UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TATIANA COSTA GUIMARAES TRINDADE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SUSTENTABILDADE PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CENÁRIO BRASILEIRO

São Carlos

2017

TATIANA COSTA GUIMARAES TRINDADE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SUSTENTABILDADE PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CENÁRIO BRASILEIRO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. João F. G. Oliveira

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T833a

Trindade, Tatiana Costa Guimaraes
Avaliação de desempenho em sustentabilidade para energias renováveis no cenário brasileiro / Tatiana Costa Guimaraes Trindade; orientador João Fernando Gomes Oliveira. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Análise de desempenho. 2. Indicadores de sustentabilidade. 3. Energias renováveis. 4. Matriz elétrica brasileira. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Tatiana Costa Guimarães Trindade**

Data da Defesa: 28/09/2017

Comissão Julgadora:	Resultado:
João Fernando Gomes de Oliveira (Orientador(a))	APROVADA
Aldo Roberto Ometto	APROVADA
Eraldo Jannone da Silva	APROVADA

Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

“Every noble work is at first impossible”

Thomas Carlyle

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha mãe, Cátia, que sempre esteve presente, me apoiando e me dando força para que eu fosse atrás dos meus sonhos e seguisse o caminho que eu acreditava ser o certo. Além de grande inspiração, ela me deu não somente as asas, mas me impulsionou à alçar voos cada vez mais distantes. Seu incentivo e carinho sempre me deram segurança para transpor qualquer barreira.

Agradeço também a minha irmã, Laura, minha avó, Zélia, minha madrinha, Cláudia, e meu pai, José Maria. Graças a eles cresci em um ambiente familiar de muito amor, incentivo e apoio incondicional. A presença deles foi imprescindível para todas as minhas conquistas.

Agradeço aos amigos que essa universidade me concedeu o prazer de encontrar. Graças a eles, todos os dias, dentro e fora da sala de aula, foram repletos de momentos inesquecíveis, pois todos eles serão pessoas inesquecíveis dentro do meu coração. Muito obrigada pelo apoio nos momentos difíceis e por todas as risadas nos momentos não tão difíceis assim.

Agradeço a meu orientador, João F. G. Oliveira, por gentilmente ter me guiado e me ajudado no decorrer desse trabalho, me dando sempre todo o suporte e inspiração necessários para sua execução.

Agradeço também a todos os professores, monitores, funcionários e colegas que sempre me transmitiram conhecimento, não somente para minha formação como Engenheira Ambiental, mas também como profissional e como ser humano.

Agradeço à Universidade de São Paulo, que após todos esses anos de graduação, se tornou mais do que uma universidade, mas um lar, de que nunca me esquecerei.

E por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação.

RESUMO

TRINDADE, T. C. G. **Avaliação de desempenho em sustentabilidade para energias renováveis no cenário brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2017.

Considerando que a energia é um elemento imprescindível para a manutenção e crescimento da sociedade moderna, a resposta para questão energética atual reside no desenvolvimento de um sistema que conte com múltiplas fontes renováveis, confiáveis e sustentáveis de energia. O Brasil, que possui matriz elétrica majoritariamente renovável, tem o privilégio de contar com diversas potencialidades de exploração dessas diferentes fontes, embora grande parte do aproveitamento energético resida nas usinas hidrelétricas. Com isso em mente, esse trabalho teve como principal intuito desenvolver uma análise de desempenho em sustentabilidade de três fontes renováveis de energia que estão atualmente em voga no país (eólica, solar, e hidrelétrica), sob a perspectiva de diferentes cenários de investidores. Essa análise foi realizada através do estudo de indicadores de sustentabilidade relacionados aos aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais dos sistemas energéticos avaliados. Como a disponibilidade das fontes renováveis é muito específica para cada local estudado, o trabalho teve como escopo dois Estados brasileiros com características distintas. Portanto, o estudo permitiu avaliar quais são as fontes energéticas renováveis mais vantajosas do ponto de vista da sustentabilidade, de acordo com os locais e perfil de investidores, sendo que a energia eólica apresentou grande destaque em dois terços dos cenários estudados.

Palavras-chaves: Análise de desempenho. Indicadores de sustentabilidade. Energias renováveis. Matriz elétrica brasileira.

ABSTRACT

TRINDADE, T. C. G. **Sustainability performance evaluation of renewable energies in Brazil**. 2017. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Considering that energy is essential for sustaining and developing the modern society, the answer for the current energy quest relies on the development of a system that comprises multiple renewable, reliable, and sustainable energy sources. Brazil, which presents a majoritarian renewable electricity grid, has the privilege of counting with several possibilities of exploring different sustainable sources, although the great part of its electricity comes from hydroelectric power plants. With that in mind, this work has the primary objective of developing a performance evaluation of three important Brazilian renewable sources (wind, solar, and hydro), by the perspective of different scenarios and investor profiles. This analysis was carried based on the study of sustainability indicators related to the technical, economic, social and environmental aspects of the evaluated energy systems. As the availability of renewable sources is very local specific, the scope of this work covered two Brazilian States with distinct characteristics. Therefore, this study allowed the evaluation of which renewable energy source is more adequate from the sustainability perspective, according to the analyzed scope and investor profile. As a result, the wind energy showed the best performance in two-thirds of the developed scenarios.

Key-words: Performance evaluation. Sustainability indicators. Renewable energies. Brazilian energy grid.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CENÁRIOS COMPARATIVOS DO CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA NOS ÚLTIMOS 15 ANOS.....28
FIGURA 2.2. PROJEÇÃO DA GERAÇÃO LÍQUIDA DE ELETRICIDADE POR FONTES DE ENERGIA, DE 2012 A 2040, EM TRILHÕES DE KWH.....29
FIGURA 2.3. EMISSÕES GLOBAIS DE CO2 RELACIONADAS AO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR TIPO DE COMBUSTÍVEIS, NO PERÍODO DE 1990-2014, EM BILHÕES DE TONELADAS. 30
FIGURA 2.4. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2015.....35
FIGURA 2.5. PARTICIPAÇÃO DOS DIFERENTES SETORES NO CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL EM 2015. 36
FIGURA 2.6. PARTICIPAÇÃO DE CADA FONTE GERADORA DE ELETRICIDADE NO TOTAL - JAN-SET/2016.....38
FIGURA 2.7. APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO NACIONAL POR REGIÃO.....43
FIGURA 2.8. PERFIL ESQUEMÁTICO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA COM RESERVATÓRIO DE ACUMULAÇÃO. 44
FIGURA 2.9. POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO P/ VENTO MÉDIO ANUAL IGUAL OU SUPERIOR A 7,0 M/S. 50
FIGURA 2.10. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA.....51
FIGURA 2.11. ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. 57
FIGURA 2.12. ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO.....59
FIGURA 4.1. MÉTODO PROPOSTO PARA A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA.....77
FIGURA 4.2. LOCALIZAÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS NO ESTADO DE SANTA CATARINA.....81
FIGURA 4.3. LOCALIZAÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS NO ESTADO DE SANTA CATARINA.....81
FIGURA 4.4. USINA HIDRELÉTRICA GARIBALDI – SC.....83
FIGURA 4.5. COMPLEXO EÓLICO ÁGUA DOCE – SC. 84
FIGURA 4.6. USINA SOLAR FOTOVOLTAICA TUBARÃO – SC.....85
FIGURA 4.7. AÇUDE CASTANHÃO – CE.....86
FIGURA 4.8. CENTRAL EÓLICA PRAIA FORMOSA, CAMOCIM – CE.....87
FIGURA 4.9. USINAS SOLAR FOTOVOLTAICA DE PINDORETAMA – CE. 88
FIGURA 4.10. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 1, SC.....111
FIGURA 4.11. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 1, CE. 111
FIGURA 4.12. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 2, SC.....112
FIGURA 4.13. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 2, CE. 112
FIGURA 4.14. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 3, SC.....113
FIGURA 4.15. GRÁFICO RADAR DE SUSTENTABILIDADE PARA O CENÁRIO 3, CE. 114

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. EMISSÃO DE GASES ESTUFA (CO_2) NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR DIFERENTES FONTES DE ENERGIA. 32
TABELA 2.2. PRINCIPAIS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE FONTES RENOVÁVEIS ENCONTRADOS NA LITERATURA 69
TABELA 4.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS EMPREENDIMENTOS AVALIADOS 80
TABELA 4.2. INDICADORES ECONÔMICOS DOS EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS 91
TABELA 4.3. INDICADORES TÉCNICOS DOS EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS 92
TABELA 4.4. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO INDICADOR "DISPONIBILIDADE DO RECURSO" 93
TABELA 4.5. INDICADORES AMBIENTAIS DOS EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS 94
TABELA 4.6. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIAIS 95
TABELA 4.7. INDICADORES SOCIAIS DOS EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS 97
TABELA 4.8. VALORES NORMALIZADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA SANTA CATARINA 100
TABELA 4.9. VALORES NORMALIZADOS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA O CEARÁ. 101
TABELA 4.10. CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA A MATRIZ DE PRIORIDADE 102
TABELA 4.11. MATRIZ DE PRIORIDADES 102
TABELA 4.12. MATRIZ DE PRIORIDADE PARA OS PESOS DO CN-MON. 104
TABELA 4.13. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DE SANTA CATARINA. 104
TABELA 4.14. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DO CEARÁ. 104
TABELA 4.15. MATRIZ DE PRIORIDADE PARA OS PESOS DO CN-ECO. 106
TABELA 4.16. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DE SANTA CATARINA. 106
TABELA 4.17. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DO CEARÁ. 106
TABELA 4.18. MATRIZ DE PRIORIDADE PARA OS PESOS DO CN-SUST. 108
TABELA 4.19. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DE SANTA CATARINA. 108
TABELA 4.20. SUB-ÍNDICES E IAS DOS EMPREENDIMENTOS DO CEARÁ. 108
TABELA 4.21. RANKING DE DESEMPENHO EM SUSTENTABILIDADE NOS CENÁRIOS AVALIADOS. 110
TABELA 5.1 EMPREENDIMENTOS DE MAIOR DESEMPENHO EM SUSTENTABILIDADE PARA DIFERENTES CENÁRIOS. ... 115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
AHP	Método de Análise Hierárquica
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRL	Real brasileiro
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CV	Célula Fotovoltaica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EOL	Central Geradora Eolielétrica
GRI	Global Report Iniciative
GWEC	Global Wind Energy Council
GW	Gigawatts
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAS	Índice Agregado de Sustentabilidade
IEA	International Energy Agency
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
kVA	kilovolt-ampère
kV	kilovolt
kW	kilowatt
kWh	kilowatt-hora
MJ	megajoules
MME	Ministério das Minas e Energia
MW	Megawatts
MWh	Megawatt-hora
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

PIB	Produto Interno Bruto
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SFA	Sistemas Fotovoltaicos Autônomos
SFC	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SIN	Sistema Elétrico Interligado Nacional
UF	Unidade Federativa
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
USD	Dólares Americanos
WEC	World Energy Council
WWF	Worldwide Fund for Nature

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 23
1.1 OBJETIVOS 25
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 26

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 27
2.1 PANORAMA DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL 27
2.1.1 Energias Não Renováveis 29
2.1.2 Energias Renováveis 31
2.1.3 Desafios para o Desenvolvimento de Energias Renováveis 32
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA 35
2.2.1 Retrospectiva da Produção e Consumo 37
2.2.2 Características do Sistema Elétrico 38
2.2.3 Programas e Incentivos 40
2.3 ENERGIA HIDRELÉTRICA 41
2.3.1 Potenciais e Geração Hidrelétrica no Brasil 42
2.3.2 Princípios Básicos da Geração Hidrelétrica 44
2.3.3 Sustentabilidade da Energia Hidrelétrica 46
2.4 ENERGIA EÓLICA 48
2.4.1 Potenciais e Geração de Energia Eólica no Brasil 48
2.4.2 Princípios Básicos da Geração de Energia Eólica 51
2.4.3 Sustentabilidade da Energia Eólica 52
2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA 55
2.5.1 Potenciais e Geração de Energia Fotovoltaica no Brasil 56
2.5.2 Princípios básicos da Geração de Energia Fotovoltaica 58
2.5.3 Sustentabilidade da Energia Fotovoltaica 60
2.6 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE 63

3. METODOLOGIA 71
3.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 71
3.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA 72
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLETA E DE ANÁLISE DE DADOS 72
3.4 LIMITAÇÕES DO MÉTODO 74

4. AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EM DUAS REGIÕES DO BRASIL 77
4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO PROJETO 78
4.2 DETALHAMENTO DOS CASOS AVALIADOS 80
4.2.1 UHE Garibaldi 82
4.2.2 EOL Complexo Eólico Água Doce 83
4.2.3 UFV Tubarão 85
4.2.4 PCH Açude Castanhão 86
4.2.5 EOL Praia Formosa 87
4.2.6 UFV Grupo Telles 88
4.3 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE 89
4.3.1 Indicadores Econômicos 89
4.3.2 Indicadores Técnicos 91
4.3.3 Indicadores Ambientais 94
4.3.4 Indicadores Sociais 96
4.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EM SUSTENTABILIDADE 98
4.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO AOS CASOS AVALIADOS 100
4.5.1 Avaliação do Cenário 1 (CN-MON) 103
4.5.2 Avaliação de Cenário 2 (CN-ECO) 105
4.5.3 Avaliação do Cenário 3 (CN-SUST) 107
4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS 110

5. DISCUSSÃO 115

6. CONCLUSÕES 121
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 122

7. BIBLIOGRAFIA 125

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DOS INDICADORES 135
APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DO IAS 139

1. Introdução

A energia é um elemento imprescindível para a manutenção e desenvolvimento da sociedade moderna. Da utilização do calor nas indústrias ao aquecimento de uma casa, da alimentação de um navio cargueiro ao abastecimento de uma motocicleta, da automação de todo um processo produtivo à iluminação de uma lâmpada de um escritório, o aproveitamento energético é parte essencial do nosso quotidiano nas mais variadas escalas e formas de utilização. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, aliado ao crescimento exorbitante da população mundial e ao surgimento de novas necessidades, um dos grandes desafios hoje encontrados é a incerteza da disponibilidade futura de energia frente à sua atual demanda, principalmente devido ao extenso uso de fontes não renováveis e a exploração em alta escala dos recursos fornecidos pelo planeta.

Desde o advento da Revolução Industrial, a energia passou a associar-se intrinsecamente à competitividade econômica dos países e à qualidade de vida de sua população. Nesse contexto, as economias que possuem maior acesso a recursos energéticos não onerosos e de baixo impacto ambiental garantem significativas vantagens de mercado. Por conseguinte, a busca por novas fontes energéticas renováveis reflete não somente a necessidade atual de diversificação da matriz energética mundial, mas também a inevitabilidade de se desenvolver alternativas que procurem reduzir os impactos causados pela geração, distribuição e consumo de energia. É nessa perspectiva que surge a discussão da viabilidade técnica, econômica, ambiental e social de implantação de sistemas de energia considerados renováveis.

Essa discussão alcançou relevância tão grande no contexto internacional, que o acesso a “Energia Limpa e Acessível” tornou-se um dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) listados na Agenda 2030, estabelecida pelos Estados-membro das Nações Unidas. A Agenda 2030 é resultado global do trabalho conjunto de governos e cidadãos que objetivam criar um novo modelo para acabar com a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar social, proteger o ambiente e combater as alterações climáticas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2017). Os

ODS estabelecidos, sucessores dos Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM) abrangem áreas muito amplas, mas interligadas, que vão desde o acesso equitativo à educação e a serviços de saúde de qualidade até a sustentabilidade energética e ambiental.

Mais especificamente, o ODS de número 7 estabelece que os países que adotarem o plano de ação estabelecido na Agenda devem "assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos" (ONU, 2017). Para que esse objetivo seja cumprido, até 2030, esses países devem aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global e reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas. Além disso, eles também devem promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia mais limpa (ONU, 2017).

O Brasil foi um dos 193 Estados-Membros da ONU adotar a Agenda 2030, trazendo atenção cada vez maior para a discussão e a busca por uma matriz energética mais limpa. No contexto nacional, nas próximas décadas, essa questão energética se apresenta para o país tanto como um desafio, como uma oportunidade (TOLMASQUIM, 2016). Desafio, pois o desenvolvimento econômico e social exigirá uma quantidade expressiva de energia e, consequentemente, um elevado grau de segurança e de sustentabilidade energética. Oportunidade, pois o país apresenta condições muito interessantes de recursos energéticos renováveis e de tecnologia para aproveitar a energia de suas diversas riquezas naturais (TOLMASQUIM, 2016).

1.1 Objetivos

Tendo em vista a problemática elucidada anteriormente, **esse trabalho visa desenvolver uma avaliação de desempenho em sustentabilidade de diferentes empreendimentos de produção de energia renovável no Brasil**, de modo a identificar as potencialidades de diferentes regiões e a avaliar a sustentabilidade de cada sistema. Para isso, será realizado um estudo de caso de usinas de geração de eletricidade a partir de diferentes fontes renováveis de energia em distintas regiões do país, objetivando determinar quais empreendimentos apresentam melhor desempenho, de acordo com o cenário avaliado. Essa análise será realizada com base em indicadores de desempenho determinados a partir do levantamento das características dos empreendimentos estudados e da literatura existente.

Portanto, os principais objetivos secundários do trabalho, são:

- Determinar as fontes energéticas renováveis de maior interesse para o estudo;
- Delimitar o escopo espacial da avaliação;
- Definir os diferentes indicadores de interesse para a análise;
- Calcular um Índice único e adimensional de desempenho em sustentabilidade para cada sistema de produção de energia avaliado;
- Desenvolver diferentes cenários de investimento;
- Apontar a fonte energética de melhor desempenho em cada cenário;
- Realizar uma análise comparativa, intra e interestadual, da sustentabilidade das diferentes fontes energéticas avaliadas.

1.2 Estrutura do Trabalho

Além da introdução, apresentada no presente capítulo, este trabalho possui mais cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** contém a revisão bibliográfica, que reúne as informações necessárias para melhor compreensão das fontes energéticas renováveis que serão avaliadas, elucidando também os principais indicadores de sustentabilidade que geralmente são utilizados nessa avaliação;
- **Capítulo 3:** descreve a metodologia do trabalho, ou seja, delimita o problema proposto e como ele será abordado;
- **Capítulo 4:** apresenta detalhadamente a execução da análise de desempenho em sustentabilidade dos casos estudados, seguindo a metodologia proposta;
- **Capítulo 5:** compreende a discussão detalhada e análise crítica dos resultados obtidos no capitulo anterior;
- **Capítulo 6:** traz as conclusões globais do trabalho, indicando as principais reflexões e resultados obtidos, propondo também ideias para futuras pesquisas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Panorama da Matriz Energética Mundial

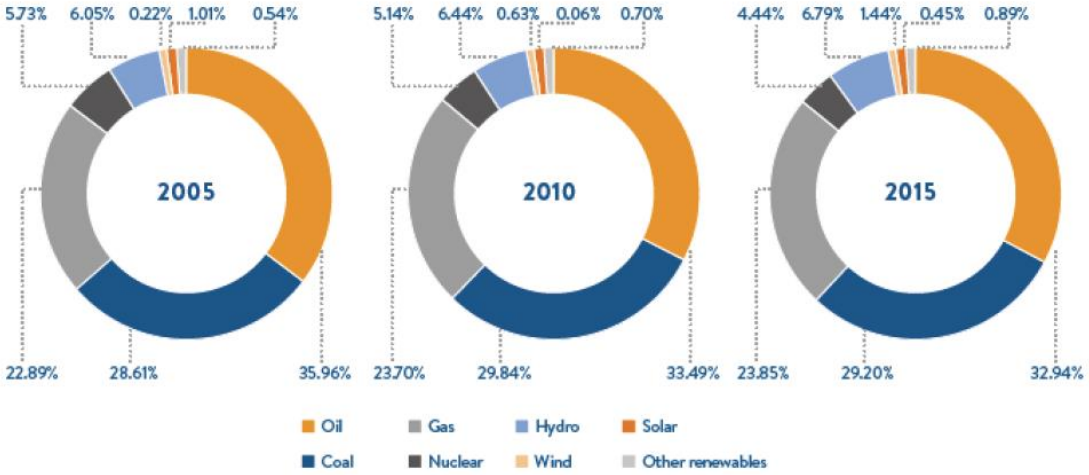
A demanda energética mundial para o desenvolvimento socioeconômico e melhoria da qualidade de vida da população cresce significativamente devido aos avanços tecnológicos e científicos da sociedade humana. Desde cerca de 1850, o consumo mundial de combustíveis fósseis (carvão, óleo e gás) vem dominando a oferta energética global, levando a um rápido crescimento nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo que o consumo dessas fontes não renováveis de energia é responsável pela maioria das emissões antropogênicas globais desses gases (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2012).

Entretanto, desde a última virada de século, o mundo vem presenciando uma mudança imprescedente no consumo de fontes energéticas. O setor energético transforma-se de modo significativo, devido, principalmente, ao aumento inesperado de investimentos no mercado de energias renováveis, novas capacidades tecnológicas e taxas de crescimento elevadas dos países em desenvolvimento (WORLD ENERGY COUNCIL - WEC, 2016). Consequentemente, presenciamos cada vez mais um rápido desenvolvimento de fontes não convencionais e na evolução tecnológica para exploração de todas as formas de energia. Isso vem contribuindo para a queda dos preços e aumentado a desassociação entre os conceitos de crescimento econômico e emissões de GEE. Dessa forma, a maioria dos países está buscando alcançar maior diversificação de sua matriz energética, com um crescimento no setor privado de microprodução energética e uma evolução no sistema de geração descentralizada (WEC, 2016).

Como pode ser observado na Figura 2.1, embora as fontes de energia não renováveis continuem representando quase 90% do consumo mundial de energia primária, é possível perceber uma tendência de queda na utilização de combustíveis fósseis nos últimos 15 anos, principalmente em relação ao carvão e óleo combustível.

Além disso, a participação das fontes renováveis, com destaque às energias solar e hidráulica, começa a ganhar mais espaço na matriz energética mundial.

Figura 2.1. Cenários comparativos do consumo mundial de energia primária nos últimos 15 anos.

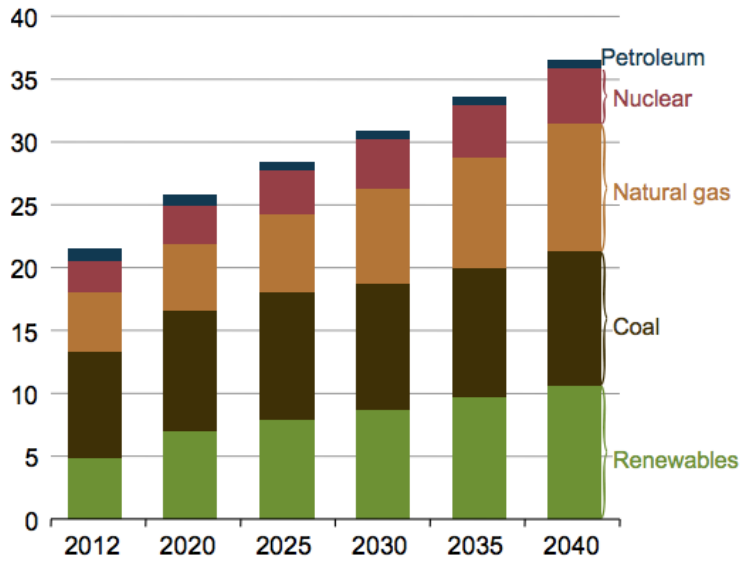


Fonte: WEC (2016).

É importante lembrar que o setor energético representa um investimento a longo prazo, fazendo com que a possibilidade de mudanças possa levar consideravelmente um longo tempo. Logo, quando o quadro mundial de consumo de energia primária é comparado nos últimos 15 anos, as mudanças percebidas podem ser consideradas, de fato, marcantes (WEC, 2016). Com isso em vista, embora a evolução do setor renovável de energia ainda não corresponda a expectativas otimistas, ele definitivamente está crescendo rapidamente, representando inegável importância no panorama energético mundial.

Os esforços de transição para uma matriz energética mais limpa ocorrem principalmente no setor de produção de energia elétrica. Considerando que esse setor é responsável por cerca de 25% da emissões globais de GEE, esses ainda sutis avanços, que podem ser observados na Figura 2.2, são considerados muito positivos (WEC, 2016).

Figura 2.2. Projeção da Geração líquida de eletricidade por fontes de energia, de 2012 a 2040, em trilhões de kWh.



Fonte: International Energy Agency (2016).

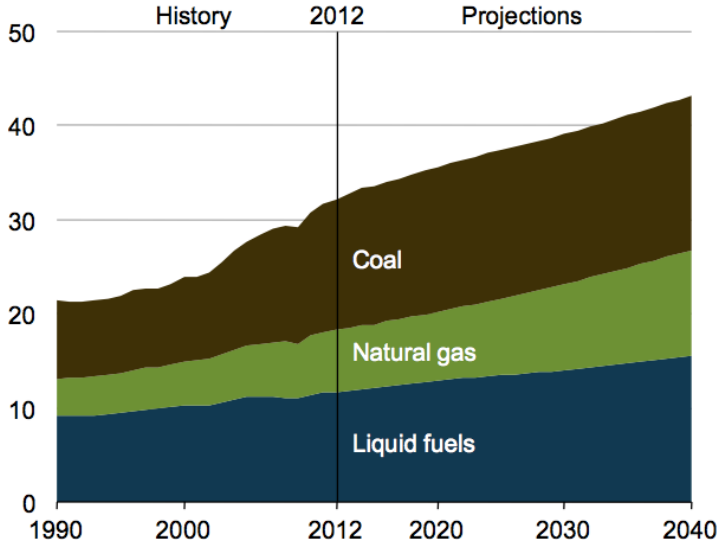
Com relação aos outros setores, ainda segundo o WEC (2016), o setor de transportes consume aproximadamente 27% da demanda energética mundial, sendo responsável por 14% das emissões; o setor industrial representa 28% da demanda, emitindo cerca de 21% dos gases estufa; e o setor de construção consome aproximadamente 34% da demanda de energia, emitindo apenas 6% dos GEE. Desse modo, considerando que o processo de urbanização está ocorrendo de forma cada vez mais intensa em todo o globo, é possível perceber a grande importância do desenvolvimento de tecnologias e inovação no aproveitamento de fontes renováveis em áreas urbanas, representando peças-chave no alcance da sustentabilidade a longo prazo do sistema global de energia (WEC, 2016).

2.1.1 Energias Não Renováveis

Também conhecidas como fontes “convencionais” de energia, são consideradas fontes “não renováveis” aquelas que são limitadas, demoram muito tempo para se repor e não estão distribuídas geograficamente de forma homogênea. Conforme comentado

anteriormente, essas fontes predominam historicamente no panorama energético mundial, principalmente em relação aos combustíveis fósseis. O consumo dessas fontes é o principal responsável pela emissão antropogênica de GEE nos últimos séculos, sendo apontadas como uma das principais responsáveis pelas mudanças climáticas e aquecimento global (WEC, 2016). Na Figura 2.3 é possível observar a emissão histórica de GEE devido a utilização de combustíveis fósseis desde a década de 90, e como as projeções futuras preveem seu significativo aumento nas próximas décadas:

Figura 2.3. Emissões globais de CO2 relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis por tipo de combustíveis, no período de 1990-2014, em bilhões de toneladas.



Fonte: International Energy Agency (2016).

Faz-se necessário esclarecer que uma fonte energética “não renovável” não é necessariamente uma fonte “não limpa” de energia, com relação a emissão de CO_2, entre outros gases de efeito estufa. Como exceção, temos a energia nuclear, que não é considerada renovável, mas sua exploração emite consideravelmente menos GEE que os combustíveis fósseis, embora existam ressalvas com relação aos resíduos radioativos gerados em consequência a sua utilização.

Segundo Dunlap (2015) nos últimos 150 anos, os combustíveis fósseis foram e continuam sendo componentes majoritários do nosso consumo de energia. Durante esse período, substancial fração das reservas desses foram exploradas. Como não se tratam de

fontes nem renováveis, nem limpas, nossa significativa dependência desses combustíveis, sua depleção, e o considerável impacto de sua utilização no meio ambiente, levam à imprescindível necessidade de implementação de fontes renováveis de energia e diversificação da matriz energética mundial (DUNLAP, 2015).

2.1.2 Energias Renováveis

Também conhecidas como fontes alternativas de energia, são consideradas "fontes renováveis" aquelas que não se apoiam em recursos que são reconhecidamente limitados e cuja exploração não causa sua depleção e esgotamento (VILLALVA, 2015). Como as energias alternativas provêm de ciclos de conversão da radiação solar, fonte natural primária de grande parte da energia disponível na Terra (PACHECO, 2006), elas são vistas geralmente como menos impactantes que os combustíveis fósseis. Essas fontes podem ser exploradas em suas mais diversas formas, como energia solar, eólica, hidráulica, geotérmica, maremotriz, oceânica e da biomassa.

Segundo IPCC (2012), essas fontes alternativas apresentam não somente o potencial de desacelerar os efeitos do aquecimento global, como também podem oferecer benefícios muito mais amplos. Se essas fontes forem implementadas propriamente, elas podem contribuir para o desenvolvimento econômico e social, o maior acesso a energia, um sistema elétrico mais seguro, e reduzir os impactos negativos do sistema energético no ambiente e na saúde da população (IPCC, 2012).

Consequentemente, o conceito de energia limpa é geralmente associado às fontes renováveis, pois, em comparação com os combustíveis fósseis, apresentam reduzidos impactos ambientais e praticamente não originam resíduos ou emissões de poluentes (VILLALVA, 2015). Entretanto, embora todas as energias renováveis produzam menos CO_2 por unidade de energia elétrica produzida, nenhuma delas é realmente livre da emissão de gás carbônico (DUNLAP, 2015).

Na Tabela 2.1 é possível observar as emissões de GEE (kg CO_2) relacionadas à produção de 1 MWh de energia através de fontes renováveis e não renováveis. Por meio de sua análise, é possível perceber que, embora muito menos significativas que as

emissões atribuídas uso de combustíveis fósseis, as fontes renováveis não podem ser consideradas “carbon free”.

Tabela 2.1. Emissão de gases estufa (CO_2) na geração de eletricidade por diferentes fontes de energia.

Recurso Energético	CO_2 (kg/MWh)
Carvão	955
Gás Natural	430
Solar Fotovoltaica	98-167
Eólica	7-9
Geotérmica	7-9
Hidroelétrica	3,6-11,6

Fonte: Adaptado de Dunlap (2015).

Além das emissões, a implementação de sistemas de aproveitamento de fontes alternativas pode também causar diferentes impactos, como o alagamento de extensas áreas, no caso da energia hidrelétrica, ou a geração de ruídos audíveis e modificação de paisagens, no caso da energia eólica. Entretanto, de modo geral, apesar dos impactos, as fontes renováveis de energia são consideravelmente mais limpas e seguras quando comparadas às fontes convencionais.

2.1.3 Desafios para o Desenvolvimento de Energias Renováveis

Embora estejamos a caminho da transição da matriz energética global para um sistema mais sustentável e menos impactante, o aproveitamento efetivo das fontes renováveis de energia ainda encontra alguns desafios. De acordo com IPCC (2012), apesar do notável progresso no setor, a velocidade do aprimoramento em direção ao uso de energias mais limpas é bem mais lenta que a necessária para atender as metas para significativas reduções nas emissões. Dunlap (2015) aponta os seguintes principais desafios para o desenvolvimento sustentável do uso de energia: **disponibilidade dos recursos necessários**; **fatores econômicos e tecnológicos**; **fatores socioambientais**; **fatores políticos**; e **integração dos sistemas**.

A disponibilidade dos recursos necessários está relacionada não somente à fonte energética em si, mas também a outros recursos necessários para explorá-la. A possibilidade de exploração de determinada fonte renovável depende fortemente do local e da quantidade de energia disponível, assim como da capacidade de explorar esse recurso (DUNLAP, 2015). Embora fontes de energia como a solar e eólica estejam presentes praticamente em quase todas as partes do mundo, há também fontes que são dependentes de condições muito específicas e podem ser exploradas apenas pontualmente, como a energia maremotriz e geotérmica. Além disso, no caso do aproveitamento, por exemplo, da energia solar, é necessária a produção de painéis solares, que necessitam de grande quantidade dos seguintes elementos químicos: Cobre, Índio, Gálio e Selênio. Esses elementos são relativamente raros e caros, além de que sua quantidade atualmente produzida é milhares de vez menor do que a que seria necessária para produzir células solares suficientes para suprir as necessidades mundiais de consumo de energia (BLEIWAS, 2010).

Além das limitações relacionadas a disponibilidade dos recursos, o aproveitamento de fontes renováveis também encontra algumas barreiras tecnológicas e econômicas. O desenvolvimento tecnológico de energias renováveis visa alcançar maior qualidade e eficiência na produção e na aplicação dos recursos energéticos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2008). Porém, embora a tecnologia apropriada para explorar certa fonte energética exista, apenas isso não é suficiente para garantir que o seu aproveitamento seja ambientalmente ou economicamente viável. No caso do Brasil, embora o potencial de exploração das fontes renováveis de energia seja grande, ainda há barreiras de mercado a serem transpostas para implementação comercial de diversas das tecnologias de geração sustentáveis (WORLD WIDE FUND FOR NATURE - WWF, 2012). A escala de produção dessas tecnologias representa grandes desafios para a efetividade de sua implantação, devido ao tamanho reduzido dos parques industriais e à existência de um mercado restrito, fazendo com que os custos de instalação permaneçam altos.

O desenvolvimento de empreendimentos de energia renovável também é responsável por impactos socioambientais, conforme comentado anteriormente, fator que, em alguns casos, impede ou atrasa sua execução. Além disso, a aceitação do público

ainda representa um desafio, independente da fonte de energia envolvida, devido principalmente à atitude de “não no meu quintal” com relação à implementação de empreendimentos energéticos (IPCC, 2012). Os principais impactos socioambientais relacionados às fontes de energia que serão estudadas nesse trabalho serão comentados com mais detalhes posteriormente.

Já com relação aos fatores políticos, a implementação de muitos empreendimentos renováveis depende de incentivos políticos e econômicos para se efetivar. Políticas públicas de investimento no setor de energias renováveis podem ajudar a combater barreiras de mercado e diminuir os custos de produção de eletricidade. Além disso, incentivos fiscais e de crédito são imprescindíveis para a ampliação do mercado e para mais investimentos privados no setor (WWF, 2012). Metas de aumento na participação dessas fontes na matriz energética também devem ser estabelecidas no planejamento regional, estadual e federal para que sejam executadas de modo eficaz

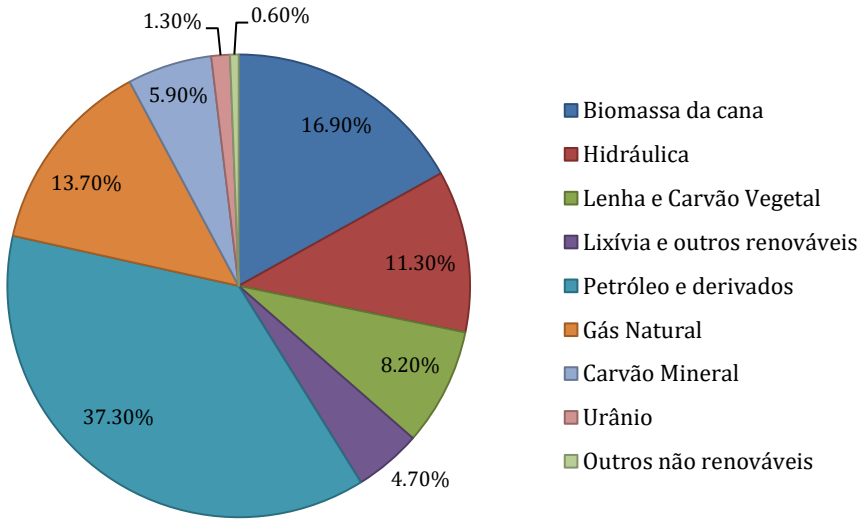
Por fim, os benefícios da utilização de fontes renováveis são amplamente reconhecidos. Porém, sua natureza variável e muitas vezes imprevisível apresenta barreiras à integração em grande escala na rede de energia convencional. Alguns desses desafios são: flutuações da energia gerada; reduzida garantia de potência e de energia; impacto na regulação da tensão na rede local; e a estabilidade do sistema elétrico. As particularidades dos sistemas de energia representam grande parte do problema, pois precisam equilibrar as relações de oferta e demanda elétrica, devido à limitação das soluções de armazenamento de eletricidade (RODRIGUES JÚNIOR, 2011).

2.2 Matriz Energética Brasileira

A matriz energética brasileira possui característica singular que a diferencia da matriz energética mundial: ela apresenta uma significativa participação de fontes renováveis de energia. Principalmente no que diz respeito a sua geração de energia elétrica, nossa matriz é caracterizada por uma predominância na participação da energia hidrelétrica na geração de eletricidade.

Como pode ser observado na Figura 2.4, dados de 2015 mostram que a matriz energética nacional é atualmente composta por cerca de 41% de fontes renováveis, como a biomassa da cana (16,9%), a energia hidrelétrica (11,3%), e lenha e carvão vegetal (8,2%), entre outros (4,7%). Já as fontes não renováveis são responsáveis por cerca de 59% da matriz, estando entre elas o petróleo (37,3%), o gás natural (13,7%), o carvão mineral (5,9%), o urânio (1,3%), entre outras (0,6%) (BRASIL, 2016).

Figura 2.4. Matriz energética brasileira em 2015.



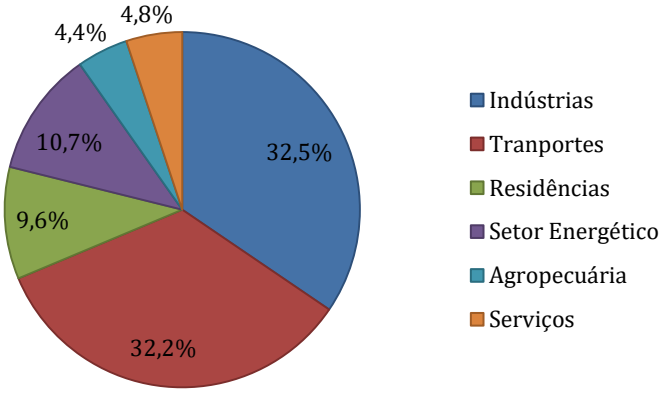
Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

Dentre a categoria “lixívia e outros renováveis”, responsável por 4,7% da energia nacional, pode ser observada a seguinte partição das diferentes fontes que a compõem: 55,7% lixívia, 22,0% biodiesel, 13,1% eólica, e 8,1% outras biomassas, além de energia

solar, biogás e gás industrial de carvão vegetal, que contribuem com menos de 1% na categoria (BRASIL, 2016). Apesar participação ainda modesta, as fontes de energia solar, eólica e biogás vêm ganhando espaço no mercado brasileiro nos últimos anos, mostrando-se cada vez mais importantes para a questão energética nacional.

No Brasil, em 2015, a oferta interna de energia alcançou uma magnitude total de 300 mega toneladas equivalentes de petróleo ou Mtep e cerca de 261 Mtep foram consumidos, sendo que a produção industrial, transporte de carga e mobilidade responderam por aproximadamente 65% desse consumo (BRASIL, 2016). A distribuição da participação de cada setor no consumo energia interna ofertada no Brasil em 2015 está representada na Figura 2.5.

Figura 2.5. Participação dos diferentes setores no consumo de energia no Brasil em 2015.



Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

No setor industrial, a eletricidade, o bagaço de cana, o carvão mineral e o gás natural têm destaque de uso, sendo que o consumo de energias renováveis nesse setor representou 54% do total no ano de 2015 (BRASIL, 2016). No setor de transporte, os combustíveis fósseis, como a gasolina e óleo diesel são os mais utilizados, embora o etanol também mereça destaque. Sobre o consumo residencial, apesar de ter sido registrado um aumento no uso de lenha e de gás liquefeito de petróleo (GLP), a eletricidade ainda lidera esse consumo, com 45,2% do total em 2015, porém com queda registrada de 0,7% em comparação ao ano de 2014 (BRASIL, 2016).

2.2.1 Retrospectiva da Produção e Consumo

O uso e a produção de eletricidade no Brasil iniciaram-se no final doséculo XIX, com a construção da primeira usina hidrelétrica no país, na cidade de Diamantina, em 1883. No mesmo ano, D. Pedro II, concedeu a Thomas Edison a permissão para introduzir no país aparelhos destinados à utilização da luz elétrica, inaugurando na cidade de Campos o primeiro serviço público municipal de energia elétrica do Brasil (JANUZZI, 2007).

Ao longo do século XX, o Brasil presenciou um intenso desenvolvimento econômico, que desencadeou uma crescente demanda por energia primária. Segundo Tosmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), entre os fatores que determinaram esse crescimento, alinham-se um considerável processo de industrialização, com a instalação de plantas muito intensivas energeticamente, e uma significativa expansão demográfica, acompanhada de rápido aumento da taxa de urbanização.

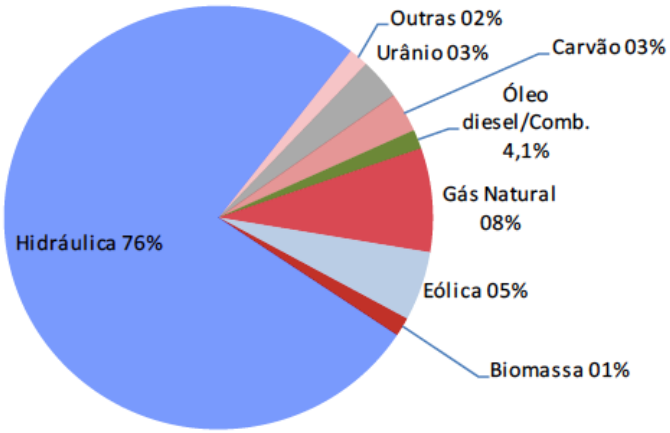
No início do século XXI, o país vivenciou a maior crise de energia elétrica de sua história, acentuada por crises hídricas em algumas regiões, levando à criação de programas de racionamento em diversas partes do território e à instituição da Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (GCE). De 2000 a 2010, diversas usinas foram construídas, sendo elas hidrelétricas, termelétricas e de produção de biodiesel. Em adição, foram criadas novas empresas e programas como o ‘Luz para Todos’ e o Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), que visava aumentar a participação da produção de eletricidade com base em fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

O modelo de estatização dos empreendimentos energéticos, estabelecido nas décadas de 1940 a 1960, fez com que grande parte da produção e distribuição de eletricidade, petróleo e gás, ficasse sob responsabilidade de governos estaduais e federal, antes dominadas por empresas de capital estrangeiro (GOMES; VIEIRA, 2009). Porém, apesar do modelo ter sido considerado bem sucedido até a década de 1980, ele desencadeou problemas na matriz energética brasileira, como o estabelecimento de tarifas artificialmente baixas para a eletricidade e a construção de usinas hidrelétricas apenas para benefícios políticos, não apresentando garantia de retorno econômico com bom valor de custo/benefício (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

2.2.2 Características do Sistema Elétrico

O sistema brasileiro de geração de energia elétrica pode ser dividido em três diferentes componentes: Geração, Transmissão e Distribuição. No que diz respeito à geração, atualmente, mais 75% de nossa matriz elétrica têm origem em fontes renováveis, sendo os empreendimentos hidrelétricos responsáveis por quase 80% de toda a geração em 2016 (ANEEL, 2016b), como pode ser observado na Figura 2.6.

Figura 2.6. Participação de cada Fonte Geradora de Eletricidade no total - Jan-Set/2016.



Fonte: ANEEL (2016b).

Embora a fonte com maior impacto na expansão da matriz de energia elétrica do Brasil continue sendo a fonte hídrica, o país tem apresentado, na última década, um considerável crescimento na participação de outras fontes renováveis, principalmente com relação a energia eólica e à biomassa, que já representam, respectivamente, 5% e 1% na geração de nossa eletricidade (ANEEL, 2016b). Até outubro de 2016, mais de 2.000 MW de potência instalada de Usinas Eólicas (EOL) entraram em operação comercial e cerca de 350 empreendimentos estão em implantação, sendo previstos aproximadamente 350 MW para entrada em operação, e mais de 8.000 MW entre 2017 e 2021 (ANEEL, 2016b).

Já com relação à transmissão, segundo ANEEL (2008), mais de 90 mil quilômetros de linhas de transmissão cruzam o Brasil. Essas são operadas por 64 concessionárias, que são responsáveis pela implantação e operação da rede, que possui

uma grande extensão devido, principalmente, à localização distante das fontes de geração aos grandes centros consumidores. A rede brasileira é dividida em dois grandes blocos: o Sistema Interligado Nacional, que cobre grande parte do território, e os Sistemas Isolados, predominantes na região norte (ANEEL, 2008).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é operado e coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e composto pelas empresas da região sul, sudeste, centro-oeste, nordeste e parte da região norte, apresentando 96,6% da capacidade do país de produção de eletricidade (ANEEL, 2008), sendo um sistema de tamanho e características únicas, com forte predominância de usinas hidrelétricas. Já os Sistemas Isolados atendem aos estados do Amazonas, Roraima, Acre, Amapá, Rondônia e Mato Grosso, além da ilha de Fernando de Noronha, sendo abastecidos predominantemente por usinas térmicas movidas à combustíveis fósseis, além de pequenas centrais hidrelétricas, centrais geradoras hidrelétricas e termelétricas movidas a biomassa. A existência desses sistemas isolados é devida à localização afastada da região, o que leva a algumas dificuldades logísticas de abastecimento (ANEEL, 2008).

Por fim, a distribuição da eletricidade é realizada por distribuidoras, sendo essas as principais encarregadas pelo atendimento ao público consumidor. Segundo ANEEL (2008), o país apresenta cerca de 63 concessionárias, de controle estatal ou privado, atendendo mais de 61 milhões de unidades consumidoras. As distribuidoras são responsáveis por receber a carga das companhias de transmissão de abastecimento do país, fazendo uma ponte entre as usinas e a sociedade. Além disso, elas também têm como encargo transformar a carga recebida em tensões variáveis em uma tensão rebaixada e estabilizada, para uso residencial.

As atividades desenvolvidas pelas distribuidoras são regularizadas e controladas pela ANEEL, por meio de indicadores como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). A qualidade do serviço prestado e as tarifas cobradas são algumas variáveis também reguladas, sendo as taxas cobradas de acordo com a quantidade de energia elétrica consumida pela residência no mês anterior, com o acréscimo de encargos do setor elétrico e tributos determinados por lei (ANEEL, 2008).

2.2.3 Programas e Incentivos

A implementação de políticas públicas de investimento no setor de energias renováveis no Brasil pode contribuir no combate às barreiras de mercado e diminuir os custos de produção de eletricidade. Já incentivos fiscais e de crédito são imprescindíveis para a ampliação do mercado e de investimentos privados no setor (WWF, 2012). Dentre os dispositivos legais nacionais de incentivo, como já citado, o Proinfa, instituído pela lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, é considerado uma das mais importantes experiências brasileiras de incentivo às energias renováveis.

O programa teve início efetivo dois anos após sua criação, visando aumentar a participação das fontes alternativas no Sistema Interligado Nacional. O seu planejamento prevê realização em duas etapas, embora a segunda etapa esteja atrasada e sem previsão de início. Na primeira etapa, o programa incentivou o desenvolvimento das fontes de energia renovável (eólica, biomassa, e PCHs), com o intuito de ampliar a sua competitividade no mercado, gerar ganhos em grande escala, promover aprendizagem tecnológica e assimilar os benefícios ambientais, sociais, técnicos e econômicos de projetos de geração por fontes renováveis (WWF, 2012). A Eletrobrás é responsável por comprar a energia produzida com o auxílio do programa seguindo o mecanismo das tarifas *feed-in*. Além desse mecanismo, o Proinfa apresenta outros para subsidiar investimentos, disponibilizando linhas especiais do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para os projetos selecionados.

O Proinfa estipula, como meta da primeira etapa, a implementação de uma capacidade instalada de 3,29 milhões de kW produzida por 144 usinas de energia renovável - 63 PCHs, 54 usinas eólicas e 27 usinas de biomassa. Além disso, 60% dos custos de construção dos projetos devem ser nacionalizados, contribuindo para a inserção de pequenos produtores de energia no setor e sua diversificação. O BNDES criou linhas de credito para cobrir até 70% dos investimentos. Embora não haja dados sobre o valor investido pelo banco no Proinfa, no ano de 2011, a quantidade investida pelo BNDES em energias renováveis aumentou 61% com relação ao ano anterior, com um montante total de 928 milhões, dos R$ 2,1 bilhões destinados ao setor energético (WWF, 2012).

2.3 Energia Hidrelétrica

O poder mecânico da queda de água é um antigo recurso explorado para a realização de serviços e usos produtivos. Há cerca de 2.000 anos atrás, os gregos utilizavam rodas d'água de eixo vertical e horizontal para moer trigo em farinha (HINRICHS; KLEINBACH, 2010). No século XVI, essa energia era amplamente utilizada para moagem e bombeamento (IPCC, 2012). O século XIX trouxe, além do desenvolvimento da máquina de vapor, a importante invenção dos geradores elétricos. Com essa nova tecnologia, a primeira usina hidrelétrica pôde ser instalada em Cragside, Rothbury, Inglaterra, em 1870. Entretanto, o uso industrial da energia hidrelétrica começou apenas uma década mais tarde, em 1880, em Grand Rapids, Michigan, quando um dínamo conduzido por uma turbina de água foi usado para fornecer iluminação para um teatro e vitrines de lojas (IPCC, 2012).

Atualmente, segundo o World Energy Council (2016), a energia hidrelétrica é a principal fonte renovável de geração de eletricidade, fornecendo cerca de 71% de toda a energia elétrica renovável no final de 2015. O potencial mundial não desenvolvido é de aproximadamente 10.000 TWh/ano, sendo que a capacidade global de energia hidrelétrica aumentou em mais de 30% entre 2007 e 2015, totalizando 1.209 GW em 2015 (WEC, 2016). Como fonte renovável, a energia hidrelétrica oferece potencial significativo para reduções de emissões de GEE. Além disso, a tecnologia de aproveitamento hidrelétrico é tecnicamente madura, já sendo economicamente competitiva com os preços atuais de energia na maioria dos mercados, o que faz com que ainda seja expandida em um ritmo acelerado. Esse aumento significativo da capacidade de energia hidrelétrica nos últimos 10 anos é antecipado, em muitos cenários, para continuar no curto prazo (2020) e médio prazo (2030), o que levanta diversas preocupações ambientais e sociais que representam talvez os maiores desafios para o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia (IPCC, 2012).

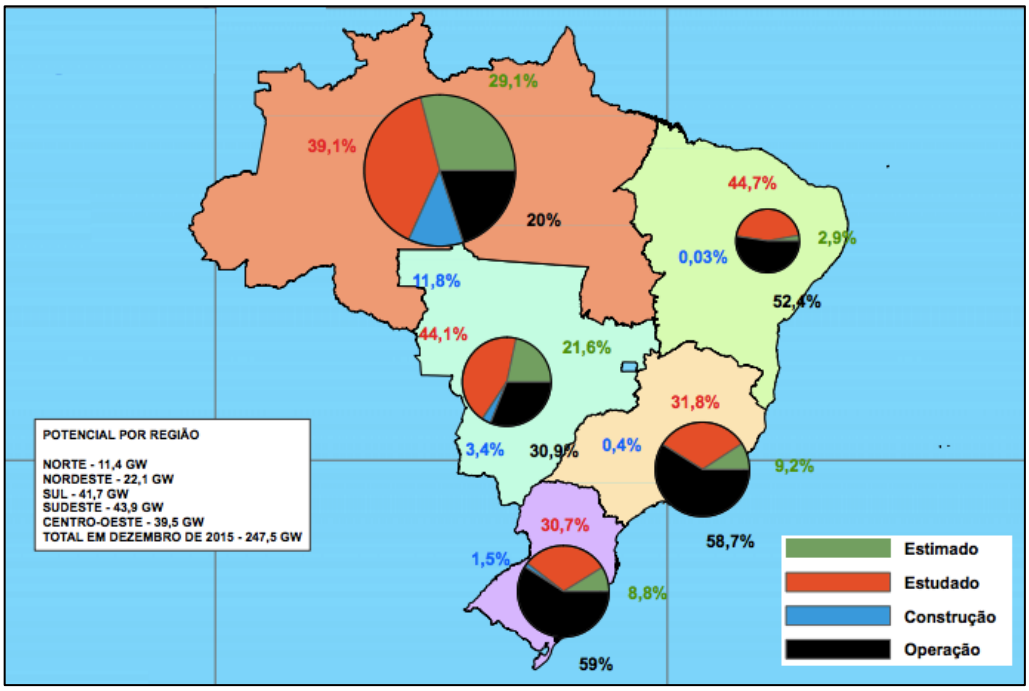
2.3.1 Potenciais e Geração Hidrelétrica no Brasil

Em 2015, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a energia de fonte hidráulica foi responsável por 11,3% da matriz energética brasileira, sendo superada por derivados da cana-de-açúcar, petróleo e derivados e gás natural. No que diz respeito à oferta interna de energia elétrica, que totalizou 615,9 TWh em 2015 (redução de 1,3% em relação ao ano anterior), a energia de fonte hidráulica produzida no Brasil foi responsável por 64% da geração, sendo a principal fonte produtora de eletricidade do país (BRASIL, 2016). Já em 2016, a energia hidrelétrica contribuiu com 76% da geração de energia elétrica (ANEEL, 2016b).

Essa significativa participação não é por acaso, já que o Brasil é um dos países com maior potencial hidrelétrico do mundo, com uma capacidade total estimada de 260 GW (ANEEL, 2008). Desse total, pouco mais de 30% foram, de fato, transformados em usinas construídas ou outorgadas. Segundo a ANEEL (2008), o potencial que ainda se pode explorar futuramente é de cerca de 126 GW, sendo que, desse total, mais de 70% estão nas bacias do Amazonas e do Tocantins/Araguaia, na região Norte do Brasil.

Como pode ser observado na Figura 2.7, apenas 30% do potencial hidrelétrico da região está em operação ou em construção, em contraste com os quase 60% da região Sul e Sudeste. Esse grande potencial não explorado não está relacionado apenas à topografia do país, mas também à forma como o parque hidrelétrico nacional foi desenvolvido (ANEEL, 2008). A primeira hidrelétrica brasileira de maior porte começou a ser operada na década de 50 no Nordeste (Paulo Afonso I, com potência de 180 MW), pela Companhia Hidrelétrica do S. Francisco. As grandes usinas hidrelétricas que seguiram, foram erguidas ao longo dos 60 anos seguintes, concentraram-se principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. No Norte foram construídas as usinas Tucuruí, no Pará, e Balbina, no Amazonas. Entretanto, foi apenas nos anos 90 que se teve inicio uma maior exploração da região, com a construção da Usina Serra da Mesa (GO), no rio Tocantins (ANEEL, 2008).

Figura 2.7. Aproveitamento hidrelétrico nacional por região.



Fonte: Eletrobrás (2015).

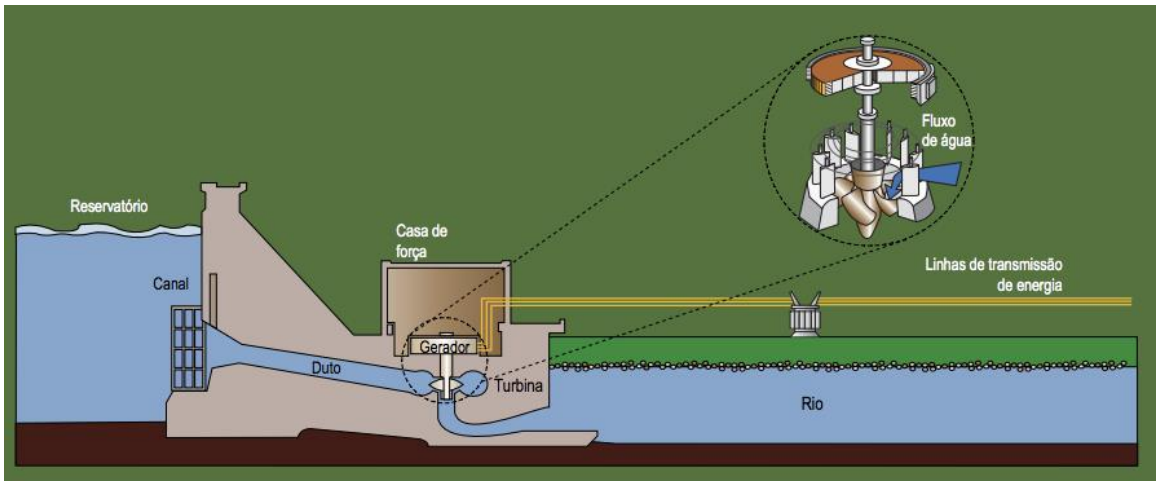
O aproveitamento desse grande potencial remanescente deve ser estudado com cuidado, considerando que a Amazônia constituiu o maior bioma brasileiro, concentrando inúmeras espécies de fauna e flora, já ameaçadas pelo avanço da agricultura, tráfego ilegal e desmatamento. A construção de uma grande usina hidrelétrica com reservatório de acumulação na região representaria o alagamento de uma área muito extensa, tendo como consequência não somente a devastadora perda de biodiversidade, como também o deslocamento de populações ribeirinhas, que sofreriam impactos sociais, materiais e culturais.

Como também pode ser observado na Figura 2.7, com grande parte do seu potencial hidrelétrico já sendo explorado, as regiões Sul e Sudeste apresentam as maiores potências hidrelétricas instaladas, de cerca de 41,7 e 43,9 GW, respectivamente. Logo em seguida, temos a região Centro-Oeste, com uma capacidade hidrelétrica de 39,5 GW, que representa cerca de 35% de seu potencial, e a região Nordeste, com uma capacidade hidrelétrica de 22,1 GW, que representa cerca de 53% de seu potencial. Por último, temos a região Norte, com potencial instalado de 11,4 GW.

2.3.2 Princípios Básicos da Geração Hidrelétrica

A energia associada à água corrente pode ser aproveitada de dois modos: como energia potencial da água represada utilizada para girar turbinas na base da barragem ou como energia cinética da água corrente (DUNLAP, 2015). Representado na Figura 2.8, o primeiro modo é explorado pela construção de usinas, geralmente de maior porte, conhecidas como usinas de grande queda. Já o segundo modo é normalmente empregado em usinas conhecidas como de “fio d’água”. De ambas as formas, a energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento do fluxo da água em uma usina, cujas as obras civis, que envolvem tanto a construção quanto o desvio do rio e a formação do reservatório, são tão ou mais importantes que os equipamentos instalados (ANEEL, 2008).

Figura 2.8. Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica com reservatório de acumulação.



Fonte: ANEEL (2008).

Uma usina hidrelétrica é composta, de modo geral, por uma barragem, um sistema de captação e adução de água, uma casa de força e um vertedouro, como pode ser observado na Figura 2.8. Em usinas que aproveitam a energia potencial da água, a construção de uma barragem é essencial para interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Esse permite a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem (ANEEL, 2008).

Já os sistemas de captação e adução são formados por condutos que levam a água até a casa de força, onde se encontram as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. A energia da água (potencial ou cinética) é utilizada para mover as turbinas, cujo movimento giratório converte essa energia em eletricidade por meio de geradores. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão, sendo que os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo (ANEEL, 2008). Por fim, há o vertedouro, cuja função é fazer com que a saída da água seja possível, quando os níveis do reservatório ultrapassam os limites necessários para a geração de energia.

No Brasil, a potência hidrelétrica instalada em uma usina determina sua classificação. Segundo a Lei nº 13.097, de 2015, usinas com potência instalada de até 100 kW, e alturas de queda entre 15 e 50 m, são classificadas como Microcentrais. Usinas com potência instalada de 100 kW à 3 MW, e alturas de queda entre 20 e 100 m, são classificadas como Minicentrais. Usinas com potência instalada de 3 MW à 50 MW, e alturas de queda entre 25 e 130 m, são classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Já usinas com potência instalada superior a 50 MW são classificadas como Usinas Hidrelétricas de Energia, ou UHEs. Os empreendimentos com potência instalada inferior a 3MW (Micro e Minicentrais) estão dispensados de qualquer tipo de concessão, permissão ou autorização, devendo ser apenas comunicados ao poder concedente.

No Brasil, quanto maior é a potência instalada de uma usina, mais distante ela tende a estar dos grandes centros consumidores. Desse modo, a transmissão da energia produzida exige a construção de grandes linhas que operam em altas tensões (de 230 quilovolts a 750 quilovolts), que podem atravessar o território de vários Estados (ANEEL, 2008). Já as PCHs e usinas de menor porte, instaladas em pequenas quedas d’águas, abastecem geralmente pequenos centros consumidores, não necessitando de instalações tão sofisticadas para o transporte da energia (ANEEL, 2008).

2.3.3 Sustentabilidade da Energia Hidrelétrica

Conforme já discutido, o Brasil apresenta grande potencial para produção de energia hidrelétrica, alcançando lugar de destaque entre as maiores potências hidráulicas do mundo. Contudo, embora seja produzida através de uma fonte renovável e não emissora de gases de efeito estufa, a energia hidrelétrica pode causar significativos impactos no meio onde é gerada. Um dos principais aspectos responsáveis por esses impactos é a construção do reservatório de grandes usinas, que implica na inundação de áreas extensas e consideráveis alterações físico-químicas e biológicas no meio.

Os principais impactos físico-químicos que podem ser identificados são a diminuição da correnteza do rio e alteração da dinâmica do ambiente aquático (SOUSA, 2000). Além disso, a temperatura do rio também é alterada, o que resulta em uma estratificação térmica da represa, reduzindo a mistura da água do ambiente represado, criando condições anóxicas, favorecendo sua eutrofização, e facilitando a ocorrência de reações químicas, que resultam em compostos nocivos (SOUSA, 2000). Com relação aos impactos biológicos, pode-se citar a grande perda de biodiversidade e o estabelecimento de uma barreira física, constituída pela barragem, para as espécies terrestres e aquáticas. A barragem pode causar também o isolamento de populações aquáticas e impedir ou dificultar a piracema das espécies de peixe (SOUZA, 2000).

A construção de um reservatório pode provocar também efeitos negativos para a população local e em suas comunidades tradicionais. Isso se deve ao fato de que a área inundada pode levar à perda de elementos importantes do patrimônio natural, cultural e social atribuídos a ela. A construção de uma hidrelétrica também pode causar um considerável deslocamento populacional, o que faz com que essa população sofra mudanças bruscas na sua maneira de trabalhar a terra e nas suas relações de vizinhança (MENDES, 2005).

Além dos impactos ocasionados pela construção da usina, deve-se citar também aqueles que são gerados durante sua operação, como a formação de gás metano, devido à decomposição da matéria orgânica alagada, e o assoreamento gradativo do reservatório. No Brasil, é frequente a retirada não adequada e insatisfatória da vegetação durante a limpeza da região a ser alagada. A decomposição da vegetação que permanece no fundo do reservatório gera gás metano, que possui um alto potencial de geração de efeito estufa,

sendo essa a origem das emissões representadas nas Tabelas 2.1 e 2.2. Além disso, a ocupação das margens do lago e o aumento da deposição de sedimentos, consequente da transformação de um ambiente antes lótico (águas correntes) em lêntico (águas paradas), levam ao assoreamento do reservatório e à diminuição da capacidade de geração da usina.

Uma alternativa menos impactante às grandes usinas hidrelétricas para o aproveitamento da energia hidráulica, seriam as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Essas geram menos impactos no meio ambiente, pois utilizam a mesma fonte de energia renovável, mas operam em regime de fio-d'água em menor escala. Em outras palavras, elas não exigem a construção de extensos reservatórios, evitando os grandes impactos a eles relacionados. Outra vantagem relacionada ao uso de PCHs, é atribuída ao fato de que elas levam à descentralização da geração de eletricidade no Brasil, pois sua maior viabilidade técnica e econômica faz com que possam ser instaladas em pequenos centros antes não alcançados pela rede interligada de energia.

2.4 Energia Eólica

O aproveitamento da energia eólica pelo homem também é milenar. Ao longo de sua história de utilização, além de força motriz, o vento também desempenhou importante papel em aplicações mecânicas, como moagem de grãos, bombeamento de água e movimentação de máquinas fabris (IPCC, 2012).

Existem indícios da presença de moinhos de vento na China e na Babilônia entre 2000 e 1700 a.C., que eram utilizados para bombear água e moer grãos (HINRICHS; KLEINBACH, 2010). No século XI, comerciantes e cruzados que retornavam de suas missões no oriente, foram responsáveis por difundir na Europa a tecnologia desses moinhos, utilizada na produção de alimentos no Oriente Médio. Os holandeses adaptaram então essa tecnologia para aplicações industriais, como a serragem de madeira, a fabricação de papel e a drenagem de lagos e pântanos (IPCC, 2012).

Entretanto, a geração de eletricidade através da energia eólica em escala comercial viável só teve início na década de 1970, graças a avanços técnicos e apoios governamentais, em países como a Dinamarca, Estados Unidos, Alemanha e Espanha (IPCC, 2012). Já o Brasil vem apresentando considerável crescimento nesse setor nas últimas décadas, com um impressionante aumento em 114% na produção de energia elétrica de fonte eólica no primeiro semestre de 2015. Em 2014, essa matriz era responsável por apenas 1,4% do total gerado de energia anualmente no Sistema Interligado Nacional (SIN). Atualmente, essa participação cresceu, e a energia eólica já representa cerca de 5% de toda a eletricidade produzida no país (ANEEL, 2016b).

2.4.1 Potenciais e Geração de Energia Eólica no Brasil

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o aproveitamento da energia eólica iniciou-se em território nacional em 1992, com a operação comercial da primeira turbina eólica instalada em solo brasileiro. Esse projeto foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), financiados pelo instituto de pesquisas

dinamarquês Folkecenter. Esse aerogerador, com potência de 225 kW, instalado em Fernando de Noronha (PE), foi o primeiro a entrar em operação comercial na América do Sul. Entretanto, na década seguinte, os avanços na consolidação da energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica no país não foram muito significativos, devido a fatores já discutidos anteriormente, como a falta de políticas de incentivo e, principalmente, o alto custo da tecnologia.

Porém, com a crise energética presenciada pelo país em 2001, o governo brasileiro procurou incentivar a contratação de empreendimentos de geração de energia eólica. Por conseguinte, o Programa Emergencial de Energia Eólica – PROEÓLICA foi criado, objetivando a contratação de 1.050 MW de projetos de energia eólica até dezembro de 2003. Além disso, a complementaridade sazonal do regime de ventos com os fluxos hidrológicos nos reservatórios hidrelétricos já era discutida na época (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA, 2016).

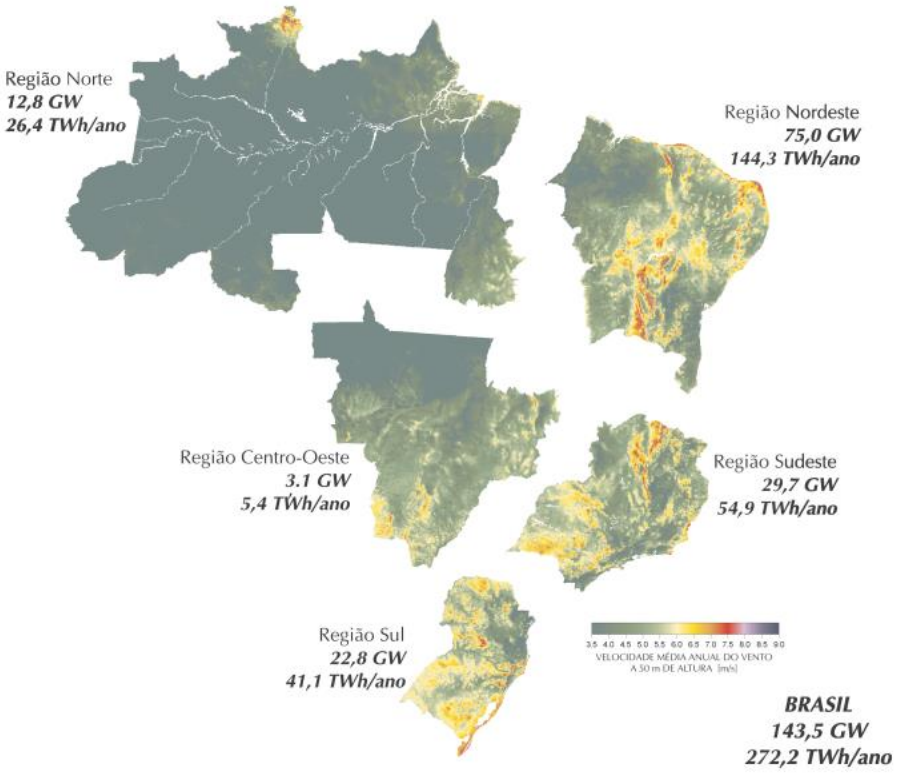
Contudo, o programa não foi bem sucedido, sendo substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA, conforme já comentado. Como resultado do PROINFA, somado aos leilões de energia realizados e ao desenvolvimento do mercado livre, em 2012, o Brasil possuía 108 parques eólicos, que totalizam 2,5 GW de capacidade instalada.

Segundo ranking divulgado pela *Global Wind Energy Council* (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica, em 2016, o país apresentou uma expansão de 2.014 Megawatts na geração dessa energia. Esse avanço posicionou o Brasil na 5ª posição no ranking mundial de capacidade instalada no mesmo ano. O País também ocupou a nova colocação no ranking mundial de capacidade acumulada de geração eólica, alcançando nono lugar no ranking mundial com uma potência acumulada de 10.740 MW (ABEEÓLICA, 2016).

O Brasil tem alguns dos maiores potencias de aproveitamento de energia eólica do mundo. O Global Wind Energy Council (2015) aponta que temos uma potência de ventos três vezes superior à necessidade de eletricidade do País, estando os fatores de capacidade brasileiros acima da média mundial. Enquanto os outros países apresentam uma média de 25%, o Brasil ultrapassa os 50% de fator de capacidade, atingindo até fatores de mais de 70% nas épocas de melhores ventos. Desse modo, a qualidade do vento brasileiro e o

fator de capacidade registrado anualmente colocam o país em posição de destaque no cenário mundial de geração de energia eólica (ABEEÓLICA, 2016).

Figura 2.9. Potencial eólico estimado p/ vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.



Fonte: Amarante, Brower e Zack (2001).

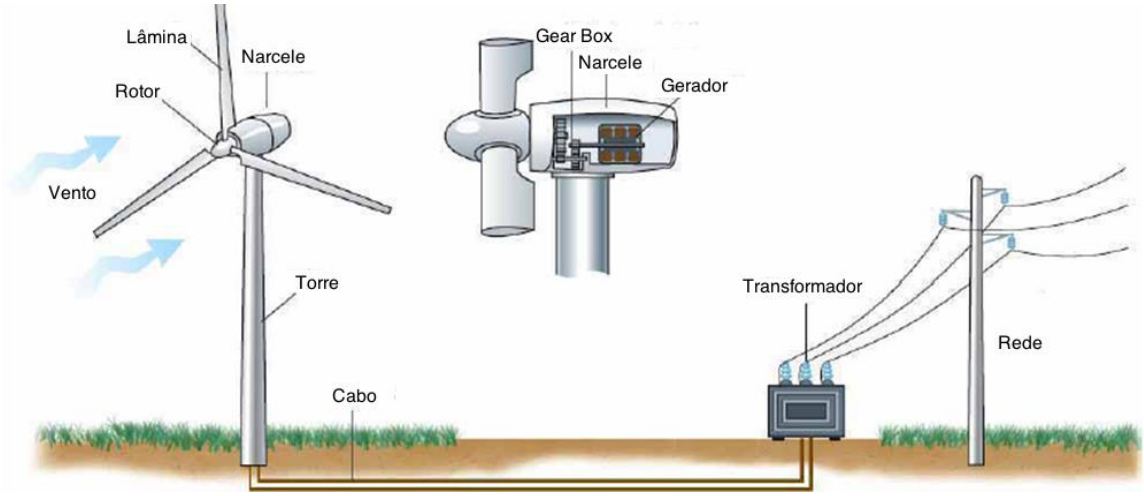
Entretanto, essa capacidade não está distribuída uniformemente pelo território nacional. Como pode ser observado na Figura 2.9, o Nordeste é a região brasileira que mais se destaca com relação ao potencial eólico, sendo seguida pelas Regiões Sudeste e Sul. No que diz respeito à capacidade eólica já instalada, a Região Nordeste também se destaca, estando o Rio Grande do Norte na liderança, com 2.243 MW instalados, seguido por Ceará (1.233 MW), Rio Grande do Sul (1.300 MW) e Bahia (959 MW).

2.4.2 Princípios Básicos da Geração de Energia Eólica

Os ventos se formam devido a um gradiente de pressão causado por gradientes térmicos que são resultantes do aquecimento e resfriamento da atmosfera. Essas correntes de vento não são constantes ao longo do tempo. Segundo Dunlap (2015), embora a velocidade média do vento possa ser estimada em uma localização particular, as suas variações são de certa forma mais imprevisíveis. Dessa forma, a utilização da energia eólica deve ser planejada juntamente com algum mecanismo de armazenamento.

A energia cinética presente nas correntes de vento pode ser transformada em energia elétrica a partir de um sistema de geração de energia eólica, cujos componentes básicos estão representados na Figura 2.10. Esse sistema é composto por um aerogerador, ou turbina eólica, conectado a um sistema de armazenamento e transmissão.

Figura 2.10. Sistema de Geração Eólica.



Fonte: Adaptado de Accettabilitasociale (2017).

A pressão do vento faz girar o as lâminas acopladas ao rotor, que está conectado a um eixo que, por sua vez, está conectado a um gerador elétrico por meio de várias engrenagens (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010). Dessa forma, a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica, que, então, é transformada em energia elétrica pelo gerador. Essa energia é produzida em corrente contínua. Desse modo, a invenção do “inversor síncrono” revolucionou a indústria da energia eólica, pois permitiu a conversão da corrente contínua que sai do gerador eólico em corrente

alternada, fazendo possível, assim, a conexão para operação em paralelo com a rede elétrica da concessionária de energia na frequência correta (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010).

As turbinas eólicas modernas podem ser utilizadas para geração de energia elétrica tanto em aplicações isoladas quanto conectadas às redes elétricas (FADIGAS, 2011). Essas turbinas são classificadas de acordo com a orientação do eixo do rotor com relação ao solo, podendo ser de eixo horizontal ou de eixo vertical. A eficiência de conversão de cada turbina depende de sua configuração, sendo que o propulsor de duas (ou três) lâminas é considerado o mais eficiente para a geração de eletricidade por causa de seu tamanho e também o mais comum (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010). Entanto, apesar de toda sua eficiência, nem mesmo este modelo é capaz de extrair toda a energia existente no vento, pois uma turbina é incapaz de apresentar eficiência maior que Coeficiente de Betz (59,3%). Esse coeficiente é referente à velocidade do vento na saída do rotor eólico que não pode ser inferior a 1/3 da velocidade do vento incidente. Dessa forma, o rotor absorve a energia equivalente a 2/3 da energia disponível no vento livre antes da turbina (CUSTÓDIO, 2013).

Além de seus principais componentes, o aerogerador, em função de sua aplicação, necessita de componentes adicionais para fazer o acondicionamento da potência gerada para atendimento direto das cargas ou conexão à rede elétrica, como cabos, chaves, disjuntores, transformadores, baterias, entre outros. Como os ventos são intermitentes e não podem ser trazidos de volta ou retidos; o armazenamento de energia para utilização posterior é muito importante se a conexão com a rede elétrica existente não for possível (FADIGAS, 2011).

2.4.3 Sustentabilidade da Energia Eólica

A energia eólica tem grande potencial para reduzir as emissões de gases estufa ao substituir a geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis (IPCC, 2012). No âmbito brasileiro, enquanto as pequenas centrais eólicas são capazes suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para a universalização do atendimento, as

centrais de grande porte podem atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2008). Dessa forma, a participação dessa fonte de energia na matriz brasileira pode gerar significativos benefícios ambientais e sociais, como a redução da emissão de poluentes atmosféricos; a redução da necessidade de construção de grandes reservatórios; e menor risco de falta de energia devido à sazonalidade hidrológica, graças a complementaridade dos dois sistemas (ANEEL, 2008). Além disso, a disponibilidade comercial e o custo da tecnologia fazem com que esse tipo de aproveitamento possa ser imediatamente implantado em grande escala (IPCC, 2012).

Todavia, a produção de energia eólica também pode gerar impactos sociais e ambientais negativos. Os principais impactos ecológicos potenciais gerados por usinas eólicas onshore são relacionados à colisão e morte de pássaros e morcegos e às modificações mais indiretas do habitat e do ecossistema. Esses impactos também podem ser observados nas usinas eólicas offshore, somados a implicações para os recursos bentônicos, pesca e vida marinha em geral.

A colisão com as turbinas eólicas pode causar mortes de aves e morcegos, estando entre as preocupações ambientais mais conhecidas associadas às usinas eólicas. As taxas de fatalidade aviária são específicas para diferentes tipos de usinas e diferentes tipos de espécie de pássaros, podendo variar com a região, as características do local, o clima, o tamanho, altura e design da turbina, entre outros fatores (IPCC, 2012). Porém, as mortes de aves contabilizadas por colisão em centrais eólicas apresentam ordens de grandeza inferior quando comparadas a outras causas antropogênicas, como, por exemplo: choques com veículos, edifícios e janelas, linhas de transmissão, e torres de comunicações; predação por gatos domésticos; e poluição do ambiente (ERICKSON; JOHNSON; YOUNG, 2005).

Além das colisões, o possível impacto das usinas eólicas no clima local também tem sido o foco de algumas pesquisas e discussões, embora ainda permaneça incerto devido a quantidade atual insuficiente de literatura sobre esse fenômeno. Essa alteração é devida ao fato de que as usinas eólicas extraem o impulso do fluxo de ar, reduzindo a velocidade do vento por trás das turbinas, além de aumentar a mistura vertical ao introduzir turbulência em diversas escalas de comprimento (BAIDYA ROY; TRAITEUR, 2010). Outros estudos indicam que esses efeitos locais podem afetar o

microclima da região, alterando o regime de chuvas, a radiação, as nuvens, a direção do vento e outras variáveis climáticas. Embora o impacto médio global dessas mudanças locais não seja muito significativo, elas podem ter implicações para os ecossistemas e atividades humanas locais (IPCC, 2012).

A produção de energia eólica também pode ser responsável por impactos sociais, principalmente no que diz respeito aos impactos sonoros e os visuais. Os primeiros são resultantes do ruído dos rotores e podem variar de acordo com os equipamentos. Desse modo, para evitar transtornos à população vizinha, é importante que o nível de poluição sonora emitido pelas turbinas atenda à legislação vigente. Já os impactos visuais são atribuídos ao agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de grandes fazendas eólicas.

Como já foi comentado, a participação da energia eólica na matriz elétrica nacional só tende a crescer nos próximos anos, fazendo com que as preocupações e impactos existentes possam se agravar e que novas preocupações possam surgir. Contudo, independente do tipo e grau de impactos sociais e ambientais, abordá-los diretamente é imperativo para qualquer planejamento bem-sucedido de novas usinas eólicas (IPCC, 2012). Para que isso aconteça, é essencial que a comunidade local esteja envolvida nesse planejamento, estando ativamente presente no processo de tomada de decisão, podendo opinar, por exemplo, sobre locais alternativos. Segundo Wolsink (2000), estudos comprovaram que a reação do publico a um empreendimento eólico melhorou significativamente quando o processo de planejamento e implementação foi realizado e percebido como transparente.

2.5 Energia Solar Fotovoltaica

Como o próprio nome já diz, a energia solar é o aproveitamento da energia que incide na terra na forma de radiação solar. Essa energia pode ser convertida em calor, e utilizada em sistemas de aquecimento, ou convertida em eletricidade, através de métodos diretos ou indiretos. Enquanto os módulos fotovoltaicos transformam diretamente a energia solar em energia elétrica, os sistemas de concentração captam e concentram o calor do sol, utilizando-o para aquecer um fluido, que, por sua vez, é utilizado para produzir vapor, responsável por mover turbinas, cuja energia mecânica é finalmente convertida em eletricidade através de geradores (VILLALVA, 2015).

Seja na forma de calor ou eletricidade, a história do aproveitamento da energia do sol pela humanidade data da descoberta intuitiva dos conceitos de conforto térmico, quando as primeiras civilizações descobriram que as moradias com aberturas para a entrada do sol ficavam mais quentes e mais iluminadas, mesmo quando o clima estava frio (IPCC, 2012). Porém, foi apenas na segunda metade do século XIX, que coletores solares foram inventados para a transformação da energia do sol em calor, e colocados em uso prático doméstico e aplicações industriais. Nas décadas seguintes, espelhos foram utilizados para aumentar a temperatura de fluidos, de modo que os motores de calor impulsionados pela energia do sol pudessem desenvolver força motriz, e consequentemente, potencial elétrico. O final do século XIX também trouxe a invenção da “célula fotovoltaica”, dispositivo capaz de converter luz solar diretamente em eletricidade, dispensando a necessidade de um motor de calor. Já o modelo moderno de células solares de silício foi descoberto décadas mais tarde, por volta do anos 40, por Russell Ohl, quando trabalhava na American Telephone and Telegraph (AT &T) Bell Labs (IPCC, 2012).

Na década de 50, o estabelecimento da International Solar Energy Society (ISES) e o aumento de esforços em pesquisa e desenvolvimento em muitas indústrias deram início a era moderna de pesquisa solar (IPCC, 2012). Consequentemente, quando a crise do petróleo teve início na década 70, vários países desenvolviam programas de pesquisa e desenvolvimento para a energia solar. Esse esforços continuaram até o presente, fazendo

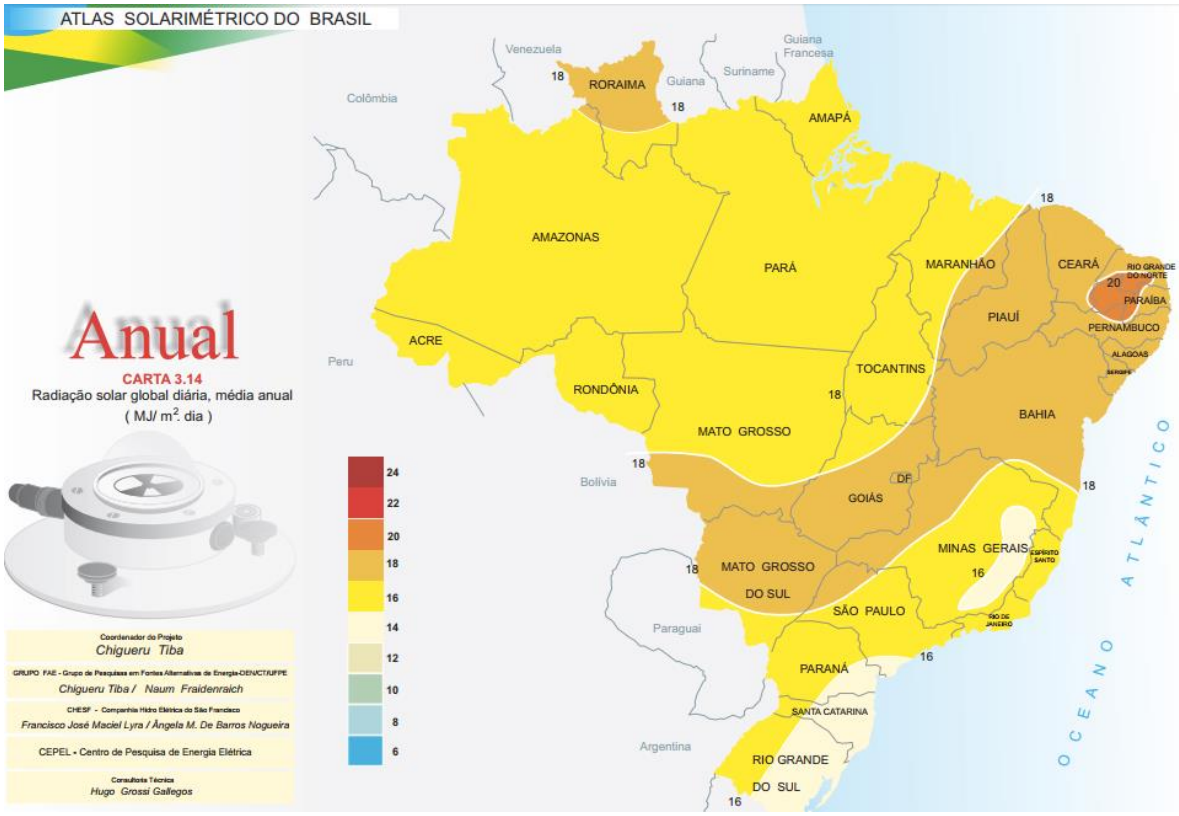
com que a energia solar represente hoje uma das tecnologias renováveis de mais rápido crescimento, possuindo grande potencial para desempenhar um papel muito maior na matriz energética mundial (IPCC, 2012).

2.5.1 Potenciais e Geração de Energia Fotovoltaica no Brasil

O Brasil é um país privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões, em comparação a países que já consolidaram sua participação no mercado de energia solar, como pode ser observado na Figura 2.11, que exibe a média anual da radiação solar global diária de cada região brasileira. Além de ser um país em que o sol aparece em média 280 dias por ano, o Brasil é detentor de uma das maiores reservas de silício no mundo, material utilizado na fabricação de painéis solares. No entanto, o aproveitamento de todo esse potencial energético ainda necessita de indústrias nacionais para a produção dos sistemas solares e incentivos para que essa energia se torne mais competitiva no mercado (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013).

A região menos ensolarada do Brasil apresenta índices de irradiação solar em torno de 1.642 kWh/m², que são superiores aos valores apresentados na área de maior incidência solar da Alemanha, que recebe cerca de 1.300 kWh/m² (SALAMONI; RÜTHER, 2007). Contudo, apesar de apresentar melhores condições climatológicas, na comparação de mercado, o Brasil está muito atrás do país europeu, que apresenta potência fotovoltaica instalada superior a 35 GW, em contraste aos 0,023 GW instalados no Brasil.

Figura 2.11. Atlas Solarimétrico do Brasil.



Fonte: Tiba et al. (2000).

Segundo Villalva (2015), até um passado recente, a energia fotovoltaica era empregada no nosso país somente em sistemas isolados ou autônomos, instalados em locais não alcançados pela rede elétrica, como propriedades rurais, comunidades isoladas, centrais remotas de telecomunicação e sistemas de sinalização. Porém, a aprovação do uso de sistemas de geração conectados à rede pela ANEEL, através da resolução nº 482 de 2012, possibilitou o avanço recente da quantidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, sendo que um aumento significativo no país desses sistemas é esperado para os próximos anos (VILLALVA, 2015).

Entretanto, a consolidação de uma participação significativa da energia solar na matriz elétrica nacional ainda deve superar alguns desafios. Houve pouca iniciativa para impulsionar a inserção de energia fotovoltaica no país até o ano de 2011, consequentemente, a participação dessa fonte de energia em nosso sistema é praticamente desprezível. Além disso, a ausência de regulamentação e de normas para o setor

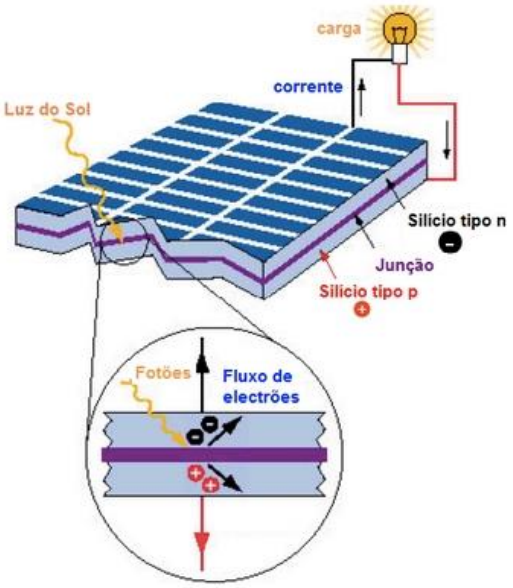
fotovoltaico, até o ano de 2012, inibiu o surgimento de indústrias e mercados voltados para os sistemas de geração distribuída em baixa tensão (VILLALVA, 2015).

Somada à ausência de regulamentação necessária, a ausência de incentivos governamentais também constitui outro obstáculo para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos no Brasil, que necessita de programas que possam impulsionar pequenos produtores, pessoas comuns ou pequenas empresas a adquirir sistemas de geração de pequeno porte. Além disso, o custo da eletricidade de origem fotovoltaica ainda é tido como consideravelmente elevado, quando comparado ao de origem hidrelétrica, o que pode ser visto como uma grande desvantagem para o consumidor (VILLALVA, 2015).

2.5.2 Princípios básicos da Geração de Energia Fotovoltaica

O aproveitamento da energia solar pode ser realizado a partir do uso de um painel fotovoltaico, devido a um fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. A energia é gerada pela luz do sol quando essa incide diretamente, ou por meio de reflexo, em painéis de materiais semicondutores (silício). Esses materiais contêm células menores, que ficam dispostas em duas camadas, uma positiva e outra negativa. Quando a energia do sol chega, o material semicondutor faz com que os elétrons se movimentem entre as duas camadas, com uma quantidade de energia cinética inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz incidente, e gerem uma corrente elétrica contínua. Entretanto, boa parte da luz que incide sobre uma célula é perdida antes que possa ser convertida em corrente elétrica, sendo que as eficiências de conversão de um painel solar variam de 10 a 15%, podendo chegar a 30% (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010). O esquema de funcionamento de um módulo fotovoltaico está representado na Figura 2.12.

Figura 2.12. Esquema de funcionamento de um painel fotovoltaico.



Fonte: Energia Inteligente (2017).

Segundo Pinho e Galdino (2014), o sistema solar fotovoltaico é composto basicamente por três blocos básicos: o bloco gerador, o bloco de condicionamento de potência e, quando necessário, o bloco de armazenamento. Enquanto o primeiro bloco é constituído pelos painéis fotovoltaicos em arranjos variados, o cabeamento elétrico e as estruturas de suporte, o segundo pode ser composto por conversores c.c.-c.c., pontos de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga, entre outros dispositivos de proteção supervisão e controle. Já o terceiro bloco abrange as baterias e/ou outras formas de armazenamento. Esses sistemas podem estar conectados à rede ou isolados.

De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Dos Reis (2010), a maior parte das células fotovoltaicas em uso atualmente é composta de silício monocristalino, embora outros processos de manufatura venham ganhando mercado. A confecção de um painel solar envolve um processo de purificação e refinamento da sílica (SiO_2), seguida de derretimento e solidificação, de modo que os átomos de silício sejam arranjados em um entrelaçamento perfeito. Um dos métodos utilizados para esse processo é realizado com a introdução de uma semente de silício cristalino em uma massa fundida de silício puro, seguida de sua extração lenta, formando um lingote cilíndrico. Esse lingote é então fatiado em “wafers”, que são dopados com impurezas de fósforo (camada de tipo *n*) ou e

de boro (camada de tipo *p*) para formar a junção *p-n*, responsável pelo mecanismo do efeito fotoelétrico (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010).

Ainda segundo os mesmos autores, técnicas mais avançadas de produção de cristais podem fazer com que os custos de manufatura das células solares, ainda consideravelmente altos, sejam reduzidos. Além dos módulos monocristalinos, existem vários outros tipos de células fotovoltaicas, já presentes no mercado e com eficiência variada, sendo as de silício policristalino e as de silício amorfo duas delas, ambas de produção menos onerosa (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2010).

2.5.3 Sustentabilidade da Energia Fotovoltaica

A energia solar é a única fonte considerada indefinidamente renovável que pode apresentar capacidade de satisfazer completamente a demanda energética mundial (DUNLAP, 2015). Com isso em mente, o Brasil pode ser considerado um país privilegiado devido a suas altas taxas de irradiação solar em todas as regiões, sendo possível esperar que alcancemos um potencial de geração de energia fotovoltaica no mínimo dez vezes maior que a capacidade instalada atual da Alemanha (VILLALVA, 2015).

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de atender comunidades isoladas desconectadas do sistema nacional de distribuição de energia. A energia solar pode geralmente ser aproveitada em lugares em que, devido a localização, é impossível explorar outras fontes, como a hidrelétrica ou a eólica, devido a simplicidade do sistema e abundância da fonte. Logo, essa tecnologia tem o potencial de melhorar a qualidade de vida dessas populações, gerando novas oportunidades econômicas, melhores condições de trabalho, e maior acesso à informação (IPCC, 2012).

Além disso, outra vantagem de um sistema fotovoltaico é que esse não gera quase nenhum tipo de resíduo sólido, líquido ou gasoso durante seu funcionamento, salvo a água utilizada para a limpeza esporádica dos painéis. Em adição, a operação desses sistemas não emite ruídos e não requere o uso de qualquer fonte de energia não renovável (IPCC, 2012).

Porém, assim como já comentado anteriormente, a produção de energia através de fontes renováveis não está completamente livre de impactos ambientais, e a energia fotovoltaica não é exceção. Atualmente, não existe literatura extensa sobre os impactos gerados por esse tipo de aproveitamento energético, por se tratar de uma tecnologia relativamente nova no mercado. Entretanto, as principais preocupações levantadas relacionam-se à geração de poluentes durante todo o ciclo de vida de um painel fotovoltaico e à possibilidade de reciclagem ao término do uso dos sistemas de geração (IPCC, 2012).

Embora não haja geração significante de qualquer tipo de resíduo durante a fase de operação, o estudo do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico mostra que a emissão de gases estufa e outras toxinas durante sua produção não pode ser desconsiderada. Como pode ser observado nas Tabelas 2.1 e 2.2, a energia solar é a maior emissora de gases estufa, NO_x, e SO_2, dentre as energias renováveis estudadas, quando todo o ciclo de vida de 1 kWh solar é analisado. Essas emissões são devidas às características da produção dos módulos fotovoltaicos, que exige, de modo intensivo, materiais relativamente raros, como o Silício e o Telureto de Cádmio (DUNLAP, 2015). Além disso, considerável energia é consumida para que esses materiais sejam extraídos, fazendo com que seja necessária a mineração de enorme quantidade de matéria-prima para a obtenção de pequena quantidade do componente da placa (DUNLAP, 2015).

Com relação ao fim de vida das placas fotovoltaicas, segundo IPCC (2012), a reciclagem dos módulos já é considerada economicamente viável, principalmente para aplicações concentradas e em grande escala. Já existem projeções de reutilização de alguns materiais dos módulos, como de 80 a 96% do vidro, do acetato de etileno vinilo, e dos metais (TE, selénio e chumbo). Porém, outros metais, tais como Cd, Te, estanho, níquel, alumínio e cobre, devem ser armazenados ou reciclados por outros métodos (IPCC, 2012).

Além dos impactos ambientais, são levantados também impactos sociais relacionados ao uso da tecnologia fotovoltaica, pois, embora essa seja uma fonte renovável com grandes potenciais, ela pode causar resistência no público consumidor. Um desses motivos de resistência é o impacto estético de uma grande usina solar, que necessitaria de extensas áreas para sua instalação. Porém, esse impacto pode ser evitado

pela escolha de áreas mais afastadas e com menor densidade populacional, que já são ideais para a implantação dessas usinas (IPCC, 2012).

Com isso em mente, é necessário elaborar estratégias que busquem mitigar esses impactos sociais, de modo a reduzir uma possível resistência das comunidades à instalação de qualquer tipo de sistema de geração renovável, não somente o solar. Dessa forma, é importante que essas comunidades sejam integradas ao processo de planejamento do sistema, fazendo com que elas tenham mais acesso e conhecimento sobre esses métodos alternativos de geração de energia e compreendam melhor tanto a importância, como as vantagens e desvantagens de cada sistema, de modo que tenham participação ativa no processo de decisão.

2.6 Indicadores de Sustentabilidade

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como um crescimento pautado no equilíbrio entre as dimensões econômicas, ambientais e sociais. Dessa forma, esse desenvolvimento pode ir de encontro com as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades. Desde a Rio-92, o mundo tem experimentado, em escalas diferentes, grandes avanços em direção à promoção do desenvolvimento sustentável, que passa a estar cada vez mais presente nas discussões e nos principais objetivos de planejamento dos tomadores de decisão. Entretanto, a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável exige a constante construção, avaliação e reajuste de objetivos e indicadores, de modo com que seja possível medir a evolução de um país ou região em relação ao que fora estabelecido para alcançar esse desenvolvimento.

Os indicadores de sustentabilidade são, portanto, ferramentas de auxílio ao monitoramento da operacionalização do desenvolvimento sustentável, tendo como função principal o fornecimento de informações sobre o estado de todas as dimensões que compõem o conceito de sustentabilidade (CARVALHO et al., 2011). A utilização de indicadores visa reunir e quantificar informações, simplificando a compreensão de fenômenos complexos, buscando melhorar, dessa forma, o processo de comunicação (VAN BELLEN, 2006). Esses indicadores não devem ser utilizados apenas para atender os interesses do Poder Público na avaliação da eficiência e eficácia das políticas adotadas, mas devem ser utilizados também pelos cidadãos, consolidando-se como instrumento de cidadania, já que podem fornecer valiosas informações sobre o estado do meio ambiente e da qualidade de vida (SANTOS; CÂMARA, 2002).

Segundo Afgan, Carvalho e Hovanov (1999), a fim de lidar com a complexidade da sustentabilidade de problemas relacionados a diferentes sistemas, os indicadores têm que refletir tanto a totalidade do sistema, como a interação de seus subsistemas. Consequentemente, os indicadores devem medir a intensidade das interações entre elementos do sistema e entre o sistema e seu ambiente. Nesta visão, há na escolha dos indicadores a necessidade de que esses permitam uma avaliação da relação complexa de

cada sistema e seu ambiente. Dessa forma, um indicador efetivo deve atender a características que reflitam o problema e os critérios a serem considerados. Seu objetivo é mostrar o quão bem o sistema está funcionando, fazendo com que os indicadores sejam fortemente dependentes do tipo do sistema que monitoram (AFGAN; CARVALHO; HOVANOV, 1999).

Buscando levantar os principais indicadores geralmente aplicados no estudo da sustentabilidade de sistemas de geração de energia renovável, diferentes parâmetros encontrados na literatura para as formas de energia estudadas foram compilados na Tabela 2.2. Nela, os indicadores estão categorizados em quatro diferentes dimensões da sustentabilidade de um sistema: econômica, técnica, ambiental e social. Entres eles, foram levantados tanto indicadores quantitativos, quanto qualitativos, de acordo com a maioria das informações encontradas nos diferentes estudos analisados.

Faz-se necessário apontar que existe uma importante gama, bem mais extensa, de indicadores que deve ser considerada em estudos mais detalhados sobre a sustentabilidade de tecnologias de geração de energia. Entretanto, o estudo de todos esses indicadores foge ao escopo desse trabalho, que buscou considerar somente aqueles de maior relevância para a análise que será realizada. Os principais indicadores de sustentabilidade de sistemas de energia renovável levantados, e representados na Tabela 2.2, estão mais bem detalhados a seguir:

- Custo de Implantação: esse indicador está relacionado ao custo de implantação da infraestrutura da usina geração de energia. Esse custo depende da energia que será explorada, mas também pode variar muito com o design da estrutura da usina (DUNLAP, 2015). O custo de implantação interfere diretamente em outros indicadores econômicos, como o tempo de retorno do investimento e o preço da energia gerada, sendo um indicador de grande importância à viabilidade econômica de instalação de uma usina de geração de energia renovável. Alguns dos custos típicos relacionados à infraestrutura necessária às fontes estudadas estão representados, em USD/kWh instalado, na Tabela 2.2.

- Preço da Energia Gerada: cada tecnologia de geração de energia apresenta diferentes preços médios de geração de eletricidade, oriundos de uma ampla gama de custos. Os valores médios apresentados na Tabela 2.2 foram calculados através de extensa revisão da literatura, considerando o ciclo de vida completo de cada tecnologia, reunindo os custos de geração desde a construção, instalação, operação, e manutenção, até o desmantelamento, reciclagem e/ou disposição (EVANS; STREZOV; EVANS, 2008). Os valores apresentados estão na unidade de custo, em dólares, de cada kWh produzido.

- Tempo de Retorno: o conceito de tempo de retorno, também conhecido como *payback*, relaciona-se ao tempo que um investimento levará a ser pago, a partir dos ganhos do empreendimento em que se está investindo. Os tempos de retorno, em anos, representados para cada uma das fontes de geração estudadas foram obtidos através da análise de diferentes fontes (IPCC, 2012; LOFTHOUSE; SIMMONS; YONK, 2015; VARUN; PRAKASH; BHAT, 2009), considerando que cada uma delas apresentava uma gama de tempo diferentes, devido aos diferentes fatores envolvidos em cada análise.

- Área Requerida: esse indicador está relacionado a área requerida para a implementação, operação e desmantelamento de uma usina de energia, durante todo seu tempo de vida. A área requerida por cada fonte energética renovável estudada foi determinada através da análise de diferentes estudos (IPCC, 2012; ONG et al., 2013; SANTOS et al., 2006). Esse indicador é dado na Tabela 2.2 em termos de quantos MW de potência elétrica podem ser produzidos através de determinada fonte no espaço físico de um quilômetro quadrado.

- Tempo de Vida: esse indicador, também conhecido por *lifetime*, mede o horizonte de duração de uma usina de energia, após a sua implementação até o seu descomissionamento. O tempo de vida tende a variar muito dependendo do quão robusta é a tecnologia utilizada para a geração de eletricidade, como pode ser

observado na Tabela 2.2, através da análise dos dados de diferentes fontes (COLTRO; GARCIA; QUEIROZ, 2003; LENZEN; WACHSMANN, 2004; VARUN; PRAKASH; BHAT, 2009). Esse indicador dita, para o horizonte de planejamento, quanto tempo a usina continuará funcionando e produzindo energia elétrica a uma taxa satisfatória.

- Eficiência de Geração: a capacidade de transformar a fonte renovável de energia em eletricidade depende fortemente da tecnologia utilizada nessa conversão. Esse indicador mede a porcentagem de eletricidade que é convertida a partir do aproveitamento de determinada fonte energética. A eficiência de geração varia muito de acordo com as tecnologias avaliadas, podendo alcançar valores superiores a 90%, no caso da energia hidrelétrica, cerca de 40%, no caso da eólica, e aproximadamente 15% para a energia solar (EVANS; STREZOV; EVANS, 2008).

- Emissões de Gases Estufa: os valores médios apresentados na Tabela 2.2 estão relacionados à contabilização das emissões de gases de efeito estufa durante todo o ciclo de vida do aproveitamento de cada fonte de energia renovável analisada, incluindo as emissões de CO_2 durante a fase de produção dos componentes da usina, até ao longo de toda a sua operação. As emissões, que variam consideravelmente com o tipo fonte estudada, estão apresentadas na unidade de gramas de CO_2 equivalente por kWh produzido. Esse indicador é um dos mais recorrentes na literatura para a avaliação dos impacto relacionados a tecnologias de geração de energia (ARDENTE et al., 2008; DUNLAP, 2015; EVANS; STREZOV; EVANS, 2008; IPCC, 2012; LENZEN; WACHSMANN, 2004; PEHNT, 2006; WEC, 2004), tanto para fontes de energia não renováveis, quanto para fontes renováveis, pois está diretamente relacionado a um dos fatores que mais impulsiona o desenvolvimento de energias alternativas atualmente: a preocupação com o aquecimento global e as mudanças climáticas.

- Emissões de Outros Gases: assim como há a emissão de gases de efeito estufa inerentes ao ciclo de vida da produção de uma unidade de energia elétrica através de qualquer fonte renovável, ocorrem também emissões de outros gases, que podem ser danosos ao meio ambiente. Esse indicador é responsável por medir as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxidos de enxofre (SO_2) relacionados à produção de um quilowatt-hora de energia elétrica a partir de cada uma das três fontes estudadas (TURCONI; BOLDRIND; ASTRUP, 2013; WEC, 2004). Ambos os gases, embora não relacionados ao efeito estufa, são reconhecidamente nocivos tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana.

- Consumo de Água: a obtenção de dados referentes à quantificação do consumo de água durante a geração de energia elétrica é muito difícil, principalmente no que se refere a energias renováveis. Isso se deve à dificuldade em diferenciar água retirada (água que foi coletada e posteriormente retornada à circulação) e água consumida (água retirada de circulação para uso dentro da usina). Logo, o "consumo de água" é considerado como um indicador mais adequado na avaliação da sustentabilidade de um sistema, pois mede a depleção desse recurso devido ao uso para a produção de energia (EVANS; STREZOV; EVANS, 2008). A maioria do consumo intrínseco às energias renováveis está relacionada ao uso de água para a manutenção do sistema e produção de seus componentes, apresentando, portanto, baixos índices quando o ciclo de vida do sistema é considerado, assim como pode ser observado na Tabela 2.2.

- Impactos à Biodiversidade: assim como já discutido anteriormente, as tecnologias de aproveitamento das fontes renováveis de energia não estão isentas de impactos ambientais, embora sejam menos nocivas ao ambiente que as fontes convencionais. Considerando que é muito difícil realizar a quantificação de bens não valoráveis, como a biodiversidade, esse indicador geralmente é qualitativo e reflete os principais impactos apontados na literatura relacionados à instalação e operação de usinas de energia renovável (EVANS; STREZOV; EVANS, 2008; FADIGAS, 2011; IPCC, 2012). Os impactos levantados na Tabela 2.2 são apenas

alguns daqueles já identificados por vários estudos. Entretanto, como as tecnologias utilizadas para a exploração da maioria das fontes renováveis de energia são relativamente novas, ainda não existem amplos estudos que identifiquem todos os seus impactos à biodiversidade a longo-prazo.

- Impactos Sociais: a implementação de usinas renováveis de geração de energia elétrica pode trazer impactos tanto positivos, quanto negativos à sociedade. Embora os impactos positivos sejam múltiplos e bem reconhecidos, como a geração de empregos, ambiente mais limpo, e energia mais segura, os impactos levantados para esse indicador nesse trabalho foram apenas aqueles considerados negativos, principalmente à comunidade que se situa próxima ao local onde a usina será instalada. Assim como o caso do indicador de impacto à biodiversidade, é muito difícil encontrar estudos que atribuam valores quantitativos aos impactos sociais, pois, embora também estejam ligados a bens materiais, eles estão diretamente relacionados a bens imateriais e sentimentais, que muitas vezes não podem ser traduzidos em valores ou quantias monetárias. Dessa forma, os impactos levantados para esse indicador foram apenas os qualitativos, com base na literatura consultada (EVANS; STREZOV; EVANS, 2008; FADIGAS, 2011; IPCC, 2012; MENDES, 2005).

Tabela 2.2. Principais indicadores de sustentabilidade de fontes renováveis encontrados na literatura

Indicadores de Sustentabilidade		Unidade	UHE	EOL	UFV
Econômico	Custo de Implantação	USD/kWh	0,05[7]	0,06[7]	0,3[7]
	Preço da Energia Gerada	USD/kWh	0,05[5]	0,07[5]	0,24[5]
	Tempo de Retorno	Anos	7 a 11[13]	0,39 a 1,4[8]	1,5 a 15,5[8]; 2 a 5[9]
	Área requerida	MW/km2	0,4 - 15,4[14]	5 a 10[9]	26,3 a 45,5[10]
Técnico	Tempo de vida	Anos	100[11]	20[1]; 20 a 25[8]	20 a 30[8]
	Eficiência de Geração	%	> 90[5]	24 a 54[5]	4 a 22[5]
Ambiental	Emissões de gases estufa (ACV)	g CO2eq/kWh	3,5 a 6,5[3]; 10[4]; 41[5]; 3,6 a 11,6[7]	5,2[1]; 10,2[4]; 25[5]; 14,8[6]; 7 a 9[7]	30 a 80[9]; 99[4]; 90[5]; 98 a 167 [7]
	Emissões de outros gases (ACV)	g NOx/kWh	0,004 a 0,06[2]; 0,003 a 0,006[3]	0,02 a 0,11[2]; 0,015 a 0,073[3]	0,15 a 0,40[2]; 0,099[3]
		g SO2/kWh	0,001 a 0,03[2]; 0,009 a 0,024[3]	0,02 a 0,09[2]; 0,015 a 0,087[3]	0,12 a 0,0,29[2]; 0,215[3]
	Consumo de Água	kg/kWh	36,0[5]	1,0[5]	10,0[5]
	Impactos à Biodiversidade	Qualitativo	Modificações no curso rio[5]; Perda de Biodiversidade [5]; Barreira física de espécies [9]; Retalhamento unidades conservação	Colisão com pássaros e morcegos [5]; Interação da fauna com aerogeradores [12];	Toxinas (produção placas) [5]
Social	Impactos sociais	Qualitativo	Deslocamento Populacional [5]; Redução na área cultivável [5]; Perda de patrimônio social e cultural [15]	Ruído [5]; Impacto visual [12]; Impacto no uso da terra [12]; Interferência Eletromagnética [12]	Estético [5]; Impacto no uso da terra [9]

Fontes: [1] Lenzen e Wachsmann (2004); [2] Turconi, Boldrind, e Astrup (2013); [3] WEC (2004); [4] Pehnt (2006); [5] Evans, Strezov e Evans (2009); [6] Ardente et al. (2008); [7] Dulanp (2015); [8] Varun, Prakash e Bhat (2009); [9] IPCC (2012); [10] Ong et al. (2013); [11] Coltro, Garcia e Queiroz (2003); [12] Fadigas (2011); [13] Lofthouse, Simmons e Yonk (2015); [14] Dos Santos et. al (2006); [15] Mendes (2005).

3. Metodologia

Esse capítulo tem como enfoque a apresentação da metodologia de pesquisa desenvolvida nesse trabalho, especificando sua caracterização, classificação e delimitação. Além disso, serão apresentadas também as técnicas e instrumentos de coleta e análise de dados utilizadas para desenvolver o trabalho, bem como as limitações inerentes ao método de pesquisa escolhido.

3.1 Caracterização e Classificação da Pesquisa

Do ponto de vista da abordagem do problema, é possível classificar a pesquisa desenvolvida nesse trabalho como quantitativa, pois ela tem como característica prevalente permitir uma abordagem focalizada, pontual e estruturada, por meio da análise de dados, em sua grande maioria, quantitativos. Segundo Fonseca (2002), esse tipo de pesquisa é centrado na objetividade, recorrendo à linguagem matemática para descrever relações entre variáveis. Dessa forma, a pesquisa quantitativa, apoiando-se nos princípios positivistas, considera como realidade aquilo que só pode ser compreendido com base na análise de dados brutos, recolhidos com o auxílio de instrumentos padronizados e neutros.

Com relação à natureza desse trabalho, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Além disso, o trabalho aqui desenvolvido tem caráter exploratório-explicativo, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema, a partir do estudo de diferentes casos, objetivando torná-lo mais explícito, além de preocupar-se em identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos estudados (GIL, 1994).

Já em relação a metodologia adotada nesse trabalho, o levantamento de dados de referências teóricas já existentes na literatura, somados aos dados obtidos através do estudo de diferentes casos, serviu como base para o desenvolvimento de uma avaliação

de desempenho em sustentabilidade de diferentes empreendimentos de produção de energia renovável. Portento, esse trabalho é pautado na análise conjunta de dados obtidos através de uma metodologia de pesquisa bibliográfica aliada ao estudo de diferentes casos de interesse.

3.2 Delimitação da Pesquisa

Considerando que o núcleo desse trabalho é a avaliação de desempenho em sustentabilidade das principais fontes energéticas renováveis brasileiras, o universo da pesquisa foi delimitado pelo estudo de empreendimentos brasileiros de geração de energia já implementados ou em fase de projeto. Para isso, foram estabelecidas a priori as três principais fontes energéticas que serviriam como base desse trabalho: a energia hidrelétrica, eólica e solar.

Com as fontes estabelecidas, procurou-se delimitar quais Unidades da Federação possuíam pelo menos um empreendimento de cada tipo de aproveitamento energético, para que a análise de desempenho fosse realizada em âmbito intraestadual e seus resultados comparados em âmbito interestadual. Por conseguinte, os Estados escolhidos foram Ceará e Santa Catarina. A partir de então, em cada Estado, três empreendimentos (um de cada tipo de fonte renovável de energia) foram selecionados para análise, totalizando seis casos de estudo, a partir dos quais foi desenvolvida a análise de desempenho em sustentabilidade.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Coleta e de Análise de Dados

Com o escopo da pesquisa delimitado, os dados primários de interesse para a determinação dos indicadores a serem utilizados na avalição de desempenho foram coletados através do estudo das características dos empreendimentos dos seis casos de estudo selecionados. Os dados necessários que não foram encontrados por meio do estudo dos empreendimentos foram estimados com base nas médias gerais de desempenho apresentadas na literatura, referentes a características de usinas que utilizam

fontes de energia semelhantes. A partir dessas informações, foi possível calcular os indicadores econômicos, técnicos, ambientais e sociais que foram aplicados no desenvolvimento da avaliação de desempenho.

O método de avaliação utilizado nessa pesquisa foi baseado na proposta desenvolvida por Araújo (2010) para a avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade. O método de Araújo (2010) se pauta no cálculo de um Índice Agregado de Sustentabilidade (IAS), que permite a integração, em um valor único, dos vários indicadores estudados, possibilitando captar, de modo abrangente, o desempenho dos sistemas avaliados e facilitando a comparação do nível de sustentabilidade de diferentes processos e empreendimentos.

Para o cálculo desse índice, foi necessária a normalização dos indicadores analisados, para que eles pudessem ser trabalhados de modo adimensional. A partir dos indicadores normalizados, foi possível a determinação dos Sub-Índices de Sustentabilidade, para cada uma das dimensões trabalhadas na pesquisa. O IAS pôde então ser calculado para cada caso, através da integração dos valores determinados para os sub-índices.

Essa integração foi realiza em três cenários para diferentes perfis de investidores, em que cada sub-índice era multiplicado por um peso, conforme o ponto de vista e interesse do investidor. Os cenários de investimento desenvolvidos foram: um investidor muito interessado na dimensão técnico-econômica, desvalorizando, em contrapartida, as dimensões socioambientais; um investidor que valorizava mais as questões socioambientais que as técnico-econômicas; e um investidor que buscava um equilíbrio entre todas as dimensões da sustentabilidade. Com os IASs calculados para cada um dos casos estudados, nos três cenários desenvolvidos, foi possível realizar a comparação entre eles, determinando qual possuía o melhor desempenho em sustentabilidade dentro de cada Estado e cenário de investimento considerado.

Os resultados dessa avaliação puderam ser então sintetizados em gráficos e tabelas, que os tornaram mais visuais, facilitando sua compreensão e servindo como base para o desenvolvimento de uma discussão sobre suas implicações.

3.4 Limitações do Método

A adoção e aplicação de qualquer método de pesquisa está inevitavelmente fadada a limitações. Dessa forma, para uma melhor compreensão do alcance e magnitude dos resultados obtidos através da aplicação de um método de pesquisa, é imprescindível ressaltar também as limitações envolvidas no processo de avaliação. No caso da análise de desempenho em sustentabilidade desenvolvida nesse trabalho, algumas restrições devem ser destacadas, principalmente aquelas que se referem ao processo de escolha e determinação de indicadores, à elaboração de cenários, à abrangência espacial dos casos estudados, e à quantidade de fontes energéticas avaliadas.

Considerando que a escolha dos indicadores que fundamentam o método de avaliação é um processo complexo e de difícil execução, resultados diferentes poderiam ter sido alcançados por meio da utilização de outros indicadores. Além disso, os resultados da pesquisa também estão condicionados pelos cenários elaborados, já que diferentes desempenhos em sustentabilidade poderiam ter sido atingidos, se outros pesos tivessem sido atribuídos para cada cenário.

Outro ponto que deve ser levantado é o da limitação no número de Unidades Federativas analisadas pelo estudo. Considerando que a disponibilidade das fontes de energia renovável depende significativamente do local e da quantidade de energia disponível, os resultados do desempenho em sustentabilidade podem diferir, conforme qual Estado, ou região do País, é levado em consideração. Logo, a extrapolação das repercussões desse estudo para outras locais, ou Unidades Federativas não consideradas por ele, deve ser realizada de forma cautelosa, de modo a evitar generalizações fracamente embasadas e a considerar as particularidades, potencialidades e restrições de cada local estudado.

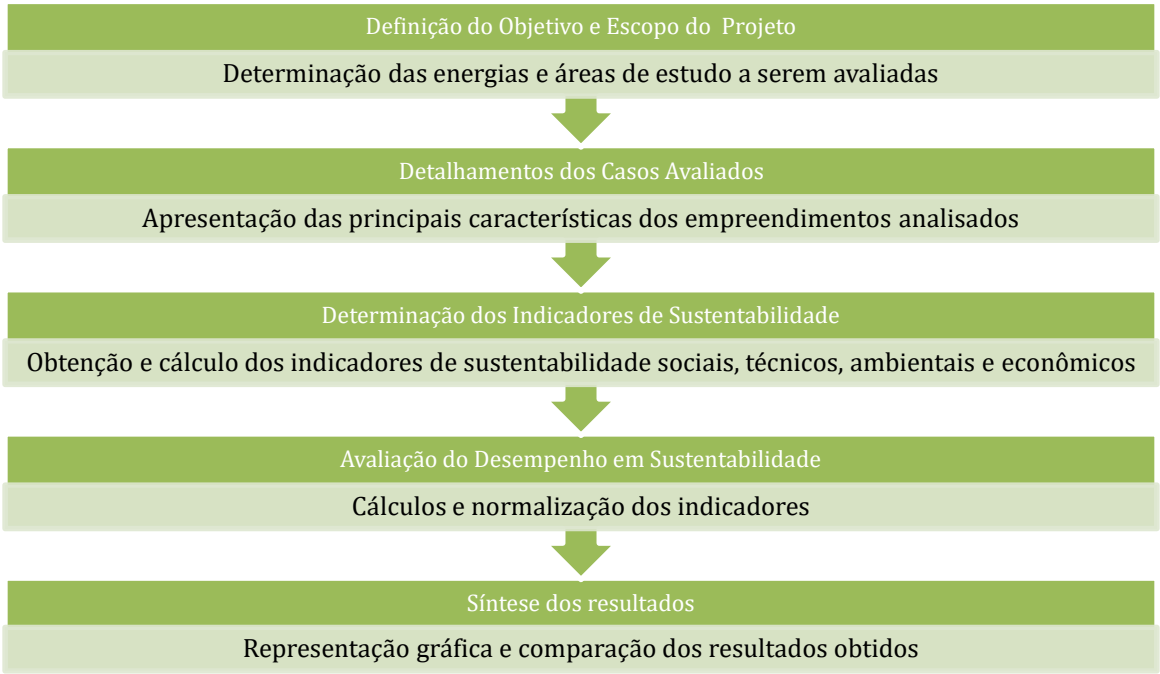
Além disso, deve-se comentar também que esse trabalho avaliou apenas três das fontes renováveis que possuem potencial de exploração no Brasil. Logo, para que os resultados aqui obtidos se tornem ainda mais condizentes à realidade de nosso país, é imprescindível que outras fontes, além das abordadas, sejam consideradas, visando abranger cada vez mais a grande variedade energética que o nosso país tem o privilégio de possuir.

Portanto, embora os resultados obtidos através do método aplicado nesse estudo possam ser de grande valia para a análise da questão energética brasileira e para o embasamento de futuras decisões e planejamentos nesse setor, é fundamental ressaltar que mais pesquisas devem ser desenvolvidas, de modo a abranger outras potenciais fontes renováveis de energia e considerar uma expansão espacial das regiões analisadas.

4. Avaliação de Tecnologias Renováveis de Produção de Energia em Duas Regiões do Brasil

A avaliação do desempenho de sustentabilidade de tecnologias renováveis de produção de energia é realizada nesse trabalho de acordo com o diagrama representado na Figura 4.1. Esse modelo foi desenvolvido com base no trabalho de avaliação de desempenho de sustentabilidade apresentado por Araújo (2010), e estruturado de modo a se obter, como resultado final, um indicador agregado de sustentabilidade a partir dos diferentes indicadores específicos de sustentabilidade escolhidos.

Figura 4.1. Método proposto para a avaliação de desempenho em sustentabilidade de tecnologias renováveis de produção de energia.



4.1 Definição do Escopo do Projeto

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a sustentabilidade das principais tecnologias renováveis de produção de energia elétrica no Brasil. Para que as fontes analisadas fossem determinadas, foi realizado um estudo da matriz energética brasileira atual e das fontes de energia que apresentam grande potencial de exploração no país. Além disso, o escopo do trabalho foi delimitado pela análise de três empreendimentos diferentes de produção de energia elétrica em dois distintos Estados da Federação.

De acordo com a ANEEL (2016b), a matriz elétrica brasileira é composta por usinas hidrelétricas, termelétricas, termonucleares, eólicas e solares, totalizando, em 2016, uma potência instalada de cerca de 148.946 MW. Em 2015, foi produzido um total de 541.408 GWh de energia elétrica, sendo a energia hidráulica responsável por cerca de 76% dessa geração. Já a participação de outras fontes renováveis é bem menos significativa, sendo a energia eólica responsável por 3,7% da produção, a biomassa por 1,2%, e a solar fotovoltaica por menos de 0,1% (ANEEL, 2016b).

Entretanto, a crescente preocupação com o meio ambiente e no sentido de proporcionar diversificação da matriz energética nacional impulsiona, entre outros fatores, a multiplicação de projetos de empreendimentos de geração de energia mais limpa e confiável. Segundo a ANEEL (2016b), o cenário atual da expansão da energia elétrica no Brasil, composto pelos empreendimentos de geração outorgados que estão atualmente em fase de implantação, é de 757 usinas, totalizando 37.139,65 MW de capacidade a ser instalada. Dentre esses, a fonte com maior previsão de expansão continua sendo a hídrica, estando previstas ao todo 21 Usinas Hidrelétricas (UHE) com pouco mais de 13.400 MW e outras 163 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) com outros 2.200 MW (ANEEL, 2016b).

Com reação às usinas fotovoltaicas, com quase 3.000 MW, representam 7,9% da capacidade a ser instalada. São 111 empreendimentos previstos entre 2017 e 2019. Já quanto às usinas eólicas, até outubro de 2016, mais de 2.000 MW de potência instalada entraram em operação comercial. Cerca de 350 empreendimentos estão em implantação, sendo que aproximadamente 350 MW estariam em operação ainda em 2016, e mais de 8.000 MW entre 2017 e 2021. No que diz respeito às termelétricas alimentadas à

biomassa, existe previsão de aumento na capacidade instalada de cerca de 1.927 MW até 2023 (ANEEL, 2016b).

Através desses dados e do que foi apresentado na Revisão Bibliográfica, é possível perceber que a energia hidrelétrica é fonte predominante da eletricidade do país, sendo sua análise indispensável para uma avaliação do desempenho de sustentabilidade das tecnologias renováveis de produção de energia. As outras fontes escolhidas para essa avaliação foram a eólica e a solar, devido aos promissores horizontes de expansão que ambas apresentam nos planos de desenvolvimento energético nacional. Além disso, a energia eólica é a segunda fonte renovável mais utilizada para a produção de eletricidade no país, e a energia solar tem se tornado cada vez mais viável tecnológica e economicamente, sem contar o significativo potencial de incidência solar que agracia o território brasileiro. Dessa forma, a avaliação apresentada a diante foi desenvolvida através da comparação de empreendimentos de energia hidrelétrica, eólica e solar.

A disponibilidade das fontes de energia renovável depende do local e da quantidade de energia disponível, assim como da capacidade de explorar esse recurso (DUNLAP, 2015). Logo, para que a comparação das três fontes escolhidas levasse a resultados mais concretos e efetivos, essa foi realizada com empreendimentos de dois Estados brasileiros distintos: Ceará e Santa Catarina. Esses estados foram escolhidos pois apresentam os três tipos de usinas de eletricidade (solar, eólica e hidrelétrica), apesar de possuírem diferentes disponibilidades de recursos energéticos. Desse modo, é possível realizar uma comparação entre os empreendimentos tanto dentro do próprio Estado, como de modo interestadual. As características das usinas analisadas nos dois Estados estão detalhadas a seguir.

4.2 Detalhamento dos Casos Avaliados

Conforme definido no escopo de avaliação do trabalho, nos dois Estados brasileiros estudados (CE e SC), foram selecionados três empreendimentos de geração de eletricidade através de três diferentes fontes renováveis de energia (hidrelétrica, eólica e solar). A Tabela 4.1 contém um resumo geral das principais características das usinas selecionadas para a avaliação de desempenho em sustentabilidade, sendo que mais detalhes sobre cada caso estão apresentados nos itens 4.2.1 a 4.2.6.

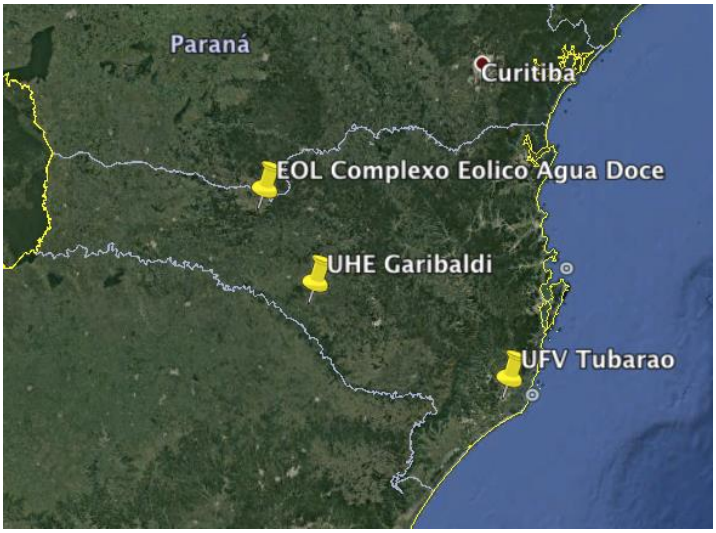
Tabela 4.1. Principais Características dos Empreendimentos Avaliados

Santa Catarina			
Dados	UHE[4][5]	EOL[2][3]	UFV[6]
Nome	Garibaldi	Complexo Eólico Agua Doce	Tubarão
Local	Abdon Batista/Cerro Negro (SC)	Água Doce (SC)	Tubarão (SC)
Detalhes	3 Turbinas Francis	86 aerogeradores	19.424 painéis
Potência Instalada (MW)	191,9	129,0	3,0
Energia Assegurada (MWh/ano)	728.000	359.042	12.725
Área Ocupada (km^2)	26,74	17,20	0,10
Custo do investimento (R$)	950.000.000	750.000.000	56.300.000
Capacidade de Abastecimento (habitantes)	500.000	380.000	10.000
Ceará			
Dados	PCH[1]	EOL[8]	UFV[9]
Nome	Açude Castanhão	Usina de Geração Eólica de Praia Formosa	Grupo Telles
Local	Jaguaribara (CE)	Camocim (CE)	Pindoretama (CE)
Detalhes	-	50 aerogeradores	9.223 painéis
Potência Instalada (MW)	5,0	105,0	3,0
Energia Assegurada (MWh/ano)	31.500	41.6678	12725
Área Ocupada (km^2)	325,0	14,00	0,05
Custo do investimento (R$)	12.000.000	500.000.000	20.000.000
Capacidade de Abastecimento (habitantes)	13.000	310.000	10.000

Fontes: [1] SEINFRA (2017); [2] Água Doce (2017); [3] IMPSA (2017); [4] Agência Nacional das Águas (2010); [5] Filippim et. al. (2013); [6] Tractebel Energia S. A. (2014); [7] ANEEL (2016a); [8] Fundação Getúlio Vargas - FGV (2009); [9] Serviço Nacional da Indústria - SENAI (2016).

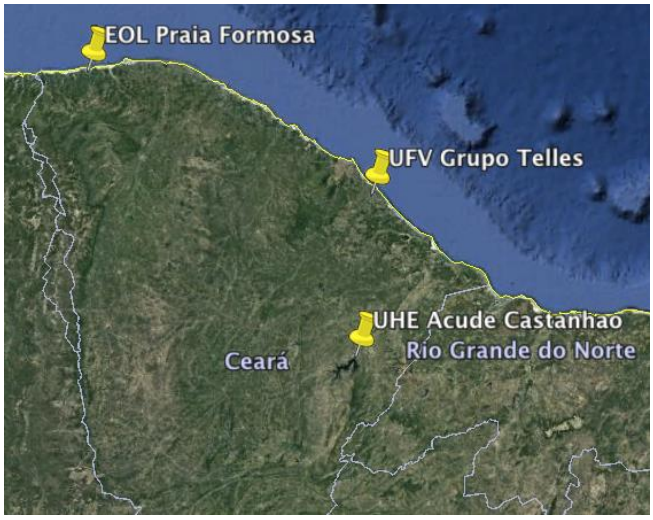
A localização espacial das usinas no Estado de Santa Catarina está ilustrada na Figura 4.2, enquanto a localização das usinas no Ceará está representada na Figura 4.3. Dos casos estudados, a PCH do Estado do Ceará é o único dos empreendimentos que ainda não foi efetivamente implementado, estando atualmente apenas em esfera de projeto.

Figura 4.2. Localização dos Empreendimentos no Estado de Santa Catarina.



Fonte: Google Earth (2017).

Figura 4.3. Localização dos Empreendimentos no Estado de Santa Catarina.



Fonte: Google Earth (2017).

É importante ressaltar que a maioria dos dados representados na Tabela 4.1 foram extraídos das fontes ali citadas. Entretanto, algumas informações não foram encontradas na literatura disponível, como a área total ocupada pelas duas fazendas eólicas, ou a energia assegurada por ambas usinas solares fotovoltaicas. Dessa forma, esses dados tiveram que ser estimados com base nas médias gerais de desempenho/aplicação apresentadas por estudos para usinas que utilizam fontes de energia semelhantes. As áreas totais ocupadas pelas EOLs foram estimadas de acordo com a média dos dados apresentados na Tabela 2.2. Já a energia assegurada pelas UFVs foi estimada considerando que elas conseguiriam garantir o fornecimento de 50% da sua capacidade total de geração. Essa suposição foi baseada na parcela da potência total instalada geralmente assegurada pelas usinas solares fotovoltaicas à ANEEL.

4.2.1 UHE Garibaldi

Construída no rio Canoas, entre as cidades de Abdon Batista e Serro Negro – SC, a Usina Hidrelétrica Garibaldi (Figura 4.4) iniciou suas operações em setembro de 2013. Com uma capacidade instalada de 191,9 MW, o empreendimento apresenta três turbinas Francis, sendo responsável por gerar energia suficiente para abastecer uma população de cerca de 500 mil habitantes. A usina, adquirida pela CTG Brasil em 2015, foi concedida à Triunfo Energia em 2010, com direito à exploração energética pelo prazo de 35 anos, até 2045. Sua construção, que durou cerca de 46 meses, contou com um investimento inicial de R$ 950 milhões.

Segundo a Agência Nacional de Águas (2010), o rio onde foi instalada a UHE nasce na serra geral catarinense, em altitudes de cerca de 1.800 m. Formando junto com o rio Pelotas, o rio Uruguai, seus principais afluentes são os rios Caveira e rio das Marombas. A área de total de drenagem do rio Canoas é de cerca de 15.000 km^2, sendo que, na seção da barragem da UHE Garibaldi, a área de drenagem é de cerca de 13.000 km^2. O arranjo da usina hidrelétrica é do tipo derivação, com barragem a montante do trecho de vazão reduzida (TVR), que tem cerca de 14 km de extensão. Seu reservatório

conta com uma área alagada de 2.674 ha, e sua casa de força principal encontra-se ao final do desvio, aproveitando-se de um desnível natural de 18m do TVR (ANA, 2010).

Figura 4.4. Usina Hidrelétrica Garibaldi – SC.

Fonte: Abdon Batista (2017).

4.2.2 EOL Complexo Eólico Água Doce

Situado ao norte do Estado de Santa Catarina, o Complexo Eólico Água Doce (Figura 4.5) está próximo à cidade de Palmas – PR, quase na divisa com o Estado do Paraná. Esse complexo, desenvolvido como parte do programa PROINFA pela empresa argentina Impsa, é composto por seis parques eólicos: Cascata (6 MW), Amparo (22,5 MW), Campo Belo (10,5 MW), Aquibatã (30 MW), Salto (30 MW), e Cruz Alta (30 MW) (IMPSA, 2017). O complexo, que recebeu um investimento total de cerca de R$ 1,3 biilhões, conta com 86 aerogeradores, todos máquinas IV-77 (geradores síncronos de imãs permanentes que acoplam as pás diretamente ao rotor do gerador, evitando a utilização de eixos, peças giratórias, e a caixa de engrenagens) de 1,5 MW de potência unitária, apresentando uma capacidade total instalada de 129 MW. Sua capacidade anual de produção de energia elétrica equivale à demanda de eletricidade de uma população de quase 400 mil habitantes. No total, a empresa argentina Impsa possui dez parques eólicos

em Santa Catarina, seis unidades do Complexo Eólico Água Doce e quatro do Complexo de Bom Jardim da Serra, disponibilizando um total de 222 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (IMPSA, 2017).

Ocupando uma área total de cerca de 200 km^2, o complexo Água Doce foi instalado diretamente sobre a Formação Geológica Serra Geral, integrante da Bacia Sedimentar do Paraná e constituída por extensos derrames vulcânicos (COSTANZO et. al., 2013). O complexo está inserido na região dos Planaltos do Sul, que se estendem aproximadamente de São Paulo até os limites ao sul do Rio Grande do Sul. Segundo Amarante, Brower e Zack (2001), o escoamento atmosférico geral nessa região é controlado pela Depressão do Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico. O gradiente de pressão entre a Depressão do Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico induz um escoamento persistente de nordeste ao longo da região, resultando em velocidades médias anuais do vento de 5,5m/s a 6,5m/s. Porém, esse escoamento é influenciado de modo significativo pelo relevo e pela rugosidade do terreno, sendo que ventos mais intensos (entre 7 m/s e 8 m/s) ocorrem nas maiores elevações montanhosas do continente, bem como em planaltos de baixa rugosidade, como os Campos de Palmas (AMARANTE; BROWER; ZACK, 2001).

Figura 4.5. Complexo Eólico Água Doce – SC.

Fonte: Água Doce (2017).

4.2.3 UFV Tubarão

A Usina Solar Fotovoltaica de Tubarão (Figura 4.6), localizada no município de Tubarão – SC, entrou em operação em agosto de 2014. Construída pela Tractebel Energia e parceiros da iniciativa privada e pública, a usina foi concebida para treinamento e pesquisas, com o objetivo de conhecer os custos de investimento, operação e manutenção de usinas solares. Com um investimento de aproximadamente R$ 30 milhões, a energia produzida por essa UFV, que apresenta uma capacidade instalada de 3 MWp, tem capacidade para abastecer cerca de 2,5 mil residências, (TRACTEBEL ENERGIA S.A., 2014).

A Usina Solar de Tubarão apresenta uma área total de 10 hectares, dos quais 4,5 ha são ocupados por seus 19.424 painéis fotovoltaicos. Esses módulos solares apresentam três diferentes tipos de composição, sendo 1 MWp produzido por placas de Silício Cristalino (c-Si), 1 MWp por placas de Silício Amorfo Microcristalino (a-Si/uc-Si), e 1 MWp por placas de CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio) (TRACTEBEL ENERGIA S.A., 2014).

Embora o município de Tubarão não seja a melhor região do Brasil para uma usina solar, apesentando uma radiação solar diária média de 14 MJ/m^2.dia, ele foi estrategicamente escolhido por causa dos recursos humanos disponíveis. Quando comparado com o melhor lugar para geração de energia fotovoltáica da Alemanha, Tubarão, mesmo apresentando um dos menores índices brasileiros de radiação solar, possui 40% mais de incidência solar do que o país germânico, que apresenta atualmente uma das maiores potências fotovoltaicas instaladas.

Figura 4.6. Usina Solar Fotovoltaica Tubarão – SC.

Fonte: Tractebel Energia (2017).

4.2.4 PCH Açude Castanhão

O estado do Ceará possui atualmente uma única PCH, localizada no município de Varjota, denominada Araras. Essa PCH entrou em funcionamento na década de 60 e encontra-se atualmente parada por conveniência operacional. Entretanto, o Governo do Estado do Ceará planeja construir uma nova PCH no Açude Castanhão, que possuirá uma potência instalada de 5 MW, superior à potência de 4 MW da PCH Araras. Segundo o Governo do Ceará, essa PCH realizará o aproveitamento da descarga de vazão de água do reservatório Castanhão, indispensável ao abastecimento do eixo de transposição à Região Metropolitana de Fortaleza e ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém CIPP.

A energia produzida será utilizada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, vinculada a Secretaria de Recursos Hídrico do Ceará - SRH, visando otimizar os custos de operação do sistema de transposição desse volume de água (SEINFRA, 2017). A construção da PCH contará com um investimento aproximado de R$ 12 milhões, para a produção projetada de 31,5 GWh/ano, com uma queda útil de 39 m. O Açude Castanhão (Figura 4.7), oficialmente denominado Açude Público Padre Cícero, foi construído sobre o leito do rio Jaguaribe, no estado do Ceará, teve suas obras iniciadas em 1995, e concluídas em dezembro de 2002. Com uma área alagada de cerca de 325 km^2 e uma capacidade de armazenamento de 6.700 milhões de metros cúbicos, o reservatório é um importante mecanismo de controle das secas e das cheias sazonais que atingem o vale do Jaguaribe, sendo uma reserva hídrica estratégica para o Estado. As águas armazenadas são direcionadas para o uso na agricultura irrigada, piscicultura, pesca, lazer náutico, entre outros usos (ARAÚJO; VIEIRA, 2001).

Figura 4.7. Açude Castanhão – CE.

Fonte: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (2017).

4.2.5 EOL Praia Formosa

Inaugurada em setembro de 2009, a Central Eólica Praia Formosa contou com um investimento total pela Siif Énergies de cerca de R$ 500 milhões. Localizada no município de Camocim, no Ceará, o parque eólico possui 50 aerogeradores de 2,1 MW de potência, apresentando uma capacidade instalada de 105 MW.

A central eólica, representada na Figura 4.8, está localizada na região Norte-Nordeste do Brasil, que compreende a faixa costeira com cerca de 100 km de largura que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte. Nessa região, os ventos alísios e as brisas terrestres são as principais influencias à velocidade do vento. De acordo com Amarante, Brower e Zack (2001), a parte sul dessa região, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, apresenta ventos com velocidades médias de 6m/s a 9m/s. Essas velocidades são mais elevadas, quando comparadas ao resto da região, pois os ventos alísios geralmente tornam-se mais fortes à medida que se afastam da Depressão Equatorial. Além disso, as brisas marinhas da parte Sul são significativamente acentuadas devido aos menores índices de vegetação e de umidade do solo, elevando a temperatura da superfície do solo durante as horas de sol e, por consequência, acentuando o contraste de temperaturas terra-mar e a velocidade das brisas marinhas resultantes (AMARANTE; BROWER; ZACK, 2001).

Figura 4.8. Central Eólica Praia Formosa, Camocim – CE.

Fonte: AVOL – Antonio Viana (2017).

4.2.6 UFV Grupo Telles

Inaugurada em outubro de 2016, a Usina Solar do Grupo Telles (Figura 4.9) é a maior usina solar privada do País. A UFV, que consta com uma potencia instalada de 3 MW, está localizada em Pindoretama, na região metropolitana de Fortaleza – CE. A usina foi implementada visando satisfazer as necessidades energéticas exclusivas do Grupo, responsável pela instalação do equipamento. Enquanto o empreendimento visa primariamente abastecer a indústria de embalagens de papelão Santelisa Embalagens, o excedente da geração será utilizado em outras empresas da companhia (SENAI, 2016).

O investimento para a construção da UFV foi de cerca de R$ 30 milhões, sendo que dois terços desse montante foram destinados à compra de equipamentos da fornecedora SunEdson, dos Estados Unidos. O restante foi investido nas instalações elétricas, mecânicas, na construção civil e em transformadores. Cerca de 58 mil metros de cabos elétricos foram enterrados para a interligação da usina fotovoltaica à indústria. No total, a UFV ocupa uma área de 6 ha e conta com 9.223 painéis fotovoltaicos policristalinos, que foram produzidos no Missouri, EUA.

Figura 4.9. Usinas Solar Fotovoltaica de Pindoretama – CE.

Fonte: Diário do Nordeste (2017).

4.3 Determinação dos Indicadores de Sustentabilidade

Conforme definido na Revisão Bibliográfica, os indicadores de sustentabilidade são parâmetros selecionados e considerados isoladamente ou combinados entre si, que visam avaliar ou indicar o desempenho de determinado objeto de estudo em relação aos três principais eixos da sustentabilidade: social, econômica e ambiental. A escolha desses indicadores é um processo complexo, que exige algumas considerações, pois há uma grande diversidade deles, sendo cada grupo mais adequado a um dado contexto ou universo de análise (ARAÚJO, 2010). Para a avaliação do desempenho das tecnologias estudas de geração de energia sustentável, foram determinados quatro grupos principais de indicadores, visando abranger os principais aspectos envolvidos em sua implementação e operação. Esses grupos, que serão mais detalhados a diante, são: indicadores econômicos, técnicos, ambientais e sociais. Os dados completos, utilizados para o cálculo dos indicadores, estão representados no Apêndice A.

4.3.1 Indicadores Econômicos

Para que um projeto seja implementado, não importa o quão inovador ou ambientalmente adequado ele é. Primeiramente, ele deve ser economicamente viável. Uma das grandes preocupações atuais com relação inserção de novas tecnologias de geração de energia renovável no mercado é se elas conseguirão tornar-se competitivas com relação às tecnologias tradicionais e já consolidadas de geração energética. No Brasil, embora o potencial de aproveitamento das fontes renováveis de energia seja grande, ainda há barreiras de mercado a serem transpostas para implementação comercial efetiva das tecnologias de geração (WWF, 2012). A escala de produção dessas tecnologias apresenta-se como um dos grandes desafios para sua implantação efetiva, devido ao tamanho reduzido dos parques industriais e à existência de um mercado restrito, fazendo com que os custos de instalação permaneçam altos.

De forma a comparar a viabilidade econômica atual das fontes estudadas com relação ao mercado nacional, foram estabelecidos três indicadores econômicos: custo de implantação (USD/kW), preço da energia gerada (USD/MWh) e período de retorno do

investimento (anos). O custo de implantação foi calculado através da razão do custo de investimento e a potência instalada. Como os valores de investimento foram encontrados em R$, para uma melhor comparação com os valores internacionais, eles foram convertidos para Dólares Americanos (USD) através de um fator de conversão de 3,2 R$/USD. Já os valores encontrados para o preço da energia, estabelecidos pela ANEEL no Leilão nº 9/2015 (ANEEL, 2016a), foram convertidos para dólar americano pelo mesmo fator de conversão. O período de retorno do investimento inicial foi calculado pela seguinte equação:

$$PR = \frac{Iin}{EA*CI} \qquad \text{[Equação 4.1]}$$

O Período de Retorno (PR) é, portanto, medido em anos, sendo o resultado da divisão do Investimento Inicial (Iin), em USD, pelo produto da Energia Assegurada (EA, em MWh/ano) e Custo Inicial (CI, em USD). É importante ressaltar que essa análise do período de retorno adotada foi bem simplificada, de modo a apenas fornecer uma base de comparação entre o investimento dos empreendimentos estudados. Essa opção foi adotada, tendo em vista a dificuldade em encontrar dados de operação e manutenção para tais empreendimentos e também pelo fato desses valores serem relativamente baixos, pois tais sistemas são projetados para funcionar com mínima necessidade de intervenção. Análises mais detalhadas incluem os custos de manutenção e operação das usinas, ao longo de seus funcionamentos, fornecendo um parâmetro mais preciso com relação ao retorno do investimento.

Os indicadores econômicos determinados para cada um dos investimentos, nos dois Estados brasileiros estudados, estão representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Indicadores econômicos dos empreendimentos estudados

Estado	Indicadores de Sustentabilidade		UHE	EOL	UFV
	Indicador	Unidade			
SC	Custo de Implantação	USD/kW	1.547,0	1.817,0	5.865,0
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,94	69,69	77,81
	Período de Retorno do Investimento Inicial	Anos	5,75	9,37	15,53
CE	Custo de Implantação	USD/kW	750,0	1.488,0	2.083,0
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,94	69,69	77,81
	Período de Retorno do Investimento Inicial	Anos	1,68	5,38	5,52

É importante notar que o custo de implantação, e o consequente período de retorno do investimento inicial, para a PCH no Ceará é consideravelmente menos elevado do que os outros investimentos. Isso se dá, pois trata-se da implementação de um sistema de geração de energia em um reservatório de água já construído. Ou seja, não haverá gastos com a implementação de uma nova barragem, apenas com a incorporação de um sistema de geração de energia elétrica, o que reduz de modo significativo o montante de capital que deve ser investido.

Além disso, a grande diferença entre os custos de instalação de usinas fotovoltaicas no Ceará e em Santa Catarina, apesar de serem investimentos que apresentam a mesma potência instalada, pode ser explicado pelo número de painéis solares requerido por cada empreendimento. Enquanto a UFV de Santa Catarina apresenta 19.424 painéis, a do Ceará possui apenas 9.223 painéis. Essa grande diferença pode ser atribuída à radiação solar global diária média do Ceará que é bem mais elevada que a de Santa Catarina, necessitando de menos área, e consequentemente menos painéis, para produzir a mesma quantidade de energia.

4.3.2 Indicadores Técnicos

Foram considerados como indicadores técnicos aqueles que representam aspectos físicos, temporais e de rendimento das usinas avaliadas, como energia assegurada, disponibilidade do recurso explorado, aproveitamento da área, e tempo de vida do empreendimento. É importante ressaltar que os indicadores técnicos de um empreendimento estão intimamente ligados com seus aspectos econômicos e ambientais. Quanto maior o aproveitamento de uma área, ou seja, quanto maior a geração de energia

em um menor espaço, menores terão de ser as modificações do ambiente ao se implantar a usina e menos oneroso será o processo de implantação, por exigir um tamanho de área menor. Além disso, se o recurso explorado for bem abundante na região, menor será a área que deverá ser ocupada para que esse recurso produza a eletricidade necessária para atender às demandas da região.

Os indicadores técnicos determinados para cada um dos investimentos, nos dois Estados brasileiros estudados, estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Indicadores técnicos dos empreendimentos estudados

Estado	Indicadores de Sustentabilidade		UHE	EOL	UFV
	Indicador	Unidade			
SC	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	3.793,6	2.783,3	4.241,7
	Disponibilidade do Recurso	Qualitativo	3	3	1
	Aproveitamento da Área	MW/km^2	7,18	7,5	30,0
	Life-Time	Anos	100	20	20
CE	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	6.300,0	3.968,4	4.241,7
	Disponibilidade do Recurso	Qualitativo	1	3	3
	Aproveitamento da Área	MW/km^2	0,015	7,5	60
	Life-Time	Anos	32	20	20

Fonte: O autor.

A energia assegurada foi determinada com base na Resolução Normativa Nº 65, de março de 2004, da ANEEL, que estabelece a energia assegurada pelas PCHs e EOLs, além de outros materiais publicados pela Agência Nacional de Energia. Entretanto, conforme citado anteriormente, como tratam-se de empreendimentos recentes, não foram encontrados em literatura os valores energéticos assegurados pelas UFVs. Logo, esses tiveram de ser estimados com base nas médias gerais de desempenho apresentadas por estudos para usinas que utilizam fontes de energia semelhantes (ANEEL, 2017; IPCC, 2012). Para que os indicadores pudessem ser comparados entre si, o valor da energia assegurada por cada usina foi dividido pela sua potência instalada.

A disponibilidade do recurso em cada região foi determinada de modo qualitativo, sendo que os parâmetros utilizados para essa avaliação estão representados na Tabela 4.4. Os valores qualitativos adotados variaram de 1, para recurso pouco disponível, a 3,

recurso abundante. Deve-se salientar que foram utilizados diferentes parâmetros de avaliação para os diferentes recursos avaliados, sendo o recurso hídrico avaliado pela pluviosidade anual média, o recurso eólico pela velocidade média do vento, e o recurso solar pela radiação global diária média.

Tabela 4.4. Avaliação qualitativa do indicador "Disponibilidade do Recurso"

Recurso	Parâmetro Avaliado	Valor Qualitativo	Valor Quantitativo	Fonte Consultada
Hidráulica	Pluviosidade Média Anual	1	<1100 mm/ano	Quadros et. al. (2017)
		2	1100 a 1500 mm/ano	
		3	>1500 mm/ano	
Eólica	Velocidade Média do Vento	1	3 a 5 m/s	Amarante, Brower e Zack (2001)
		2	5 a 7 m/s	
		3	7 a 9 m/s	
Solar	Radiação solar global diária	1	14 a 16 MJ/m2.dia	Tiba et. al. (2000)
		2	16 a 18 MJ/m2.dia	
		3	> 18 MJ/m2.dia	

Fonte: O autor.

O indicador "Aproveitamento de Área" foi obtido pela divisão da potência instalada pela área total ocupada por cada empreendimento. Dessa forma, quanto maior o indicador, mais energia pode ser produzida por quilômetro quadrado, o que significa a ocorrência de um melhor rendimento do espaço ocupado. Como também já foi comentado anteriormente, não foi encontrada na literatura disponível a área total ocupada pelas duas fazendas eólicas. Dessa forma, esses dados tiveram que ser estimados com base nas médias gerais de desempenho apresentadas por estudos para usinas que utilizam fontes de energia semelhantes, sendo as áreas totais ocupadas pelas EOLs estimadas de acordo com a média dos dados apresentados na Tabela 2.2.

Já o Tempo de Vida, ou Life-time, foi estimado de acordo com as médias apresentadas por empreendimentos semelhantes, encontradas na literatura. Enquanto usinas hidrelétricas costumam apresentar tempo de vida de cerca de 100 anos, PCHs apresentam um período mais curto, de cerca de 30 anos. Já as usinas solares e eólicas costumam apresentar Life-time aproximado de 20 anos, como também pode ser observado na Tabela 2.2.

4.3.3 Indicadores Ambientais

Em geral, as energias renováveis têm como principal vantagem serem menos nocivas ao ambiente do que as fontes fósseis tradicionais, não renováveis. Entretanto, não se deve assumir que elas sejam completamente inofensivas ao meio, ou isentas de consequências ambientais negativas. Seja durante o processo de produção dos componentes das usinas, durante a implementação, ou, até mesmo durante a operação, esses empreendimentos são sim responsáveis por impactos ao meio ambiente, embora em escala bem menor quando comparados às fontes não renováveis. Desse modo, é imperativo que esses danos ambientais sejam quantificados ou qualificados por meio de indicadores, para que se possa identificar oportunidades de melhoria. Logo, o ciclo de vida desses empreendimentos pode ser aprimorado constantemente, tornando-os cada vez mais sustentáveis.

Os indicadores ambientais determinados para cada um dos investimentos, nos dois Estados brasileiros estudados, estão representados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Indicadores ambientais dos empreendimentos estudados

Estado	Indicadores de Sustentabilidade			UHE	EOL	UFV
	Tipo	Indicador	Unidade			
SC	Ambiental Quantitativo	Emissões anuais de gases estufa	kg CO2eq/MWh	12,7	11,87	94
		Emissões anuais de outros gases	kg NOx/MWh	0,018	0,0545	0,216
			kg SO2/MWh	0,016	0,053	0,208
		Consumo anual de Água	t/MWh	36	1	10
	Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		5	1	1
		Retalhamento Unidades de Conservação		5	2	1
		Interação da estrutura com a fauna		3	2	1
		Toxinas		2	1	3
CE	Ambiental Quantitativo	Emissões anuais de gases estufa	kg CO2eq/MWh	12,7	11,87	94
		Emissões anuais de outros gases	kg NOx/MWh	0,018	0,0545	0,216
			kg SO2/MWh	0,016	0,053	0,208
		Consumo anual de Água	t/MWh	36	1	10
	Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		3	1	1
		Retalhamento Unidades de Conservação		3	2	1
		Interação da estrutura com a fauna		3	2	1
		Toxinas		2	1	3

Fonte: O autor.

Os indicadores quantitativos propostos para a avaliação do desempenho ambiental das fontes avaliadas foram: emissões de gases estufa, emissões de NOx, emissões de SO_2, e consumo de água. Deve-se ressaltar que todos esses indicadores foram avaliados de acordo com a análise do ciclo de vida de cada uma das fontes de energia, incluindo, principalmente, a produção dos componentes do sistema e a operação das usinas. Os valores calculados foram estimados a partir das médias dos dados apresentados na literatura estudada, que estão resumidos na Tabela 2.2.

Embora existam diversos indicadores que podem ser utilizados para a avaliação dos impactos aos bens de difícil valoração, os indicadores qualitativos escolhidos para avaliar os impactos ambientais inerentes ao ciclo de vida das fontes estudadas foram: perda de biodiversidade, retalhamento de unidades de conservação, interação da estrutura com a fauna, e lançamento de toxinas no meio. Os valores atribuídos a esses indicadores foram determinados de acordo com os critérios apresentados na Tabela 4.6. Esses valores foram baseados nos critérios de avaliação de impacto ambiental propostos por Noble (2015).

Tabela 4.6. Avaliação qualitativa dos Indicadores Ambientais e Sociais

Valor Qualitativo	Tipo de Impacto
1	Impacto negligenciável
2	Pequeno impacto
3	Impacto moderado
4	Grande impacto
5	Impacto severo

Fonte: Noble (2015).

O pior desempenho das fontes de energia solar nos indicadores ambientais quantitativos pode ser explicado através da análise do escopo de avaliação dos estudos dos quais os valores médios dos dados foram retirados. Esses estudos consideraram todo o ciclo de vida de uma usina fotovoltaica de geração de energia elétrica, que leva em conta, consequentemente, a etapa de exploração da matéria-prima das placas solares. Conforme explicado por Dunlap (2015), alguns dos materiais usados na produção de

módulos fotovoltaicos exigem muita energia para sua produção. Esse caso está tipicamente relacionado a obtenção de materiais que são relativamente raros, como Gálio, Índio e Selênio, componentes comuns de placas fotovoltaicas que requerem a extração de grande quantidade de matéria bruta para que seja obtida pequena quantidade do elemento necessário (DUNLAP, 2015). Além disso, atualmente, o processo de manufatura de placas solares requer alta tecnologia e consome muita energia, o que colabora para o aumento dos índices de emissões de gases e consumo de água, quando o ciclo de vida da energia solar fotovoltaica é avaliado.

Deve-se notar também que o desempenho dos indicadores ambientais qualitativos dos aproveitamentos hidrelétricos foi diferente para cada Estado. Isso se deve ao fato de que o empreendimento avaliado em Santa Catarina trata de uma usina hidrelétrica propriamente dita (potência instalada superior à 50MW), enquanto a usina que se pretende instalar no Ceará é uma PCH (potência instalada entre 3 e 50MW). Por serem de menor porte, as PCHs tendem a apresentar menores impactos ao meio ambiente durante seu processo de instalação e operação, pois requerem uma área menor de alagamento, causando modificações mais brandas no meio.

4.3.4 Indicadores Sociais

Assim como as energias renováveis não são isentas de impactos ambientais, elas também apresentam impactos sociais que devem ser levados em consideração. A exploração de fontes energéticas sustentáveis resulta em grandes ganhos para a sociedade que a realiza, como a promoção de um modo de vida mais limpo e sustentável e a diversificação e aumento da segurança no fornecimento de energia. Entretanto, apesar de serem responsáveis por vários impactos sociais positivos, esse trabalho focou-se em avaliar os principais indicadores de impactos negativos dessas fontes energéticas para a sociedade. Embora diversos impactos sociais estejam associados à implementação e operação de sistemas de geração de energia, foram selecionados indicadores relativos aos principais impactos que são comumente levantados na literatura para as três fontes de energia estudadas. Esses indicadores são: deslocamento populacional, impacto no uso da terra, impacto visual e ruído.

Os indicadores sociais foram determinados de modo qualitativo, seguindo os mesmos preceitos apresentados na Tabela 4.6, com base nos critérios de avaliação de impacto propostos por Noble (2015). Esses indicadores foram representados na Tabela 4.7. para cada um dos investimentos, nos dois Estados brasileiros estudados.

Tabela 4.7. Indicadores sociais dos empreendimentos estudados

Estado	Indicadores de Sustentabilidade		UHE	EOL	UFV
	Indicador	Unidade			
SC	Deslocamento Populacional		5	1	1
	Impacto uso da terra		5	2	1
	Impacto visual		1	3	1
	Ruído		2	3	1
CE	Deslocamento Populacional		3	1	1
	Impacto uso da terra		3	2	1
	Impacto visual		1	3	1
	Ruído		2	3	1

Fonte: O autor.

Assim como nos indicadores ambientais, é importante observar que o desempenho dos indicadores sociais dos aproveitamentos hidrelétricos foi diferente para cada Estado. Isso também se deve ao fato de que, conforme já citado, o empreendimento avaliado em Santa Catarina trata de uma usina hidrelétrica propriamente dita, enquanto a usina que se pretende instalar no Ceará é uma PCH, que não impacta tanto a população ou o uso da terra quanto uma grande usina hidrelétrica.

4.4 Avaliação do Desempenho em Sustentabilidade

A avaliação do desempenho em sustentabilidade dos seis empreendimentos analisados foi realizada através do cálculo de um Índice Agregado de Sustentabilidade (IAS). Esse índice permite a integração dos vários indicadores estudados em um valor único, possibilitando captar integralmente o desempenho dos sistemas avaliados e facilitando a comparação de seu nível de sustentabilidade (ARAÚJO, 2010). Segundo a Global Report Iniciative – GRI (2006), o principal objetivo de um índice agregado de sustentabilidade é tornar possível a análise conjunta de indicadores, considerando cada uma das categorias avaliadas nas três dimensões da sustentabilidade (GRI, 2006).

Entretanto, como cada um dos indicadores apontados apresenta dimensões e unidades diversas, isso dificulta a sua agregação em um índice comum adimensional. Por conseguinte, é imperativo que se efetue uma normalização dos indicadores antes do cálculo, para que as diferentes categorias estudadas sejam avaliadas diretamente (ARAÚJO, 2010). O cálculo dessa normalização foi realizado a partir da seguinte fórmula, adaptada de Wenzel, Haushild e Alting (1997):

$$NP\ (j) = \ \pm 1 * P(j) * \ R(j)^{-1}$$ [Equação 4.2]

Sendo que, R(j) é o fator de normalização, P(j) é o indicador do empreendimento, e NP(j) é o indicador normalizado. O fator de normalização R(j) utilizado foi a média aritmética dos valores analisados para aquele indicador. Além disso, aqueles indicadores que, ao aumentar, apresentariam um impacto positivo na sustentabilidade dos sistemas avaliados, foram multiplicados por 1. Já aqueles indicadores que, se fossem reduzidos, aumentariam a sustentabilidade do sistema, foram multiplicados por -1. Em outras palavras, ao serem normalizados, os impactos positivos resultaram em indicadores adimensionais com sinal positivo e os impactos negativos resultaram em indicadores adimensionais com sinal negativo. Dessa forma, ao se calcular o Índice Agregado de Sustentabilidade (IAS), aqueles de maior valor apresentam melhores desempenhos em sustentabilidade, enquanto aqueles de menor valor apresentam desempenho pior.

A partir dos indicadores normalizados, é possível calcular os sub-índices referentes a cada uma das categorias de indicadores estudada: econômica, técnica, social e ambiental. O cálculo desses sub-índices se dá através da seguinte fórmula (ARAÚJO, 2010):

$$I_s = \sum_j W_j * NP(j) \qquad \text{[Equação 4.3]}$$

Nessa equação, Wj representa o fator de peso para o potencial de impacto ou indicador de entrada j, NP(j) é o indicador normalizado e Is é o sub-índice de impacto. Segundo Araújo (2010), um obstáculo que surge durante a integração dos indicadores é a dificuldade em definir fatores de peso adequados. Esses fatores devem ser baseados tanto nas condições do local onde se opera o negócio, quantos no tipo de política de sustentabilidade dos responsáveis pelo investimento (ARAÚJO, 2010). Dessa forma, é importante que os fatores de ponderação sejam reflexo dos objetivos estratégicos dos investidores, que atribuiriam diferentes pesos para a importância dos impactos econômicos, técnicos, ambientais e sociais do empreendimento em que estão investindo.

Por fim, o IAS é calculado pela soma de todos os sub-índices de impacto (Equação 4.4), resultando, portanto, em uma medida única e adimensional que busca agregar os indicadores estudados e permite a avaliação dos sistemas de geração de energia renovável em todos os eixos da sustentabilidade.

$$IAS = I_{eco} + I_{tec} + I_{amb} + I_{soc} \qquad \text{[Equação 4.4]}$$

O Apêndice B desse trabalho apresenta o memorial de cálculo completo dos Índices Agregados de Sustentabilidade de cada cenário para os dois Estados abrangidos pela análise desenvolvida nesse trabalho.

4.5 Aplicação do Método aos Casos Avaliados

A seguir será apresentado como o método de avalição de desempenho em sustentabilidade detalhado no item 4.4 foi aplicado aos indicadores apontados no item 4.3, para cada um dos empreendimentos avaliados nas duas regiões estudadas.

Primeiro, normalizou-se os indicadores de sustentabilidade com a aplicação da equação 4.2, lembrando que o valor do fator de normalização utilizado corresponde ao valor médio entre os valores dos três empreendimentos da região estudada. Os valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade estão apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, para os Estados de Santa Catarina e Ceará, respectivamente.

Tabela 4.8. Valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade para Santa Catarina**.**

Indicadores de Sustentabilidade			UHE	EOL	UFV	R(j)	NP(j)		
Tipo	Indicador	Unidade					UHE	EOL	UFV
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	1.547	1.817	5.865	3.076	-0,50	-0,59	-1,91
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,9	69,7	77,81	72,81	0,97	0,96	1,07
	Retorno do Investimento	Anos	5,75	9,37	15,53	10,22	-0,56	-0,92	-1,52
Técnico	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	3.794	2.783	4.242	3.606	1,05	0,77	1,18
	Dispon. do Recurso	Qualitativo	3	3	1	2,33	1,29	1,29	0,43
	Aproveitamento da Área	MW/km2	7,18	7,5	30	14,89	0,48	0,50	2,01
	Life-Time	Anos	100	20	20	46,67	2,14	0,43	0,43
Ambiental Quantitativo	Emissões de gases estufa	kg CO2eq/MWh	12,7	11,87	94	39,52	-0,32	-0,30	-2,38
	Emissões de outros gases	kg NOx/MWh	0,018	0,054	0,216	0,10	-0,19	-0,57	-2,25
		kg SO2/MWh	0,016	0,053	0,208	0,09	-0,17	-0,57	-2,25
	Consumo anual de Água	t/MWh	36	1	10	15,67	-2,30	-0,06	-0,64
Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		5	1	1	2,33	-2,14	-0,43	-0,43
	Retalhamento Unidades de Conservação		5	2	1	2,67	-1,88	-0,75	-0,38
	Interação da estrutura com a Fauna		3	2	1	2,00	-1,50	-1,00	-0,50
	Toxinas		2	1	3	2,00	-1,00	-0,50	-1,50
Social	Deslocamento Populacional		5	1	1	2,33	-2,14	-0,43	-0,43
	Impacto uso da terra		5	2	1	2,67	-1,88	-0,75	-0,38
	Impacto visual		1	3	1	1,67	-0,60	-1,80	-0,60
	Ruído		2	3	1	2,00	-1,00	-1,50	-0,50

Fonte: O autor.

Tabela 4.9. Valores normalizados dos indicadores de sustentabilidade para o Ceará**.**

Indicadores de Sustentabilidade			UHE	EOL	UFV	R(j)	NP(j)		
Tipo	Indicador	Unidade					UHE	EOL	UFV
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	750	1.488	2.083	1.440	-0,52	-1,03	-1,45
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,9	69,7	77,8	72,8	0,97	0,96	1,07
	Retorno do Investimento	Anos	1,68	5,38	5,52	4,19	-0,40	-1,28	-1,32
Técnico	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	6.300	3.968	4.242	4.836	1,30	0,82	0,88
	Dispon. do Recurso	Qualitativo	1	3	3	2,33	0,43	1,29	1,29
	Aproveitamento da Área	MW/km2	0,02	7,5	60	22,51	0,001	0,33	2,67
	Life-Time	Anos	32	20	20	24,00	1,33	0,83	0,83
Ambiental Quantitativo	Emissões de gases estufa	kg CO2eq/MWh	12,7	11,87	94	39,52	-0,32	-0,30	-2,38
	Emissões de outros gases	kg NOx/MWh	0,018	0,054	0,216	0,10	-0,19	-0,57	-2,25
		kg SO2/MWh	0,016	0,053	0,208	0,09	-0,17	-0,57	-2,25
	Consumo anual de Água	t/MWh	36	1	10	15,67	-2,30	-0,06	-0,64
Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		3	1	1	1,67	-1,80	-0,60	-0,60
	Retalhamento Unidades de Conservação		3	2	1	2,00	-1,50	-1,00	-0,50
	Interação da estrutura com a Fauna		3	2	1	2,00	-1,50	-1,00	-0,50
	Toxinas		2	1	3	2,00	-1,00	-0,50	-1,50
Social	Deslocamento Populacional		3	1	1	1,67	-1,80	-0,60	-0,60
	Impacto uso da terra		3	2	1	2,00	-1,50	-1,00	-0,50
	Impacto visual		1	3	1	1,67	-0,60	-1,80	-0,60
	Ruído		2	3	1	2,00	-1,00	-1,50	-0,50

Fonte: O autor.

Com os indicadores normalizados, o passo seguinte para o cálculo dos índices agregados de sustentabilidade está relacionado à determinação dos pesos (Wj), os quais serão aplicados em cada categoria de indicador, conforme indicado na Equação 4.3. Os stakeholders responsáveis pela promoção das energias renováveis apresentam diferentes visões e prioridades estratégicas, valorizando, portanto, as categorias de indicadores de modo diferente. Em outras palavras, os investidores podem associar diferentes medidas de peso para cada indicador individual dependendo dos seus interesses.

Portanto, de modo a facilitar o processo de definição de pesos para os indicadores, escolheu-se o método de análise hierárquica (AHP). Segundo Araújo (2010), esse método tem como base analises em pares, e na visão de especialistas, para derivar fatores de prioridade. A análise desenvolvida nas matrizes de prioridade (Tabelas 4.12, 4.15 e 4.18) está mais detalhada nas Tabelas 4.10 e 4.11. Lembrando que os índices calculados na

Tabela 4.10 são relativos ao peso de importância dada pelo investidor a determinada dimensão da sustentabilidade quando comparada a outra dimensão. Por exemplo, o índice C_2 se refere ao peso de importância dado à dimensão Ambiental de um projeto, quando comparada a dimensão Técnica do mesmo, segundo ponto de vista de um investidor. O peso de cada dimensão foi calculado pela média aritmética dos diferentes índices Wj obtidos pela análise, como pode ser observado na Tabela 4.11.

Tabela 4.10. Cálculo dos índices para a Matriz de Prioridade

A_1	$P_{A(eco)}/P_{A(eco)}$
A_2	$P_{A(eco)}/P_{A(tec)}$
A_3	$P_{A(eco)}/P_{A(amb)}$
A_4	$P_{A(soc)}/P_{A(soc)}$
B_1	$P_{B(tec)}/P_{B(eco)}$
B_2	$P_{B(tec)}/P_{B(tec)}$
B_3	$P_{B(tec)}/P_{B(amb)}$
B_4	$P_{B(tec)}/P_{B(soc)}$
C_1	$P_{C(amb)}/P_{C(eco)}$
C_2	$P_{C(amb)}/P_{C(tec)}$
C_3	$P_{C(amb)}/P_{C(amb)}$
C_4	$P_{C(amb)}/P_{C(soc)}$
D_1	$P_{D(soc)}/P_{D(eco)}$
D_2	$P_{D(soc)}/P_{D(tec)}$
D_3	$P_{D(soc)}/P_{D(amb)}$
D_4	$P_{D(soc)}/P_{D(soc)}$

Fonte: O autor.

Tabela 4.11. Matriz de Prioridades

	$P_{Econômico}$	$P_{Técnico}$	$P_{Ambiental}$	P_{Social}	Pesos (Wj)
$P_{Econômico}$	A_1	B_1	C_1	D_1	
$P_{Técnico}$	A_2	B_2	C_2	D_2	
$P_{Ambiental}$	A_3	B_3	C_3	D_3	
P_{Social}	A_4	B_4	C_4	D_4	
Somatório	ΣA	ΣB	ΣC	ΣD	
Weco	$A_1/\Sigma A$	$B_1/\Sigma B$	$C_1/\Sigma C$	$D_1/\Sigma D$	Média Aritmética de Weco
Wtec	$A_2/\Sigma A$	$B_2/\Sigma B$	$C_2/\Sigma C$	$D_2/\Sigma D$	Média Aritmética de Wtec
Wamb	$A_3/\Sigma A$	$B_3/\Sigma B$	$C_3/\Sigma C$	$D_3/\Sigma D$	Média Aritmética de Wamb
Wsoc	$A_4/\Sigma A$	$B_4/\Sigma B$	$C_4/\Sigma C$	$D_4/\Sigma D$	Média Aritmética de Wsoc

Fonte: O autor.

Logo, visando orientar o processo de definição dos pesos para as categorias de indicadores, definiram-se três cenários diferentes com base em investidores com interesses e visões estratégicas distintas. Esses cenários são mais bem detalhados a seguir:

- **Primeiro Cenário (CN-mon):** o investidor prioriza o retorno econômico e as características técnicas e de rendimento do sistema de geração de energia, atribuindo maior valor, portanto, ao desempenho dos indicadores econômicos e técnicos, em detrimento dos indicadores ambientais e sociais.

- **Segundo Cenário (CN-eco):** o investidor apresenta grande preocupação com relação ao desempenho dos indicadores ambientais e sociais, estando disposto, dessa forma, a investir em sistemas de geração de energia renovável que valorizem muito esses aspectos, mesmo que eles não sejam tão vantajosos de forma técnica ou econômica.

- **Terceiro Cenário (CNsust):** o investidor desse cenário busca integrar todas as três dimensões da sustentabilidade, valorizando de forma igual todas as categorias de indicadores avaliadas. Logo, esse investidor apresenta grande interesse no que caracteriza um sistema de produção sustentável.

4.5.1 Avaliação do Cenário 1 (CN-MON)

Conforme explicado anteriormente, o CN-MON visa representar o ponto de vista de um investidor que apresenta grande interesse no retorno econômico e desempenho técnico do empreendimento, não atribuindo o mesmo valor para as questões ambientais e sociais. Para representar esse ponto de vista, determinou-se os pesos a serem utilizados no cenário a partir da matriz de prioridades representada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Matriz de Prioridade para os pesos do CN-MON.

	$P_{Econômico}$	$P_{Técnico}$	$P_{Ambiental}$	P_{Social}	Pesos (Wj)
$P_{Econômico}$	1/1	1/1	9/1	9/1	
$P_{Técnico}$	1/1	1/1	9/1	9/1	
$P_{Ambiental}$	1/9	1/9	1/1	1/1	
P_{Social}	1/9	1/9	1/1	1/1	
Somatório	2,22	2,22	20,00	20,00	
Weco	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Wtec	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Wamb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Wsoc	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: O autor.

Com os pesos determinados, esses foram combinados as diferentes categorias de indicadores, de modo a determinar o sub-índice ambiental, social, técnico e econômico. A partir da soma deles, é possível determinar, por fim, o Índice Agregado de Sustentabilidade. Os valores calculados para o CN-MON do Estado de Santa Catarina estão representados na Tabela 4.13, enquanto os do Ceará constam na Tabela 4.14.

Tabela 4.13. Sub-índices e IAS dos empreendimentos de Santa Catarina.

Santa Catarina	CN-MON		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	-0,04	-0,25	-1,06
Itec	2,23	1,35	1,82
Iamb	-0,58	-0,23	-0,54
Isoc	-0,17	-0,20	-0,07
$IAS_{(CN-MON)}$	1,44	0,66	0,15

Fonte: O autor.

Tabela 4.14. Sub-índices e IAS dos empreendimentos do Ceará.

Ceará	CN-MON		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	0,02	-0,61	-0,76
Itec	1,38	1,47	2,55
Iamb	-0,44	-0,23	-0,53
Isoc	-0,25	-0,25	-0,11
$IAS_{(CN-MON)}$	0,72	0,39	1,15

Fonte: O autor.

Para o CN-MON de Santa Catarina, como pode ser observado na Tabela 4.12, o empreendimento que apresentou maior desempenho foi o de energia hidrelétrica. Deve-se ressaltar novamente que esse resultado final foi alcançado em consequência da atribuição de um peso bem maior para as categorias de indicadores econômicos e técnicos, pois esses teriam uma importância superior aos sociais e ambientais, no ponto de vista do investidor analisado. Os indicadores que mais contribuíram para o maior desempenho da energia hidrelétrica foram o período de retorno do investimento e o tempo de vida do empreendimento.

Já para o CN-MON do Ceará, como pode ser visto na Tabela 4.13, o empreendimento que apresentou maior desempenho foi o de energia solar, quando um maior peso é atribuído as categorias de indicadores econômicos e técnicos. Os indicadores que mais contribuíram para o maior desempenho da energia solar foram a disponibilidade do recurso e o aproveitamento de área. É importante ressaltar novamente que a PCH estudada será implementada em um reservatório já construído, o que reduz significativamente seus custos de implantação. Por conseguinte, esse é um dos motivos que fizeram com que a PCH tivesse um desempenho superior a EOL, quando os indicadores são avaliados de acordo com os pesos estabelecidos para o CN-MON.

4.5.2 Avaliação de Cenário 2 (CN-ECO)

O CN-ECO representa o ponto de vista de um investidor que apresenta grande preocupação com os aspectos ambientais e sociais de seu empreendimento. Dessa forma, para obter o melhor desempenho possível nesses aspectos, esse investidor estaria disposto, até mesmo, a não atingir os melhores desempenhos técnico e econômico. Para representar esse ponto de vista, determinou-se os pesos a serem utilizados no cenário a partir da matriz de prioridades representada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Matriz de Prioridade para os pesos do CN-ECO.

	$P_{Econômico}$	$P_{Técnico}$	$P_{Ambiental}$	P_{Social}	Pesos (Wj)
$P_{Econômico}$	1/1	1/2	1/5	1/5	
$P_{Técnico}$	2/1	1/1	1/5	1/5	
$P_{Ambiental}$	5/1	5/1	1/1	1/1	
P_{Social}	5/1	5/1	1/1	1/1	
Somatório	13,00	11,50	2,40	2,40	
Weco	0,08	0,04	0,08	0,08	0,07
Wtec	0,15	0,09	0,08	0,08	0,10
Wamb	0,38	0,43	0,42	0,42	0,41
Wsoc	0,38	0,43	0,42	0,42	0,41

Fonte: O autor.

Os pesos determinados foram então combinados às diferentes categorias de indicadores, de modo a determinar o sub-índice ambiental, social, técnico e econômico. A partir da soma deles, determinou-se, por fim, o Índice Agregado de Sustentabilidade. Os valores calculados para o CN-ECO do Estado de Santa Catarina estão representados na Tabela 4.16, enquanto os do Ceará constam na Tabela 4.17.

Tabela 4.16. Sub-índices e IAS dos empreendimentos de Santa Catarina.

Santa Catarina	CN-ECO		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	-0,01	-0,04	-0,17
Itec	0,50	0,30	0,40
Iamb	-3,89	-1,72	-4,23
Isoc	-2,30	-1,84	-0,78
IAS_{CN-ECO}	-5,71	-3,29	-4,77

Fonte: O autor.

Tabela 4.17. Sub-índices e IAS dos empreendimentos do Ceará.

Ceará	CN-ECO		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	0,00	-0,10	-0,12
Itec	0,31	0,33	0,57
Iamb	-3,60	-1,89	-4,35
Isoc	-2,01	-2,01	-0,90
IAS_{CN-ECO}	-5,30	-3,66	-4,81

Fonte: O autor.

Para o CN-ECO de Santa Catarina, como pode ser observado na Tabela 4.16, o empreendimento que apresentou maior desempenho em sustentabilidade foi o de energia eólica. É importante ressaltar que esse resultado final foi alcançado em consequência da atribuição de um peso bem maior para as categorias de indicadores sociais e ambientais, pois esses teriam uma importância superior aos técnicos e econômicos, segundo o ponto de vista do investidor analisado. Para o CN-ECO do Ceará, como pode ser visto na Tabela 4.17, o empreendimento que apresentou maior desempenho também foi o de energia eólica. Também se nota em ambas as tabelas que a energia solar obteve segundo melhor desempenho socioambiental, enquanto a energia hidrelétrica apresentou o pior desempenho das energias estudadas.

Vale ressaltar que os empreendimentos de energia solar, apesar de apresentarem baixos impactos sociais, tiveram seu desempenho ambiental prejudicado pelo seu ciclo de vida. Como já foi comentado anteriormente, quando os processos de mineração das matérias-primas e produção dos módulos solares são levados em consideração na análise do ciclo de vida da energia solar, isso faz com que se considere um o número maior de poluentes atmosféricos emitidos para que se produza 1 MWh dessa energia.

4.5.3 Avaliação do Cenário 3 (CN-SUST)

Considerando que o desenvolvimento sustentável pode ser entendido como um desenvolvimento pautado no equilíbrio entre as esferas econômicas, ambientais e sociais, o CN-SUST foi elaborado baseando-se no ponto de vista de um investidor que busque a promoção de uma produção sustentável de energia, em todos os seus aspectos. Logo, esse investidor daria a mesma importância para todas as categorias de indicadores avaliadas. Para representar esse ponto de vista, determinou-se os pesos a serem utilizados no cenário a partir da matriz de prioridades representada na Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Matriz de Prioridade para os pesos do CN-SUST.

	$P_{Econômico}$	$P_{Técnico}$	$P_{Ambiental}$	P_{Social}	Pesos (Wj)
$P_{Econômico}$	1/1	1/1	1/1	1/1	
$P_{Técnico}$	1/1	1/1	1/1	1/1	
$P_{Ambiental}$	1/1	1/1	1/1	1/1	
P_{Social}	1/1	1/1	1/1	1/1	
Somatório	4,00	4,00	4,00	4,00	
Weco	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Wtec	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Wamb	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Wsoc	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Fonte: O autor.

Assim como nos outros cenários, os pesos determinados foram combinados às diferentes categorias de indicadores, de modo a determinar o sub-índice ambiental, social, técnico e econômico. A partir da soma deles, determinou-se, por fim, o Índice Agregado de Sustentabilidade. Os valores calculados para o CN-SUST do Estado de Santa Catarina estão representados na Tabela 4.19, enquanto os do Ceará constam na Tabela 4.20.

Tabela 4.19. Sub-índices e IAS dos empreendimentos de Santa Catarina.

Santa Catarina	CN-SUST		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	-0,02	-0,14	-0,59
Itec	1,24	0,75	1,01
Iamb	-2,37	-1,05	-2,58
Isoc	-1,40	-1,12	-0,48
$IAS_{CN\text{-}SUST}$	-2,56	-1,56	-2,63

Fonte: O autor.

Tabela 4.20. Sub-índices e IAS dos empreendimentos do Ceará.

Ceará	CN-SUST		
	UHE	EOL	UFV
Ieco	0,01	-0,34	-0,42
Itec	0,77	0,82	1,42
Iamb	-2,19	-1,15	-2,65
Isoc	-1,23	-1,23	-0,55
$IAS_{CN\text{-}SUST}$	-2,64	-1,90	-2,21

Fonte: O autor.

Para o CN-SUST, tanto de Santa Catarina, quanto do Ceará, o empreendimento que apresentou maior desempenho em sustentabilidade foi o de energia eólica. Deve-se acentuar que esse resultado final foi alcançado em consequência da atribuição de pesos iguais para todas as categorias de indicadores avaliadas, considerando que o investidor preconiza o equilíbrio de todas as esferas da sustentabilidade. É importante observar que, enquanto em Santa Catarina, a energia hidrelétrica foi a que apresentou segundo melhor desempenho em sustentabilidade, a energia solar foi a segunda melhor no Ceará. Isso pode ser reflexo da diferença na disponibilidade dos dois recursos nas duas regiões estudadas, o que tem grande influencia nos aspectos técnicos e econômicos da análise.

4.6 Síntese dos Resultados

Nesse item, apresenta-se a última etapa do procedimento proposto no diagrama da Figura 4.1 para a avaliação do desempenho em sustentabilidade das energias renováveis estudadas. Nessa etapa, visa-se condensar todas as informações obtidas pela análise desenvolvida nos itens anteriores, de modo a o fornecer subsídios para tomada de decisão com relação a qual empreendimento de geração de energia renovável é o mais adequado para diferentes situações. O ranking de desempenho em sustentabilidade para cada um dos cenários avaliados está representado na Tabela 4.21.

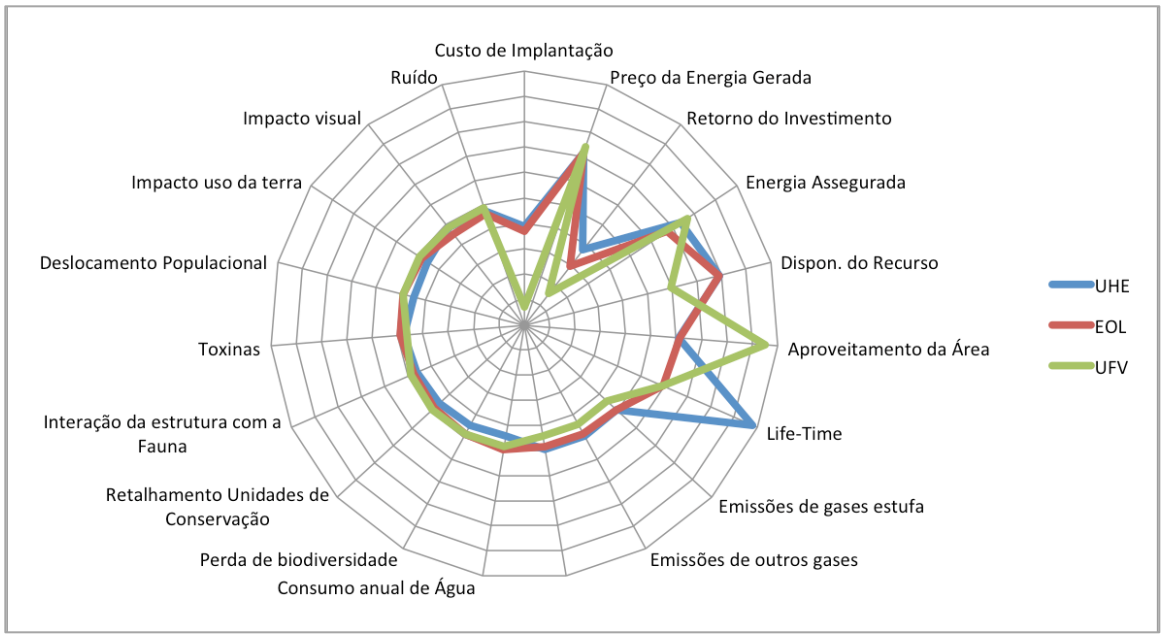
Tabela 4.21. Ranking de desempenho em sustentabilidade nos cenários avaliados.

Cenário	Ranking de Desempenho	Santa Catarina	Ceará
CN-MON	1º	UHE	UFV
	2º	EOL	UHE
	3º	UFV	EOL
CN-ECO	1º	EOL	EOL
	2º	UFV	UFV
	3º	UHE	UHE
CN-SUST	1º	EOL	EOL
	2º	UHE	UFV
	3º	UFV	UHE

Fonte: O autor.

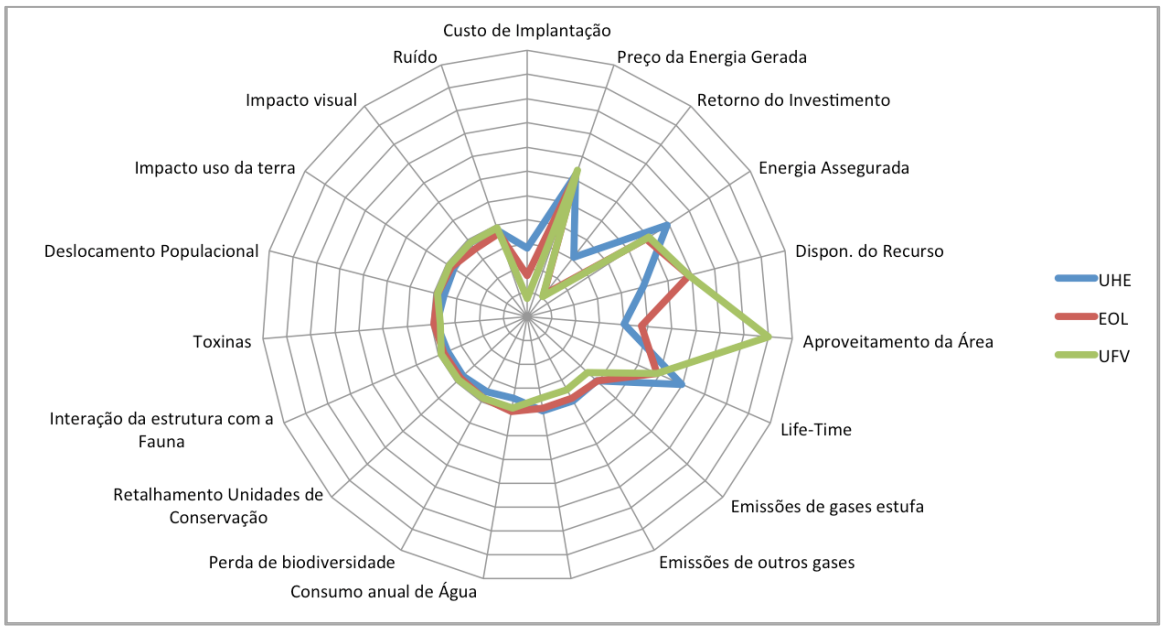
De forma a tornar essa síntese mais visual, os gráficos das Figuras 4.10 a 4.15 foram elaborados para os três cenários analisados. Nas Figuras 4.10 e 4.11, para as duas regiões estudadas, estão ilustrados os CN-MON em que tomou-se o ponto de vista de um investidor que prioriza o desempenho econômico e técnico de seu empreendimento. Nesse cenário, enquanto a energia hidrelétrica apresentou melhor desempenho em Santa Catarina, a energia solar foi a melhor no Ceará.

Figura 4.10. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 1, SC.



Fonte: O autor.

Figura 4.11. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 1, CE.

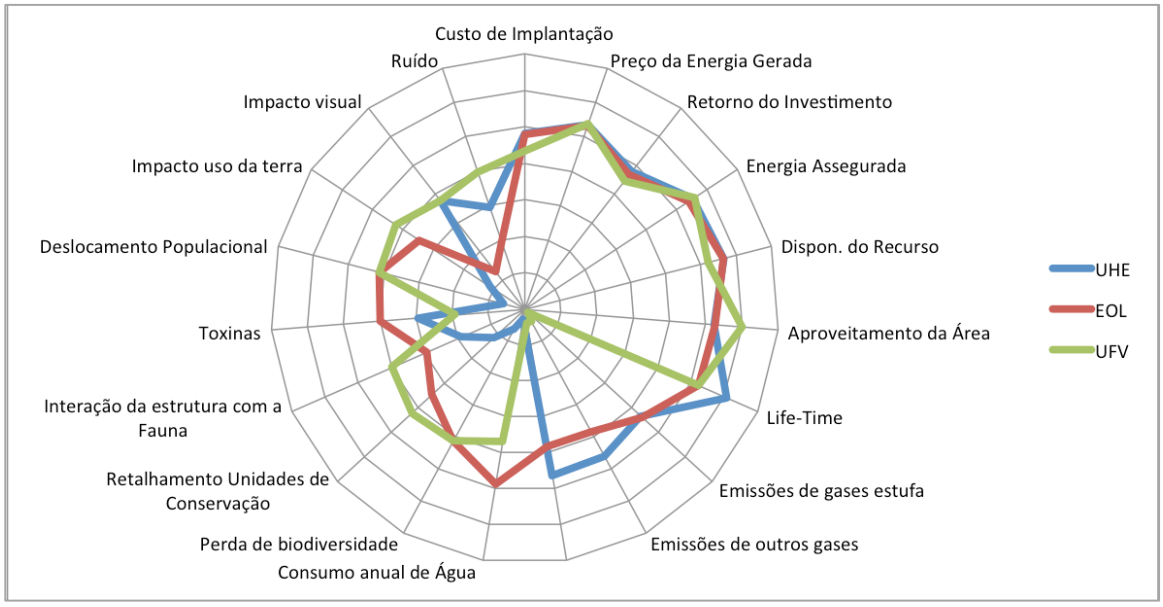


Fonte: O autor.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, para as duas regiões estudadas, estão ilustrados os CN-ECO, em que tomou-se o ponto de vista de um investidor que prioriza o desempenho

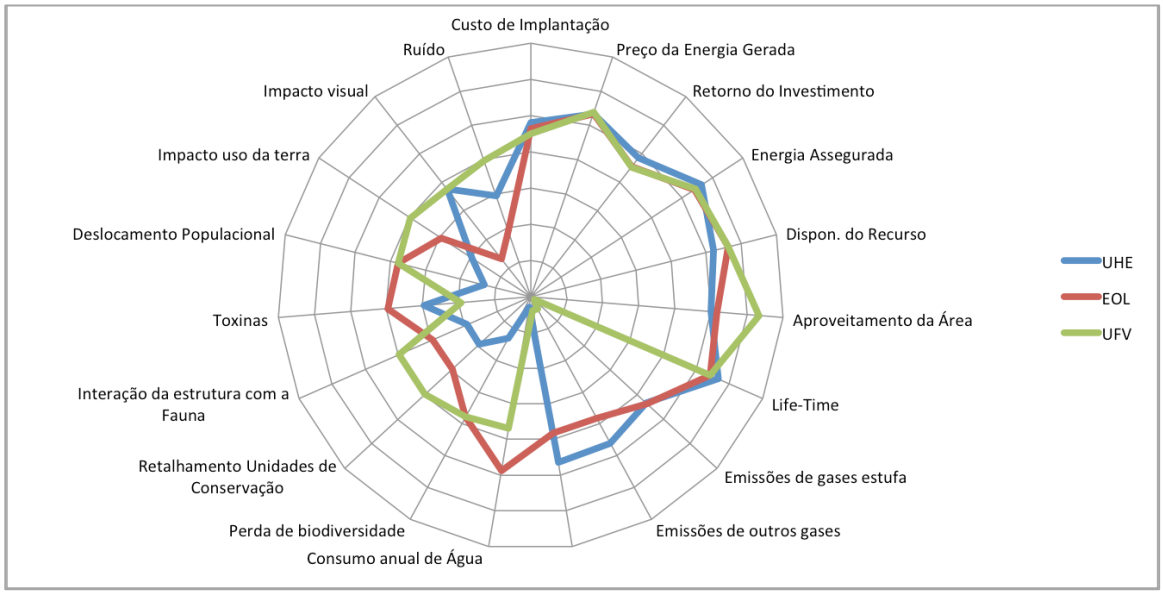
socioambiental de seu empreendimento. Nesse cenário, a energia eólica foi a de melhor desempenho tanto para Santa Catarina, quanto para o Ceará.

Figura 4.12. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 2, SC.



Fonte: O autor.

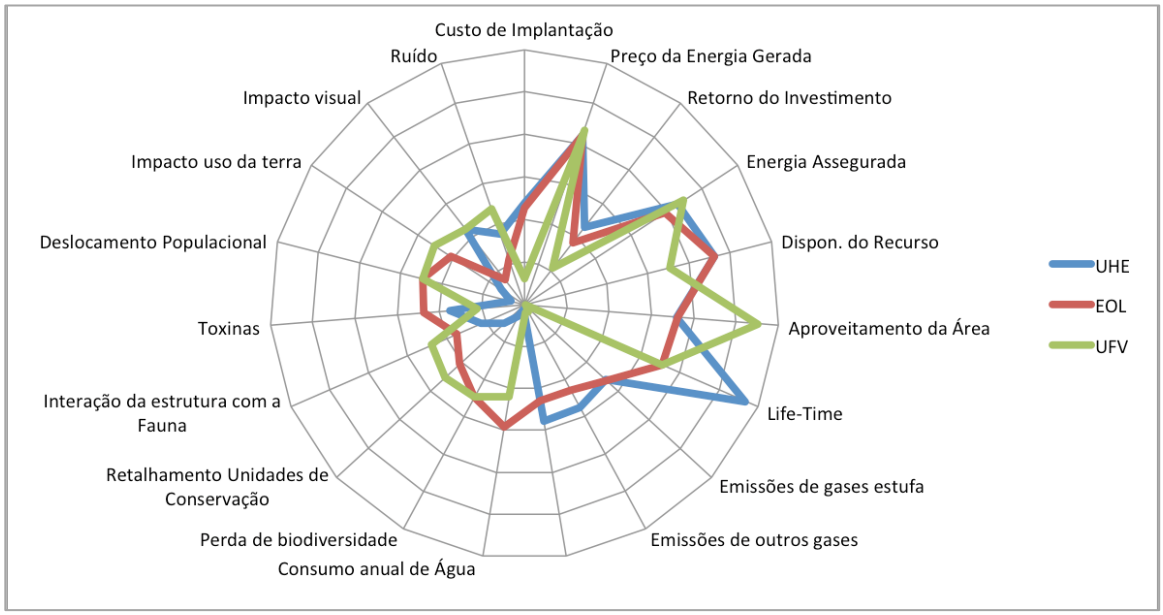
Figura 4.13. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 2, CE.



Fonte: O autor.

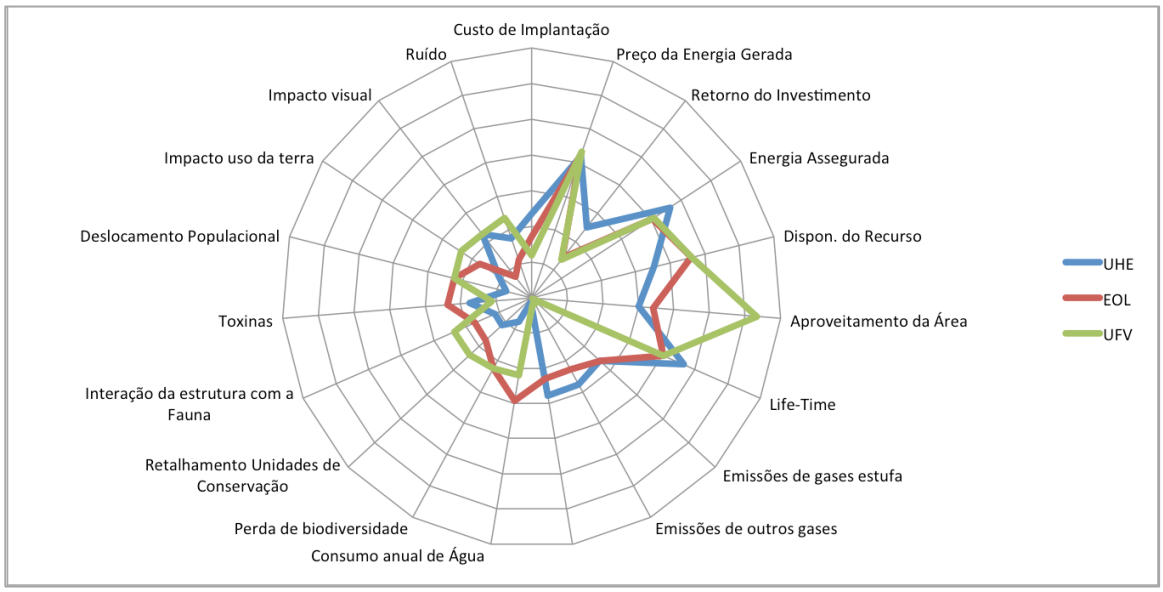
Por fim, nas Figuras 4.14 e 4.15, para as duas regiões estudadas, estão ilustrados os CN-SUST, em que tomou-se o ponto de vista de um investidor que prioriza o desempenho sustentável de seus empreendimento, preconizando de modo igual todas as esferas da sustentabilidade. Nesse cenário, a energia eólica também foi a de melhor desempenho tanto para Santa Catarina, quanto para o Ceará.

Figura 4.14. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 3, SC.



Fonte: O autor.

Figura 4.15. Gráfico Radar de Sustentabilidade para o Cenário 3, CE.



Fonte: O autor.

Portanto, é importante ressaltar que a energia eólica apresentou o melhor desempenho em sustentabilidade tanto para o CN-MON quanto para o CN-ECO, para as duas regiões estudadas. Os motivos que levaram a esse resultado serão discutidos com mais detalhes no próximo item, assim como as consequências e limitações dessa análise.

5. Discussão

Consta na Tabela 5.1 uma síntese dos resultados obtidos por meio da avaliação do desempenho em sustentabilidade dos seis empreendimentos de geração de energia renovável analisados em Santa Catarina e Ceará. Através da análise dessa tabela, é indiscutível que há grande destaque para a energia eólica, que apresentou o melhor desempenho em quatro dos seis cenários estudados. Conforme já visto, a energia eólica ocupa o terceiro lugar em participação na matriz elétrica brasileira, sendo a segunda fonte renovável mais utilizada no país, depois da energia hidrelétrica.

Tabela 5.1 Empreendimentos de maior desempenho em sustentabilidade para diferentes cenários.

Cenário	Santa Catarina	Ceará
CN-MON	UHE	UFV
CN-ECO	EOL	EOL
CN-SUST	EOL	EOL

Fonte: O autor.

Os empreendimentos de geração de energia elétrica a partir do vento apresentaram o melhor desempenho em sustentabilidade para os dois estados, tanto no Cenário 2 (CN-MON), que representou o ponto de vista de um investidor que demonstra grandes preocupações com os aspectos ambientais e sociais de seu investimento, quanto no Cenário 3 (CN-SUST), que ilustrou o caso de um investidor interessado no equilíbrio de todos os aspectos envolvidos no conceito de sustentabilidade. Esses resultados demonstram que, dentro das limitações do método de análise, o sistema de geração de energia eólica é aquele que apresentou o maior equilíbrio entre as vantagens e desvantagens de seus aspectos econômicos, técnicos, ambientais e sociais. Como consequência, não é de se estranhar que os empreendimentos de energia eólica crescem cada vez mais no Brasil. Segundo o ranking divulgado pela Global Wind Energy Council (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica, em 2016, houve no país uma expansão de 2.014 Megawatts na geração dessa energia. Isso fez com que o

Brasil atingisse a 5ª posição no ranking mundial de capacidade instalada de energia eólica nesse mesmo ano.

Nos cenários analisados, a energia eólica não representou a melhor opção econômica em nenhum dos casos (Cenário 1 – Santa Catarina e Ceará). Segundo Fadigas (2011), a densidade baixa do recurso eólico, somada a uma menor eficiência do aerogerador, faz com que esse tenha que apresentar uma grande área de captação de energia dos ventos, o que, consequentemente, encarece o equipamento. Dessa forma, o grande desafio enfrentado pela consolidação da energia eólica no mercado é reduzir ainda mais os custos dos aerogeradores. No que diz respeito ao caso específico do Brasil, a estabilização no mercado do setor eólico à longo prazo é de extrema importância para a redução desses custos. Isso pode ser alcançado por meio de um planejamento de longo prazo com regras bem definidas para esse setor e de uma produção de montantes de energia que favoreçam a economia de escala (FADIGAS, 2011). Já com relação aos impactos ambientais e sociais de um empreendimento eólico, esses estão principalmente concentrados na fase de preparação do sítio e de instalação dos aerogeradores. Além disso, durante a operação, um parque eólico também pode causar impactos negativos relacionados à interação da fauna com as turbinas, aos impactos visuais e de ruído, e aos efeitos de interferência eletromagnética.

Com relação à energia hidrelétrica, como pode ser observado por meio dos indicadores analisados, essa apresenta grandes vantagens em relação à economia do empreendimento, quando o recurso hídrico é abundante (Cenário 1 – Santa Catarina). Isso se dá, entre outros fatores, devido ao fato de que a tecnologia de exploração de energia hidrelétrica já é consolidada no mercado, robusta e utilizada tradicionalmente e historicamente no contexto brasileiro de produção de eletricidade. Entretanto, esse tipo de aproveitamento energético, principalmente quando em grande porte, pode ser responsável por significativos danos ambientais e sociais no que diz respeito ao alagamento de extensas áreas para a formação do reservatório. Entre os diversos impactos desse aproveitamento, pode-se destacar, além da alteração do regime natural do rio em que a barragem foi instalada, a grande perda de biodiversidade, o deslocamento de populações tradicionais e as perdas significativas de elementos importantes de seu patrimônio natural, cultural e social. Entretanto, apesar de todos esses impactos, a fonte com maior

previsão de expansão no cenário energético brasileiro continua sendo a fonte hídrica, o que leva a uma discussão sobre a necessidade de diversificação do modelo nacional de geração de energia elétrica e à necessidade de planejamento de empreendimentos hidrelétricos de menor porte ou menos impactantes aos meios ambiental e social, nos quais eles estariam inseridos.

Já com relação à energia solar, foi possível constatar, através da análise de desempenho realizada, que se trata de um empreendimento muito interessante do ponto de vista econômico para regiões em que há intensa incidência de radiação solar (Cenário 1 – Ceará). Entretanto, esse tipo de aproveitamento energético pode ser bem oneroso quando implementado em uma região não tão intensamente agraciada por esse recurso (Cenário 1 – Santa Catarina), pois a geração de uma determinada potência de energia elétrica nesse local exigiria tanto uma área, quanto um número de placas solares fotovoltaicas bem maior, aumentando significativamente os custos do projeto.

Usinas solares fotovoltaicas apresentam impactos mínimos durantes sua instalação e operação. Entretanto, conforme discutido ao longo da análise de desempenho, quando o ciclo de vida dos módulos solares é levado em consideração, o desempenho ambiental dessa forma de energia fica prejudicado. Isso se deve ao fato de que algumas das matérias-primas usadas na produção desses módulos requerem grande consumo energético para sua extração. Além disso, o processo atual de manufatura de placas solares requer alta tecnologia e também consome muita energia, o que colabora para o aumento, durante a avaliação de seu ciclo de vida, dos índices de emissões de gases e consumo de água. Logo, para que essa fonte renovável se consolide efetivamente no mercado energético e torne-se cada vez mais sustentável é imperativo o investimento em pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias solares mais eficientes, que contenham matérias-primas com ciclos-de-vida menos impactantes, e cujos processos de produção sejam mais simples, menos onerosos e menos energeticamente intensos.

É importante ressaltar também as limitações envolvidas no processo de avaliação de desempenho em sustentabilidade desenvolvido ao longo desse trabalho. Conforme já discutido, a escolha dos indicadores que seriam utilizados como base dessa análise é um processo complexo e de difícil execução. Resultados diferentes poderiam ter sido alcançados se outros indicadores tivessem sido utilizados, ou se outros pesos tivessem

sido atribuídos para cada cenário. Entretanto, os indicadores e os pesos utilizados foram escolhidos com base na literatura já existente com relação à avaliação de sustentabilidade e do ciclo de vida de sistemas de geração de energia renovável. Embora alguns dos dados avaliados não estivessem disponíveis ou não pudessem ser encontrados, para alguns dos parâmetros dos empreendimentos estudados, esses foram estimados com base em outros estudos realizados para as fontes avaliadas, ou extrapolados das médias de desempenho apresentadas por empreendimentos semelhantes de geração.

Outra questão que deve ser levantada é que o estudo foi realizado apenas para dois estados de diferentes regiões brasileiras. Como já abordado, a disponibilidade das fontes de energia renovável é fortemente depende do local e da quantidade de energia disponível, assim como da capacidade de explorar esse recurso (DUNLAP, 2015). Dessa forma, a energia eólica pode ter alcançado um bom destaque na análise de desempenho, pois essa foi realizada em duas regiões que possuem significativa abundância de recursos eólicos. Entretanto, se a mesma análise tivesse sido realizada na região Amazônica, que concentra grande parte do potencial hidrelétrico ainda não explorado no país, mas, em contrapartida, possui baixo potencial eólico, talvez os resultados dos três cenários analisados tivessem sido completamente diferentes e a energia hidrelétrica poderia resultar naquela de maior destaque.

Além disso, deve-se comentar também que esse trabalho avaliou apenas três das diversas fontes renováveis que possuem potencial de exploração no Brasil e no mundo. Como exemplo, uma das fontes de energia que não foram abordadas e ganha crescente destaque no panorama energético mundial é a biomassa. Se a análise desenvolvida nesse trabalho tivesse sido realizada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, que apresentam significativa produção agropecuária, e o desempenho em sustentabilidade da biomassa tivesse sido levado em consideração, talvez essa também ganhasse relativa importância nos cenários avaliados.

Portanto, apesar de que os resultados obtidos através da avaliação de desempenho em sustentabilidade realizada nesse trabalho possam ser de importância para se analisar a questão da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis no país e embasar futuras decisões e planejamentos nesse setor, é necessário ressaltar que mais pesquisas devem ser desenvolvidas tanto em relação à outras fontes renováveis, quanto a outras

regiões do Brasil. Dessa forma, as características particulares de cada região analisada poderão ser consideradas de forma mais efetiva e concreta, facilitando a identificação de suas diferentes potencialidades e limitações. É também válido destacar que a elaboração de cenários mais complexos, que envolvam mais parâmetros e indicadores, levariam a resultados mais confiáveis e condizentes à realidade. Por conseguinte, esses resultados poderiam embasar de forma mais objetiva a escolha das fontes de energias renovável mais vantajosas para determinada região, tanto com relação aos aspectos técnicos e econômicos, quanto aos aspectos ambientais e sociais.

6. Conclusões

Considerando a questão energética nacional, a promoção de uma matriz elétrica tão diversificada quanto limpa é essencial para garantir o desenvolvimento sustentável do país e atender, com segurança, suas demandas energéticas atuais e futuras. A disponibilidade das fontes de energia renovável tem características particulares conforme a área estuda, logo, o planos de desenvolvimento e exploração dessas fontes devem se pautar em análises de sustentabilidade de cada um dos potenciais energéticos regionais, de modo a determinar quais energias são as mais interessantes do ponto de vista técnico, econômico, social ou ambiental.

Visando analisar o desempenho em sustentabilidade de três fontes energéticas renováveis (solar, eólica e hidrelétrica) que apresentam grande potencial de aproveitamento no cenário brasileiro, esse trabalho realizou uma avaliação de desempenho que teve como escopo dois Estados brasileiros com características diferentes: Ceará e Santa Catarina. Para isso, um índice de sustentabilidade adimensional foi calculado a partir de indicadores de sustentabilidade em diferentes cenários, que representavam o ponto de vista de investidores com interesses diversos. A partir desses indicadores, foi possível determinar quais fontes energéticas poderiam ser consideradas mais interessantes de acordo com cada contexto e região analisados.

Embora o método de avaliação adotado apresentasse diversas limitações, relacionadas principalmente à escolha dos indicadores, ao acesso a informações e ao escopo da análise, os resultados obtidos através dele permitiram observar o notável destaque da energia eólica. Essa apresentou o melhor desempenho em sustentabilidade em quatro dos seis cenários estudados. Logo, é possível concluir que o sistema de geração de energia eólica, no contexto avaliado, demonstrou um equilíbrio significativo entre os pontos positivos e negativos de seus aspectos econômicos, técnicos, ambientais e sociais. Consequentemente, o progressivo crescimento, em número e potência, dos empreendimentos de energia eólica no Brasil pode ser justificado pela maior

sustentabilidade desses sistemas, no que concerne, não somente ao desempenho técnico-econômico, mas também o socioambiental.

No que diz respeito à energia hidrelétrica, ela é fonte predominante da eletricidade produzida no país. Entretanto, apesar de possuir tecnologia mais robusta e consolidada, essa fica para trás na avaliação em sustentabilidade, quando considerados os aspectos socioambientais de sua implantação. Isso se deve ao fato de que, principalmente quando em grande porte, a instalação de uma usina hidrelétrica pode causar significativos danos ambientais e sociais, devido ao alagamento de extensas áreas para o reservatório. Já com relação à energia solar fotovoltaica, embora essa cause impactos mínimos durante sua instalação e operação, seu desempenho em sustentabilidade fica prejudicado quando o ciclo de vida dos módulos solares é considerado.

Portanto, através desse trabalho, foi possível concluir que, embora consideradas energias limpas, as fontes renováveis não são isentas de impactos negativos. Além disso, uma fonte de energia pode apresentar uma sustentabilidade maior ou menor com relação a outras, conforme a região, os indicadores, e os investidores considerados na análise. Desse modo, fica claro que a resposta à questão energética brasileira não reside no investimento em uma fonte renovável única, como vem sido feito há muitos anos com relação à energia hidrelétrica. O desenvolvimento de uma matriz elétrica confiável, limpa e segura depende fortemente do estudo das potencialidades das diferentes regiões do país, e investimento nas suas diversas fontes. Assim, essas podem se complementar, de modo a compor um sistema elétrico capaz de garantir o atendimento das demandas atuais e futuras, sem comprometer a qualidade de vida dos consumidores ou prejudicar o meio ambiente em que está inserido.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Conforme discutido anteriormente, esse trabalho ficou limitado à análise de apenas três fontes energéticas em duas Unidades Federativas do Brasil. Por conseguinte, as subsequentes sugestões foram levantadas para estudos futuros:

- **Análise de desempenho em sustentabilidade da Biomassa:** embora essa fonte de energia seja também muito importante no cenário brasileiro, principalmente na região Sul e Sudeste, ela não foi incluída nessa análise, mas representa um tema muito importante, cuja sustentabilidade pode ser avaliada com relação às outras fontes aqui abordadas.

- **Análise de mais indicadores e cenários:** a inclusão de mais indicadores de desempenho em sustentabilidade e desenvolvimento de mais cenários de investimento podem tornar a pesquisa realizada nesse trabalho ainda mais representativa, com resultados mais concretos e expressivos da realidade energética brasileira.

- **Análise de outros Estados brasileiros:** embora esse trabalho tenha se limitado a apenas duas Unidades Federativas do país, o desenvolvimento da mesma análise em outras regiões pode trazer resultados diferentes, compondo um quadro de grande interesse para o embasamento e orientação de futuros planos, políticas e projetos de energia renovável no país.

7. Bibliografia

ACCETTABILITA SOCIALE. **Eolico alta capacità**. Disponível em <http://www.accettabilitasociale.com/pagine/eolico-alta-capacita/>. Acesso em 11 ago. 2017.

AFGAN, N. H.; CARVALHO, M. G.; HOVANOV, N. V. **Energy system assessment with sustainability indicators**. Energy Policy, 1999.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica para o aproveitamento hidrelétrico Garibaldi, localizado no rio Canoas**. Nota Técnica Conjunta ANA – DRHI-SDS-SC. ANA, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3.ed. Brasília, 2008.

_____. **Últimas Notíciais: Leilão nº 9/2015 é homologado parcialmente**. ANEEL, 2016a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9060&id_area=90>. Acesso em: 22 fev. 2017.

_____. **Boletim de Informações Gerenciais 2016**. ANEEL, 2016b. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 27 fev. 2017.

_____. **Empreendimentos em Operação**. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/dados/geracao>. Acesso em 20 fev. 2017.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. MME / ELETROBRÁS / CEPEL. 2001.

ARAÚJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processo de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade** (Tese de doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 2010.

ARAÚJO, M. Z. T.; VIEIRA, V. P.P.B. **As dificuldades encontradas para implantação da Barragem do Castanhão e o acompanhamento das ações mitigadoras dos seus impactos ambientais**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Fortaleza, 2001.

ARDENTE, F.; BECCALI, M., CELLURA, M.; LO BRANO, V. **Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2016**. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br>. Acesso em: 5 ago. 2017.

AVOL – ANTONIO VIANA. Disponível em: < http://www.antonioviana.com.br/>. Acesso em: 5 fev. 2017.

BAIDYA ROY, S.; TRAITEUR, J.J. **Impacts of wind farms on surface air temperatures**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v.107,n.42, p.17899-17904, Oct. 2010.

BLEIWAS, D.I. **Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells**. 2010. (Geological Survey Circular 1365). Disponível em:<http://pubs.usgs.gov/circ/1365/>. Acesso em: 4 ago. 2017.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional 2016**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em:< http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>. Acesso em: 7 de ago. 2017.

CÂMARA, J. B. D. (Org). **GEO BRASIL 2002: Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente PNUMA. Edições IBAMA, Brasília, 2002.

CARVALHO, J. R. M. de; CURI, W. W. F; CARVALHO, E. K. M. de A, CURI, R. C. **Proposta e validação de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do alto curso do Rio Paraíba, PB**. Revista Sociedade e Natureza, Uberlândia, 2011.

CABRAL, I. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. **Energia Solar – Análise Comparativa entre Brasil e Alemanha**. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador, 2013.

COLTRO, L; GARCIA, E.E.C.; QUEIROZ, G.C. **Life cycle inventory of electric energy system in Brazil**. Int. J. Life Cycle Assessment , Landsberg, v. 8, n. 5, p. 290-296, 2003.

COSTANZO, A.; VILLARREAL, M.; FREIRE, P. E.; LIMA, M. A.; PANE, E.; DOMINGUES, S. **Parque Eólico Água Doce Medições de Resistividade do Solo e de Resistências de Aterramento**. Brazil Wind Power Conference and Exhibition, 2013.

CUSTÓDIO, R.S. **Energia eólica para a produção de energia elétrica**. 2.ed. Porto Alegre: Synergia, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Castanão**. Disponível em: < http://www.dnocs.gov.br/barragens/castanhao/castanhao.html >. Acesso em: 10 fev. 2017.

DIÁRIO DO NORDESTE. Disponível em: <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/>. Acesso em: 10 fev. 2017.

DOS SANTOS, M.; ROSA, L; SIKAR, B; DOS SANTOS, E. **Gross greenhouse gas fluxes from hydropower reservoir compared to thermopower plants**. Energy Policy, 34, 481–488. ELSEVIER, 2006.

DUNLAP, R. A. **Sustainable Energy**. Halifax: Dalhousie University, 2015.

ELETROBRAS. **Sistema de Informações do Potencial Hidreletrico Brasileiro – SIPOT**. Rio de Janeiro, 2015

ENERGIA INTELIGENTE. **Como funciona: Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <http://energiainteligenteufjf.com/como-funciona/energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em 11 ago. 2017.

ERICKSON, W.P.; JOHNSON, G.D.; YOUNG, .D.P. **A Summary and comparison of bird mortality from anthropogenic causes with an emphasis on collisions**. Washington: United States Forest Service, 2005. (General Technical Report).

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. **Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies**. Sidney, 2008.

FADIGAS, L. A. F. A. **Energia eólica**. Barueri, SP: Manole, 2011.

FILIPPIM, E. S.; MOCELIM, J. P.; FISCHER, A.; BERNARDY, R. J. **As perspectivas de atingidos por hidrelétricas: O caso da construção da Usina Garibaldi**. Revista Pensamento & Realidade, 2013.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. **Canal de Energia: Siif Énergies investe R$ 500 milhões na Central Eólica Praia Formosa**. Centro de Estudos em Sustentabilidade. FGV-EAESP, 2009. Disponível em: <http://gvces.com.br/siif-energies-investe-r-500-milhoes-na-central-eolica-praia-formosa?locale=pt-br>. Acesso em: 20 fev. 2017.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1994.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Sustainability Reporting Guidelines**, 2006. Disponível em: <www.aeca.es/comisiones/rsc/documentos_fundamentales_rsc/gri>. Acesso em: 29 fev. 2007.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **2015 Global Wind Market Report**. GWEC: Bruxelas, 2015. Disponível em: <www.gwec.net>. Acesso em 10 ago. 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados, 21 (59), 2007, pp. 7 – 20.

GOMES, J.P.P.; VIEIRA, M.M.F. O Campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. **RAP**: revista de administração pública, Rio de Janeiro, v.43, n.2, p.295-321, mar./abr. 2009. Disponível em:<http://www.scielo.br/pdf/rap/v43n2/v43n2a02.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2017.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <www.google.com.br/maps>. Acesso: 20 jan. 2017.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M.; REIS, L.B. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **International Energy Outlook 2016**. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2016. Disponível em: <www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf>. Acesso em: 3 ago. 2017.

IMPSA. **Parque Eólico Santa Catarina - Brasil**. Disponível em: <www.impsa.com>. Acesso em: 9 fev. 2017

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

JANNUZZI, A. C. **Regulação da Qualidade de Energia Elétrica sob o Foco do Consumidor**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência, Publicação PPGENE.DM - 302A/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília: Brasília, 2007.

LENZEN, M.; WACHSMANN,U. **Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment**. Rio de Janeiro, 2004.

LOFTHOUSE, J; SIMMONS, R. T.; YONK, R. M. **The Reliability of Renewable Energy: Hydro**. Utah: Institute of Political Economy (IPE), 2015.

MENDES, N. A. S. **As usinas hidrelétricas e seus impactos: os aspectos socioambientais e econômicos do Reassentamento Rural de Rosana - Euclides da Cunha Paulista**. Presidente Prudente: UNESP, 2005.

NOBLE, B. F. **Environmental Impact Assessment: A Guide to Principles and Practice**. Oxford University Press, 2015.

ONG, S.; CAMPBELL, C.; DENHOLM, P.; MARGOLIS, R; HEATH, G. **Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Agenda 2030**. Disponível em:<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 5 out. 2017.

PACHECO, F. Energias renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**. Salvador, n.149, p.4-11, out. 2006. Disponível em:<http://ieham.org/html/docs/Conceitos_Energias_renováveis.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2017.

PEHNT, M. **Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies**. Heidelberg, 2006.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ed.rev.e atual. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL, CRESESB, 2014.

PREFEITURA DE ABDON BATISTA. **Lago da Usina Hidrelétrica Garibaldi**. Disponível em: < http://www.abdonbatista.sc.gov.br/>. Acesso em: 10 fev. 2017.

PREFEITURA DE ÁGUA DOCE. **Turismo: Complexo Eólico Água Doce**. Disponível em: <http://www.aguadoce.sc.gov.br/turismo/item/detalhe/2245>. Acesso em: 10 fev. 2017.

QUADROS, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. **Climatologia de precipitação e temperatura**. CPTEC/INPE, 2017. Disponível em: < http://climanalise.cptec.inpe.br/>. Acesso em 24 mar. 2017.

RODRIGUES JUNIOR, L.C. **Integração de fontes renováveis no sistema eléctrico**

através de Centrais Renováveis Virtuais. 2011. 98p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em:<http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/7925/1/ulfc102597_tm_Luis_Rodrigues_Junior.pdf >. Acesso em: 4 ago. 2017.

SALAMONI, I.; RÜTHER, R. **Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede**. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, 2007.

SEINFRA. **Pequena Central Hidrelétrica no Castanhão**. Governo do Estado do Ceará, 2017. Disponível em: <http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/energia/pequena-central-hidreletrica-no-castanhao>. Acesso em: 23 fev. 2017.

SENAI - DEPARTAMENTO REGIONAL DO CEARÁ. **Notícias: Grupo Telles inaugura usina solar em Pindoretama**. SENAI/CE, 2016. Disponível em: <http://www.senai-ce.org.br/99662/fiecnoticias/grupo-telles-inaugura-usina-solar-em-pindoretama>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SOUSA, W. L. **Impacto ambiental de hidrelétricas: Uma análise comparativa de duas abordagens**. Dissertação Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.

TIBA, C. et al. **Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Recife: Ed.Universitária da UFPE, 2000.

TRACTEBEL ENERGIA S. A. **Comunicado ao mercado**. Florianópolis, 2014.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva**. São Paulo: CEBRAP, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-33002007000300003&script=sci_arttext>. Acesso: em 4 ago. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TURCONI, R.;BOLDRIND, A.; ASTRUP, T. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations**. ELSEVIER, 2013.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de Sustentabilidade: Uma Análise Comparativa**. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006.

VARUN, PRAKASH, R., & BHAT, I. K. **Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems**. ELSEVIER, 2009.

VILLALVA, M.G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 3.ed. São Paulo: Érica, 2015.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products**. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, v.1 e 2, 1997.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment**. London, 2004.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resourses 2016**. London, 2016.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Sumário para tomadores de decisão: Além de Grandes Hidrelétricas. Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil**. Brasilia, 2012. Disponível em: <http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2017.

WOLSINK, M. **Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support**. Renewable Energy, v.21, p.49-64, 2000.

APÊNDICE A – Memorial de Cálculo dos Indicadores

SANTA CATARINA					
Dados			UHE [4][5]	EOL [2][3]	UFV [6]
Nome			Garibaldi	Complexo Eólico Agua Doce	Tubarão
Local			Abdon Batista/Cerro Negro (SC)	Água Doce (SC)	Tubarão (SC)
Detalhes			3 Turbinas Francis	86 aerogeradores	19424 paineis
Potência Instalada (MW)			191,9	129,0	3,0
Energia Assegurada (MWh/ano)			728.000,0	359.042,0	14.560,0
Área Ocupada (km2)			26,7	200,0	0,1
Custo do investimento (R$)			950.000.000,0	750.000.000,0	56.300.000,0
Capacidade de Abastecimento (habitantes)			500.000,0	380.000,0	10.000,0
Indicadores de Sustentabilidade		Unidade	Garibaldi	Agua Doce	Tubarão
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	1.547,0	1.816,9	5.864,6
	Preço da Energia Gerada [7]	R$/MWh	227,0	223,0	249,0
	Período de Retorno do Investimento	Anos	5,7	9,4	15,5
Técnico	Aproveitamento da Área	MW/km2	7,2	0,6	30,0
	Life-Time	Anos	100,0	20,0	20,0
	Eficiência de Geração	%	Não considerada	Não considerada	Não considerada
Ambiental	Emissões anuais de gases estufa (ACV)	kg CO2eq	9.245.600,0	4.261.828,5	1.368.640,0
	Emissões anuais de outros gases (ACV)	kg NOx	13.104,0	19.567,8	3.145,0
		kg SO2	11.648,0	19.029,2	3.028,5
	Consumo anual de Água	t/ano	26.208.000,0	359.042,0	145.600,0

CEARÁ					
Dados			PCH [1]	EOL [8]	UFV [9]
Nome			Açude Castanhão	Usina de Geração Eólica de Praia Formosa	Grupo Telles
Local			Jaguaribara (CE)	Camocim (CE)	Pindoretama (CE)
Detalhes				50 aerogeradores	9223 paineis
Potência Instalada (MW)			5,0	105,0	3,0
Energia Assegurada (MWh/ano)			31.500,0	416.678,0	14.560,0
Área Ocupada (km2)			325,0		0,05
Custo do investimento (R$)			12.000.000,0	500.000.000,0	20.000.000,0
Capacidade de Abastecimento (habitantes)			13.000,0	310.000,0	5.721,0
Indicadores de Sustentabilidade		Unidade		Praia Formosa	Grupo Telles
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	750,0	1.488,1	2.083,3
	Preço da Energia Gerada [7]	R$/MWh	227,0	223,0	249,0
	Período de Retorno do Investimento	Anos	1,7	5,4	5,5
Técnico	Aproveitamento da Área	MW/km2	0,02		60,0
	Life-Time	Anos		20,0	20,0
	Eficiência de Geração	%	Não considerada	Não considerada	Não considerada
Ambiental	Emissões anuais de gases estufa (ACV)	kg CO2eq	400.050,0	4.945.967,9	1.368.640,0
	Emissões anuais de outros gases (ACV)	kg NOx	567,0	22.709,0	3.145,0
		kg SO2	504,0	22.083,9	3.028,5
	Consumo anual de Água	t/ano	1.134.000,0	416.678,0	145.600,0

[1] SEINFRA. Pequena Central Hidrelétrica no Castanhão. Governo do Estado do Ceará, 2017. Disponível em: <http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/energia/pequena-central-hidreletrica-no-castanhao>. Acesso em: 23 fev. 2017.
[2] PREFEITURA DE ÁGUA DOCE. Turismo: Complexo Eólico Água Doce. Disponível em: <http://www.aguadoce.sc.gov.br/turismo/item/detalhe/2245>. Acesso em: 10 fev. 2017.
[3] IMPSA. Parque Eólico Santa Catarina - Brasil. Disponível em: <www.impsa.com>. Acesso em: 9 fev. 2017
[4] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica para o aproveitamento hidrelétrico Garibaldi, localizado no rio Canoas. Nota Técnica Conjunta ANA – DRHI-SDS-SC. ANA, 2010.
[5] FILIPPIM, E. S.; MOCELIM, J. P.; FISCHER, A.; BERNARDY, R. J. As perspectivas de atingidos por hidrelétricas: O caso da construção da Usina Garibaldi. Revista Pensamento & Realidade, 2013.
[6] TRACTEBEL ENERGIA S. A. Comunicado ao mercado. Florianópolis, 2014.
[7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Últimas Notíciais: Leilão nº 9/2015 é homologado parcialmente. ANEEL, 2016. Diponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9060&id_area=90>. Acesso em: 22 fev. 2017
[8] FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. Canal de Energia: Siif Énergies investe R$ 500 milhões na Central Eólica Praia Formosa. Centro de Estudos em Sustentabilidade. FGV-EAESP, 2009. Disponível em: <http://gvces.com.br/siif-energies-investe-r-500-milhoes-na-central-eolica-praia-formosa?locale=pt-br>. Acesso em: 20 fev. 2017.
[9] SENAI - DEPARTAMENTO REGIONAL DO CEARÁ. Notícias: Grupo Telles inaugura usina solar em Pindoretama. SENAI/CE, 2016. Disponível em: <http://www.senai-ce.org.br/99662/fiecnoticias/grupo-telles-inaugura-usina-solar-em-pindoretama>. Acesso em: 20 fev. 2017.

APÊNDICE B – Memorial de Cálculo do IAS

SANTA CATARINA																					
Indicadores de Sustentabilidade			UHE	EOL	UFV	Média	NP			Pesos			CN-MON			CN-ECO			CN-SUST		
Tipo	Indicador	Unidade					UHE	EOL	UFV	MON	ECO	SUS	UHE	EOL	UFV	UHE	EOL	UFV	UHE	EOL	UFV
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	1547	1817	5865	3076	-0,50	-0,59	-1,91	0,45	0,07	0,25	-0,23	-0,27	-0,86	-0,04	-0,04	-0,13	-0,13	-0,15	-0,48
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,93	69,69	77,8	72,81	0,97	0,96	1,07	0,45	0,07	0,25	0,44	0,43	0,48	0,07	0,07	0,07	0,24	0,24	0,27
	Período de Retorno do Investimento	Anos	5,75	9,38	15,53	10,22	-0,56	-0,92	-1,52	0,45	0,07	0,25	-0,25	-0,41	-0,68	-0,04	-0,06	-0,11	-0,14	-0,23	-0,38
Técnico	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	3794	2783	4242	3606	1,05	0,77	1,18	0,45	0,10	0,25	0,47	0,35	0,53	0,11	0,08	0,12	0,26	0,19	0,29
	Disp. do Recurso	Qualitativo	3	3	1	2,33	1,29	1,29	0,43	0,45	0,10	0,25	0,58	0,58	0,19	0,13	0,13	0,04	0,32	0,32	0,11
	Ap. da Área	MW/km2	7,18	7,5	30	14,89	0,48	0,50	2,01	0,45	0,10	0,25	0,22	0,23	0,91	0,05	0,05	0,20	0,12	0,13	0,50
	Life-Time	Anos	100	20	20	46,67	2,14	0,43	0,43	0,45	0,10	0,25	0,96	0,19	0,19	0,21	0,04	0,04	0,54	0,11	0,11
Ambiental Quantitativo	Emissões anuais de gases estufa (ACV)	kgCO2eq/ MWh	12,7	11,87	94	39,52	-0,32	-0,30	-2,38	0,05	0,41	0,25	-0,02	-0,02	-0,12	-0,13	-0,12	-0,98	-0,08	-0,08	-0,59
	Emissões anuais de outros gases (ACV)	kg Nox/MWh	0,018	0,055	0,216	0,10	-0,19	-0,57	-2,25	0,05	0,41	0,25	-0,01	-0,03	-0,11	-0,08	-0,23	-0,92	-0,05	-0,14	-0,56
		kg SO2/MWh	0,016	0,053	0,208	0,09	-0,17	-0,57	-2,25	0,05	0,41	0,25	-0,01	-0,03	-0,11	-0,07	-0,24	-0,92	-0,04	-0,14	-0,56
	Consumo anual de Água	t/MWh	36	1	10	15,67	-2,30	-0,06	-0,64	0,05	0,41	0,25	-0,11	0,00	-0,03	-0,94	-0,03	-0,26	-0,57	-0,02	-0,16
Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		5	1	1	2,33	-2,14	-0,43	-0,43	0,05	0,41	0,25	-0,11	-0,02	-0,02	-0,88	-0,18	-0,18	-0,54	-0,11	-0,11
	Retalhamento Unidades de Concervação		5	2	1	2,67	-1,88	-0,75	-0,38	0,05	0,41	0,25	-0,09	-0,04	-0,02	-0,77	-0,31	-0,15	-0,47	-0,19	-0,09
	Interaçao da estrutura com a fauna		3	2	1	2,00	-1,50	-1,00	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,08	-0,05	-0,03	-0,62	-0,41	-0,21	-0,38	-0,25	-0,13
	Toxinas		2	1	3	2,00	-1,00	-0,50	-1,50	0,05	0,41	0,25	-0,05	-0,03	-0,08	-0,41	-0,21	-0,62	-0,25	-0,13	-0,38
Social	Deslocamento Populacional		5	1	1	2,33	-2,14	-0,43	-0,43	0,05	0,41	0,25	-0,11	-0,02	-0,02	-0,88	-0,18	-0,18	-0,54	-0,11	-0,11
	Impacto uso da terra		5	2	1	2,67	-1,88	-0,75	-0,38	0,05	0,41	0,25	-0,09	-0,04	-0,02	-0,77	-0,31	-0,15	-0,47	-0,19	-0,09
	Impacto visual		1	3	1	1,67	-0,60	-1,80	-0,60	0,05	0,41	0,25	-0,03	-0,09	-0,03	-0,25	-0,74	-0,25	-0,15	-0,45	-0,15
	Ruído		2	3	1	2,00	-1,00	-1,50	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,05	-0,08	-0,03	-0,41	-0,62	-0,21	-0,25	-0,38	-0,13
										IAS			1,44	0,67	0,15	-5,71	-3,29	-4,77	-2,56	-1,56	-2,63

CEARÁ																					
Indicadores de Sustentabilidade			UHE	EOL	UFV	Média	NP			Pesos			CN-MON			CN-ECO			CN-SUST		
Tipo	Indicador	Unidade					UHE	EOL	UFV	MON	ECO	SUS	UHE	EOL	UFV	UHE	EOL	UFV	UHE	EOL	UFV
Econômico	Custo de Implantação	USD/kW	750,00	1488	2083	1440	-0,52	-1,03	-1,45	0,45	0,07	0,25	-0,23	-0,46	-0,65	-0,04	-0,07	-0,10	-0,13	-0,26	-0,36
	Preço da Energia Gerada	R$/MWh	70,94	69,7	77,8	72,81	0,97	0,96	1,07	0,45	0,07	0,25	0,44	0,43	0,48	0,07	0,07	0,07	0,24	0,24	0,27
	Período de Retorno do Investimento	Anos	1,68	5,38	5,52	4,19	-0,40	-1,28	-1,32	0,45	0,07	0,25	-0,18	-0,58	-0,59	-0,03	-0,09	-0,09	-0,10	-0,32	-0,33
Técnico	Energia Assegurada	MWh asseg./MW	6300	3968	4241	4836	1,30	0,82	0,88	0,45	0,10	0,25	0,59	0,37	0,39	0,13	0,08	0,09	0,33	0,21	0,22
	Disp. do Recurso	Qualitativo	1,00	3,00	3,00	2,33	0,43	1,29	1,29	0,45	0,10	0,25	0,19	0,58	0,58	0,04	0,13	0,13	0,11	0,32	0,32
	Ap. da Área	MW/km2	0,02	7,50	60,00	22,51	0,00	0,33	2,67	0,45	0,10	0,25	0,00	0,15	1,20	0,00	0,03	0,27	0,00	0,08	0,67
	Life-Time	Anos	32,00	20,0	20,0	24,00	1,33	0,83	0,83	0,45	0,10	0,25	0,60	0,38	0,38	0,13	0,08	0,08	0,33	0,21	0,21
Ambiental	Emissões anuais de gases estufa (ACV)	kgCO2eq/ MWh	12,70	11,9	94,0	39,52	-0,32	-0,30	-2,38	0,05	0,41	0,25	-0,02	-0,02	-0,12	-0,13	-0,12	-0,98	-0,08	-0,08	-0,59
	Emissões anuais de outros gases (ACV)	kg Nox/MWh	0,02	0,05	0,22	0,10	-0,19	-0,57	-2,25	0,05	0,41	0,25	-0,01	-0,03	-0,11	-0,08	-0,23	-0,92	-0,05	-0,14	-0,56
		kg SO2/MWh	0,02	0,05	0,21	0,09	-0,17	-0,57	-2,25	0,05	0,41	0,25	-0,01	-0,03	-0,11	-0,07	-0,24	-0,92	-0,04	-0,14	-0,56
	Consumo anual de Água	t/MWh	36,00	1,00	10,00	15,67	-2,30	-0,06	-0,64	0,05	0,41	0,25	-0,11	0,00	-0,03	-0,94	-0,03	-0,26	-0,57	-0,02	-0,16
Ambiental Qualitativo	Perda de biodiversidade		3,00	1,00	1,00	1,67	-1,80	-0,60	-0,60	0,05	0,41	0,25	-0,09	-0,03	-0,03	-0,74	-0,25	-0,25	-0,45	-0,15	-0,15
	Retalhamento Unidades de Concervação		3,00	2,00	1,00	2,00	-1,50	-1,00	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,08	-0,05	-0,03	-0,62	-0,41	-0,21	-0,38	-0,25	-0,13
	Interaçao da estrutura com a fauna		3,00	2,00	1,00	2,00	-1,50	-1,00	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,08	-0,05	-0,03	-0,62	-0,41	-0,21	-0,38	-0,25	-0,13
	Toxinas		2,00	1,00	3,00	2,00	-1,00	-0,50	-1,50	0,05	0,41	0,25	-0,05	-0,03	-0,08	-0,41	-0,21	-0,62	-0,25	-0,13	-0,38
Social	Deslocamento Populacional		3,00	1,00	1,00	1,67	-1,80	-0,60	-0,60	0,05	0,41	0,25	-0,09	-0,03	-0,03	-0,74	-0,25	-0,25	-0,45	-0,15	-0,15
	Impacto uso da terra		3,00	2,00	1,00	2,00	-1,50	-1,00	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,08	-0,05	-0,03	-0,62	-0,41	-0,21	-0,38	-0,25	-0,13
	Impacto visual		1,00	3,00	1,00	1,67	-0,60	-1,80	-0,60	0,05	0,41	0,25	-0,03	-0,09	-0,03	-0,25	-0,74	-0,25	-0,15	-0,45	-0,15
	Ruído		2,00	3,00	1,00	2,00	-1,00	-1,50	-0,50	0,05	0,41	0,25	-0,05	-0,08	-0,03	-0,41	-0,62	-0,21	-0,25	-0,38	-0,13
										IAS			0,72	0,39	1,15	-5,30	-3,67	-4,81	-2,64	-1,90	-2,21