

## **Análise da sustentabilidade da geração de eletricidade do Ceará**

### ***Sustainability analysis of Ceará's electricity generation***

### ***Análisis de la sostenibilidad de la generación de electricidad del Ceará***

### ***Analyse de la durabilité de la production d'électricité de l'état du Ceará au Brésil***

**André Ribeiro da Costa**  
andribeirocosta@gmail.com  
Universidade de Fortaleza - Unifor

**Bruna de Oliveira Busson**  
bruna.busson@yahoo.com.br  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Bruno de Alencar Carneiro**  
brunoaln@hotmail.com  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia do Maranhão  
- IFMA

**Cláudio Wagner Santos Lima**  
claudiowsl@gmail.com  
Instituto Federal do Ceará – IFCE

**Elcid Rodrigues de Oliveira Filho**  
elcidrdof@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Francisco Tarcísio G. L. V. Neto**  
tarcisiolv@gmail.com  
Instituto Tecnológico de  
Aeronáutica – ITA

**José Wilton F. do Nascimento**  
wilton@quantaconsultoria.com  
Universidade de Fortaleza – Unifor

**Marcello Anderson F. B. Lima**  
marcello@ifce.edu.br  
Centro de Ensino Tecnológico -  
ICET

**Paulo C. M. Carvalho**  
carvalho@dee.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Pedro Antoine Meireles Marsylle**  
pedro.marsylle@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Pedro Henrique Fonteles Dias**  
pedrohfdias18@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Pedro Hericson Machado Araujo**  
hericsonaraujo2013@gmail.com  
Instituto Federal do Ceará – IFCE

**Ronier Mesquita Lopes**  
roniermesquita@yahoo.com.br  
Universidade Federal do Ceará  
- UFC

**Wallason Farias de Souza**  
wallason.farias@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará  
-UFC

#### **Resumo**

A matriz elétrica cearense distingue-se da matriz elétrica brasileira por ser alicerçada, principalmente, em usinas eólicas e térmicas, que fornecem, juntas, 99% da produção de eletricidade do estado. Em relação à demanda por eletricidade do Ceará, do ano de 1981 até 2015, houve um crescimento de cerca de 747%, com um crescimento médio de 21,34% ao ano. O presente artigo tem como objetivo analisar o comportamento de índices de sustentabilidade para o setor de geração de energia elétrica cearense. Para isso, os seguintes multicritérios de análise da sustentabilidade na matriz elétrica são considerados: emissão de gases de efeito estufa; área imobilizada; uso de recursos de combustível; uso de água; morbidade; confiabilidade da geração e eficiência energética. A proposta desenvolvida divide os pesos dos multicritérios no aspecto social e técnico (40%) e nos parâmetros ambientais (60%). No Ceará, dentro dos parâmetros ambientais, o índice referente ao consumo de água, devido à inconstância de chuvas, recebeu a maior ponderação de impactos na sustentabilidade (30%). Segundo a metodologia proposta, o setor de geração de eletricidade do Ceará, em 2017, baseado principalmente em usinas termelétricas e eólicas, apresenta um índice de sustentabilidade de 1,351, que é 2,2 vezes acima do patamar de sustentabilidade brasileiro (índice de 0,614). Um elevado indicador de sustentabilidade demonstra baixa sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade.

**Palavras-chave:** Setor elétrico do Ceará. Sustentabilidade energética. Matriz de energia elétrica.

#### **Abstract**

Ceará's electricity matrix is distinguished from the Brazilian one because it is mainly based on wind and thermal plants that together supply 99% of the state's electricity production. Considering the demand for electricity in Ceará, from 1981 to 2015, there was an increase of about 747%, with an average growth of 21.34% per year. The present paper has the goal of analyzing the behavior of sustainability indices for the electric power generation sector of Ceará. For this, the following multi-criteria of sustainability analysis in the electric matrix are considered: emission of greenhouse gases; Immobilized area; Use of fuel resources; Water use; Morbidity; Reliability of energy generation and energy efficiency. The developed proposal divides the weights of the multicriteria in the social and technical aspect (40%) and in the environmental parameters (60%). In Ceará, considering the environmental parameters, the index referring to water consumption, due to the inconstancy of the rainy season, received the greatest impact on sustainability (30%). According to the proposed methodology, Ceará's electricity generation sector in 2017, based mainly on thermoelectric and wind farms, has a sustainability index of 1.351, which is 2.2 times above the Brazilian sustainability threshold (index of 0.614). A high sustainability index demonstrates a low sustainability of the electricity generation matrix.

**Keywords:** Ceará's electrical sector. Energy sustainability. Electricity matrix

#### **Resumen**

La matriz eléctrica cearense se distingue de la matriz eléctrica brasileña por anclarse, principalmente, en parques eólicos y térmicos, que ofrecen, juntas, 99% de la producción de electricidad del Estado. En relación a la demanda de electricidad del Ceará, del año de 1981 hasta 2015, hubo un crecimiento de 747%, con un aumento medio de 21,34% al año. Este artículo objetiva analizar el comportamiento de los índices de sostenibilidad para el sector de generación de energía eléctrica cearense. Para eso,

los siguientes multicriterios de análisis de la sostenibilidad en la matriz eléctrica son considerados: emisión de gases de efecto invernadero; área inmovilizada; utilización de recursos combustibles; uso del agua; morbilidad; fiabilidad de la generación y eficiencia energética. La propuesta desarrollada divide los pesos de los multicriterios en el ámbito social y técnico (40%) y en los parámetros ambientales (60%). En el Ceará, dentro de los parámetros ambientales, el índice referente al consumo del agua, debido a las lluvias inconstantes, recibió la mayor ponderación de impactos en la sostenibilidad (30%). Según la metodología propuesta, el sector de generación de electricidad del Ceará, en 2017, basado principalmente en parques termoeléctricos y eólicos, presenta un nivel de sostenibilidad de 1,351, que es 2,2 veces superior al nivel de sostenibilidad brasileño (índice de 0,614). Un alto indicador de sostenibilidad demuestra baja sostenibilidad de la matriz de generación de electricidad.

**Palabras-clave:** Sector eléctrico del Ceará. Sostenibilidad energética. Matriz de energía eléctrica.

### Résumé

La matrice électrique originaire du Ceará se distingue de la matrice électrique brésilienne, parce que la première est fondée, principalement, dans des usines éoliennes et thermiques, qui fournissent 99% de la production d'électricité de l'état. En ce qui concerne l'exigence par électricité au Ceará, de l'année de 1981 jusqu'à 2015, il a y eu une croissance d'environ 747%. C'est à dire, une croissance moyenne de 21.34% par an. Cet article a l'objectif d'analyser le comportement d'indices de durabilité chez le secteur de génération d'énergie électrique originaire du Ceará. Pour cela, les suivants multicritères d'analyse de la durabilité dans la matrice électrique sont considérés : émission de gaz à effet de serre ; zones immobilisées ; utilisation de ressources de combustible ; utilisation d'eau ; morbidité ; fiabilité de la génération et de l'efficacité énergétique. La proposition développée divise les poids des multicritères par l'aspect social et technique (40%) et par les paramètres environnementaux (60%). Au Ceará, dans les paramètres environnementaux, l'indice de consommation d'eau, en raison de l'inconstance des pluies, a reçu la pondération la plus élevée des impacts sur le développement durable (30 %). Selon la méthodologie proposée, le secteur de production d'électricité au Ceará, en 2017, basé principalement dans les centrales thermoélectriques et parcs éoliens, présente un indice de durabilité de 1,351, qui est de 2,2 fois au-dessus du niveau de durabilité brésilien ( index de 0,614). Un indicateur de durabilité élevée montre la faible durabilité de la matrice de production d'électricité.

**Mots-clés:** Secteur électrique au Ceará. Durabilité énergétique. Matrice d'énergie électrique.

## 1 Introdução

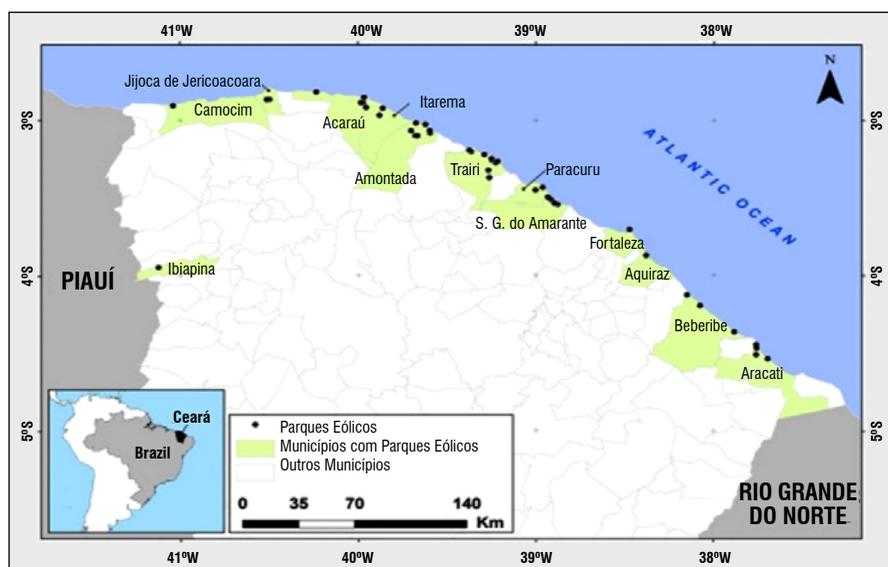
O aumento do efeito estufa, das doenças associadas à poluição e a degradação de biosistemas fomenta as discussões sobre a sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade mundial. No ano de 2014, 66,7% da produção de eletricidade do mundo proveio de fontes fósseis, hidroelétricas participaram com 16,4%, usinas nucleares com 10,6%, biocombustível e resíduos sólidos urbanos-RSU com 2,1%, e geotérmica, solar, eólica e outras fontes foram responsáveis pelos 4,2% restantes. A maior parte dessa eletricidade gerada foi destinada ao consumo dos setores industrial e residencial (IEA, 2016).

Na matriz elétrica brasileira, é possível notar um aumento proporcional da participação de fontes renováveis, apesar da redução da oferta hidráulica. Enquanto a capacidade instalada para geração de eletricidade em térmicas por derivados de petróleo cresceu apenas 4,6% de 2014 para 2015, em plantas solares e eólicas o crescimento foi, respectivamente, de 42,3% e 56,2% (EPE, 2016). Mesmo assim, em 2016, a matriz elétrica brasileira continuou tendo como principal colaboradora a fonte hídrica, com 64% da potência total instalada. No entanto, há impedimentos para novas hidroelétricas devido às longas distâncias entre os centros consumidores e as usinas e às limitações sociais e ambientais (MME, 2017). O setor elétrico brasileiro, com grande participação de hidrelétricas, tem sofrido com a baixa pluviosidade, o que tem provocado perda de confiabilidade. Para contornar a situação, houve aumento da quota de termelétricas, ocasionando a elevação de riscos ambientais e para a saúde, além da elevação do custo de produção de energia elétrica no país.

Focando a análise no Ceará (CE), o estado distingue-se da matriz elétrica brasileira. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) 2016 - ano base 2015, a geração de eletricidade cearense provém, principalmente, de parques eólicos e de termelétricas, contando com uma participação ínfima de hidrelétricas. Em 2015, no Ceará, as usinas eólicas forneceram

4.472 MWh e as térmicas 12.027 MWh, representando juntas 99% da geração de eletricidade do estado (EPE, 2016). A explicação para a participação insignificante de hidrelétricas no estado deve-se, principalmente, às irregulares precipitações, ocasionando a existência de rios intermitentes. O estado possui um potencial hidráulico total (excluindo mini e microgeração distribuída) de apenas 25 MW, muito baixo frente aos 247.465 MW do Brasil (EPE, 2016; FUNCEME, 2017). Sem poder contar com a fonte hídrica para garantir a geração de eletricidade cearense, como acontece na matriz elétrica brasileira, parques eólicos e termoelétricas são utilizados. A capacidade instalada de parques eólicos cresceu de 518,9 MW, em 2010, para 1,4 GW, em 2015, sendo instalados principalmente ao longo do litoral (Fig.1) (BRANNSTROM et al, 2017).

**Figura 1** – Distribuição de parques eólicos no Ceará, Brasil.



Fonte: Adaptado de Brannstrom et al (2017).

O rápido aumento do número de parques eólicos ao longo do litoral cearense tem provocado, em alguns casos, transtornos, como a degradação de dunas e lagoas, a poluição sonora nas circunvizinhanças dos aerogeradores e o impedimento da livre circulação da comunidade local (BRANNSTROM et al, 2017).

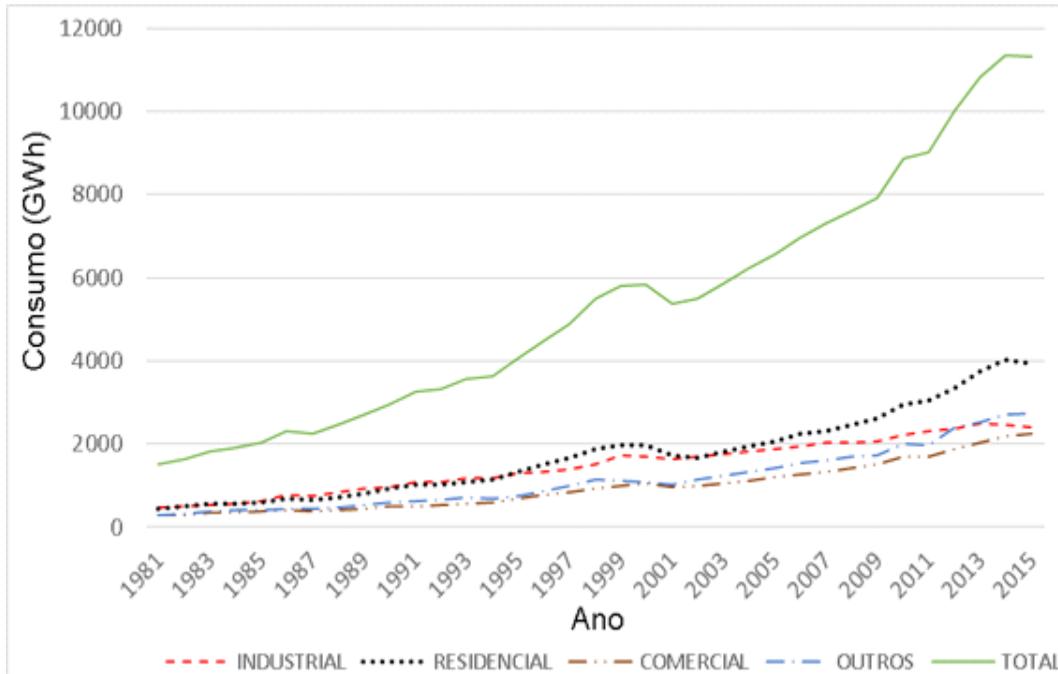
Em relação à produção de eletricidade a partir de termelétricas, o estado possui duas usinas:

- Energia Pecém, em São Gonçalo do Amarante, com potência de 720 MW e capacidade máxima de geração anual de 6.307 GWh (EDP, 2017). A usina produz mensalmente cerca de 550 toneladas de cinzas, subproduto da queima de carvão mineral, importado da Colômbia, que são destinadas à cimenteira cearense, contribuindo para redução da estocagem do resíduo. Depois do descarregamento no Porto do Pecém, o carvão mineral é levado por correia transportadora fechada, tipo tubular, com extensão de 12,5 km até a termelétrica. A correia transportadora tem sido alvo de ações e multas por parte do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente), por causa da fuligem e dos ruídos do equipamento, conforme matéria publicada no jornal Diário do Nordeste (CABRAL, 2016).
- Usina Termoceará, em Caucaia, com potência de 220 MW. Além do gás natural, que é o combustível prioritário, também pode operar utilizando óleo diesel, garantindo maior confiabilidade energética (PETROBRAS, 2014).

Durante a etapa de geração de energia elétrica a partir do carvão mineral, os principais efeitos estão associados com a emissão de material particulado. Entre as fontes primárias de energia, o carvão mineral é aquele com a maior quantidade de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub>, considerando tanto as emissões diretas quanto as indiretas. Consequentemente, o combustível ocupa o primeiro lugar como fonte de energia em número de mortes e doenças causadas durante a geração de eletricidade. Adicionalmente, tanto o carvão mineral quanto o gás natural são os maiores emissores de óxidos de nitrogênio e ainda possuem os riscos associados aos efeitos adversos relacionados ao lixo sólido e efeitos mistos relacionados às mudanças na atmosfera (MARKANDYA; WILKINSON, 2007).

No tocante ao consumo de eletricidade, o total passou de 1.516 GWh, no ano de 1981, para 11.325 GWh, no ano de 2015. A figura 2 apresenta a evolução do consumo de eletricidade no estado de 1981 a 2015. Percebe-se uma tendência de evolução uniforme, com exceção do ano de 2001, período de racionamento elétrico devido à baixa disponibilidade de água nos reservatórios das hidrelétricas. Outro ponto de destaque é o consumo residencial, que ultrapassou o consumo de eletricidade da indústria.

**Figura 2** – Evolução do consumo de eletricidade no Ceará (1981 – 2015). \*Os dados de 2003 a 2005 foram estimados.



Fonte: EPE (2016).

As tomadas de decisão sobre o planejamento energético envolvem diversos pontos de vista, os quais levam em consideração aspectos financeiros e socioambientais, provenientes da visão de interessados, empresários, agências de planejamento e sociedade organizada. Há necessidade de uma condução sistemática na definição de diretrizes norteadoras da elevação de disponibilidade energética para que seja alcançada de forma sustentável e que apresente resultados que atendam satisfatoriamente os pontos de vista dos diversos grupos interessados (MOREIRA et al, 2015).

Fatores como meio ambiente, interesses financeiros, confiabilidade do fornecimento de energia e políticas tarifárias influenciam na escolha de alternativas que buscam diminuir os impactos causados pela geração de eletricidade. Como não se pode restringir a análise a métodos biofísicos ou monetários, os impactos de diferentes parâmetros no setor podem ser estimados por indicadores técnicos baseados em análise multicritério (modelo da soma de pesos de diferentes critérios). Conforme essa metodologia, Moreira et al (2015) dividem os requisitos prioritários para a sustentabilidade em dimensões ambiental, social e técnica.

A partir dessa motivação, o presente artigo tem como objetivo analisar o comportamento de índices de sustentabilidade para o setor de geração de energia elétrica cearense, com foco nas fontes térmica e eólica, base da geração elétrica do estado. O estudo pode servir de base para trabalhos de planejamento energético em médio e longo prazo, contribuindo para tomadas de decisões que busquem o desenvolvimento do setor elétrico de forma sustentável.

## 2 Métodos e dados

Diante da problemática abordada, a avaliação de sustentabilidade da matriz energética cearense visa se tornar uma ferramenta para auxílio nas tomadas de decisão dos gestores do setor energético, aplicável a outros estados. Através de uma seleção dos métodos apropriados, conforme articulação de questões feita nos quadros 1, 2, 3 e 4, desenvolvido e adotado

por Zijp et al (2015), a Chave de Identificação de Avaliação de Sustentabilidade (CIAS) é a metodologia projetada para conduzir o usuário através de todas as escolhas necessárias de objetivo, escopo e limitações para o desenrolar de uma análise sobre a sustentabilidade de um objeto de estudo – no caso, o setor de geração de eletricidade cearense.

A CIAS é, em geral, um suporte para guiar a seleção de método de avaliação de sustentabilidade, com base na articulação de questões específicas resultantes em domínios voltados para o método de seleção e o design ou uso. Os domínios referentes ao método envolvem o Contorno do sistema/Inventário, a Avaliação de Impacto/Seleção do Tema e Agregação/Interpretação; enquanto os domínios relacionados ao uso são o Design do Método e as Restrições Organizacionais (ZIJP et al, 2015).

Tais dimensões estruturadas na chave são elaboradas para contribuir para a melhora da transparência na ligação entre a questão ambiental e o método de seleção; a coerência entre questões perguntadas e respostas fornecidas; e a consistência interna no projeto metodológico. Essa chave requer escolhas no escopo, premissas, valores e precisão, capazes de capturar a dinâmica e a complexidade da questão (demanda) e método (fornecimento) das avaliações de sustentabilidade. O planejamento proposto é baseado na observação de que todas as avaliações de sustentabilidade contenham: contornos de sistema/ferramentas, avaliação de impacto/seleção do tema, e agregação/interpretação.

Com base nisso, deve-se reportar os resultados da avaliação, referentes às escolhas explícitas feitas com articulação de questões, tornando os resultados mais fáceis de serem entendidos, interpretados e comparados com outras avaliações; e tornar a seleção de método transparente e reprodutível, reconhecendo que reflitam visões subjetivas de pesquisadores na definição de sustentabilidade e que podem divergir devido a isto.

Com relação ao problema proposto no artigo, os principais passos são:

- Identificar como a avaliação de sustentabilidade pode contribuir dentro dos procedimentos existentes de tomada de decisão do setor de geração de eletricidade do Ceará.
- Categorizar a problemática da avaliação de sustentabilidade ao identificar o objeto, escopo, condições espaciais e temporais, com a abordagem de CIAS (ZIJP et al, 2015).
- Identificar o mais apropriado conjunto de metodologias e dados baseados no problema definido.
- Conduzir a atribuição de pesos.
- Conduzir a avaliação de sustentabilidade do setor de geração de eletricidade do Ceará visando evidenciar sua deterioração.

## 2.1 Atributos da problemática de sustentabilidade

Ao identificar o objeto, o escopo e as restrições de espaço e tempo através da abordagem CIAS, a tabela 1 apresenta as conjecturas sob um foco espacial, temporal, observando o ciclo de vida e cadeia de suprimento da avaliação de sustentabilidade (MOREIRA et al, 2015).

**Tabela 1** – Configuração do problema de avaliação de sustentabilidade.

<b>Domínio: contornos do sistema e inventário</b>	
<b>Objeto</b>	Qual é o objeto em avaliação?
	Avaliar o setor de geração elétrica cearense.
<b>Foco espacial</b>	<b>Qual é o foco espacial da avaliação?</b>
	Ceará
<b>Foco temporal</b>	<b>Qual é o foco temporal da avaliação?</b>
	1 ano
<b>Pensamento de ciclo de vida</b>	<b>Quais partes do ciclo de vida e das cadeias de suprimentos estão incluídas na avaliação?</b>
	Ciclo de vida na fase de operação
<b>Contexto de avaliação</b>	<b>Quem utilizará os resultados e como estes serão aproveitados?</b>
	Tomadores de decisão, gestores municipais e estaduais, investidores do setor energético

Fonte: Adaptado de Moreira et al (2015).

A sustentabilidade do setor de produção de energia elétrica é definida através de um conjunto de temas ou critérios. Cada planta de geração contribui para o estado de sustentabilidade do setor, introduzindo mais ou menos danos ou benefícios

ao ambiente e à sociedade. Para identificar o conjunto mais apropriado de metodologias, a tabela 2 apresenta as questões e respostas conforme o foco sustentável, os problemas e os impactos espaciais e temporais do foco. É considerada a problemática proposta por diferentes estudos (MOREIRA et al, 2015).

**Tabela 2** – Identificação do conjunto mais apropriado de métodos e dados baseada no problema definido.

<b>Domínio: seleção de questões e avaliações de impacto</b>	
<b>Foco de sustentabilidade</b>	<b>O que será preservado?</b>
	O meio ambiente, o bem-estar social relacionado ao domínio e confiabilidade do setor de geração de eletricidade do Ceará
<b>Questões e critérios selecionados</b>	<b>Quais serão os temas ou critérios importantes?</b>
	Emissão de gases do efeito estufa, área imobilizada, perda da biodiversidade, uso de recursos naturais, consumo de água, agravo à saúde, operação normal e acidentes, confiabilidade do suprimento de eletricidade e eficiência energética
<b>Foco temporal do impacto</b>	<b>Qual é o foco temporal do impacto?</b>
	Médio e longo prazo
<b>Limites críticos para os impactos</b>	<b>Haverá limites críticos para os inúmeros impactos?</b>
	Escassez de água no estado em função das condições climáticas.

Fonte: Adaptado de Moreira et al (2015).

Dentro da lista, um leque de indagações é fornecido por diferentes estudos relativos à cobertura dos impactos biofísicos, econômicos, ambientais e sociais. Os índices ambientais utilizados pelo setor industrial englobam tanto dimensões ambientais quanto sociais, geralmente considerando a intensidade de eletricidade e recursos utilizados, com o inerente potencial de risco à saúde e ao meio ambiente, conservação das fontes, a extensão de reaproveitamento dos insumos e a eficiência energética. A morbidade, ou agravo à saúde, inclui doenças respiratórias, carcinogênicas e todas as que estão fortemente relacionadas à poluição, causadas pela mudança climática, pela emissão de gases tóxicos, a degradação da camada de ozônio e a radiação (MOREIRA et al, 2015).

Outra questão relevante para o setor elétrico cearense é o uso responsável de recursos hídricos, considerando a importância das termoeletricas no estado (PINHEIRO et al, 2016; KROL et al, 2011). Segundo matéria publicada no Jornal O POVO, 90% das térmicas do Nordeste estão em regiões de escassez hídrica. Durante o processo de resfriamento, as usinas demandam volumes grandes de água que poderiam abastecer municípios inteiros. A térmica de Pecém I, no Ceará, por exemplo, consome tanto quanto cidades de até 200 mil habitantes (CAVALCANTE, 2016).

As informações das plantas de produção de eletricidade do Ceará são advindas da revisão da literatura e relatórios governamentais. Na tabela 3 são apresentados os parâmetros correspondentes e as variáveis de projeto associadas a cada questão levantada na tab. 2. Nesse caso, são considerados somente os recursos relacionados ao consumo de combustível para a produção de eletricidade (MOREIRA et al., 2015).

**Tabela 3** – Critérios e variáveis ou parâmetros de projeto adotados conforme metodologia.

<b>Critério</b>	<b>Variável ou Parâmetro de Projeto</b>
<b>Mudança climática e efeito estufa</b>	Emissão de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /MWh)
<b>Área imobilizada</b>	Área imobilizada (m <sup>2</sup> .ano/MWh)
<b>Uso e processo de recursos de combustíveis</b>	Massa de combustível utilizado para gerar eletricidade (kg/MWh)
<b>Sustentabilidade dos recursos hídricos</b>	Consumo de água (m <sup>3</sup> /MWh)
<b>Agravo à saúde</b>	Morbidade humana esperada devido à poluição (morbidade/MWh)
<b>Confiabilidade da geração elétrica</b>	Produto entre o fator de capacidade e disponibilidade das fontes de geração
<b>Eficiência energética</b>	Eficiência energética

Fonte: Adaptado de Moreira et al (2015).

O conjunto de critérios inclui questões relacionadas à sustentabilidade do planeta, apresentadas na tabela 3. Os quatro primeiros parâmetros estão relacionados diretamente ao meio ambiente, nomeadamente a emissão de gases de efeito estufa, o dano à biodiversidade, o uso da água e o uso da terra através do desmatamento e degradação, todos ligados

ao ser humano e à tecnologia da planta de geração. Os parâmetros são definidos como uma relação entre a variável de análise e a eletricidade gerada. O foco é voltado para a problemática regional, com degradações de âmbito local e regional, tratadas em avaliações de impacto ambiental para licenciamento de novos projetos de capacidade (MOREIRA et al, 2015).

A emissão de gases de efeito estufa é representada pela emissão direta e indireta de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por unidade de eletricidade gerada, comparada entre os diversos tipos de usinas. A área imobilizada pelo empreendimento pode causar danos à biodiversidade e à população local. No estado, parques eólicos no litoral estão ligados ao desmatamento de mangues, soterramento de dunas, extinção e fragmentação de lagoas entre dunas (MEIRELES, 2011). Moreira et al (2015) utilizaram como parâmetro a área transformada (m<sup>2</sup>) e a área imobilizada ao longo do tempo (m<sup>2</sup>.ano) para calcular o uso direto e indireto de área para geração de eletricidade. O tempo de inatividade da área é tomado como o parâmetro associado desse critério.

O critério do uso e processo de recursos naturais é considerado porque a redução no consumo está diretamente ligada à diminuição de emissões de gases poluentes na atmosfera. Como a maior parte da energia elétrica gerada do Ceará é oriunda de parques eólicos e termelétricas, analisar o uso de combustíveis é importante, principalmente gás natural e carvão. Como parâmetro de estudo, é definida a massa de combustível por tipo de projeto na produção de eletricidade. No presente estudo, é analisada somente a quantidade utilizada diretamente na produção, não se levando em consideração os recursos utilizados indiretamente para a construção dos empreendimentos (MOREIRA et al, 2015).

A água é um dos recursos mais importantes para a população cearense, principalmente devido a uma bacia hidrográfica estadual que sofre de escassez periodicamente, impactando na vida de milhões de pessoas (PINHEIRO et al, 2016; KROL et al, 2011). Agravando esse quadro, as termelétricas existentes no estado consomem 762 litros de água por segundo em sua operação (DUTRA, 2016), que vem de açudes e reservatórios. Logo, o impacto associado ao consumo hídrico de uma planta de geração de eletricidade é um dos critérios definidos para a avaliação de sustentabilidade no presente estudo.

Em relação à dimensão social, a sociedade considera a boa saúde como um indicador importante para obemestar. Para representar tais preocupações sociais, é escolhida como parâmetro associado à morbidade, isto é, as doenças causadas pelo funcionamento normal das instalações de produção de eletricidade que emitem poluentes para o ambiente. Os gases poluentes emitidos pelas termelétricas podem causar doenças respiratórias e cancerígenas (MOREIRA et al, 2015). No caso de parques eólicos, o ruído emitido pelas turbinas pode causar estresse, impactar na qualidade do sono e de vida da população (MEIRELES, 2011).

A confiabilidade do tipo de geração de energia elétrica é um fator técnico que deve ser levado em consideração na avaliação de sustentabilidade, sendo definida como o produto entre o fator de capacidade e a disponibilidade da planta de geração. Fator de capacidade é a relação entre a produção efetiva e a produção nominal nesse mesmo período. Disponibilidade é a quantidade de tempo que uma planta está disponível para operar em um determinado período de tempo. A confiabilidade tem valores de 0 a 1; quanto mais próximo de 1, mais confiável é a planta de geração. (MOREIRA et al, 2015).

Eficiência energética é a relação entre a quantidade de energia elétrica gerada e quantidade de energia disponível para a geração. Quanto mais eficiente for uma planta, melhor será o uso dos recursos para serem transformados em energia elétrica.

## 2.2 Seleção dos métodos apropriados

A tabela 4 apresenta o conjunto de questões articuladas utilizadas para selecionar métodos apropriados para a avaliação. Como o conjunto de critérios envolve variáveis de diferentes disciplinas, não se pode restringir a análise a métodos biofísicos ou monetários. É escolhido então um método baseado em indicadores acoplados a análise multicritério, que é um método simples e direto para poder considerar o conjunto de critérios listados na tabela 2. Em princípio, o método de análise multicritério mantém a perspectiva de valor de diferentes questões e temas. Os impactos podem ser monitorados para evitar a invasão de valores críticos, de modo que todo o método possa ter uma forte perspectiva de sustentabilidade e ser menos reducionista. Para avaliar os impactos de diferentes variáveis ou parâmetros no setor de geração de eletricidade, são estimados indicadores técnicos baseados em análises de insumo-produto, que se encaixam bem com análises multicritério (MOREIRA et al, 2015). Sendo a quantidade de impacto social ou ambiental associado ao i-ésimo critério que surge do projeto da k-ésima usina para gerar uma dada quantidade de eletricidade  $\Delta E$ ; é definido como o indicador técnico que qualifica a quantidade do i-ésimo tipo de impacto causado pelo k-ésimo projeto por unidade de eletricidade gerada, isto é,

$$\sigma_i^k = \frac{\Delta S_i^k}{\Delta E} \quad (1)$$

Os indicadores técnicos possuem unidades de impacto por quantidade de eletricidade gerada, representando o ciclo de vida completo do processo. Se houver geração de eletricidade junto com outros produtos e serviços, os impactos devem ser divididos entre todos os produtos em conformidade. Os indicadores técnicos fornecem uma abordagem multidisciplinar, na qual o impacto de cada critério pode ser quantificado, permitindo, dessa maneira, uma perspectiva de sustentabilidade forte para a análise. Visando ser transparente com os investidores, o modelo de soma de peso é escolhido para realizar a análise multicritério, para construir indicadores compostos baseados em pesos para os diferentes critérios (MOREIRA et al, 2015).

**Tabela 4** – Evidência da avaliação de sustentabilidade do setor de geração de eletricidade em determinado tempo.

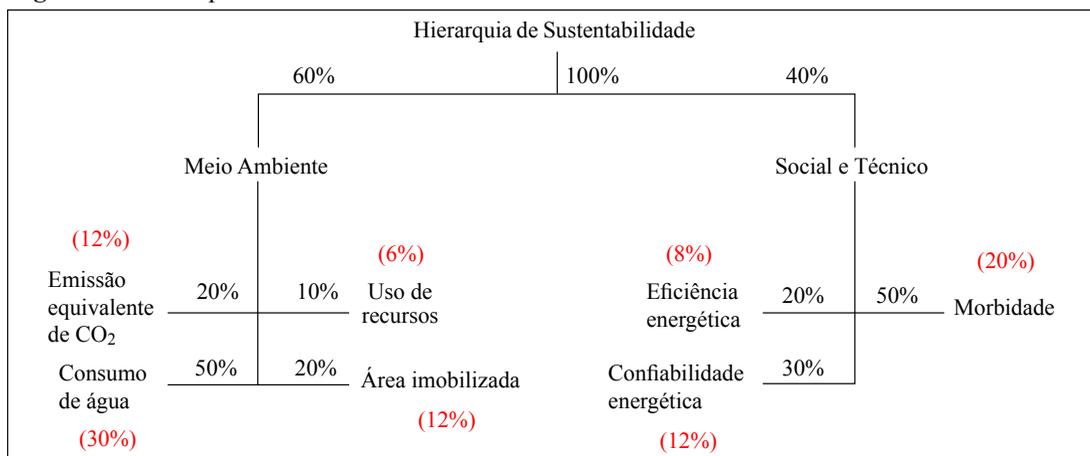
<b>Domínio: agregação e interpretação</b>	
<b>Meta de sustentabilidade</b>	<b>A meta de sustentabilidade é necessária?</b>
	Não há uma meta especificada, embora seja necessário reduzir os impactos.
<b>Visões sobre sustentabilidade e valor</b>	<b>Que visões de sustentabilidade são enfatizadas?</b>
	Projetos que contemplem preservação dos recursos hídricos e reuso da água utilizada durante todo o ciclo. Projetos com ações mitigadoras voltadas para cada impacto descrito na tabela 3.
<b>Multidisciplinaridade das informações</b>	<b>Como a informação de diferentes disciplinas contribui para o relatório?</b>
	a) em uma abordagem multidisciplinar, a contribuição individual de cada critério é considerada.
	b) em uma abordagem interdisciplinar simples, as variáveis ou critérios são compostos em um indicador de modo a admitir algumas compensações entre diferentes impactos.
	<b>Quais métodos para normalização e ponderação são considerados?</b>
	A normalização é requerida de modo a fazer a comparação de diferentes dados. A determinação de pesos estabelece a inter-relação entre as variáveis ou parâmetros

Fonte: Adaptado de Moreira et al (2015).

### 2.3 Análise multicritério acoplada com indicadores compostos

As prioridades de sustentabilidade são divididas nas dimensões ambiental (ecocêntrica) e social e técnica (antropocêntrica). No presente estudo, é atribuída maior prioridade às questões ambientais e biofísicas, principalmente ao uso da água. As ponderações foram definidas conforme a figura 3, destacando que a proposta não é a única e não há forma correta de fazer. Assim, o consumo de água (30%) e a morbidade (20%) ganham destaque na distribuição relativa de pesos, pois a primeira aborda a escassez periódica do recurso hídrico no estado e a segunda atinge diretamente a saúde pública. A seguir, são encontrados os itens: emissão equivalente de CO<sub>2</sub> (12%), devido à importância do tema mudanças climáticas no contexto mundial; área imobilizada (12%), devido ao impacto que parques eólicos têm causado na costa do Ceará; e confiabilidade energética (12%), considerando a importância do setor energético para o desenvolvimento do estado. Os itens de menor peso são eficiência energética (8%) e uso de recursos (6%), considerados importantes, mas que assumem posição secundária na presente análise.

**Figura 3** – Hierarquia de sustentabilidade.



Fonte: Adaptado de Moreira et al (2015).

Comparando com a análise feita para o Brasil encontrada em Moreira et al (2015), os outros aspectos tiveram redução de pesos como compensação pelo aumento do peso do parâmetro relacionado ao consumo de água. Seguindo a metodologia desenvolvida e aplicada por Moreira et al (2015), após definidos os indicadores técnicos e os pesos, é necessário se fazer uma normalização dos indicadores, para que se tornem adimensionais e se chegue ao indicador composto. O indicador composto para o impacto de um projeto específico em sustentabilidade leva em consideração tanto o peso arbitrado, de acordo com a relevância do i-ésimo impacto, como o indicador composto de cada usina. Com indicadores normalizados constantes, passa a haver uma combinação linear de cada impacto individual.

A análise providencia uma abordagem interdisciplinar simples, na qual critérios são compostos em um indicador para admitir compensações entre os diferentes impactos. Para verificar o quanto um projeto específico prejudica a sustentabilidade do setor de geração, um indicador para o estado de sustentabilidade de todo o setor de geração deve ser reconhecido. Em princípio, esse indicador pode ser representado pela soma dos indicadores de todas as unidades ponderadas pela eletricidade gerada por cada um por ano.

Para obter o indicador de impacto de um projeto específico, é necessário coletar dados de projetos individuais, e para obter o indicador do setor de geração cearense, é necessário coletar dados sobre todas as usinas existentes no estado. Foram utilizadas estimativas médias dos indicadores normalizados de diferentes fontes de energia e é pressuposto que esses valores médios são boas estimativas. A tabela 5 apresenta o levantamento de impactos, considerados relevantes, sobre as perspectivas social e ambiental, para sete recursos utilizados na produção de eletricidade do estado.

**Tabela 5** – Indicadores técnicos obtidos para diferentes fontes de energia elétrica do Ceará.

Tecnologia	$\sigma_1^k$ (kgC <sub>eq</sub> /MWh)	$\sigma_2^k$ (m <sup>2</sup> .ano/MWh)	$\sigma_3^k$ (kg/MWh)	$\sigma_4^k$ (m <sup>3</sup> /MWh)	$\sigma_5^k$ (morbidade/ TWh)	$\sigma_6^k$ (não-confiabilidade)	$\sigma_7^k$ (ineficiência)
Solar	0,09 <sup>a</sup>	193,48	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	0,89 <sup>d</sup>	0,15 <sup>b</sup>
Carvão	645 <sup>c</sup>	2,64	334 <sup>d</sup>	69 <sup>d</sup>	225 <sup>d</sup>	0,32 <sup>d</sup>	0,64 <sup>d</sup>
Eólica	20 <sup>d</sup>	1057,00	0 <sup>d</sup>	0,005 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	0,89 <sup>d</sup>	0,00 <sup>d</sup>
Gás natural	356 <sup>c</sup>	1,69	287 <sup>d</sup>	35,3 <sup>d</sup>	30 <sup>d</sup>	0,28 <sup>d</sup>	0,49 <sup>d</sup>
Hidrelétrica	31 <sup>d</sup>	430,23	0 <sup>d</sup>	26,5 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	0,75 <sup>d</sup>	0,00 <sup>d</sup>
Óleo combustível	616 <sup>c</sup>	3,42	250 <sup>d</sup>	31,5 <sup>d</sup>	161 <sup>d</sup>	0,47 <sup>d</sup>	0,63 <sup>d</sup>

Legenda:  $\sigma_1^j$  - emissão equivalente de CO<sub>2</sub>;  $\sigma_2^j$  - área imobilizada;  $\sigma_3^j$  - uso de recursos naturais;  $\sigma_4^j$  - uso de água;  $\sigma_5^j$  - morbidade; Fonte: <sup>a</sup> - PINTO (2016), <sup>b</sup> - MPX (2011), <sup>c</sup> - SEEG Brasil (2016), <sup>d</sup> - MOREIRA et al. (2015).

Os impactos da não-confiabilidade do suprimento de energia (Eq. 2) e da ineficiência de energia (Eq. 3) foram obtidos da *International Energy Agency* (IEA, 2016) e do fator de capacidade (Tab. 6) e dos dados de eficiência ( $\eta$ ) térmica, a partir de várias bibliografias compiladas por Cesaretti (2010).

$$\sigma_6^k = 1 - FCM \times \eta_{t\acute{e}rmica} \quad (2)$$

$$\sigma_7^k = 1 - \eta_{energ\acute{e}tica} \quad (3)$$

### 3 Resultados e discussão

A visão e o método de avaliação da sustentabilidade escolhida, ao acoplar indicadores compostos com análises multicritério, permitem confrontar a avaliação sob as perspectivas de sustentabilidade. Os resultados são apresentados e discutidos sob uma visão individualizada dos critérios na Seção 3.1 e, mesclando todos os impactos, conforme atribuição de ponderações da Fig.3 sob uma visão mitigadora na Seção 3.2. A Seção 3.3 detalha os impactos e contribuições de diferentes projetos implantados no CE.

#### 3.1 Estimativas dos indicadores técnicos para diferentes plantas

Os indicadores técnicos estimados para plantas de geração de eletricidade apresentados na tabela 5 foram calculados com base nos dados das tabelas 6 e 7.

**Tabela 6** – Centrais geradoras de eletricidade no Ceará.

Centrais de Energia Elétrica - Ceará								
Tipo	Fonte	Qtd	Pt (kW)	PTI (%)	FCM	EG (kWh)	Área (ha)	PEG
CGH	Hidrelétrica	2	1.263	0,04	0,50	632	2,4	0,03
CGE	Eólica	59	1.603.664	45,30	0,38	609.392	18.808,5	29,08
CGSFV	Solar	1	1.000	0,03	0,18	177	1,2	0,01
UT	Gás Natural	7	569.604	16,09	0,80	455.683	19,3	21,74
	Óleo	25	278.909	7,88	0,58	161.767	12,1	7,72
	Carvão	2	1.085.274	30,66	0,80	868.219	57,3	41,43
Total		96	3.539.714	100,00		2.095.870	18.900,8	100,00

Legenda: Qtd=Quantidade; Pt=Potência; PTI=Percentual da Potência Instalada; FCM=Fator de Capacidade Médio; EG=Eletricidade Gerada; PEG=Percentual da Eletricidade Gerada; CGH=Central Geradora Hidrelétrica; CGE=Central Geradora Eólica; CGSFV=Central Geradora Solar Fotovoltaica; UT=Usina Termelétrica.

Fonte: ANEEL (2017), Moreirael et al (2015) e Pinto (2016).

**Tabela 7** - Área imobilizada de diversas fontes de energia elétrica.

Fonte	Área (m²)	Energia Elétrica Gerada Média (MWh)	Ocupação (Anos)	Área imobilizada total (m².ano/MWh)
Solar	12.000	1.551	25	193,48
Carvão	573.000	7.605.600	35	2,64
Eólica	188.085.100	5.338.277	30	1.057,00
Gás Natural	192.898	3.991.785	35	1,69
Hidrelétrica	23.800	5.532	100	430,23
Óleo	121.071	1.417.081	40	3,42

Fonte: ANEEL (2017), Pinho e Galdino (2014), Moreira et al (2015) e Galdino (2016).

Os impactos ecocêntricos, como as áreas transformadas para várias fontes de energia e o tempo de vida útil utilizado para determinar o tempo de imobilização, constam da tabela 7, com os valores citados representando médias.

A tabela 8 apresenta a importância relativa do i-ésimo critério para a fonte de energia elétrica. Nessa tabela, só estão apontados os três indicadores técnicos mais relevantes de cada fonte.

**Tabela 8** – Impactos relevantes para as fontes de energia elétrica e índices relativos.

Indicador de impacto	Fontes					
	Solar	Carvão mineral	Eólica	Gás natural	Hidrelétrica	Óleo combustível
Emissão equivalente de carbono	-	0,278	0,009	0,154	-	0,266
Área imobilizada	0,083	-	0,451	-	0,183	-
Uso de água	-	0,765	-	0,391	0,294	0,349
Morbidade	-	0,649	-	-	-	0,464
Falta de confiabilidade	0,178	-	0,178	-	0,150	-
Ineficiência energética	0,037	-	-	0,123	-	-

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

A emissão de carbono em plantas de combustíveis fósseis apresenta diferentes índices devido à variedade de projetos e aplicações, como em cogeração nas siderúrgicas do estado. As outras fontes emitem CO<sub>2</sub>, especialmente na fase de construção e implantação (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). Os dados apresentados na Tabela 5 sobre a emissão de CO<sub>2</sub> apresentam como principais agentes de impacto os combustíveis fósseis e, em menor grau, a fotovoltaica (FV) e eólica, com números bem menores pelo fato de que só impactam indiretamente, isto é, ao longo de seu ciclo de vida e da etapa de implantação.

Para o quesito imobilização de áreas, a fonte eólica destaca-se negativamente pelo espaço ocupado pelos aerogeradores, pois precisam de uma maior área, devido aos espaçamentos mínimos obrigatórios entre as turbinas eólicas para geração de eletricidade. Como citado, em alguns casos são instalados em regiões interdunares, afetando o ecossistema, a movimentação dos bancos de areia e a formação de lagos nas restingas (MEIRELES, 2011), fato que agrava a problemática ambiental. Do contrário, as fontes derivadas de combustíveis fósseis, por conterem usinas mais compactas, exigem menor área para uma mesma produção de eletricidade. Já os painéis FV seguem a disposição de projetos de geração distribuída, em que muitos pontos estão instalados sobre telhados, portanto, o impacto é menor.

O indicador técnico para o uso de recursos nesta avaliação é restrito à utilização de combustível. Se consideradas cadeias completas de ciclo de vida e produção para esse critério, os resultados para eólica e FV seriam diferentes, pois a fundação das torres requer grandes quantidades de materiais de construção e a produção do silício de grau solar demanda muita energia para obtenção do necessário nível de pureza.

Quanto ao consumo de água durante o ciclo de vida, o carvão obtém o maior índice. Contudo, a gestão de recursos hídricos, não só nas termelétricas a carvão, como também a gás natural, depende das condições do processo de geração. No caso de ciclos combinados com alta eficiência térmica, ligados a outros processos, tais como a cogeração na Siderúrgica do Porto do Pecém, tem-se uma compensação em indicadores técnicos. Por sua vez, as fontes eólica e FV requerem pouca água para produção de eletricidade em comparação com as outras alternativas.

Os dados relativos à morbidade variam para as tecnologias baseadas na combustão devido às diferenças na sofisticação dos sistemas utilizados para controlar as emissões. As doenças respiratórias são a principal fonte de morbidade e as usinas movidas a combustíveis fósseis apresentam altos indicadores técnicos, pois comprometem a saúde de trabalhadores e moradores das circunvizinhanças, que são atingidos diretamente pela presença das usinas. O gás natural apresenta indicadores técnicos de morbidade intermediários. As fontes hidrelétricas, eólicas e FV apresentam indicadores de morbidade muito baixos.

As tecnologias com menor confiabilidade de energia são a FV e eólica, enquanto que as que apresentam maior nível são as termelétricas a carvão e a gás natural. Por outro lado, a eólica tem menor nível para ineficiência energética. Painéis FV apresentam índices um pouco acima de eólicas devido às limitações de conversão com a tecnologia presente.

### 3.2 Indicadores compostos

Com os dados da tabela 5, os indicadores normalizados para os efeitos de projetos típicos de geração para todas as fontes de energia foram obtidos através dos cálculos baseados na metodologia de Moreira et al (2015). A metodologia de cálculo para se encontrar os valores dos indicadores compostos segue os seguintes passos:

- Primeiramente, é feito a normalização de cada um dos sete indicadores técnicos, da fonte de energia (solar, carvão, óleo etc.). A normalização consiste na razão entre o indicador de uma determinada fonte de energia e a média desse mesmo indicador técnico de todas as fontes. Por exemplo, o valor normalizado do indicador técnico para o óleo é dado por

$$\sigma_{1normalizado}^{\acute{o}leo} = \frac{\sigma_1^{\acute{o}leo}}{\sigma_1^{solar} + \sigma_1^{carvão} + \sigma_1^{eólica} + \sigma_1^{g.natural} + \sigma_1^{hidrelétrica} + \sigma_1^{\acute{o}leo}} = 2,22 \quad (4)$$

- Em seguida, é calculado o indicador técnico ponderado, que consiste no valor normalizado multiplicado pelo peso atribuído ao indicador técnico. Por exemplo, ainda para o óleo, o valor ponderado do indicador técnico é dado por

$$\sigma_{1ponderado}^{\acute{o}leo} = (\sigma_{1normalizado}^{\acute{o}leo})(Peso_{\sigma_1}) = 0,27 \quad (5)$$

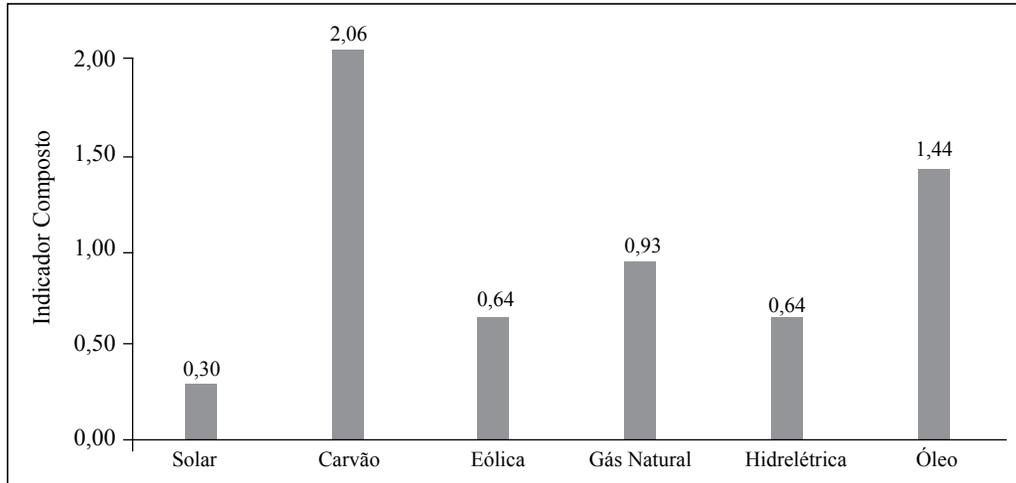
Neste caso, como mostrado na figura 3, é igual a 12%.

- Por último, é calculado o indicador composto para a determinada fonte de energia, que consiste na soma dos sete indicadores técnicos ponderados de uma fonte de energia. Continuando com o óleo como exemplo, tem-se que o valor do indicador composto para esta fonte é dado por

$$\sigma_{composto}^{\acute{o}leo} = \sum_{i=1}^7 (\sigma_{ponderado}^{\acute{o}leo}) = 1,44 \quad (6)$$

A figura 4 exibe o indicador composto para as diferentes fontes de energia. À exceção da maior relevância dada ao impacto de consumo de água, a distribuição de ponderações é bastante uniforme. As fontes FV, gás natural, hídrica e eólica são as alternativas com menores danos à sustentabilidade do setor de eletricidade, com indicadores compostos abaixo de 1,00.

**Figura 4** – Indicador composto para diferentes fontes de energia.



Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Os combustíveis fósseis apresentam grande variação, o que significa que seus indicadores compostos podem mudar de acordo com a tecnologia de conservação ambiental empregada por diferentes projetos, métodos de construção, materiais e condições de operação. As usinas de gás natural e carvão mineral produzem eletricidade, calor e são participantes dos processos na fabricação de outros produtos. Assim, o impacto do ciclo de vida para suas cadeias de produção completas deve ser dividido ao longo de sua vida útil.

A tabela 9 apresenta, a critério de comparação da sustentabilidade do setor de geração de eletricidade, o indicador composto para o setor de geração do Brasil, em 2016, conforme a metodologia de distribuição de pesos apresentada por Moreira et al (2015); e os indicadores compostos para o Brasil, em 2016, e o Ceará, em 2017, calculados segundo a distribuição de pesos proposta na figura 3. Os índices do Brasil, em 2016, tanto utilizando a distribuição de pesos de Moreira et al. (2015) como utilizando a distribuição do presente trabalho, apresentam valores próximos, indicando que as fontes são, em sua maior parte, renováveis. A matriz brasileira consome menor volume de água por MWh gerado e também tem menor participação de fontes responsáveis por emissão de particulados e outros poluentes. Portanto, com a ponderação priorizando o impacto do consumo de água, a diferença entre os dois indicadores brasileiros é de apenas 5,3%.

**Tabela 9** – Indicadores de sustentabilidade do setor de produção de eletricidade para o Brasil e para o Ceará.

Brasil 2016 (Moreira et al.)	Brasil 2016
0,583	0,614
Ceará 2017 (Moreira et al.)	Ceará 2017
1,331	1,351

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Segundo a metodologia proposta, o setor de geração de eletricidade do estado, em 2017, baseado principalmente em usinas termelétricas e eólicas, apresenta um índice de sustentabilidade 2,2 vezes acima do patamar de sustentabilidade brasileiro. Deve-se ressaltar que quanto maior o indicador de sustentabilidade menor é a sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade. Portanto, a matriz brasileira é mais sustentável do que a matriz cearense. Esse aspecto é bem

perceptível quando se observa que 41% da eletricidade gerada no CE (ANEEL, 2017) provêm do carvão mineral, enquanto, no Brasil, a participação dessa fonte é de apenas 2,3% (MOREIRA et al, 2015). Enquanto a matriz brasileira tem 76,7% de participação de fontes renováveis (hidrelétrica e eólica) (MOREIRA et al, 2015), que possuem baixos índices de morbidade, a matriz cearense tem participação de apenas 29% (dominado por energia eólica). Isto evidencia a grande lacuna de sustentabilidade do setor de geração do CE, ainda que a parcela de energia eólica na matriz elétrica seja considerável.

A sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade cearense é comprometida pelo consumo de água durante a produção de eletricidade, pela morbidade associada às fontes e pela área imobilizada. Os 762 L/s de água consumidos durante a produção de eletricidade das termelétricas do estado (DUTRA, 2016), juntamente com a importância traduzida em forma de peso relativo dada ao consumo de água, elevou de 0,459 (MOREIRA et al, 2015) para 0,765 o valor do índice correspondente para a fonte carvão mineral. Contudo, se houvesse o reuso de 80% das águas das termelétricas a carvão mineral, gás natural e óleo combustível, o indicador de sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade cearense seria reduzido para 1,182.

A morbidade associada com duas (carvão e óleo combustível) das três fontes das termelétricas possui indicadores, respectivamente, iguais a 0,649 e 0,464. O índice de área imobilizada, por sua vez, reduz seu valor de 0,676 para parques eólicos (MOREIRA et al, 2015) até 0,451, porque são responsáveis pela ocupação de mais de 180 km<sup>2</sup>, predominantemente, da faixa litorânea.

### **3.3 Discussão sobre projetos implantados**

A abordagem da construção de indicadores compostos permite uma comparação e avaliação mais consistente de diferentes alternativas de geração de eletricidade em relação ao conjunto escolhido de critérios de sustentabilidade. Os resultados da Tabela 8 identificam quais parâmetros são importantes para reduzir o indicador composto para diferentes fontes de energia elétrica. A importância relativa é menor para projetos de energia eólica e FV, seguidos por projetos de gás natural. As fontes de energia de carvão e óleo combustível apresentam números para a importância relativa de 2,06 e 1,44, respectivamente.

Carvão mineral, gás natural e óleo combustível, típicas fontes das termelétricas cearenses, apresentam os maiores índices relativos quanto à emissão de gás carbônico, grande responsável pelo aquecimento global e poluição do ar. Enquanto essas três fontes emitem CO<sub>2</sub> durante toda a cadeia de instalação, produção, transporte e operação, as energias eólica e solar emitem, principalmente, na fase de implantação.

Em relação ao consumo de água, os maiores índices foram apresentados pelo carvão mineral, gás natural e óleo combustível, todos utilizados como combustível nas termelétricas. O volume de água consumido pelas termelétricas durante a geração de eletricidade quando confrontado com o peso relativo dado ao recurso hídrico, na figura 3, retorna valores do parâmetro “Uso de água” que causam grande impacto no índice final de sustentabilidade da matriz do CE.

O carvão apresentou maior índice de importância relativa para morbidade devido aos diversos agravos causados pelo produto de sua combustão, bem como particulados oriundos do processo de produção, transporte e operação. Em seguida, encontra-se o índice de morbidade para o óleo, cujos agravos estão relacionados à poluição do ar pelos produtos de sua combustão, demonstrando a maior capacidade desses agentes como fontes poluidoras e, portanto, com sustentabilidade questionável.

Frente aos aspectos levantados, a geração FV apresenta-se como a fonte com menores índices relativos. Por se localizar no semiárido brasileiro, onde há a menor média anual de cobertura de nuvens do país (MARTINS et al, 2008), o CE tem grande potencial produtivo para o setor solar. A fonte solar tem grandes possibilidades de crescimento no mercado de energia elétrica cearense, principalmente após o advento da Resolução Normativa n° 482/2012, alterada pela Resolução Normativa n° 687/2015, que estabelece as condições gerais para uso de micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2012).

Durante o processo de tomada de decisão sobre a alocação de recursos para construção de novos projetos de geração é avaliada a confiabilidade dada pela fonte energética em relação ao suprimento de energia. Fontes como carvão mineral operam quase em tempo integral e fornecem energia elétrica durante todo o tempo, pois seu combustível não depende de horário, de estação do ano, nem de fenômenos da natureza. Sob o aspecto da falta de confiabilidade, as fontes solar e eólica apresentam os mesmos índices devido à inconstância no regime de ventos e na incidência de céu claro.

Contudo, uma redução para 21% na participação das termelétricas a carvão mineral na matriz cearense e o aumento proporcional da participação de renováveis, como eólica e solar, que passariam a contribuir com, respectivamente, 39%

e 10% da eletricidade gerada, causaria uma redução no índice de sustentabilidade de 1,351 para 1,023. A matriz cearense aumentaria sua sustentabilidade com o incremento na participação de energias renováveis, que possuem menores impactos no uso de água, emissão de CO<sub>2</sub> e morbidade. Contudo, a ponderação que levou aos valores de 1,351 para o Ceará, em 2017, e de 0,614 para o Brasil, em 2016, não é definitiva, pois permite outras abordagens que se adequem a cada realidade.

#### 4 Conclusão

A partir da hierarquia de sustentabilidade relacionada a uma distribuição de pesos, o indicador de sustentabilidade da matriz de geração de eletricidade cearense é calculado. Na hierarquia de sustentabilidade, o fator relacionado ao uso de água (peso relativo de 30%) recebe maior destaque pela situação hídrica crítica vivida pelo estado. Considerando o índice de uso de água, unido ao índice de morbidade (peso relativo de 20%) e a participação de 41% da produção de eletricidade advinda da termelétrica a carvão mineral do estado, elevou o indicador de sustentabilidade para 1,351.

Quando esse indicador é confrontado com o valor 0,614 encontrado para o Brasil, em 2016, há perceptível impacto causado pela produção por termelétricas no estado. As termelétricas no estado utilizam carvão mineral, gás natural ou óleo combustível, essas três fontes possuem indicadores, respectivamente, iguais a 2,06, 0,93 e 1,44, consequência das emissões de carbono resultantes da queima de combustíveis e problemas com morbidade causados por toda a cadeia de produção. A produção de eletricidade das térmicas ainda apresenta o agravante do consumo de 762 litros de água por segundo durante sua operação, comprometendo ainda mais seu indicador composto, o que pode ser atenuado pelo reuso da água. Contudo, as fontes térmicas apresentam maior confiabilidade e menor área imobilizada (1.485,67 MWh em 0,79 km<sup>2</sup>) em comparação com a fonte eólica.

No setor eólico, o consumo de água que influi no indicador ocorre durante o período de implantação dos parques. O índice de morbidade não pode ser mensurado, pois não há dados atrelando o funcionamento dos parques a doenças e mortes. Contudo, no Ceará, o uso da energia eólica já apresenta diversos problemas sociais, devido à instalação dos parques em áreas do litoral, ocupadas por comunidades tradicionais, e ambientais, como degradação de dunas e lagoas. Para não comprometer ainda mais a sustentabilidade de produção de energia elétrica no estado, os interessados devem fazer um planejamento energético que vise à inclusão mais intensa de plantas FV, principalmente após a Resolução Normativa n° 482/2012.

Uma redução na participação das termelétricas a carvão mineral na matriz cearense e um aumento proporcional da participação de renováveis, como eólica e solar, que passariam a contribuir com, respectivamente, 39% e 10% da eletricidade gerada, causaria uma redução no índice de sustentabilidade de 1,351 para 1,023. Sendo assim, haveria um aumento na sustentabilidade pela maior participação das fontes renováveis disponíveis. No entanto, a ponderação dada pela Hierarquia de Sustentabilidade, mostrada na figura 3, não é definitiva, pois outras abordagens mais adequadas às diferentes realidades da matriz energética local são permitidas.

#### Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 26 jun. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2017.
- BRANNSTROM, C. et al. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. Revista Científica: **Renewable and sustainable energy reviews**, Berlim. v. 67, p. 62-71, jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.047>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- CABRAL, B. IBAMA embarga correia transportadora do Cipp: Na terça-feira o órgão notificou a termelétrica Porto do Pecém Geração de Energia, empresa que opera a esteira. **Jornal Diário do Nordeste**, Fortaleza, 22 set. 2016. Caderno Negócios. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/ibama-embarga-correia-transportadora-do-cipp-1.1620981>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

CAVALCANTE, B. 90% das Térmicas do NE estão em Regiões de Escassez Hídrica: Estudo mostra que usinas chegam a consumir água suficiente para abastecer cidades de até 200 mil habitantes. **Jornal O POVO**, Fortaleza, 30 nov. 2016. Disponível em: <<https://www20.opovo.com.br/app/opovo/economia/2016/11/30/noticiasjornaleconomia,3672169/90-das-termicas-do-ne-estao-em-regioes-de-escassez-hidrica.shtml>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

CESARETTI, M. A.. **Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, Centro de Engenharias, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010. Disponível em: <[http://www.biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo\\_sophia=6227&midiaext=41604](http://www.biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=6227&midiaext=41604)>. Acesso em: 17 jul. 2017.

DUTRA, A. Desligar térmicas do CE não prejudica abastecimento: Desligamento representaria economia de 762 litros de água por segundo ao Ceará. Conforme Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), isso não prejudicaria abastecimento de energia, que poderia vir de outras regiões. **Jornal O POVO**, Fortaleza, 2 ago. 2016. Disponível em: <<http://www20.opovo.com.br/app/opovo/economia/2016/08/02/noticiasjornaleconomia,3642585/desligar-termicas-do-ce-nao-prejudica-abastecimento.shtml>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

EDP. **Geração**. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/Paginas/default.aspx#1>>. Acesso em: 15 maio 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>. Acesso em: 04 jun. 2017.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Sistema de Qualidade das Águas: Estado Trófico**: Portal Hidrológico do Ceará. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/reservatorios/qualidade/eutrofizacao>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

GALDINO, M. A. **Um ano e meio de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede do CEPEL**. 2005. p. 67-77. (Coletânea de Artigos - Energias Solar e Eólica, v. II). Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/artigo\\_FV\\_conectado\\_rede\\_Cepel.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/artigo_FV_conectado_rede_Cepel.pdf)>. Acesso em: 04 jun. 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: USP, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key Electricity Trends. Excerpt from**: Electricityinformation. 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

KROL, M. S. et al. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. **Water Resources Management**. Enschede, The Netherlands, v. 25, issue 2, p. 3017-2026, feb. 2011.

MARKANDYA, A.; WILKINSON, P. Energy and health 2: Electricity generation and health. **The Lancet**. Berlim. v. 370, p. 979-990. 2007. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61253-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61253-7)>. Acesso em: 04 jun. 2017.

MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil. Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, São José dos Campos, Brazil, v. 36, p. 2853-2864, ap, 2008.

MEIRELES, A. J. A. Socioenvironmental damages originated by wind farms in Brazilian Northeast dunes fields and criteria for the definition of locational alternatives. **Revue Franco-Brésilienne de Géographie**, São Paulo, v. 11, n. 11, mar, 2011. Disponível em: <<http://confins.revues.org/6970>>. Acesso em: 29 maio 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2016**. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

MOREIRA, J. M. L. et al. Sustainability deterioration of electricity generation in Brazil. **Energy Policy**, Santo Andre, v. 88, p. 334-346, dez. 2015.

MPX. **Usina Solar Tauá. 17 slides**. 2011. Disponível em: <<http://www.crea-rj.org.br/wp-content/uploads/2011/12/MPX-MAUR%C3%8DCIO-MOSZKOWCZ.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

PETROBRAS. **Termoceaná 2014**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/termeletricas/termoceanaria.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

PINHEIRO, E. A. R. et al. Importance of of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, Fortaleza, v. 9, p. 1313–1327, fev. 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. CEPTEL – DTE – CRESESEB. Rio de Janeiro; 2014.

PINTO, M. A. **Balanco e payback time de carbono de um sistema fotovoltaico**: planta solar jaiba. Brasília: Universidade de Brasília, 2016.

SEEG Brasil. **Tabela geral de emissões. 2016**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/tabela-geral-de-emissoes/>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

ZIJP, M. C. et al. An identification key for selecting methods for sustainability assessments. **Sustainability**, Holanda. v. 7, p. 2490–2515, mar. 2015.

## Sobre os autores

### André Ribeiro da Costa

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Fortaleza - UNIFOR (2009); graduação em Tecnólogo em Mecatrônica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE (2003) e curso técnico em Eletrotécnica pelo IFCE (1999). Pós-graduado em MBA em Gerenciamento de Projetos pela UNIFOR (2012) e MBA em Gestão de Negócios com Ênfase no Setor Elétrico pela UNIFOR (2014). Atualmente ocupa o cargo de Engenheiro Eletricista - Especialista da Companhia Energética do Ceará - COELCE (Empresa pertencente ao Grupo Europeu Enel). É coordenador do sistema de Gestão da Qualidade ISO 9001 e Gestão da Rotina (PDCA e SDCA) atuando fortemente na Gestão de Melhorias no setor elétrico.

### Bruna de Oliveira Busson

Graduada em Eng<sup>a</sup>. Mecânica pela Universidade Federal do Ceará - UFC. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Mecânica.

### Bruno de Alencar Carneiro

Graduado em Engenharia Mecânica Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) com período de intercâmbio em Hanyang University (Seul), participando como bolsista CAPES/CNPq no programa Ciência sem Fronteiras Coréia do Sul.

### Cláudio Wagner Santos Lima

Graduado em Mecatrônica industrial pelo Instituto Federal do Ceará – IFCE - Reitoria(2015), graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará - UFC(2016) e especialização em Gestão Pública pela Faculdade Internacional Signorelli(2016). Atualmente é Assistente Administrativo da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. Tem experiência na área de Engenharia de Energia, com ênfase em Fontes Renováveis de Energia.

### Elcid Rodrigues de Oliveira Filho

Engenheiro eletricista graduado pela Universidade Federal do Ceará - (UFC), formação complementar de Green Belt (Six Sigma), Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e mestrando em engenharia elétrica na UFC. Áreas de estudo, pesquisa e trabalho: geração de energia elétrica pela conversão eólio-elétrica e fotovoltaica, eficiência energética, fontes renováveis de energia elétrica, projetos elétricos de baixa e média tensão, análise e gestão da manutenção. Apto a ministrar cursos na área de engenharia elétrica. Pós-graduando na Universidade Federal do Ceará - UFC.

### Francisco Tarcísio G. L. V. Neto

Possui graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA - (2010). Atualmente é Engenheiro Fiscal de Intervenções em Poços na Petrobrás.

### José Wilton F. do Nascimento

Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade de Fortaleza – Unifor (2015), graduação em Engenharia de Produção pela Universidade de Fortaleza- Unifor (2009) e especialização em Gestão de Projetos pelo Instituto de Estudos, Pesquisas e Projetos da Universidade Estadual do Estado do Ceará – UECE (2011). Atualmente é Gerente de Planejamento da Quanta Consultoria Ltda., Coordenação de Planejamento da Quanta Consultoria Ltda. e Coordenação Técnica e Administrativa da Quanta Consultoria Ltda. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Engenharia do Produto.

**Marcello Anderson F. B. Lima**

Graduado em Tecnologia em Eletromecânica pelo Instituto Centro de Ensino Tecnológico - ICET (2007) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará - UFC (2016). Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal do Ceará e doutorando do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará.

**Paulo C. M. Carvalho**

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará – UFC - (1989), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba – UFPA (1992) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Paderborn, Alemanha (1997). Atualmente é professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Tem atividades de ensino, pesquisa e extensão nos seguintes temas: geração fotovoltaica, geração eólica e biodigestores. Coordena o Laboratório de Energias Alternativas da UFC. Bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq.

**Pedro Antoine Meireles Marsylle**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará – UFC (2011), pós-graduado em Engenharia e Segurança no Trabalho. Especialista em projetos de instalações industriais e prediais, consultoria em gestão de energia e eficiência energética. Atualmente presta consultoria em gestão e eficiência energética para rede de Supermercados Cometa, Grupo Tavares e pequenas construtoras.

**Pedro Henrique Fonteles Dias**

Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará – UFC, Mestrando Profissional em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade Continuada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), mestrando acadêmico no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará - UFC, com ênfase em energia solar fotovoltaica. Pós-graduando na Universidade Federal do Ceará - UFC.

**Pedro Hericson Machado Araújo**

Graduado em Ciência da Computação pelo Instituto Federal do Ceará - IFCE. Participou do Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados do departamento de Telemática deste Instituto. Suas pesquisas se concentram na área de Sistemas Embarcados com a utilização do microcomputador Raspberry Pi e o microcontrolador PIC. Pós-graduando na Universidade Federal do Ceará - UFC.

**Ronier Mesquita Lopes**

Engenheiro de Segurança do Trabalho e Engenheiro Químico, com graduação pela Universidade Federal do Ceará - UFC, em 2014. Durante a graduação, desenvolveu pesquisa de iniciação científica por três anos, sobre a catálise heterogênea na produção de biodiesel. Atua como professor temporário do governo do Estado do Ceará, nas Disciplinas de Física e Química. É como professor convidado na Escola Técnica de Maracanaú. Pós-graduando na Universidade Federal do Ceará - UFC.

**Wallason Farias de Souza**

Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará – UFC, com o projeto “Implicações socioambientais dos licenciamentos aplicados em empreendimentos de energia eólica no litoral do estado do Ceará - Brasil”. Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Ceará – UFC em 2016 com a dissertação Sensoriamento remoto e SIG aplicados à análise da evolução espaço temporal da linha de costa do município de Icapuí, Ceará - Brasil. Licenciado em Geografia pela Universidade Federal do Ceará – UFC em 2013. Também possui vínculos com as atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão do Laboratório de Geoprocessamento Universidade Federal do Ceará – UFC e do Laboratório de Geoecologia da Paisagem e Planejamento Ambiental Universidade Federal do Ceará – UFC. Pós-graduando na Universidade Federal do Ceará - UFC.

*Recebido em: 19/07/2017*

*Avaliado em: 06/02/2018*

*Aceito em: 05/04/2018*