropaulo-2014
COPEL-2016		COPEL-2014	COPEL-2012	Eletropaulo-2013
CEMIG-2012		COPEL-2012	Eletrobras-2013	Eletropaulo-2012
COPEL-2017		COPEL-2013	COPEL-2013	Eletropaulo-2015
Eletropaulo-2015		COPEL-2017	COPEL-2014	Eletropaulo-2017
CPFL-2013		CPFL-2012	LIGHT-2013	Eletropaulo-2016
COPEL-2014		COPEL-2015	LIGHT-2012	COPEL-2013
CPFL-2012		COPEL-2016	Eletrobras-2014	LIGHT-2014
COPEL-2015		CPFL-2013	LIGHT-2014	LIGHT-2015
EDP-2017		CPFL-2016	COPEL-2015	EDP-2014
CEMIG-2014		CEMIG-2014	LIGHT-2015	COPEL-2016
CPFL-2014		CPFL-2014	Eletrobras-2015	EDP-2013
MENOS FAVORÁVEL		CEMIG-2016	CPFL-2017	LIGHT-2016
	CPFL-2016	CPFL-2015	COPEL-2016	LIGHT-2017
	CPFL-2015	EDP-2014	LIGHT-2017	LIGHT-2013
	CEMIG-2015	EDP-2015	Eletrobras-2016	EDP-2015
	CEMIG-2017	EDP-2016	COPEL-2017	LIGHT-2012
	Eletrobras-2012	EDP-2017	Eletrobras-2017	EDP-2012
	Eletrobras-2013	Eletrobras-2017	EDP-2012	EDP-2017
	CPFL-2017	Eletrobras-2016	EDP-2013	COPEL-2012
	Eletrobras-2014	Eletrobras-2012	EDP-2014	EDP-2016
	Eletrobras-2015	Eletrobras-2015	EDP-2015	COPEL-2017
Eletrobras-2017	Eletrobras-2014	EDP-2016	COPEL-2014	
Eletrobras-2016	Eletrobras-2013	EDP-2017	COPEL-2015	

Iniciando-se a análise pelas ineficientes no modelo CCR, nota-se que a COPEL entre os anos de 2014 a 2017, possui os menores índices de desempenho, apresentando variação entre 29,56% e 37,11%, conforme Tabela III, contribuindo para este resultado o fato dessa empresa, apesar de se situar no grupo de médio para menor porte, a relação entre as variáveis de output e de input encontra-se em patamares baixos, em relação às demais DMUs. No modelo DDF, também apresenta baixo desempenho com variação entre 1,3% e 1,93%, demonstrado na Tabela V.

Verifica-se que a CPFL possui baixo desempenho em 2017, tanto no CCR com 34,71%, Tabela III, quanto pelo DDF com 1%, Tabela V. Esse baixo desempenho, a princípio é explicado pela elevação dos custos operacionais e emissões de GEE nesse

ano, conforme Tabela II. Ressalta-se que nesse ano a empresa teve uma importante transição do controle acionário passando do Grupo de origem da CPFL para a chinesa “*State Grid*”, maior empresa de energia elétrica do mundo [43].

Destaca-se ainda no modelo DDF com baixo desempenho a EDP, a partir de 2014, sendo que entre os anos de 2015 e 2017, não chega a 1%, e a explicação se deve a entrada em operação da Usina de PECÉM, afetando o consumo de energia através de queima de carvão, como se evidência no aumento de valores das emissões de gases poluentes, na Tabela II [44].

No que tange as DMUs eficientes, em ambos modelos CCR e DDF, destaca-se a ELETROPAULO, nos anos de 2013, 2014 e 2015, por apresentar baixas emissões de GEE e considerável número de consumidores, com os demais índices na média em relação às demais DMUs, de acordo com a Tabela VI.

A ELETROBRÁS apesar de apresentar altos números de emissões de GEE e de custo operacional, destaca-se como a empresa com maior quantidade de energia demandada em todos os anos, sendo eficiente pelo DDF e CCR, no ano de 2012 e apenas pelo CCR, no ano de 2013 por estar em ambos anos acima da média relativo ao número de consumidores, e eficiente também em 2017 pelo CCR por apresentar uma performance um pouco melhor relativo às emissões de GEE, tudo evidenciado através da Tabela VI.

As demais eficientes pelo CCR são: a CEMIG nos anos de 2012 e 2013, que apresenta considerável número de consumidores, conjugado com a quantidade de energia demandada, estando ambas variáveis acima da média em relação às DMUs, e na média relativo aos custos operacionais e a emissões de GEE, conforme se evidencia na Tabela VI, e finalmente a EDP em 2012, que apresenta a menor emissão de GEE e menor custo operacional em relação às DMUs, apesar de se encontrar bem abaixo da média, nas demais variáveis, como se verifica na Tabela VI.

Portanto, é possível usar a metodologia proposta para monitorar o desempenho de cada empresa durante um período (benchmarking interno), assim como para a análise comparativa entre diferentes empresas (benchmarking externo), vislumbrando pontos de melhoria para investimentos sustentáveis [45].

A análise dos relatórios de sustentabilidade das empresas estudadas, sugere que os resultados obtidos possam ter sofrido a influência de políticas públicas para o setor elétrico, de condições climáticas desfavoráveis e da crise econômica nacional, observados no período. Importante ressaltar a edição da Medida Provisória nº 579 publicada em 11 de setembro de 2012, posteriormente convertida na Lei nº 12.783 de 11 de Janeiro de 2013 [46], que teve como objetivo a redução dos valores das contas de energia em todas as classes de consumo de energia [47], provocando impacto nos segmentos do setor elétrico de geração, transmissão, distribuição e comercialização, ou seja, reflexo em suas operações.

É notório que entre os anos de 2012 e 2015, as precipitações ficaram abaixo da média histórica, acarretando redução de disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas, prejudicando a geração de energia, e consequentemente intensificando a geração de energia através das termoeletricas [48], o que intrinsecamente denota um aumento de emissão de gases, que precisa ser minimizado através de operações eficientes. Essa ‘crise hídrica’ encadeou ações governamentais para garantir o

pleno atendimento da carga dentro dos critérios preconizados nos procedimentos de rede do órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica, denominado Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [49].

V. CONCLUSÕES

Este estudo atingiu o seu objetivo, em avaliar a ecoeficiência de empresas do setor elétrico brasileiro, aplicando a metodologia DEA clássica CCR e o modelo DDF, com variáveis operacionais e ambiental, para obtenção das eficiências das DMUs, no âmbito da sustentabilidade. A busca por alternativas mais eficientes considerando critérios quantitativos visa obter maior qualidade sustentável, capaz de atender as questões ambientais para a sociedade atual e futura.

Verificou-se a pertinência da aplicação das metodologias aplicadas para a apuração do ordenamento de alternativas corporativas mais sustentáveis, permitindo a comparação inter-empresas, além de fornecer uma medida de referência, a fim de que as organizações que não alcançaram o nível de excelência possam rever a sua gestão, empregando melhores práticas. A aplicação do modelo DDF proporcionou a ampliação de metodologias para analisar o desempenho sustentável corporativo em relação ao DEA clássico CCR. Além disso, se mostrou uma ferramenta adequada e complementar, permitindo maior discriminação para análise e tomada de decisões gerenciais.

Assim, a pesquisa contribui com a proposição e aplicação de uma nova metodologia de medição de desempenho considerando questões operacionais e ambientais. Sob o ponto de vista prático, o estudo também propõe melhorias nas avaliações de ecoeficiência em empresas de energia, utilizando indicadores reais que devem ser monitorados, com o condão de colaborar para que as empresas possam tomar decisões estratégicas ou investirem recursos em prol do seu desenvolvimento sustentável.

Em pesquisas futuras seria interessante a realização de mais estudos de ecoeficiência provenientes de casos reais, envolvendo mais amostras, maior gama de indicadores a serem analisados, bem como considerando segmentações de mercado bem específicas e por um tempo mais longo. Também em futuros estudos poderão ser utilizados outros modelos de programação matemática, além dos empregados no presente trabalho, bem como a possibilidade de combinar com outros recursos de análise de dados, com a expectativa de continuar aprimorando os resultados relativo ao tema em apreço. Em paralelo espera-se que o poder público considere a utilização complementar da metodologia aplicada para avaliação do desempenho e fiscalização ambiental do setor privado, fazendo com que as empresas exerçam uma atitude mais proativa para a sustentabilidade.

VI. AGRADECIMENTOS

Muito se tem a agradecer ao apoio recebido da CAPES e da FINEP.

VII. REFERÊNCIAS

[1] M. K. Linnenluecke and A. Griffiths. "Firms and sustainability: Mapping the intellectual origins and structure of the corporate

- sustainability field". *Global Environmental Change*. vol. 23, pp. 382–391. 2013.
- [2] B. Perrot. "The sustainable organisation: blueprint for an integrated model" *Journal of Business Strategy*, vol. 35, Is 3, pp. 26 – 37. 2014.
- [3] R. G. G. Caiado, G. B. A. Lima, L. O. Gavião, O. L. G. Quelhas and F. F. Paschoalino. "Sustainability Analysis in Electrical Energy Companies by Similarity Technique to Ideal Solution". *IEEE Latin America Transactions*. vol. 15, Is4, pp. 675-681. 2017.
- [4] S.K. Sikdar. "Sustainable Development and Sustainability Metrics". *AIChE Journal*. vol. 49, no. 8, pp. 1928-1932. 2003.
- [5] J. Elkington. "Cannibals with Forks – The Triple Bottom Line of 21st Century Business". *Grabiola Island: New Society Publishers*. 1998.
- [6] K. Charmondusit, S. Phatarachaisakul and P. Prasertpong. "The quantitative eco-efficiency measurement for small and medium enterprise: a case study of wooden toy industry". *Clean Technology and Environmental Policy*. vol. 16, Is 5, pp 935-945. 2014.
- [7] H. Zhou, Y. Yang, Y. Chen and J. Zhu. "Data envelopment analysis application in sustainability: The origins development and future directions". *European Journal of Operational Research*, pp. 1–16. 2018.
- [8] ANEEL. "Custos Operacionais e Receitas Irrecuperáveis". http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2018806_Proret_Submod_2_2_v3.pdf. Acessado em 25/11/2018.
- [9] A. Charnes, W. Cooper and E. Rhodes. "Measuring the efficiency of decision making units". *European Journal of Operational Research*, vol. 2 Is 6 pp.429–444. 1978.
- [10] P. B. Tschaffon and L. A. Meza. "Assessing the Efficiency of the Electric Energy Distribution using Data Envelopment Analysis with undesirable outputs". *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 6, pp. 1027-1035. 2014.
- [11] A.J. Picazo-Tadeo, M. Beltrán-Esteve and J.A. Gómez-Limón, "Assessing eco-efficiency with directional distance functions". *European Journal of Operational Research*, 220(3), pp.798-809. 2012.
- [12] E. Monastyrenko. "Eco-efficiency outcomes of mergers and acquisitions in the European electricity industry". *Energy Policy*. pp. 258-277. 2017.
- [13] D. Pal and S. K. Mitra. "An application of the directional distance function with the number of accidents as an undesirable output to measure the technical efficiency of state road transport in India". *Transportation Research Part A: Policy And Practice*. vol. 93, pp. 1-12. 2016.
- [14] R. Oliveira, A.S. Camanho and A. Zanella. "Expanded eco-efficiency assessment of large mining firms". *Journal of Cleaner Production*, pp.2 364-2373. 2017.
- [15] L. G. Machado, J. C. C. B. S. de Mello and M. C. Roboredo. "Efficiency evaluation of brazilian electrical distributors using dea game and cluster analysis". *IEEE Latin America Transactions*, 14(11), pp. 4499-4505. 2016.
- [16] R. S. Constant and J. C. C. B. S. de Mello. "Brazilian Electricity Distributors Efficiency Index Based on Non Radial Efficiency". *IEEE Latin America Transactions*, 15(9), pp. 1657-1663. 2017.
- [17] G. N. Andrade, L. A. Alves, C. E. R. F. da Silva and J. C. C. B. S. de Mello. "Evaluating electricity distributors efficiency using self-organizing map and data envelopment analysis". *IEEE Latin America Transactions*, 12(8), pp. 1464-1472. 2014.
- [18] L. A. Alves and J. C. C. B. S. de Mello, "Weights Based Clustering In Data Envelopment Analysis Using Kohonen Neural Network: Na Application In Brazilian Electrical Sector", *IEEE Latin America Transactions* vol. 13, no. 1, 2015.
- [19] G. Diaz-Villavicencio, S.R. Didonet and A. Dodd. "Influencing factors of eco-efficient urban waste management: Evidence from Spanish municipalities". *Journal of Cleaner Production*, 164, pp.1486-1496. 2017.
- [20] L. Shao, X. Yu and C. Feng. "Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network data envelopment analysis". *Journal of Environmental Management*, pp. 551-560. 2019.
- [21] H. Scheel. "Undesirable outputs in efficiency valuations," *European Journal of Operational Research*, pp. 400-410. 2009.
- [22] E.G. Gomes and M.P.E. Lins. "Análise envoltória de dados com ganhos de soma zero na modelagem de outputs indesejáveis. In Embrapa Monitoramento por Satélite". *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO*, 36, 2004.
- [23] T. C. Koopmans. "Analysis of production as an efficient combination of activities". in *Activity Analysis of Production and Allocation*. Ed. John Wiley and Sons, pp. 33 – 97. 1951.

- [24] B. Golany and Y. Roll, "An application procedure for DEA". *Omega*. vol. 17, pp. 237-250. 1989.
- [25] W. W. Cooper, L. M. Seiford and K. Tone. "A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA". *Solver Software*. New York: Springer. 2007.
- [26] R. Fare, S. Grosskopf, D.W. Noh and W. Weber. "Characteristics of a polluting technology: theory and practice". *Journal of Econometrics*, pp. 469-492. 2005.
- [27] R. Chambers, Y. Chung and R. Färe. "Benefit and distance functions". *Journal of Economic Theory* 70, 407-419. 1996.
- [28] R. Färe and S. Grosskopf. "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: comment". *European Journal of Operational Research*, pp. 242-245. 2014.
- [29] M. Watanabe and K. Tanaka. "Efficiency analysis of Chinese industry: a directional distance function approach". *Energy policy*. 35(12), pp. 6323-6331. 2007.
- [30] Y.R. Chung, R. Färe and S. Grosskopf. "Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach". *J. Environ Manage*. 51, pp. 229-240. 1997.
- [31] R. Fare and S. Grosskopf. "Theory and Application of Directional Distance Functions". *Journal of Productivity Analysis*. vol. 13, pp. 93-103. 2000.
- [32] BMFBOVESPA. "Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE)" [online] Available: http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/produtos/indices/indices-de-sustentabilidade/indice-de-sustentabilidade-empresarial-ise.htm [acessado em 10/12/2018].
- [33] PACTO GLOBAL. "Quem somos: Rede Brasil do Pacto Global" [online] available: <http://pactoglobal.org.br/quem-somos/>. [acessado em 10/12/2018].
- [34] T. Jasmab and M. Pollit. "Benchmarking and regulation: international electricity experience". *Utilities Policy*. vol. 9, no. 3, pp. 107-130. 2000.
- [35] R. Pacudan and E. de Guzman. "Impact of energy efficiency policy to productive efficiency of electricity distribution industry in the Philippines". *Energy Economics*, vol. 24, pp. 41-54, 2002.
- [36] F. Alvarez and H. Rudnick. "Impact of Energy Efficiency Incentives Electricity Distribution Companies". *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 25, no. 4, 2010.
- [37] F.S. Costa, J. Gomes, C. Bayer and J. Mielniczuk. "Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera". *Ciência Rural*. vol.36, no. 2, pp. 693-700. 2006.
- [38] S. N. Dapper, C. Spohr and R.R. Zanini. "Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo". *Estudos Avançados*. vol.30, no. 86. 2014.
- [39] L. O. Gavião, L. A. Meza, G. B. Lima, A. P. Sant'Anna and J.C.S. de Mello. "Improving discrimination in efficiency analysis of bioethanol processes". *Journal of Cleaner Production*, pp.1525-1532. 2017
- [40] L. F. A. C. Senra, L. C. Nanci, J. C. C. B. S. de Mello and L. A. Meza "Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA". *Pesquisa Operacional*. vol. 27, no. 2, 2007.
- [41] L.A. Alves and J.C.C.B. Soares Mello. "Weights Based Clustering In Data Envelopment Analysis Using Kohonen Neural Network: Na Application In Brazilian Electrical Sector". *IEEE Latin America Transactions*. vol. 13, no. 1. 2015.
- [42] R Core Team. "R A Language and Environment for Statistical Computing". *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2017.
- [43] CPFL. "Relatório Anual 2017". [online] Available: <https://www.cpfl.com.br/institucional/relatorio-anual/Documents/relatorio-anual-2017.pdf> [acessado em 10/12/2018].
- [44] EDP. "Relatório Anual 2014". [online] Available: http://ri.edp.com.br/fck_temp/29_1/file/RS-EDP-2014-v9.pdf [acessado em 10/12/2018].
- [45] F.A.F.D.S. Cunha, E.M. de Oliveira, R.J. Orsato, M.C. Klotzle, F.L. Cyrino Oliveira and R.G.G.Caiado. "Can sustainable investments outperform traditional benchmarks? Evidence from global stock markets". *Business Strategy and the Environment*. 2019.
- [46] Brasil. Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013. "Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais e sobre a modicidade tarifária". [online] Available: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/Lei/L12783.htm [acessado em 10/12/2018].
- [47] ELETROBRÁS. "Relatório Anual e de Sustentabilidade 2012". [online] available: http://eletrobras.com/pt/SobreEletrobras/Relatorio_Anual_Sustentabilidade/2012/Relatorio-Anual-e-de-Sustentabilidade-Eletronbras-2012.pdf [acessado em 10/12/2018].
- [48] ELETROBRÁS. "Relatório Anual e de Sustentabilidade 2015". [online] available: http://eletrobras.com/pt/SobreEletrobras/Relatorio_Anual_Sustentabilidade/2015/Relatorio-Anual-e-de-Sustentabilidade-Eletronbras-2015.pdf [acessado em 10/12/2018]
- [49] PEN 2014. "Relatório do PEN 2014/2018: RE-3-0166/2014 - Plano da Operação Energética 2014/2018". *Sumário executivo da ONS*. [online] Available: http://www.ons.org.br/download/planejamento_eletrico/mensal/RE-3-0166-2014_PEN2014_SumarioExecutivo.pdf [acessado em 10/12/2018].



Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado nasceu na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Possui graduação em Engenharia de Produção, mestrado em Engenharia Civil e doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis pela UFF. Atualmente é pesquisador do Instituto Tecgraf da PUC-Rio. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, atuando principalmente nos temas: Sustentabilidade, Indústria 4.0, Manufatura Enxuta e Gestão Sustentável.



Mozart Caetano Heymann nasceu na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Possui graduação em Engenharia Civil pela UERJ, Engenharia Mecânica pela UGF e Direito pelo IMB (habilitado como Advogado). Especialização em Gerenciamento de Projetos pela UESA e Docência Superior pela FABES. Mestrado em Economia Empresarial pela UCAM e atualmente é doutorando em Engenharia de Produção pela UFF, atuando principalmente em gestão de processos, sustentabilidade e avaliação de risco.



Celso Luis Rey da Silveira, nasceu na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Possui graduação em Engenharia Química pela UFRJ e mestrado em Economia e Gestão da Inovação pela Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Tem experiência na área de Políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação, atuando na FINEP na avaliação de políticas.



Lidia Angulo Meza nasceu em Lima, Peru. Fez graduação em Pesquisa Operacional, na Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM (Peru), mestrado e doutorado em Engenharia de Produção, área de Concentração de Pesquisa Operacional, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Atualmente, é professora do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense. Artigos publicados nas áreas de Análise Envoltória de Dados e

Programação Linear Multiobjetivo e é bolsista de Produtividade e Pesquisa do CNPq.



Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas nasceu na cidade de São Gonçalo, Brasil. Graduação e Mestrado em Engenharia Civil pela UFF. Possui doutorado em Engenharia de Produção pela UFRJ Atualmente é Coordenador do Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis, professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção/UFF é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq .