



**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental**

Adhara Ginaid

**INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIOS SOCIOAMBIENTAIS NA
FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE
LONGO PRAZO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Rio de Janeiro

2017



UFRJ

Adhara Ginaid

**INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIOS SOCIOAMBIENTAIS NA
FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE LONGO
PRAZODA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química de Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D. Sc.

Co-orientador: Luiz Guilherme Barbosa Marzano, D. Sc.

Rio de Janeiro

2017

Ginaid, Adhara

Incorporação de critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica/ Adhara Ginaid. – 2017.

149 f.: il 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2017.

Orientadores: Amarildo da Cruz Fernandes e Luiz Guilherme Barbosa Marzano

1.Planejamento da Expansão de Longo Prazo. 2. Sistema Hidrotérmico. 2. Garantia de Suprimento. 3. Impacto Socioambiental. 4. Multiobjetivo. I. Fernandes, Amarildo e Marzano, Luiz. II. Escola Politécnica e Escola de Química. III.Título.



UFRJ

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIOS SOCIOAMBIENTAIS NA FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Adhara Ginaid

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D. Sc.

Co-orientador: Luiz Guilherme Barbosa Marzano, D. Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química de Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Amarildo da Cruz Fernandes, DSc., UFRJ.

Luiz Guilherme Barbosa Marzano, DSc., CEPEL.

Jorge Machado Damázio, DSc., CEPEL.

Carlos Henrique Medeiros de Sabóia, DSc., CEPEL.

Estevão Freire, DSc., UFRJ.

Rio de Janeiro - RJ

2017

iv

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) pela disponibilização dos modelos computacionais e dos dados necessários para elaboração do presente trabalho e por todo conhecimento adquirido durante o programa de bolsista desenvolvido nesta empresa.

Ao co-orientador e pesquisador do CEPEL Luiz Guilherme Marzano, e ao pesquisador do CEPEL Carlos Henrique Medeiros de Sabóia, por me oferecerem a oportunidade de realizar um projeto no tema citado, pela paciência em ensinar e por todo o suporte durante a realização deste trabalho.

Ao orientador Amarildo da Cruz Fernandes pelo incentivo durante a realização deste trabalho com suas importantes críticas e sugestões.

Ao amigo Renan Rodrigues pelo amor, carinho, paciência e enorme apoio que me deu nas horas mais difíceis.

A minha família, que mesmo distante, me deu apoio para finalizar essa importante etapa na minha vida acadêmica.

RESUMO

GINAID, Adhara. **Incorporação de Critérios Socioambientais na Formulação do Problema de Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O planejamento sustentável do setor elétrico brasileiro é um estudo muito complexo devido a necessidade de garantir o suprimento de energia elétrica considerando objetivos conflitantes e as diversas incertezas inerentes de um sistema hidrotérmico. O propósito dessa dissertação é de apresentar uma metodologia multiobjetivo que incorpore os critérios socioambientais no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica através da adaptação da formulação matemática do Modelo de Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP). Os critérios socioambientais selecionados foram obtidos a partir de um estudo prévio realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica em 2011, que contempla impactos avaliados de forma qualitativa e quantitativa e compreende grande parte daqueles mencionados na literatura: uso e ocupação do solo, modos de vida, populações tradicionais e ribeirinhas, aversão ao risco, poluição sonora, qualidade da água, qualidade do ar, resíduos sólidos radioativos, contaminação com radiação, aquecimento global, etc. O estudo de caso baseado no sistema brasileiro é apresentado a fim de testar a aplicabilidade do modelo multiobjetivo desenvolvido (MELP-SUSTENTÁVEL). Os resultados mostram uma alteração no mix de fontes de geração de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional a medida que os critérios socioambientais são considerados mais relevantes. A principal mudança observada foi a substituição de fontes nuclear e carvão mineral por fontes com menor impacto socioambiental como gás natural, biomassa, eólica e biogás.

Palavras-chave: Planejamento da Expansão de Longo Prazo, Sistema Hidrotérmico, Garantia de Suprimento, Impacto Socioambiental, Multiobjetivo

ABSTRACT

GINAID, Adhara. **Incorporação de critérios socioambientais na Formulação do Problema de Planejamento da Expansão da Geração de Energia Elétrica de Longo Prazo.** Rio de Janeiro, 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The sustainable planning of the Brazilian electricity sector is a very complex study due to the need to guarantee the electric power supply considering conflicting objectives and the diverse inherent uncertainties of a hydrothermal system. The purpose of this paper is to present a multiobjective methodology to incorporate socio-environmental criteria in the long-term expansion planning of electric power generation systems by adapting the formulation of a mono-objective mathematical model (MELP). The selected socio-environmental criteria were obtained from a previous study carried out by the Centro de Pesquisas de Energia Elétrica in 2011, which contemplates impacts in a qualitative and quantitative way and comprises a large part of those mentioned in the literature: soil use and occupation, ways of life, traditional and riverside populations, risk aversion, sound pollution, water quality, air quality, solid radioactive waste, radiation contamination, global warming, etc. The case study based on the Brazilian system is presented in order to test the applicability of the developed multiobjective model (MELP-SUSTENTÁVEL). The results show a change in the mix of generation sources for the national interconnected system as the socio-environmental criteria are considered more relevant. The main change observed was the substitution of sources such as nuclear and coal for sources with less social and environmental impact such as natural gas, biomass, wind and biogas.

Keywords: Long-Term Expansion Planning, Hydrothermal System, Supply Guarantee, Socio-environmental Impact, Multi-objective

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Estrutura da Dissertação	3
2. Planejamento da expansão da geração do setor elétrico brasileiro	6
2.1. Plano Nacional de Energia	8
2.2. Modelo de Planejamento Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP)	13
3. Energia e desenvolvimento sustentável.....	18
3.1. Impactos Socioambientais e o Setor Elétrico.....	20
3.1.1. Análise do Ciclo de Vida.....	22
3.1.2. Impactos Socioambientais das Fontes de Geração de Energia Elétrica	25
3.1.2.1. Fontes Térmicas não renováveis	27
3.1.2.2. Fontes Renováveis.....	30
3.1.2.3. Transmissão de Energia Elétrica.....	36
3.2. Indicadores de sustentabilidade para o setor elétrico.....	38
3.2.1. Econômico.....	41
3.2.2. Ambiental	43
3.2.2.1. Emissões.....	43
3.2.2.2. Recursos Naturais	44
3.2.2.3. Área Transformada.....	45
3.2.3. Social.....	47
3.2.4. Técnicos	49
3.3. Metodologia do CEPEL – Detalhamento do cálculo do IAEXP	51
4. Métodos de Apoio a Decisão para incorporar critérios socioambientais no Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo do Setor Elétrico.	65
4.1. Método de Custo (Externalidade)	65
4.2. Método Multicritério	70

4.2.1. Utilização de métodos multicritério no setor elétrico	73
5. Abordagem Proposta para Incorporação da dimensão socioambiental no modelo MELP.....	85
5.1. Indicadores Socioambientais Selecionados.....	87
5.2. Desenvolvimento do MELP-SUSTENTÁVEL.....	88
5.2.1.Função objetivo	89
5.2.2.Restrições	92
6. Estudo de Caso.....	92
6.1. Dados de entrada e premissas básicas	92
6.1.1.Horizonte de Tempo	92
6.1.2.Sistema Existente.....	93
6.1.3.Demanda.....	93
6.1.4.Portfólio de Projetos	94
6.1.5.Dados Econômicos	96
6.1.6.Dados complementares.....	97
6.1.7.Critérios socioambientais	97
6.1.8.Critérios técnicos.....	98
7. Análise de Resultados.....	100
7.1. Mix de expansão.....	105
7.2. Avaliação do Portfólio	108
7.3. Indicadores socioambientais.....	110
7.4. Expansão da Transmissão	111
8. Conclusões	114
9. Discussão e Recomendações	116
10. Referências	120
Anexos	1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodologia dos estudos do PNE 2030: uma visão geral	10
Figura 2. Percentual de participação na matriz elétrica por fonte.].....	11
Figura 3. Percentual de participação na matriz elétrica por fonte excluindo a fonte hidráulica.].....	12
Figura 4. Ilustração de a)sustentabilidade como uma interseção das dimensões econômica, social e ambiental e b) hierarquia das dimensões de sustentabilidade..	19
Figura 5. O ciclo de vida da fonte: a) gás natural; b) carvão; c) nuclear; d) biomassa e e) eólica/solar/hidráulica.....	24
Figura 6. Ações impactantes de Usinas Termelétricas a Carvão.].....	27
Figura 7. Pirâmide de Informações	38
Figura 8. Preço da geração de energia elétrica por fonte.]	42
Figura 9. Emissão de GEE estufa por fonte.	43
Figura 10. a) fontes preferíveis em nível nacional na Austrália. b) fontes preferíveis em nível local em New South Wales.	48
Figura 11. Fluxograma do ciclo de vida da geração de energia elétrica através de usinas a) hidrelétricas; b) térmicas a gás natural; c) térmicas nucleares; d) térmica a carvão e) térmicas biomassa de cana-de-açúcar; f) eólicas	54
Figura 12. Passos para seleção dos impactos socioambientais.	55
Figura 13. Metodologia multicritério para seleção de fontes de geração de energia elétrica.....	72
Figura 14. Sistema Interligado Nacional (2015) e possibilidades de expansão 2030.	93
Figura 15. Custo unitário de investimento de projetos de usinas hidrelétricas.....	96
Figura 16. Fatores de participação térmicos.	99
Figura 17. Curva de eficiência.....	102
Figura 18. Relação dos custos individuais com os impactos socioambientais.....	102
Figura 19. Geração de energia elétrica ao longo do horizonte de estudo.	103
Figura 20. Expansão da capacidade de geração total para cada cenário avaliado de 2016-2030.	104
Figura 21. Expansão da capacidade de geração por fonte para cada cenário avaliado de 2016-2030.....	105
Figura 22. Mix de expansão para os cenários de 2016-2030.....	106
Figura 23. Utilização do portfólio disponível para os cenários extremos em todo horizonte de planejamento a) cenário 1 e b) cenário 6.	109
Figura 24. Mix de expansão anual para o cenário 6 (mínimo socioambiental viável)	111
Figura 25. Capacidade do intercâmbio considerando ou não o impacto das linhas de transmissão.....	112
Figura 26. Mix de expansão para os cenários de 2016-2030, considerando ou não o impacto das linhas de transmissão.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Expansão da oferta de energia elétrica a longo prazo, por fonte de geração – (MW).....	10
Tabela 2. Classificação dos impactos ambientais.....	21
Tabela 3. Intensidade dos impactos ambientais da geração de energia elétrica na ACV.....	25
Tabela 4. Impactos socioambientais das principais fontes de geração de eletricidade	26
Tabela 5. Impactos negativos da fonte hidráulica	32
Tabela 6. Impactos ambientais da transmissão de energia elétrica	37
Tabela 7. Lista de critérios de avaliação utilizados em estudos de multicritério para o setor de energia.	41
Tabela 8. Captação e consumo de água durante a geração de energia elétrica.	45
Tabela 9. Uso da terra para diferentes fontes de geração de energia elétrica.....	46
Tabela 10. Área ocupada e área afetada para diversas fontes de geração de energia elétrica.....	47
Tabela 11. Posicionamento da população aos diferentes métodos de geração de energia elétrica.....	49
Tabela 12. Eficiência de diversas fontes de geração de energia elétrica.....	50
Tabela 13. Classificação dos níveis de significância dos impactos socioambientais.	56
Tabela 14. Principais impactos-fonte explorados em CEPEL [57].	58
Tabela 15. Resumo de indicadores e critérios de avaliação para os impactos selecionados	59
Tabela 16. Área utilizada por GW e grau de impacto de cada fonte.	62
Tabela 17. Grau de impacto modificado por impacto.	62
Tabela 18. Impacto por fonte final.....	63
Tabela 19. Faixa de valores monetários para as externalidades ambientais de projetos de usinas de geração elétrica.....	68
Tabela 20. Danos ambientais do para as fontes de geração de energia elétrica avaliadas por Reis [58].	68
Tabela 21. Valores de custo ambiental considerados no estudo de [30].	69
Tabela 22. Revisão da literatura sobre a utilização de métodos multicritério em temas do setor elétrico.	76
Tabela 23. Fontes de geração de energia elétrica avaliadas em cada estudo avaliado neste trabalho.....	83
Tabela 24. Indicadores socioambientais utilizados para o estudo e seus respectivos pesos.....	88
Tabela 25. Projeção da carga de energia ¹ (MWmédio)	94
Tabela 26. Capacidade disponível para a expansão do SIN.....	95
Tabela 27. Custo das fontes térmicas	96

Tabela 28. Índice de impacto socioambiental por fonte utilizado no estudo de caso.	98
Tabela 29. Fatores de capacidade final para diversas fontes de geração de energia elétrica.....	99
Tabela 30. Cenários avaliados no estudo.	101
Tabela 31. Relação entre o impacto socioambiental e o custo total.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV - Análise do Ciclo de Vida
AHP – Analytic Hierarchy Process
BEM - Balanço Energético Nacional
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
ELECTRE - Elimination and Choice Translating
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FC - Fator de Capacidade
GEE - Gases de Efeito Estufa
GNL - Gás Natural Liquefeito
IEA - International Energy Agency
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês, Intergovernmental Panel on Climate Change)
MELP - Modelo de Expansão da Geração de Longo Prazo
MME - Ministério de Minas e Energia
PCH - Pequena Central Hidrelétrica
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE - Plano Nacional de Energia
PPEG - Problema de Planejamento da Expansão da Geração
PROMETHEE - Preference Ranking Method for Enrichment
PSI - Paul Scherrer Institute
SIN - Sistema Interligado Nacional
SINV - Sistema de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas
UHE - Usina Hidrelétrica
UTE - Usina Termelétrica

1. Introdução

A energia elétrica é essencial para o crescimento econômico bem como para atender as necessidades da população. Dessa forma, suprir o crescimento da demanda de energia elétrica é um problema recorrente em vários países, principalmente para os países em desenvolvimento como o Brasil. Nesse aspecto, a realização de um planejamento da expansão de longo prazo é importante em um sistema hidrotérmico visto que o tempo de construção das usinas geradoras pode ser longo, como é caso das usinas hidrelétricas.

Como a geração de energia elétrica utiliza recursos naturais como insumos e gera necessariamente impactos sobre o meio ambiente, a melhoria de condições de vida da geração atual sem o comprometimento dos recursos a serem disponibilizados para as gerações futuras exige a adoção de estratégias sustentáveis [1]. Essa necessidade se concretiza com os estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que apontam o setor elétrico como grande contribuinte para o aquecimento global e para as emissões de poluentes atmosféricos [2,3] além de estudos a nível local, que exaltam os impactos locais desse setor no entorno das usinas geradoras de energia elétrica. A literatura reforça que o planejamento pautado na minimização de custos não é mais apropriado e deve ser reformulada, pois a tomada de decisão deve considerar múltiplos objetivos como critérios sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais [4].

As políticas baseadas no desenvolvimento sustentável para o setor elétrico devem promover um maior uso de fontes de energia elétricas limpas e renováveis [5, 6], sob o ponto de vista da oferta, e sistemas mais eficientes, sob o ponto de vista da demanda. Nesse contexto, onde há uma crescente preocupação com o meio ambiente, vários pesquisadores buscam maneiras de incorporar a dimensão socioambiental nos estudos da expansão do setor elétrico. Alguns estudos hierarquizam as fontes de geração de energia elétrica sob critérios sustentáveis [4, 7-16], outros criam cenários de expansão para selecionar o mais sustentável [6,17-19] e por último alguns utilizam metodologias de otimização [20-27]. As abordagens mais utilizadas para incluir critérios socioambientais na tomada de decisão para o planejamento da expansão de geração são: a definição de custos para os impactos sociais e ambientais (monocritério), também conhecido como custo

de externalidade e a análise multicritério (multicritério/multiatributo). Em qualquer abordagem o objetivo é atender aos compromissos com o desenvolvimento sustentável e contribuir para a redução das incertezas e riscos inerentes à questão socioambiental associados aos empreendimentos do setor, que pode se traduzir em maiores custos e prazos de implantação de projeto mais longos [28].

O modelo matemático de otimização adotado no Plano Nacional de Energia 2030 - PNE2030 [29], último plano de expansão de longo prazo publicado pelo governo brasileiro, se caracteriza como um modelo monoobjetivo, isto é, avalia apenas a dimensão econômica. No PNE2030 os aspectos socioambientais são considerados de forma exógena e indireta como uma condicionante para a expansão do sistema elétrico, que prevê o atraso de certos projetos em função da dificuldade de obtenção das licenças ambientais. Neste caso ainda não há a incorporação de forma explícita dos critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento da expansão e o critério econômico ainda é o fator mais relevante para a determinação do mix de expansão

O planejamento do setor elétrico já foi avaliado por diversos autores, com diferentes propostas e métodos para solucionar esse problema complexo de vários objetivos conflitantes. A maior parte inclui diversos métodos multicritério, em que cada critério tem sua própria unidade, ou em análises custo benefício, em que os demais critérios (sociais, ambientais, técnicos) são expressos em termos econômicos. Em qualquer uma das abordagens, os diferentes grupos de tomadores de decisão deparam com questões quantitativas e qualitativas, estas podem ser mais difíceis de mensurar e, portanto mais sujeitas a um julgamento subjetivo.

Dentre as pesquisas em nível nacional, Santos [30] aplicou, em um sistema fictício, uma metodologia de valoração ambiental para avaliar o impacto da variável ambiental na decisão do planejamento do setor elétrico. Diferente da metodologia mono-objetivo utilizada por Santos [30], outros autores avaliaram a mesma questão com uma metodologia multi-objetivo [20-22] em que as variáveis ambiental e econômica formam duas parcelas distintas. Foi observado que, de forma geral, quando se considera a dimensão socioambiental, o planejamento da expansão prioriza a utilização de fontes de geração de energia elétrica renovável, que implica em um maior custo de expansão, pois, em geral, as fontes renováveis têm um custo superior às fontes convencionais, devido, principalmente, ao alto custo de instalação

de uma tecnologia ainda não consolidada. No entanto, o desenvolvimento sustentável só é atingido quando se encontra um equilíbrio entre as três dimensões: ambiental, econômica e social. Dessa forma, o quesito econômico continua tendo um papel importante na decisão de quais usinas devem ser selecionadas para a expansão do sistema e, portanto deve estar dentre as variáveis de decisão.

Apesar dos esforços que vem sendo empreendidos em estudos nacionais acerca do assunto, a incorporação da dimensão socioambiental de modo formal e sistemático no modelo de otimização do planejamento da expansão da geração de longo prazo ainda não foi concretizada. A modelagem de critérios socioambientais juntamente com o critério econômico permite avaliar quanto o tomador de decisão está disposto a pagar pela redução de impactos socioambientais. A inexistência de critérios e métodos adequados a cada etapa do processo é um dos fatores responsáveis por esta lacuna [28]. Como exemplo positivo na incorporação formal da dimensão socioambiental pode-se apontar o Sistema para Estudos Energéticos e Socioambientais de Inventários Hidroelétricos de Bacias Hidrográficas (SINV), em que critérios socioambientais são considerados nas etapas de inventário e viabilidade no ciclo dos aproveitamentos hidroelétricos [31].

1.1. Objetivo

O objetivo principal desse trabalho é incorporar os critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento da expansão da geração de energia elétrica de longo prazo do setor elétrico brasileiro e analisar os efeitos dessa inclusão.

1.2. Estrutura da Dissertação

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução ao tema abordado nessa dissertação, que será desenvolvido ao longo dos capítulos seguintes. Além disso, o capítulo apresenta os principais objetivos para solução do problema de planejamento da expansão do da geração de longo prazo do sistema elétrico brasileiro em função da consideração de critérios socioambientais.

No segundo capítulo são apresentados os aspectos relevantes do processo de planejamento da expansão da geração de longo prazo do setor elétrico brasileiro, com a finalidade de contextualizar o desenvolvimento metodológico abordado nessa dissertação. Dentro deste tema é apresentado o Plano Nacional de Energia (PNE), documento utilizado pelo governo brasileiro para definir a expansão a longo prazo. Por fim o modelo matemático MELP, utilizado no PNE e para desenvolvimento deste trabalho é detalhado.

No terceiro capítulo apresenta-se inicialmente o histórico e importância do desenvolvimento sustentável e a sua relação com o setor elétrico, reafirmando a necessidade de incorporar a dimensão socioambiental no processo do planejamento do setor elétrico. Além disso, é mencionada a importância da utilização de uma análise do ciclo de vida de forma a realizar uma análise mais profunda dos impactos socioambientais. Em seguida, os impactos socioambientais causados pelos empreendimentos do setor elétrico considerados nessa dissertação (hidrelétricas, termelétrica e linhas de transmissão) são descritos. Ainda neste capítulo, comenta-se sobre a utilização dos indicadores como forma de representar as questões socioambientais bem com os mais utilizados nesse processo. A última seção deste capítulo descreve um estudo realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica em que são definidos índices de impacto socioambiental para as diversas fontes mencionadas no PNE.

No quarto capítulo são descritos os métodos de apoio a decisão existentes para incorporar critérios socioambientais no planejamento da geração de longo prazo do setor elétrico. Nesse contexto duas metodologias são detalhadas: o método de custo (externalidade) e o método multicritério. Além disso, são exploradas as vantagens e desvantagens de cada metodologia para lidar com problemas de planejamento de sistemas de geração de energia elétrica. Por fim são resgatadas algumas experiências nacionais e internacionais e são destacados os principais pontos para a avaliação socioambiental e abordagens para sua integração a este processo.

No quinto capítulo é apresentada a abordagem proposta para a incorporação da dimensão socioambiental no modelo MELP para solucionar o problema da expansão da geração de longo prazo. Para tal é apresentado o desenvolvimento do

modelo computacional “MELP-SUSTENTÁVEL” além dos parâmetros, das variáveis e das restrições utilizadas.

No sexto capítulo apresenta um estudo de caso baseado nos dados do PNE, de forma a verificar a aplicabilidade do modelo para o sistema de grande porte brasileiro. Nesse capítulo são detalhados os dados de entrada utilizados bem como as adaptações e considerações realizadas no estudo do PNE para melhor adequação ao modelo proposto.

No sétimo capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos para os cinco cenários analisados.

Finalmente, o oitavo capítulo apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação e o nono capítulo apresenta as sugestões para trabalhos futuros sobre o tema tratado, a fim de dar seguimento no uso de metodologias multicritério no planejamento da expansão do sistema elétrico no longo prazo.

2. Planejamento da expansão da geração do setor elétrico brasileiro

O crescimento da demanda de energia elétrica implica na necessidade de expandir as instalações de suprimento com investimento em projetos como: unidades geradoras (hidrelétricas, termelétricas, outras fontes renováveis de geração de energia elétrica), linhas de transmissão e até mesmo projetos de eficiência energética.

O planejamento do setor elétrico se constitui de um processo extenso, com envolvimento de equipes multidisciplinares para a sua elaboração. Dentre as atividades, inclui o levantamento do potencial energético, com destaque para os estudos de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas e para os estudos de viabilidade técnico, econômica e ambiental [32]. Nesse contexto, o planejamento da expansão do setor elétrico é um estudo necessário para determinar uma estratégia de implementação desses projetos de tal forma que se minimize a soma dos custos de investimentos e dos valores esperados dos custos de operação, atendendo as restrições de confiabilidade no suprimento ao mercado consumidor [33].

Além disso, a garantia do suprimento da demanda de energia elétrica e os custos associados às ações para atendê-la são dependentes de diversos fatores para os quais não se sabe ao certo qual será a sua evolução ao longo do período de planejamento, sendo necessário que estas incertezas sejam incorporadas [34]. Alguns exemplos são:

- o crescimento da demanda;
- disponibilidade e preço dos combustíveis;
- tempos de construção;
- taxas de juros e restrições financeiras;
- crescimento econômico;
- restrições ambientais.

O planejamento do setor elétrico é realizado em diferentes escalas de tempo e espaço. Cada escala tem sua importância no resultado final que é o atendimento à demanda de energia elétrica de forma segura, econômica e sustentável. Desde a elaboração do Plano Diretor de Meio Ambiente do Setor Elétrico [35], entende-se

que o setor elétrico desenvolve seu planejamento em três horizontes temporais. Quanto mais longínquo é o horizonte de análise, mais incertezas estão presentes e menor é grau de detalhamento na modelagem do sistema. Por outro lado, quanto menor é o horizonte temporal, muitas incertezas já foram realizadas e há a oportunidade de se detalhar a representação do sistema em análise. No estudo de Zimmerman [33] esses horizontes são descritos como:

- longo prazo: onde são abordadas as principais questões estratégicas ligadas ao suprimento de energia elétrica, a composição futura do parque gerador e os principais troncos e sistemas de transmissão, num horizonte, em geral, de 20 a 30 anos e com periodicidade de 5 a 6 anos. Tem como produto o Plano Nacional de Energia (PNE);
- médio prazo: se estabelecem os programas de geração e de transmissão de referência e estima as necessidades de recursos financeiros para investimentos e a demanda de serviços de construção de usinas, de sistemas elétricos (linhas de transmissão e subestações) e de equipamentos, em um horizonte de 15 anos e com periodicidade de 2 a 3 anos.
- curto prazo: em que são apresentadas as decisões relativas à expansão da geração e da transmissão, definindo os empreendimentos e sua alocação temporal, sendo realizadas as análises das condições de suprimento ao mercado e calculados os custos marginais de expansão, em um horizonte de 10 anos e periodicidade anual. Tem como produto o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE).

Seguindo essa escala temporal, o planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro vem sendo feito através de uma sequência de estudos que considera horizontes temporais decrescentes e aproximações sucessivas das decisões até a tomada de decisão efetiva. Até 2003, o Governo Federal só realizava o planejamento da expansão para o setor elétrico, sob a responsabilidade do Ministério de Minas e Energia – MME. Em 2004 iniciou-se a reestruturação do planejamento energético brasileiro com a produção dos seguintes documentos [33]:

- Balanço Energético Nacional - BEN 2030;
- Projeção da Matriz Energética Nacional - MEN 2030;
- Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030;
- Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2007/2016;
- Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica - PDEE 2006/2015;
- Manual de Planejamento - MP.

O presente trabalho será baseado no planejamento de longo prazo, uma vez que as diretrizes para incorporação explícita dos critérios socioambientais devem começar nos estudos de longo prazo. Esta representação explícita dos critérios socioambientais deve também ser incorporada nos estudos de planejamento de médio e curto prazo, para que as estratégias definidas no longo prazo não sejam “desfeitas” no médio e curto prazo. Entretanto, a análise do médio e curto prazo foge do escopo deste trabalho.

Devido à complexidade do problema do planejamento da expansão de longo prazo, e, que no caso do sistema brasileiro, também é de grande porte, não é possível determinar um planejamento que contemple aqueles objetivos sem auxílio computacional. Sendo assim, para fazer esta análise, são utilizados instrumentos quantitativos de apoio à tomada de decisão [30]. No âmbito desse trabalho, o Modelo de Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) será detalhado.

2.1. Plano Nacional de Energia

Os estudos do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) foram desenvolvidos pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, coordenados pela Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia - MME, com o apoio do CEPEL. Atualmente manual de planejamento é a principal ferramenta de planejamento de longo prazo para a expansão do sistema energético nacional, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão do segmento nas próximas décadas [29].

O PNE, com horizonte de até 30 anos e periodicidade em torno de cinco anos, procura analisar as estratégias de desenvolvimento do sistema energético nacional

para diferentes cenários de crescimento da demanda e da conservação de energia, otimizando-se a composição futura do parque gerador de energia elétrica, compreendendo todas as principais fontes primárias de geração de energia elétrica disponíveis em cada região do país, assim como a capacidade dos principais troncos de transmissão e redes de gás [33].

Os estudos desenvolvidos para o Plano Nacional de Energia- PNE 2030 podem ser estruturados em quatro grandes grupos [29]:

- Módulo macroeconômico, que compreendeu a formulação de cenários de longo prazo para as economias mundial e nacional;
- Módulo de demanda, que compreendeu o estabelecimento de premissas setoriais, demográficas e de conservação de energia resultando nas projeções do consumo final de energia;
- Módulo de oferta, que compreendeu, principalmente, o estudo dos recursos energéticos, envolvendo aspectos relacionados à tecnologia, aos preços, ao meio ambiente, à avaliação econômica da competitividade das fontes e dos impactos da regulação, permitindo a formulação de alternativas para a expansão da oferta frente a uma evolução esperada da demanda;
- Estudos finais, que compreenderam a integração dos estudos de oferta e de demanda, inclusive a reavaliação das projeções iniciais de consumo dos energéticos, *vis-à-vis* aspectos de natureza política, estratégica, institucional e de segurança energética, que culminaram com as projeções finais de consumo e de oferta interna de energia.

Esquemáticamente, a inter-relação entre esses módulos pode ser representada como na Figura 1. Deve-se ressaltar que os estudos da oferta e da demanda são conduzidos de forma integrada, inclusive com a incorporação do processo iterativo de ajuste entre oferta e demanda, na qual resulta na reavaliação das projeções iniciais de consumo a partir das restrições de oferta ou da concorrência entre os diversos energéticos. Em cada um desses módulos são empregados modelos de

quantificação desenvolvidos internamente ou modificados de acordo com os objetivos dos estudos do PNE 2030.

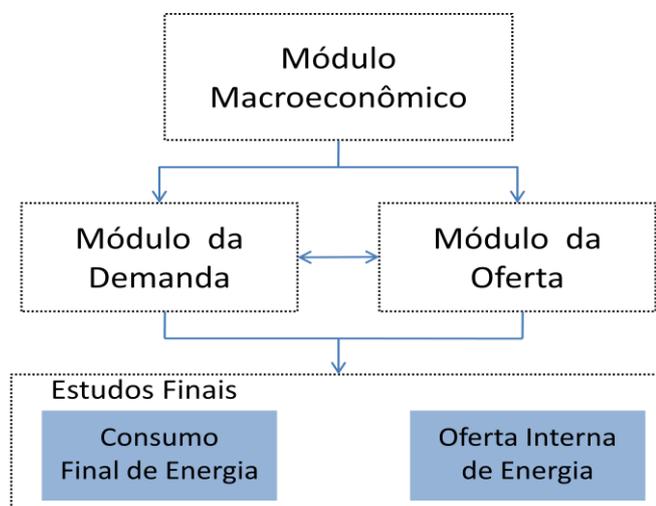


Figura 1. Metodologia dos estudos do PNE 2030: uma visão geral. Fonte: [20]

Tendo em vista os condicionantes estabelecidos em relação à proposta de expansão que consta no PNE 2030, o modelo de cálculo encontrou uma repartição ótima em termos energético-econômico entre as fontes hidráulicas e térmicas, considerando não somente a comparação entre os custos das fontes, mas também a influência do custo da transmissão. Desta forma, entre 2015-2030 a expansão seria composta de 65% de hidrelétricas e 18% de termelétricas, além das outras fontes renováveis, com 17%. A Tabela 1 apresenta os resultados da expansão da oferta de energia elétrica para o PNE 2030.

Tabela 1. Expansão da oferta de energia elétrica a longo prazo, por fonte de geração – (MW).

Fonte	Capacidade Instalada em		Acréscimo	
	2020	2030	2005-2030	2015-2030
Hidrelétrica	116.100	156.300	87.700	57.300
Grande Porte ¹	116.100	156.300	87.700	57.300
Termelétrica	26.897	39.897	22.945	15.500
Gás Natural	14.035	21.035	12.300	8.000

Nuclear	4.347	7.347	5.345	4.000
Carvão ²	3.015	6.015	4.600	3.500
Outras ³	5.500	5.500	700	-
Outras Renováveis	8.783	20.322	19.468	15.350
PCH	3.300	7.769	7.000	6.000
Centrais Eólicas	2.282	4.682	4.653	3.300
Biomassa da Cana	2.971	6.571	6.515	4.750
Resíduos Urbanos	200	1.300	1.300	1.300
Importação	8.400	8.400	0	0
TOTAL	160.180	224.919	130.113	88.150

1) inclui usinas binacionais; 2) refere-se somente ao carvão nacional, não houve expansão com carvão importado; 3) a expansão após 2015 é numericamente pouco significativa por referir-se aos sistemas isolados remanescentes (0,2% do consumo nacional). Fonte:[29]

A Figura 2, a seguir, mostra o percentual de participação de cada fonte na matriz de geração elétrica. Observa-se no planejamento a tendência de aumento do percentual de geração nuclear e da geração por biomassa da cana.

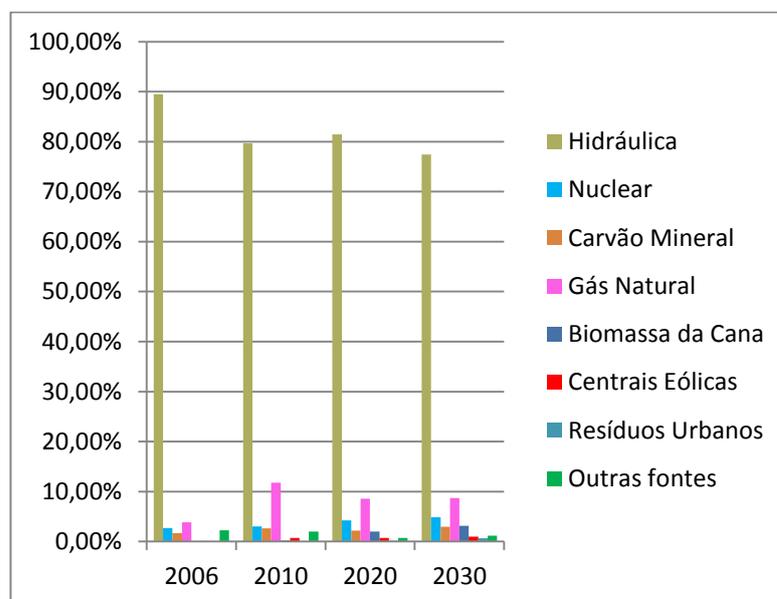


Figura 2. Percentual de participação na matriz elétrica por fonte. Fonte: [29]

No gráfico da Figura 3, apenas para fins de visualização, é excluída a fonte hidráulica, e o valor máximo no eixo vertical é de 14%. De acordo com o plano, em 2030 apenas três fontes representarão individualmente percentual superior a 4% da matriz elétrica: hidráulica (77,44%), gás natural (8,72%) e nuclear (4,89%), juntas representando 91,05% da produção de energia elétrica. Em ordem decrescente de representatividade a próxima seria a biomassa de cana (3,17%), aumentando o percentual de cobertura para 94,22%; e o carvão mineral (2,97%), o que sobe a cobertura para 97,2%.

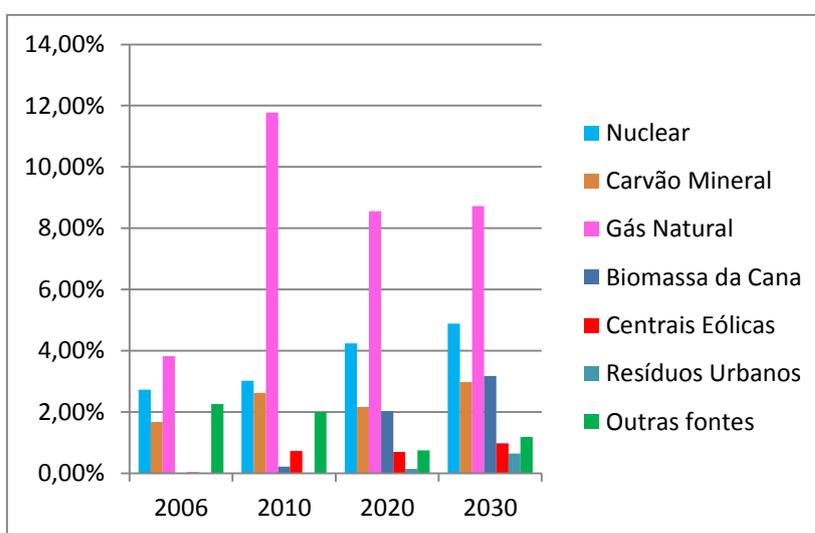


Figura 3. Percentual de participação na matriz elétrica por fonte excluindo a fonte hidráulica.
Fonte:[29]

No estudo, pode-se concluir que as termelétricas tendem a assumir, ao longo do horizonte considerado no PNE, uma função diferente da que exercem quando da elaboração do estudo, deixando de operar em regime de complementação para operar na base (regime operativo mais permanente). Nessa situação, o custo de geração na base das térmicas refletirá, em última análise, o custo marginal da expansão.

Em sua metodologia, o PNE 2030 não insere a variável socioambiental de forma explícita na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica. Neste estudo, os critérios socioambientais a serem considerados no planejamento são de caráter restritivo, ou seja, os empreendimentos elétricos que forem considerados impactantes para a sociedade e o meio ambiente terão uma maior dificuldade de implantação, representada pelo

adiamento da sua data de inicial de expansão. Esta abordagem para o problema coloca o meio ambiente como um fator de atraso para o crescimento da oferta, um sobrepeso sobre determinadas usinas, mas sem muita precisão de seu real impacto socioambiental. A abordagem utilizada para o PNE2030 é adequada em relação a modelos econômicos, porém, tem grandes carências para representar a aspectos sociais e ambientais, implicando em melhorias metodológicas para que a estratégia de expansão da oferta de energia elétrica esteja dentro da ótica de desenvolvimento sustentável do país.

2.2. Modelo de Planejamento Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP) ¹

Conforme mostrado nos itens anteriores, o planejamento de longo prazo é fundamental para que o atendimento da demanda seja realizado de forma eficiente, e devido ao tamanho do parque gerador nacional e a complexidade envolvida na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) são utilizados modelos matemáticos que auxiliam na definição de quais projetos serão implantados [30]. Para o último PNE, publicado em 2007 pelo MME, o modelo matemático utilizado de apoio ao planejamento da expansão foi Modelo de Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP), desenvolvido pelo CEPEL [36].

Em linhas gerais, este modelo de otimização permite determinar a solução de expansão da oferta de energia elétrica para atender a demanda futura com a minimização de custos de investimento e do valor esperado dos custos de operação dos sistemas de geração de energia elétrica e dos troncos de interligação, levando em consideração aspectos de variabilidade e incertezas hidrológicas na análise da operação hidrotérmica.

No MELP, o problema do planejamento da expansão da geração tem o horizonte de planejamento dividido em estágios temporais, e caracteriza-se pela existência de dois subproblemas lineares acoplados, i.e. investimento e operação, que são modelados por variáveis inteiras (0-não se constrói; 1-constrói-se) e contínuas, respectivamente. Do ponto de vista matemático, isto resulta em um problema de programação linear inteira mista e que para um sistema elétrico com as

¹ Compilado de [13]

dimensões do sistema brasileiro, trata-se de um problema de grande porte que requer elevado esforço computacional para sua solução.

O subproblema de investimento é definido principalmente pelos custos de investimentos de usinas (hidrelétricas, termoelétricas convencionais, eólica, biomassa e etc.) e interligações enquanto subproblema de operação está relacionado com os custos operativos das usinas termoelétricas (custos de combustíveis), manutenção de usinas e custos de déficits.

Para o sistema elétrico brasileiro, com parque gerador predominantemente hidrelétrico, a confiabilidade de atendimento à demanda de energia deve ser analisada considerando as incertezas hidrológicas. A representação destas incertezas é modelada no modelo MELP através da análise da operação para duas condições de hidrologia: crítica e média. Para a condição de hidrologia média, a geração de uma usina hidroelétrica está limitada ao valor médio de geração desta usina para as séries de vazões históricas, i.e. considera as energias firme² e secundária³. Para a hidrologia crítica, a produção de energia está limitada ao valor da energia firme. No caso das termoelétricas, a geração máxima é definida em função de fatores de participação das usinas nas condições de hidrologia média e crítica.

A representação da característica sazonal de geração de usinas geradoras, notadamente as usinas hidrelétricas situadas na Amazônia, é importante para o cálculo mais preciso da capacidade dos troncos de interligação. No MELP, esta representação se faz através de curvas de geração sazonais típicas. Estas curvas podem ser também aplicadas à geração dos parques eólicos e cogeração a bagaço de cana-de-açúcar.

Dados Principais: Os principais dados necessários para execução do modelo MELP são:

² A energia firme de uma usina hidrelétrica corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da sequência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde ela está instalada.

³ Energia secundária é o fornecimento da energia ocasionalmente excedente (montante que supera a energia assegurada), verificadas em determinados períodos em que existem condições favoráveis, ou seja, ocorrência de chuvas e/ou menor solicitação do mercado.

- configuração do parque gerador;
- capacidade das interligações entre subsistemas;
- mercado de energia elétrica, para cada subsistema e período do horizonte de planejamento;
- dados técnicos e econômicos de projetos de usinas geradoras e troncos de interligação;
- custos de combustíveis das usinas termelétricas;
- custos fixos e variáveis de operação e manutenção das usinas geradoras;
- taxa de desconto.

Variáveis de Investimento: Na formulação do subproblema de investimento, as usinas e as interligações entre subsistemas são diferenciadas em dois grupos:

- projetos candidatos: são os projetos de usinas, ou usinas já existentes, mas com projeto de expansão complementar, e os projetos de interligações entre subsistemas;
 - empreendimentos existentes: usinas e interligações já construídas e em operação.
- As variáveis de investimento são modeladas por variáveis binárias.

Variáveis de Operação: Representam a geração das usinas e os fluxos de energia nas interligações entre os subsistemas, e são modeladas por variáveis contínuas.

Função Objetivo: A função objetivo do problema de planejamento da expansão da geração corresponde à minimização dos custos totais de investimentos e do valor esperado dos custos de operação, composto pelos custos de combustíveis nas usinas térmicas e custos de racionamentos de energia, ao longo do período de planejamento. Na função objetivo do MELP, o custo de operação considerado é o associado à condição de hidrologia média.

Modelagem das Restrições: As restrições modeladas no MELP são essencialmente de três tipos:

Operativas: em termos de potência das usinas são considerados os limites mínimos e máximos operativos. Em termos de disponibilidade de energia, para cada condição hidrológica (média e crítica), são considerados limites mínimos e máximos de produção, especificados para as termoelétricas em função do seu fator de participação, e para as hidroelétricas em função de suas energias firme e secundária. Os fluxos nas interligações são limitados aos seus limites operativos máximos;

Atendimento à demanda de energia: para cada estágio de tempo, para ambos os regimes médio e crítico, a geração total do subsistema considerado, acrescentada do déficit e intercâmbios, deve satisfazer a demanda (dada por patamares e subsistemas);

Déficit nulo para condição de hidrologia crítica: o plano de expansão ótimo deve atender os requisitos de demanda de energia em condições críticas.

Resolução do Problema: A formulação matemática do MELP se caracteriza como um problema de programação linear inteira mista. A complexidade do problema é confirmada pelo acoplamento entre variáveis binárias e contínuas, através das equações de atendimento à demanda e de limites operativos. Existem duas opções de resolução do problema implementadas no MELP:

Relaxação Linear: As variáveis de investimento são tratadas como contínuas, fazendo-se uso do pacote computacional CPLEX [37] para resolução de programas lineares contínuos. Entretanto, surgem dificuldades de interpretação dos planos de expansão obtidos, com valores fracionários de construção de projetos de usinas e interligações;

Inteiro Determinístico: Por ser um problema de porte razoável, o problema pode ser resolvido, considerando-se certa tolerância para a otimalidade, diretamente usando um algoritmo de *Branch-and-cut* disponível no pacote CPLEX. Heurísticas desenvolvidas para determinar uma solução inteira viável de boa qualidade permitem reduzir de forma substancial o tempo computacional e, viabilizaram a

aplicação do modelo MELP para o planejamento de longo prazo do sistema elétrico brasileiro.

Recentemente, foi incorporada ao modelo MELP uma restrição de nível máximo de emissões acumuladas de gases de efeito estufa [38]. Através de simulações com o MELP com diferentes limites de restrição ambiental, pode-se construir a curva de eficiência, com base na qual o decisor poderá escolher a solução mais próxima de suas preferências. Do ponto de vista matemático e computacional, a inclusão desta restrição ambiental gera acoplamento temporal da geração, aumentando a complexidade do problema. Para resolvê-lo foi necessário o desenvolvimento de uma nova metodologia com base na técnica de decomposição de *Dantzig-Wolfe* [39]. Para casos de maior complexidade, foi desenvolvido um algoritmo do tipo *Branch-and-Price* [39].

3. Energia e desenvolvimento sustentável

O desejo de atingir uma sociedade sustentável não é uma particularidade das sociedades modernas [40]. Um exemplo clássico de que a insustentabilidade pode levar a um colapso da sociedade foi o ocorrido na ilha de Páscoa, em que os habitantes consumiram desordenadamente os recursos naturais locais, inviabilizando a alimentação e até mesmo a construção de canoas [41]. Cada vez mais a sustentabilidade se torna uma preocupação mundial devido a dois fatores: (1) aumento da consciência da existência de limites para a disponibilidade de recursos não renováveis; e (2) aumento da consciência de que há limites para a capacidade suporte da biosfera para resíduos e poluição [42].

Há várias definições de sustentabilidade, mas a definição mais reconhecida foi definida em 1987 no relatório “*Our Common Future*” como aquele que “satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” [43]. Essa definição reafirmava os resultados publicados no livro “Os Limites do Crescimento” [44], que apresentou a ocorrência de um crescimento de consumo, associado ao crescimento populacional, incompatível com os padrões de produção, evidenciando um esgotamento de recursos naturais. Esse conceito foi incorporado como um princípio, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Cúpula da Terra de 1992 – Eco-92, realizada no Rio de Janeiro, e serviu como base para a formulação da Agenda 21, com a qual mais de 170 países se comprometeram. Desde então, o conceito de desenvolvimento sustentável passou a fazer parte de uma espécie de senso comum [22]. Tomadores de decisão e a sociedade civil em geral por todo o mundo lançaram mão do conceito de sustentabilidade, que passou a ser um dos mais citados conceitos nos meios: político, empresarial e acadêmico [45].

A sustentabilidade pode ser representada pela região de interseção de três círculos sobrepostos que representam economia, meio ambiente e sociedade (Figura 4a). As três dimensões da sustentabilidade também podem ser representadas em uma estrutura hierárquica, em que a economia é um subsistema da sociedade e ambos são parte da dimensão ambiental [40], conforme a Figura 4b.

Esses modelos ilustram a interligação das três dimensões e o efeito delas em um sistema sustentável.

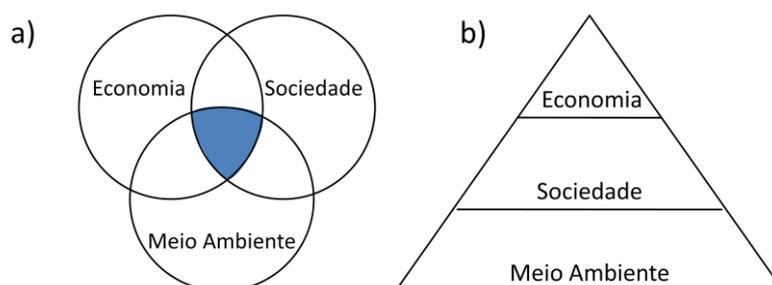


Figura 4. Ilustração de a) sustentabilidade como uma interseção das dimensões econômica, social e ambiental e b) hierarquia das dimensões de sustentabilidade. Fonte:[40].

O conceito de sustentabilidade se difundiu em diversas áreas do conhecimento. A sustentabilidade aplicada ao setor elétrico também possui muitas conceituações, mas de forma geral compreende os temas: segurança energética, substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, o investimento em eficiência energética, saúde pública e proteção do meio ambiente [1, 7, 20, 22, 46]. Em 1987, a comissão do Relatório Brundtland definiu quatro elementos para a sustentabilidade energética, que confirma que as três dimensões estão intrinsecamente relacionadas:

- Crescimento de energia elétrica suficiente para atender a demanda.
- Eficiência energética e medidas de conservação para minimizar os resíduos dos recursos primários.
- Comprometimento com a saúde pública e reconhecimento dos riscos de segurança inerentes às fontes energéticas.
- Proteção da biosfera e prevenção de poluição local.

Mesmo que houvesse um consenso na definição desse termo, ainda não há uma metodologia padrão de como mensurar a sustentabilidade ou para definir um índice para a sustentabilidade de algum produto ou processo. Um dos grandes desafios para a construção do desenvolvimento sustentável é, portanto, compreender os impactos inerentes das atividades, e, mais do que isso, conseguir quantificá-los de forma a prover informações que facilitem a avaliação do grau de sustentabilidade.

A oferta e uso da energia elétrica se inserem nesta questão por serem importantes para o desenvolvimento das sociedades e provocarem importantes impactos socioambientais [47]. Na âmbito dos sistemas elétricos, vários estudos consideram critérios socioambientais para avaliar a sustentabilidade das fontes de geração de energia elétrica, cada qual utiliza métodos, critérios, dados e premissas diferentes, fato que impossibilita uma comparação direta entre os estudos. Há dificuldade de se elencar os critérios, principalmente devido aos estágios diferentes de desenvolvimento social entre os países. As questões ambientais e sociais apresentam aspectos diferentes para os países desenvolvidos, pobres e emergentes [48]. Na dimensão ambiental sabe-se que a emissão de gases efeito estufa (GEE) é prejudicial ao meio ambiente, e, portanto, um critério amplamente considerado nesses estudos, mas outros critérios ambientais e sociais também são cruciais para avaliar a sustentabilidade.

3.1. Impactos Socioambientais e o Setor Elétrico

De acordo com Goldemberg e Lucon [49], após a Revolução Industrial as agressões antropogênicas ao meio ambiente se tornaram significativas devido ao aumento populacional e desenvolvimento sócio econômico que aceleraram, de forma exponencial, o ritmo de extração dos recursos naturais e o despejo de resíduos sobre o meio ambiente. A preocupação era alcançar o crescimento econômico e tecnológico, sem preocupações ou conhecimento das consequências da utilização de tecnologias fósseis para a obtenção de energia elétrica, por exemplo.

Esses impactos contínuos e de grande magnitude não permitem que o meio ambiente se recupere totalmente dessas ações. Desta forma, se faz necessário e estratégico mitigar os impactos do setor elétrico sobre o meio ambiente, pois estes impactos reduzem a qualidade de vida dos seres vivos, comprometem a extração de recursos naturais, desequilibram ecossistemas e a biosfera [1].

Segundo o Conselho Nacional de Meio Ambiente [50], pela resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986, o impacto ambiental pode ser definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente,

causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam:

- a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- as atividades sociais e econômicas;
- a biota;
- as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e
- a qualidade dos recursos ambientais.

O impacto ambiental pode ser classificado em função de diversas características, conforme a Tabela 2. Essas classificações são importantes para determinar os impactos que são mais relevantes para as fontes de geração de energia elétrica. A classificação do impacto quanto a abrangência, por exemplo, é bastante relevante uma vez que os sistemas de geração de energia elétrica impactam o entorno de suas usinas mesmo quando operam normalmente, a exemplo de uma hidrelétrica, que altera o fluxo e qualidade de água [51].

Tabela 2. Classificação dos impactos ambientais.

Classificação	Característica	Descrição
Natureza	Positivo	Provoca efeitos benéficos ao ambiente e à sociedade
	Negativo	Cria efeitos prejudiciais ao ambiente e à sociedade
Duração	Permanente	Durante toda a vida útil do empreendimento
	Temporário	Cessa após um determinado tempo
Reversibilidade	Reversível	Após terminada a ação, o meio retorna ao estado original
	Irreversível	Após terminada a ação, o meio não retorna ao estado original, pelo menos em um espaço de tempo aceitável pelo homem
Abrangência	Local	Ocorre na área diretamente afetada
	Regional	O efeito se propaga pelas imediações da área afetada
	Estratégico/Global	Atinge áreas de importância coletiva, nacional ou internacional

Fonte: Adaptado de [52]

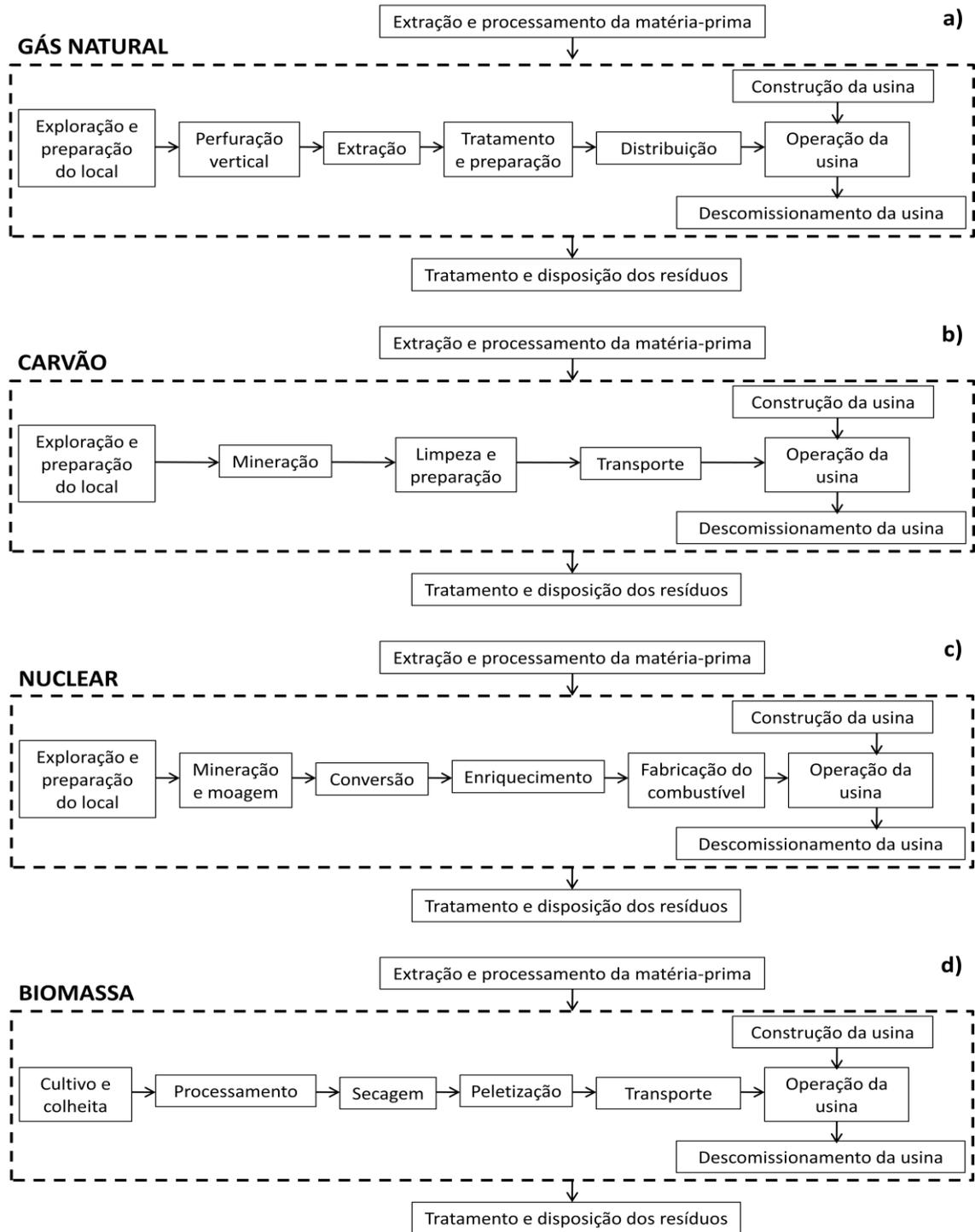
3.1.1. Análise do Ciclo de Vida

Os impactos socioambientais da geração de energia elétrica podem ocorrer ao longo de diversas etapas do ciclo de vida das fontes de geração de energia elétrica. Algumas fontes têm impactos mais relevantes na etapa de implantação, como é o caso de usinas hidrelétricas, e outras na etapa de operação, como é o caso das térmicas. Para comparar essas tecnologias é imprescindível realizar a análise do ciclo de vida (ACV).

A ACV é um instrumento de gestão ambiental que tem como objetivo identificar os impactos ambientais e os fluxos de matéria e energia, quantificando-os em todas as etapas do processo produtivo de um determinado produto, desde a produção e obtenção de cada matéria-prima e insumo até o consumo e a disposição final do produto no ambiente [22]. De acordo com Manzinni [53], considerar o ciclo de vida quer dizer adotar uma visão sistêmica de produto de forma a analisar o conjunto dos inputs e dos outputs de todas as suas etapas produtivas, com a finalidade de avaliar as consequências ambientais, econômicas e sociais. A ACV pode ser utilizada para comparar dois produtos ou processos ou para identificar qual fase do ciclo de vida pode ter alguma melhoria em termos econômicos, sociais ou ambientais.

A ACV deve ser considerada em processos de tomada de decisão que considerem critérios socioambientais, uma vez que todas as etapas do processo produtivo impactam o meio ambiente e sociedade de alguma forma e são importantes para que a atividade se desenvolva com êxito. Dessa forma, a análise dos impactos de uma usina térmica, por exemplo, deve ir além daqueles ocorridos durante sua operação, é necessário quantificar também os impactos associados ao combustível utilizado, o seu processo de extração, tratamento e transporte. Por exemplo, para o caso das térmicas movidas a carvão é imprescindível quantificar os enormes impactos da mineração, fase que antecede a geração de energia elétrica. No caso de usinas renováveis a etapa de combustível não é relevante e, portanto torna-se importante considerar fatores como o balanço de energia e materiais utilizados para a produção dos equipamentos e outros impactos que podem ocorrer nas etapas da cadeia produtiva que antecedem a geração de energia elétrica propriamente dita. Os impactos devem ser mapeados “do berço ao túmulo” [6]. A ACV é essencial para garantir que os impactos não sejam subdimensionados [54].

Com relação ao ciclo de vida, as fontes não renováveis costumam ter mais etapas que as renováveis devido à existência de combustível. O esquema de Stamford [55] representado na Figura 5 mostra as etapas do ciclo de vida da geração de energia elétrica para diversas fontes.



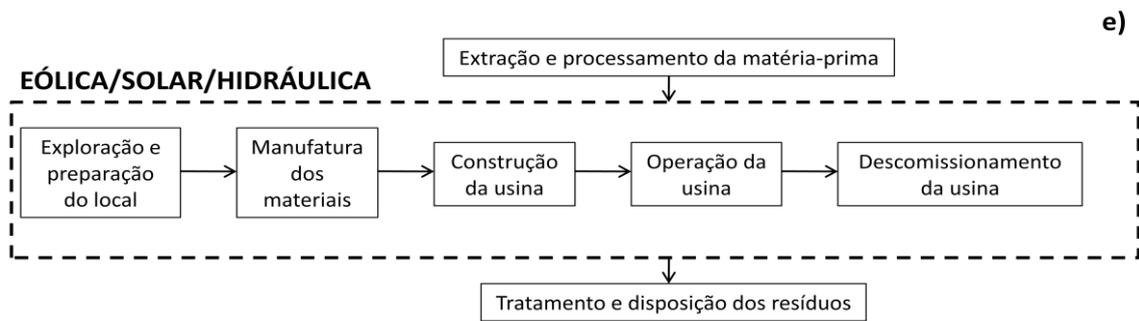


Figura 5. O ciclo de vida da fonte: a) gás natural; b) carvão; c) nuclear; d) biomassa e e) eólica/solar/hidráulica. Fonte: Adaptado de [55]

A comparação entre estudos que aplicam a ACV pode ser complicada, uma vez que não há uma metodologia padrão para que a mesma seja feita, podendo haver diferenças no escopo de impactos analisados e também incertezas no cálculo dos mesmos. Outra dificuldade decorre do local onde o estudo foi realizado, devido às características específicas de cada região. Por exemplo, a ACV de uma usina fotovoltaica no quesito emissão de GEE pode ser bem distinta em dois estudos. Isso ocorre, pois a maior parte das emissões está associada à energia utilizada para produção das peças e, dessa forma, dependendo da matriz elétrica da região, esse valor da emissão pode ser maior, no caso de uma matriz elétrica baseada em combustíveis fósseis, ou menor, no caso de uma matriz baseada em fontes não fósseis.

Um estudo realizado por Miranda [56] representou qualitativamente o impacto das fontes de geração de energia elétrica conforme a Tabela 3. Se o estudo fosse realizado por outra pessoa/grupo de pessoas, essa mesma tabela poderia ter outra configuração, pois depende de quais critérios foram considerados para avaliação dos impactos socioambientais em cada etapa do ciclo de vida. Mas de uma maneira geral, a Tabela 3 é uma boa representação dos impactos socioambientais das fontes de geração de energia elétrica e confirma que todas as etapas do ciclo de vida devem ser consideradas na análise. Para a representação do autor é possível verificar que se apenas a etapa de geração de energia elétrica (transformação) fosse considerada, a fonte térmica a carvão seria a pior opção. Quando todo o ciclo de vida é considerado a fonte termonuclear também apresenta impactos significativos. É necessário, portanto avaliar quais etapas/impactos são mais relevantes para auxiliar a tomada de decisão.

Tabela 3. Intensidade dos impactos ambientais da geração de energia elétrica na ACV.

Fonte	Etapas do Ciclo de Vida									
	Construção das Instalações			Matéria Prima		Geração de Energia	Distrib.	Risco	Resíduo	Descarte
	Material	Transp.	Área	Obtenção	Transp.					
PCH										
UHE										
Solar										
Eólica										
UTE Carvão Mineral										
UTE Biomassa										
UTE Gás Natural										
UTE Nuclear										

Escala de Impacto Ambiental	Muito Alto	Alto	Médio	Baixo	Muito Baixo
-----------------------------	------------	------	-------	-------	-------------

Fonte: [56]

3.1.2. Impactos Socioambientais das Fontes de Geração de Energia Elétrica

Os impactos socioambientais das usinas de geração de energia elétrica variam conforme a fonte, o combustível e a tecnologia empregada [22]. Para a utilização de combustíveis fósseis, os impactos mais significativos têm origem na operação da planta. No caso das renováveis não existem praticamente emissões de gases efeito estufa durante a operação, sendo mais significativas na fabricação dos equipamentos e na construção da planta, como: a ocupação de áreas, represamento de corpos d'água e deslocamento de população [57]. A Tabela 4 extraída do estudo de Cesaretti [48] apresenta os principais impactos socioambientais das principais fontes de geração de energia elétrica. Nos itens seguintes será feita a descrição mais detalhada dos impactos das fontes de geração de energia elétrica.

Tabela 4. Impactos socioambientais das principais fontes de geração de eletricidade

Fonte de Geração de Energia Elétrica	Impactos
<p>Petróleo Carvão Gás Natural</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Poluição do ar - Emissão de monóxido de carbono (CO) - Emissão de matéria particulada suspensa (metais pesados) - Destruição da camada de ozônio - Aquecimento Global via efeito estufa - Emissão de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) - Chuva ácida - Emissão de SO₂ formando ácido sulfúrico na atmosfera - Emissão de No_x formando ácido nítrico na atmosfera - Perturbação acústica na fauna (marinha ou terrestre) pela exploração sísmica - Alteração da qualidade do solo e da água - Modificação dos padrões de uso e ocupação do solo - Remanejamento involuntário de comunidades locais para construção de dutos - Geração de apreensão na população local pela possibilidade de acidentes
<p>Hidrelétrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Formação de grandes represas - Realocação das populações - Aquecimento Global via efeito estufa - Emissão de gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) - Modificação dos padrões de uso e ocupação do solo
<p>Nuclear</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Resíduos de nível baixo e médio de radioatividade - Resíduos de nível alto de radioatividade que requerem disposição por 10.000 anos - Desativação das instalações nucleares após término da vida útil
<p>Biomassa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Poluição do ar - Emissão de monóxido de carbono (CO) - Emissão de dióxido de carbono (CO₂) - Emissão de matéria particulada suspensa - Uso intensivo de solo e água - Diminuição da biodiversidade
<p>Eólica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ruído causado pelos aerogeradores - Colisão de pássaros - Impacto visual - Certa limitação do uso do espaço ocupado

Fonte: [48]

Os impactos listados por Cesaretti [48] são genéricos, pois cada fonte pode ser empregada utilizando uma tecnologia diferente, mas é uma boa base de dados para orientar vários estudos. No entanto, para certos estudos individualizados o levantamento de impactos específicos é imprescindível, como para o caso de

Estudos de Avaliação de Impacto Ambiental. Para essa situação, existe uma variedade de fatores que são importantes na avaliação dos impactos associados à geração elétrica. Dependendo da especificação destes obtêm-se impactos distintos para uma mesma fonte. Assim, para avaliação dos efeitos de um determinado projeto de geração, deve-se considerar e definir de forma clara [58]:

- a localização e capacidade da planta de geração;
- a localização das atividades de suporte;
- as tecnologias utilizadas;
- o tipo de combustível utilizado; e
- a fonte e composição do combustível utilizado.

3.1.2.1. Fontes Térmicas não renováveis

Os impactos mais significativos da geração térmica são causados durante a fase de operação e são consequências das emissões atmosféricas, dos efluentes líquidos, sólidos (significativo somente nas usinas que utilizam carvão) e do consumo de água [59]. Além disso, o combustível utilizado pelas térmicas não renováveis é finito, e, portanto a exploração desordenada pode levar ao fim dessas reservas e inviabilizar a mesma para gerações futuras. A Figura 6 mostra um esquema simplificado das principais ações impactantes das usinas termelétricas.

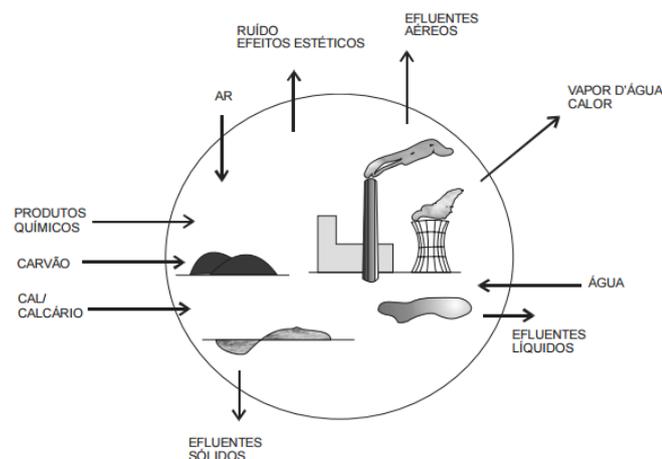


Figura 6. Ações impactantes de Usinas Termelétricas a Carvão. Fonte: [30]

A composição dos efluentes aéreos varia em relação ao combustível utilizado, mas em geral apresentam: GEE, NO_x, SO_x e material particulado. A emissão de GEE contribui para o aquecimento global enquanto as demais emissões estão associadas à saúde humana, mais especificamente ao agravamento de doenças respiratórias. Além de prejudiciais à saúde humana, esses gases são o principal responsável pela formação da chamada chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodiversidade, entre outros impactos negativos, como a corrosão de estruturas metálicas [60].

O funcionamento das usinas termelétricas utiliza um sistema de resfriamento, cujo fluido refrigerante utilizado costuma ser a água. Embora existam tecnologias de redução da quantidade de água necessária e de mitigação de impactos, o volume de água captada, as perdas por evaporação e do despejo de efluentes são considerados impactos relevantes, pois comprometem o uso múltiplo das águas [30].

Em alguns casos, a água utilizada para o resfriamento da usina é descartada no corpo d'água a uma temperatura de 7° a 10° Celsius superior à que foi captada. Este é o maior potencial de emissão térmica pela usina, já que este aumento de temperatura pode trazer danos ao ecossistema aquático local [59].

a) Fonte Térmica a Carvão Mineral

O carvão é uma das formas de produção de energia elétrica/térmica mais agressivas ao meio ambiente [60]. Dentre as etapas do ciclo de vida desse processo, a geração de energia elétrica/térmica por meio da combustão do carvão é a que apresenta os impactos mais severos: emissão de grandes volumes de gases como dióxido de carbono (CO₂), NO_x, SO₂, CO e emissão de material particulado. Estimativas apontam que o uso do carvão para geração de energia elétrica é o maior contribuinte para emissão global de CO₂ [7].

A atividade de mineração do carvão, anterior à produção de energia elétrica, também contribui com grande parte dos impactos socioambientais, pois a ocupação do solo provoca impactos na população, nos recursos hídricos, na flora, na fauna e morfologia do solo [48,61]. A drenagem da mina pode provocar impacto nos corpos hídricos naturais se não houver direcionamento e tratamento adequado das águas sulfurosas efluentes [29]. O beneficiamento do carvão gera rejeitos sólidos, que

também são depositados no local das atividades, criando extensas áreas cobertas de material líquido, as quais são lançadas em barragens de rejeito ou diretamente em cursos de água, que pode levar a contaminação do solo ou lençóis freáticos [60].

b) Fonte Térmica a Gás Natural

O gás natural apresenta duas vantagens ambientais significativas em relação a outros combustíveis fósseis: a primeira em função de um menor impacto na mineração e a segunda em função da menor emissão de gases poluentes que contribuem para o efeito estufa. O volume de CO₂ lançado na atmosfera pode ser entre 40% e 50% inferior aos casos de geração de energia elétrica a partir de combustíveis sólidos, como o carvão [29].

De acordo com CEPEL, [57], os impactos das atividades relacionadas à produção de energia elétrica a partir de gás natural dependem: da composição do combustível a ser queimado, do processo de queima ou remoção pós-combustão e, das condições de dispersão dos poluentes (altura da chaminé, relevo e meteorologia). Os principais poluentes atmosféricos emitidos pelas usinas termelétricas a gás natural são dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOX) e, em menor escala, monóxido de carbono e alguns hidrocarbonetos de baixo peso molecular, inclusive metano [61].

c) Fonte Térmica Nuclear

Assim como as fontes renováveis, a fonte térmica nuclear emite baixas quantidades de emissões durante a operação da usina. No entanto, quando outras etapas do ciclo de vida são levadas em consideração, a mineração e o refino do urânio podem apontar emissões de GEE relevantes. Quanto aos demais danos que essa tecnologia pode causar ainda não se tem um conhecimento profundo sobre todas as perspectivas [62]. Alguns estudos apontam que há um maior índice de crianças com leucemia em cidades próximas as usinas nucleares.

Dentre os impactos analisados na literatura, a questão sobre os resíduos radiativos que essa fonte produz é o mais significativo. Em condições normais, esses resíduos são estocados adequadamente, no próprio local da planta ou em

instalações especiais, pois ainda não há uma solução concreta de como tratar esse resíduo. A preocupação socioambiental, portanto é de que esses resíduos sejam de fato acondicionados adequadamente por longos períodos, de forma que não ocorra a contaminação do solo, do ar e da água por radionuclídeos. Além disso, devido ao sistema de resfriamento, há uma poluição térmica local, devido a descarga de efluentes em temperaturas maiores do que o corpo hídrico receptor.

A fase de mineração produz dois tipos de efluentes líquidos, os resultantes do local da mineração, cujos limites de radioatividade estão abaixo da concentração máxima permitida; e os da usina de tratamento, cuja alta concentração de radioatividade é tratada antes de ser lançada no meio ambiente, contendo, portanto, baixas concentrações de rádio e urânio [57].

No caso das usinas nucleares, a análise de risco é mais extrema do que aquelas relacionadas com o aquecimento global. Embora a probabilidade de eventos seja menor, a consequência de um único evento é catastrófica [62]. Os acidentes como o da Central Nuclear de Fukushima, no Japão, em 2011; da radiação do Césio-137, na cidade de Goiânia, em 1987; e de Chernobyl, na Ucrânia, em 1986, mostraram a fragilidade do sistema e o efeito devastador que pode ocorrerão se optar por essa tecnologia. Devido a uma grande preocupação da população da re-ocorrência de acidentes nucleares históricos, a aceitabilidade dessa tecnologia é pequena, pois o risco é muito maior do que os benefícios de gerar energia elétrica por esta fonte. Caso fosse possível garantir um manejo seguro dessa tecnologia esta seria a fonte de geração de energia elétrica mais sustentável.

3.1.2.2. Fontes Renováveis

Na maior parte dos estudos científicos realizados e também na mídia, o foco da sustentabilidade do setor de energia elétrica se concentra exaltar os impactos negativos das fontes convencionais, classificando as fontes renováveis como sustentáveis [42,63]. Dessa forma, tecnologias sustentáveis estão se tornando cada vez mais importantes para tomadores de decisão.

Esse fato pode ser explicado devido a grande ênfase mundial com o aquecimento global, fenômeno intensificado em função da emissão de GEE, com grande ocorrência na geração de energia elétrica por fontes convencionais. O

estudo de Abbasi [63] avalia os impactos referentes às fontes renováveis e levanta a questão de que impactos de algumas fontes renováveis podem ser desastrosos e tão potencialmente negativos quando os impactos das fontes convencionais de geração de energia elétrica. Algumas hidrelétricas podem ser consideradas geradoras de grandes impactos socioambientais negativos devido aos impactos associados ao alagamento de grandes áreas, perda de biodiversidade e remanejamento de população local.

a) Fonte Hidráulica

A priorização da implantação de usinas hidrelétricas no Brasil deve-se, primordialmente, ao vasto potencial hidrelétrico existente no país e à competitividade econômica que essa fonte apresenta [64]. No entanto a maior parte desse potencial, cerca de 60%, encontra-se localizado na região amazônica, em grande parte ocupada por reservas florestais, parques nacionais e terras indígenas, distante dos principais centros consumidores como Sudeste e Sul [29]. As consequências sociais e ambientais da possibilidade de implantação dos empreendimentos hidrelétricos previstos na Amazônia, envolvendo questões como as relacionadas com reservatórios em terras indígenas ou a manutenção da biodiversidade, exigem atenção e cuidados [65].

As hidrelétricas são geralmente consideradas fontes limpas, pois não emitem grande quantidade de gases ou resíduos poluidores durante sua operação. Os GEE emitidos por essa tecnologia durante a operação são provenientes do decaimento do material orgânico inundado, liberando gás metano. A quantidade de GEE emitido varia em função de características locais como: temperatura, índice pluviométrico, formato da área inundada, e etc [7].

Essa tecnologia demanda uma grande quantidade de água para manter o nível dos reservatórios. No entanto, o consumo de água por essa tecnologia é bem baixo, pois a maior parte retorna com corpo hídrico. O consumo de água está relacionado a evaporação, que pode ser influenciada por diversos fatores: área da superfície do reservatório, volume de água, temperatura e geografia local [7].

O grande impacto associado a essa fonte de geração de energia elétrica está relacionado à frequente necessidade de inundar grandes áreas para formação

reservatórios. As áreas inundadas por vezes produzem impactos na fauna, flora, no clima local e no clima regional [48]. Dependendo do uso e ocupação dessa área, os danos podem ser bastante significativos e irreversíveis, pois podem ser áreas produtivas, de grande diversidade biológica ou até de grande herança cultural.

A formação de reservatórios de acumulação de água e regularização de vazões, por sua vez, provoca alterações no regime das águas e a formação de microclimas, favorecendo certas espécies e prejudicando ou até mesmo extinguindo outras. Entre as espécies nocivas à saúde humana, destacam-se parasitas e transmissores de doenças endêmicas, como a malária e a esquistossomose [56]. Os reservatórios também emitem gás metano, que possui um potencial de aquecimento global 23 vezes maior que o carbono [49].

No que se refere aos aspectos sociais, destaca-se o impacto nas populações ribeirinhas. Estas têm seus terrenos desapropriados (e muitas vezes sem a compensação adequada) para que o terreno seja alagado ou sofrem com perda irreversível das suas condições de vida. Além de todos os impactos já citados, a existência de tal barragem pode ser um fator de risco para as populações locais, uma vez que pode ocorrer o rompimento de barragens e outros acidentes correlatos. A Tabela 5, extraída de um relatório da EPE [66] sobre a bacia hidrográfica do rio Teles Pires, mostra um resumo dos impactos mais significativos dessa fonte.

Tabela 5. Impactos negativos da fonte hidráulica

Componente-síntese	Impactos
Recursos hídricos e ecossistemas aquáticos	Alteração do regime fluvial
	Potencial de eutrofização dos reservatórios
	Perda de habitats específicos da ictiofauna
	Contaminação por mercúrio
Meio físico e ecossistemas terrestres	Perda de áreas com potencial mineral
	Redução de cobertura vegetal e fragmentação de ambientes
	Interferência de perda de vegetação para a fauna silvestre associada
Socioeconomia	Perda de áreas produtivas
	Alteração da estrutura fundiária
	Pressão sobre a atenção a saúde
	Criação de postos de trabalho
	Crescimento de arrecadação municipal

Fonte: [66]

b) Fonte Solar

Assim como todas as fontes renováveis, a geração de energia elétrica pela fonte solar tem grandes vantagens contra as fontes convencionais devido a uma baixa emissão GEE e uma pequena demanda de recursos naturais não renováveis. Além disso, durante a geração de energia elétrica esta fonte conta com baixa emissão de poluentes atmosféricos e inexpressiva geração de resíduos.

No entanto, é importante ressaltar que a emissão de GEE para esta fonte está relacionada à fabricação das células fotovoltaicas: produção do alumínio e aço (para os suportes e as molduras) e redução da sílica [67] e, portanto, a emissão de GEE será dependente da característica da matriz elétrica em que essa fabricação é realizada. Por esse motivo, a redução de emissão de GEE para essa fonte consiste em produzir as células solares em países com mix de geração de energia elétrica renovável.

Devido à baixa eficiência da tecnologia solar, uma grande área é necessária para captação de energia em quantidade suficiente para viabilidade do empreendimento. Essas áreas devem ser cuidadosamente selecionadas para minimizar alguns impactos como: competição com outras atividades (agricultura), erosão e compactação do solo, desvio de ventos, redução da taxa de evaporação, alteração nos fluxos de água subterrânea e superficial [63].

Em relação a impactos sociais, a fonte solar pode comprometer a saúde daqueles que trabalham na produção das células solares uma vez que estas requerem o manuseio de algumas substâncias químicas classificadas como tóxicas, inflamáveis e explosivas [7]. Além desse risco na fase de pré-produção, a geração de energia elétrica também requer o manuseio de alguns componentes outros tóxicos como anticongelantes, anticorrosivos e metais pesados que são prejudiciais a saúde humana e ao meio ambiente [63].

c) Fonte Eólica

Essa fonte tem sido considerada uma fonte renovável limpa, principalmente quando se coloca em análise a emissão de GEE, impacto ambiental mais relevante na atualidade. No entanto, assim como qualquer atividade antrópica alguns impactos

locais podem ser observados. Os principais impactos para essa fonte são tipicamente: poluição sonora, visual, uso da terra e a ocorrência de colisão de aves com os aerogeradores.

Durante a operação de um parque eólico a poluição sonora pode ter duas origens: o fluxo de ar sobre as pás da turbina e o funcionamento das caixas de engrenagens. O ruído aerodinâmico é influenciado diretamente pela velocidade do vento incidente sobre a turbina eólica [48]. A solução para esse tipo de impacto é a regulamentação adequada para delimitar as áreas para instalação desse tipo de empreendimento e também na limitação do nível de ruído máximo admissível, que acarretaria no desenvolvimento de tecnologias menos impactantes. No caso de parques *offshore* essa poluição sonora deixa de ser relevante.

Segundo alguns estudos [69-71], o impacto visual é apontado como sendo o mais relevante a esse tipo de tecnologia. Em geral, consideram que o grande porte dos equipamentos degenera a beleza natural do local, prejudicando o ambiente. No entanto, é necessário observar que esse impacto pode até ser considerado benéfico em alguns casos, devido à associação da alteração visual a produção de energia elétrica mais limpa e seus benefícios econômicos. Dessa forma, a poluição visual é determinada basicamente pela comunidade localizada mais próxima ao empreendimento.

As turbinas eólicas podem ter um grande impacto sobre as aves devido ao risco de o animal colidir com as mesmas. Para mitigar esse risco, devem-se avaliar as rotas migratórias das aves da região de instalação do parque eólico. O estudo do World Energy Council [72] destacou que em parques eólicos modernos e bem projetados a morte das aves é cada vez mais rara.

A instalação dos parques eólicos requer uma extensa área, pois para que os aerogeradores possam funcionar é necessário que cada unidade seja instalada a uma distância mínima de outra unidade devido a existência de uma zona de “sombreamento”, caso elas estejam muito próximas. Em geral, assume-se que há possibilidade de se utilizar a área em torno da turbina para o aproveitamento agrícola ou pecuário, o que reduz o impacto ambiental de área transformada, mas o estudo de Phillips [69] comenta sobre a possibilidade de grande impacto na herança cultural, caso a instalação seja realizada em uma área de grande valor cultural.

Para o caso da fonte eólica, a emissão de GEE está ligada à geração da energia elétrica necessária para produção dos materiais requisitados para a construção do parque eólico. Nesse caso, assume-se que a produção é local, visto que o BNDES exige 70% de nacionalização para liberação de investimentos e, portanto com baixa emissão de GEE devido à grande participação da fonte hidráulica no mix de geração de energia elétrica brasileira.

d) Fonte Térmica a Biomassa

Os impactos dessa fonte são considerados inferiores quando comparado à queima de combustíveis fósseis, pois utiliza um combustível renovável. Apesar de gerar GEE, a contribuição deste gás no caso da biomassa plantada é considerada nula ou muito pequena, pois há um balanço de massa do ciclo do carbono, em que as plantas capturam o CO₂ durante o seu crescimento e desenvolvimento [29].

Os maiores problemas para esse tipo de tecnologia estão associados à obtenção do combustível. Dessa forma caso a biomassa for produzida de forma sustentável, os impactos são minimizados. Por outro lado, a utilização de grandes áreas pode ser um conflito com o uso destas para outras atividades agrícolas importantes como a produção de alimento [29]. Além disso, o grande uso de terras pode fragmentar habitat e assim prejudicar certas espécies e contribuir para uma redução na biodiversidade.

Alguns autores consideram que as térmicas a biomassa tem um viés insustentável, pois apresentam um grande consumo de energia quando se considera todo o ciclo de vida desta tecnologia, principalmente cultivo e conversão da biomassa [42]. Além disso, também podem ter um alto consumo de água, uma vez que as plantações devem ser irrigadas.

Apesar de essa tecnologia representar um número alto de empregos gerados, em geral três vezes mais do que o carvão [63], um número alto de acidentes de trabalho e doenças são observados em comparação com a mesma tecnologia [7].

3.1.2.3. Transmissão de Energia Elétrica

Em função da predominância da hidroeletricidade na matriz elétrica nacional o abastecimento de energia elétrica é altamente dependente do regime de chuvas, que pode apresentar grandes variações sazonais, além de um significativo componente de imprevisibilidade. Como as usinas hidrelétricas estão distribuídas em bacias hidrográficas geograficamente distantes entre si e, portanto, sujeitas a diferentes regimes pluviométricos, as linhas de transmissão exercem a importante função de interligar o parque gerador [73]. Em geral a necessidade maior está relacionada com as hidrelétricas, mas a utilização é necessária para todo centro de geração distante do centro consumidor.

As linhas de transmissão se estendem por grandes extensões de terra causando diversos impactos ambientais no meio físico. A exposição do solo durante a fase de instalação gera alterações do escoamento superficial das águas, que podem provocar o surgimento de processos erosivos e assoreamento dos recursos hídricos [74]. Além disso, a remoção da vegetação para instalação da linha de transmissão gera fragmentação do habitat, sendo prejudicial a vida da fauna e flora. Esses impactos no meio físico ainda podem ser intensificados caso o traçado compreenda Áreas de Preservação Permanente (APPs), Unidades de Conservação, rios, ecossistemas urbanos, atividades agropecuárias, locais de importância histórica ou paisagística e em áreas indígenas.

Em relação aos impactos sociais, a população localizada no entorno pode ter suas terras desapropriadas ou a restrição do uso da faixa de servidão para realização de atividades agropecuárias, que resulta em perda de valor da propriedade [75]. Além disso, a presença dos campos elétricos pode induzir alterações nocivas em organismos vivos muito expostos aos seus efeitos. Preece et al. [76] retrata o persistente debate na comunidade científica acerca da possível natureza causal da associação entre a exposição aos campos eletromagnéticos de baixa frequência, como aquela observada nas proximidades de linhas de transmissão elétrica, e o desenvolvimento de tumores malignos, sobretudo leucemia e tumor de cérebro.

O efeito corona⁴, além de causar problemas de recepção em aparelhos de rádio e televisão, também gera um ruído audível que provoca sensação de insegurança e distúrbio para a população rural ou urbana próxima às subestações [74].

A Tabela 6 de Miranda [56] apresenta um resumo dos impactos mais importantes reportados na literatura, relacionando-os com as ações referentes a cada fase do ciclo de vida de uma linha de transmissão de energia elétrica.

Tabela 6. Impactos ambientais da transmissão de energia elétrica

Principais Ações	Principais Aspectos e Impactos Negativos
Serviços topográficos	Aumento da Erosão
Abertura de estradas de acesso e serviço	Modificações do escoamento superficial da água em áreas de estradas e torres
Investigação geológico-geotécnicas dos locais de construção das torres	Perda e modificação de habitats da vida selvagem
Contratação de serviços e mão de obra para construção	Interferência com a produção agropecuária
Remoção de vegetação	Perda da biodiversidade
Transporte das torres, cabos e demais componentes	Emissão de gases e material particulado
Execução das fundações e obras de estabilização de taludes e drenagem	Degradação de áreas, processos erosivos
Montagem de estruturas metálicas	Geração de resíduos sólidos (embalagem, bobinas, latas e restos de tintas e solventes)
Lançamento dos cabos e instalações dos componentes	Risco de acidentes no lançamento de cabo, risco de eletrodução
Inspeção	Riscos à segurança das pessoas e dos bens econômicos
Manutenção da faixa desmatada	Desvalorização de imóveis
Manutenção da estrada de serviço	Impacto Visual

Fonte: [56]

⁴ O Efeito de Corona é um mecanismo de descargas formadas ao redor da superfície do condutor, quando a intensidade do campo elétrico na superfície do mesmo excede o valor de ruptura do ar, gerando luz, ruído audível, ruído de rádio, vibração do condutor, ozônio e outros produtos, causando perda de energia.

3.2. Indicadores de sustentabilidade para o setor elétrico

O termo indicador possui diversos conceitos. A palavra "indicador" é originária do latim *indicare*, que significa divulgar, apontar, anunciar, estimar ou precificar. Os indicadores são, por assim dizer, considerados medidas da condição, processos, reação ou comportamento, fornecendo um resumo de vários parâmetros de um sistema complexo [77]. Em termos gerais, um indicador representa uma simplificação de uma abundância de informações. O índice, por sua vez, constitui-se a partir da agregação de indicadores em único fator, com o objetivo de simplificar e auxiliar a tomada de decisão. Essa simplificação pode, por outro lado, tornar as nuances e complexidades invisíveis [56]. Essa relação dos indicadores com as informações pode ser observada na Figura 7.



Figura 7. Pirâmide de Informações. Fonte: [78]

Os indicadores são excelentes ferramentas para o apoio a tomada de decisão. Eles permitem sintetizar informações qualitativas ou quantitativas sobre uma realidade complexa e variável em unidades apropriadas de forma a facilitar o entendimento por parte do tomador de decisão. Além disso, são capazes de fornecer um alerta, contribuindo para evitar danos econômicos, sociais e ambientais. Por fim, os indicadores comunicam informações sobre o progresso em direção a metas sociais, como o desenvolvimento sustentável [78].

Um bom indicador, segundo Mueller *et al. apud* [79] deve conter os seguintes atributos:

- **Simplificação:** um indicador deve descrever de forma sucinta o estado do fenômeno estudado. Mesmo com causas complexas, deve ter a capacidade de sintetizar e refletir da forma mais próxima possível à realidade;
- **Quantificação:** enquanto número, a natureza representativa do indicador deve permitir coerência estatística e lógica com as hipóteses levantadas na sua consecução;
- **Comunicação:** o indicador deve comunicar eficientemente o estado do fenômeno observado. Um bom indicador, via de regra, simplifica para tornar quantificável aspectos do fenômeno, de forma a permitir a comunicação;
- **Validade:** um indicador deve ser produzido em tempo oportuno, pois é um importante elemento no processo decisório dos setores público e privado;
- **Pertinência:** o indicador deve atender às necessidades dos seus usuários. Deve transmitir informações de forma fácil com base científica e método adequados.

Para a abordagem da questão socioambiental no planejamento de longo prazo do setor elétrico é de extrema importância buscar compreender os impactos que as diversas fontes de geração de energia elétrica causam, e mais do que isso, conseguir quantificá-los. Para isso é comum optar pela utilização de indicadores, principalmente quando os impactos socioambientais são avaliados sob uma perspectiva de ACV, visto que a determinação de custos das externalidades de diversos impactos ainda é difícil de quantificar. Nesse contexto, os indicadores contribuem para transformar os impactos em informações tangíveis e mensuráveis [80], desempenhando um papel fundamental como instrumentos de gestão.

O impacto ambiental mais expressivo no setor elétrico é o de emissão de GEE. Por esse motivo e pelo fato deste impacto ser mais facilmente mensurado, grande parte dos estudos utiliza a emissão de gases de efeito estufa como indicador ambiental. Em muitos casos esse é o único a ser considerado. Essa escolha simplificada implicará em recorrer às fontes não fósseis para expansão dos sistemas elétricos, conforme resultado na maior parte dos estudos avaliados nessa tese. Por outro lado, isso pode direcionar a classificação de quais tecnologias não fósseis são mais promissoras na expansão do sistema elétrico, necessitando de mais indicadores para a classificação. Na tese de Vila, [20], por exemplo, a falta de outros indicadores ambientais coloca a fonte nuclear a frente das tecnologias renováveis,

pois apesar de baixa emissão de GEE, as tecnologias eólica e solar possuem um custo de implantação elevado quando comparado a nuclear. Por outro lado, se o critério rejeitos nucleares e aceitação da população fosse considerado na decisão, a fonte nuclear poderia ser uma escolha menos sustentável, pois os rejeitos são perigosos e também em função de acidentes como Chernobyl, a aceitação dessa tecnologia pode ser baixa. Brown [42] discute que embora monitorar as emissões dos GEE tem grande utilidade para resolver as preocupações com aquecimento global, outros impactos podem ser mais destrutivos e representar uma maior ameaça para o bem estar humano do que toneladas de emissão de CO₂. Dessa forma, é necessário que critérios relevantes sejam selecionados para cada tipo de fonte, pois os impactos mais relevantes em cada fonte não é o mesmo, de forma a não penalizar de forma errônea as mesmas. No entanto, um grande obstáculo em incorporar um grande número de critérios relevantes ocorre devido à limitação de dados disponíveis [49,81].

Os critérios sociais têm uma pequena representatividade nos estudos que avaliam a sustentabilidade do setor elétrico. Em geral essa dimensão é mais difícil de mensurar e predominam os indicadores qualitativos, que ainda são pouco explorados [81,82]. Um estudo realizado por Ferreira, [83] destaca a importância da dimensão social e que estudos recentes estão, cada vez mais, integrando a questão social no planejamento do setor elétrico.

No caso do Brasil, por sua matriz elétrica predominantemente hidráulica, uma das questões mais alarmantes em relação à dimensão social é a desapropriação de terras e o desalojamento de comunidades, em função do alagamento de áreas para a formação do reservatório. Além disso, também é importante considerar o impacto na população que não é removida, como a suscetibilidade a inundações e o comprometimento de suas atividades tradicionais, seja a montante ou a jusante do empreendimento.

Não há na literatura mundial um consenso em quais indicadores devem ser utilizados para avaliar a sustentabilidade das fontes de geração de energia elétrica [81]. Essa ausência de metodologia padrão acarreta em grandes divergências nos resultados de estudos que avaliam a sustentabilidade da expansão dos sistemas elétricos, tornando-os incomparáveis. A Tabela 7 lista os critérios mais utilizados na avaliação da sustentabilidade em sistemas elétricos. O estudo de Evans, [7] fez uma

revisão da literatura sobre os valores encontrados para diversos critérios avaliados em análise multicritério para o setor elétrico que será detalhado nos itens seguintes.

Tabela 7. Lista de critérios de avaliação utilizados em estudos de multicritério para o setor de energia.

Dimensão	Critério
Técnica	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiência - Exergy (racional) eficiência - Relação de energia utilizada - Segurança - Confiabilidade - Maturidade - Outros
Econômica	<ul style="list-style-type: none"> - Custo de investimento - Custo de operação e manutenção - Custo do combustível - Custo da eletricidade gerada - Tempo de payback - Vida útil - Custo anual equivalente
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão NO_x - Emissão CO₂ - Emissão CO - Emissão SO₂ - Emissão de particulado - Componentes voláteis (sem metano) - Uso da terra - Ruído - Outros
Social	<ul style="list-style-type: none"> - Aceitação pela população - Empregos - Benefícios sociais

Fonte: [84]

3.2.1. Econômico

O indicador de custo é o mais utilizado na literatura como auxílio a tomada de decisão. Muitas vezes era utilizado como critério único para a tomada de decisão. Apesar da crescente preocupação com o meio ambiente, esse critério ainda tem grande importância, devido ao mundo capitalista em que o Brasil está inserido, mas

este critério deve ser avaliado com outras questões, principalmente quando os projetos avaliados englobam uma série de impactos socioambientais, como é o caso do setor elétrico. Em linhas gerais o custo de um empreendimento se divide em: custos de investimento e custos de operação e manutenção, estes últimos podem ser fixos ou variáveis.

O estudo de Evans, [7] avaliou mais de 50 estudos para verificar o preço médio da energia elétrica gerada por nove tecnologias diferentes: solar fotovoltaica, eólica, hidráulica, geotérmica, biomassa cultivada, biomassa de resíduo, gás, carvão e nuclear. A Figura 8 mostra os resultados desse estudo.

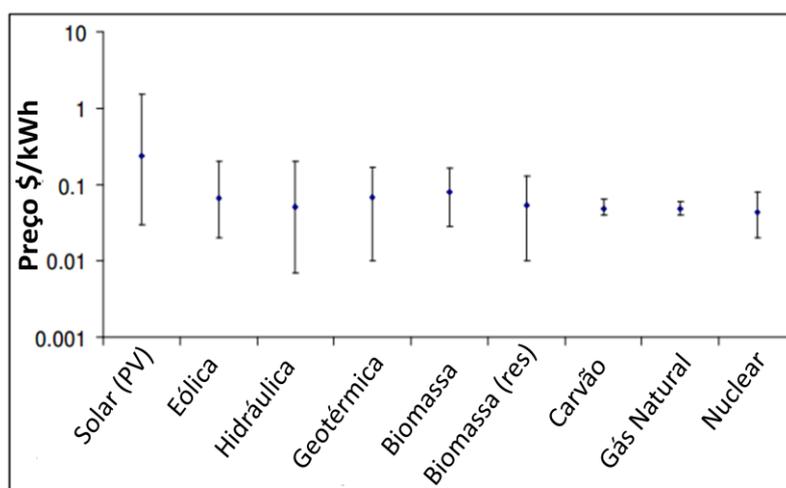


Figura 8. Preço da geração de energia elétrica por fonte. Fonte: [7]

É possível verificar que há uma grande variabilidade nos resultados encontrados, principalmente para as tecnologias renováveis. As fontes de geração de energia elétrica a carvão e a gás apresentam pequena variação, que pode ser explicada pela maturidade e consistência dessas tecnologias no mundo [7]. Essa variabilidade também está relacionada ao local de implantação da tecnologia, uma vez que os preços variam para cada país, estado e cidade.

As tecnologias que apresentaram a menor média de preço foram carvão e nuclear, enquanto hidráulica e geotérmica apresentaram os menores preços possíveis. A tecnologia fotovoltaica apresentou tanto o maior preço médio quanto o maior preço total; no entanto, o menor preço encontrado para essa tecnologia é menor do que o preço de carvão e gás.

3.2.2. Ambiental

3.2.2.1. Emissões

Devido a grande repercussão do fenômeno de aquecimento global, a emissão dos GEEs, tem sido considerada o principal indicador ambiental para avaliar a sustentabilidade das fontes de geração de energia elétrica. Os efeitos da emissão de GEE são globais, independente de que região é responsável pelo impacto. A emissão de poluentes (SO_2 , NO_x , MP) ainda continua bastante representativa, mas em alguns casos a análise dessas emissões é desconsiderada devido ao fato da existência de políticas locais que regulam o controle dessas emissões na fonte [7]. A quantidade de emissões de uma determinada tecnologia térmica depende de vários fatores como: idade e tipo de usina, tipo de combustível, conteúdo de enxofre, existência de mecanismos de controle de emissões, operação da usina, temperatura de combustão, entre outros [85].

A Figura 9 do estudo de Evans [7] apresenta a emissão de GEE para diferentes tecnologias, realizada em uma análise de mais de 50 estudos.

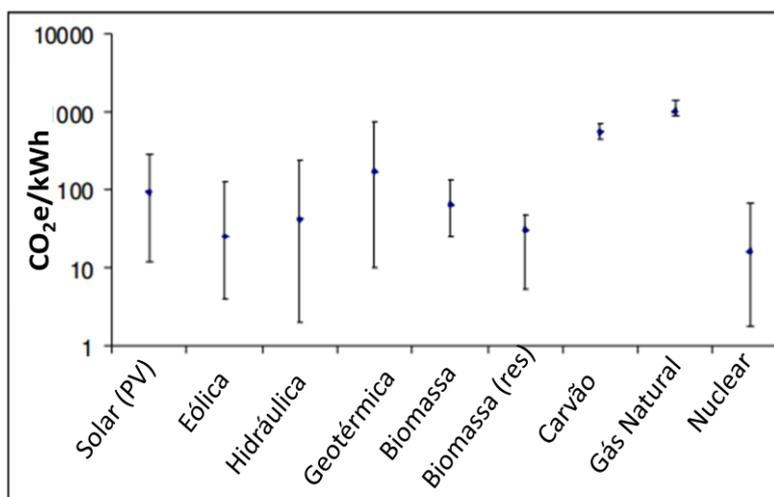


Figura 9. Emissão de GEE estufa por fonte. Fonte: [7]

É possível observar uma grande variação nos valores obtidos para cada fonte. Essas diferenças ocorrem devido a vários fatores: o objetivo para qual o estudo foi realizado, a qualidade do combustível utilizado, tipo de mineração utilizado, consideração de toda a vida útil, consideração das diversas etapas do ciclo de vida e

etc. Mesmo com essa variação, o estudo de Evans [7] confirma a maior contribuição dos GEE para as fontes fósseis. De acordo com a Figura 9, as fontes renováveis e nuclear são consideradas as melhores opções para mitigar o aquecimento global. No entanto essas fontes de geração de energia elétrica não são inteiramente neutras em termos de emissão de GEE. Apesar de não emitirem gases durante a operação da usina, com exceção da usina hidrelétrica devido ao CH₄ nos reservatórios, outras etapas do ciclo de vida contribuem para esse impacto. A emissão de GEE para produção de turbinas e placas solares varia em função da matriz energética do país em que a mesma é produzida, uma matriz predominantemente renovável, por exemplo, gera menos GEE que uma matriz baseada em combustíveis fósseis. Na Austrália esse valor é maior, em função de uma matriz energética baseada no carvão [7]. O estudo de Pacca [86], constatou que a utilização de energia elétrica proveniente de uma placa fotovoltaica para produção de um painel solar reduz em 85% a quantidade de emissão de GEE, caso fossem utilizadas fontes fósseis.

3.2.2.2. Recursos Naturais

A análise do consumo de recursos é um indicador bem importante quando se trata de algum país com alguma limitação em recursos naturais. No caso do consumo de água, por exemplo, pode ser um indicador de grande importância em áreas áridas [7]. Para o consumo de combustível, leva-se em conta a depleção de recursos que não estará disponível para gerações futuras.

Conforme visto anteriormente nessa dissertação, as fontes térmicas consomem grandes quantidades água para o seu sistema de resfriamento. A revisão de literatura por Evans [7] apresenta valores para o consumo e para captação de água de diversas tecnologias (Tabela 8). O consumo considera a água captada que é evaporada ou perdida no sistema que não pode ser devolvida. Por outro lado, a captação de água considera a totalidade da água que é utilizada pela tecnologia.

Tabela 8. Captação e consumo de água durante a geração de energia elétrica.

Fonte	Consumo kg de água/kWh			Captação	
	Larson <i>et al.</i> (<i>apud</i> [7])	Trewin (<i>apud</i> [7])	Younos <i>et al.</i> (<i>apud</i> [7])	Inhaber (<i>apud</i> [7])	
Solar (PV)	irrelevante			0,01	
Eólica				0,001	
Hidráulica	11	3740*	0,26	20	13600
Geotérmica	0,3-1,6		1,7	12-300	
Biomassa (Resíduo)	3,2				
Biomassa	34				
Gás Natural	0,3-0,5	0,6		1,6	78
Carvão	0,3-0,5	1,5	14-28	1,6	78
Nuclear			31-75	1,8	107

* Corresponde à captação. **Fonte: [7]**

Apesar de a tecnologia hidrelétrica apresentar um alto valor de captação de água, devido à manutenção do nível dos reservatórios, a maior parte dessa água retorna para o curso d água. O consumo de água nessa tecnologia consiste na água evaporada nos reservatórios. Por outro lado, a tecnologia de biomassa plantada tem o maior consumo de água, pois além da água necessária para resfriamento do sistema térmico, há uma grande demanda de água devido à irrigação dos cultivos, para o desenvolvimento das plantas. Dentre as térmicas não renováveis, a nuclear tem maior demanda de água para refrigerar o sistema.

Dentre as tecnologias avaliadas, as tecnologias solar e eólica são as que apresentam os menores valores de consumo de água e, portanto mais sustentáveis com relação a esse critério. Essas tecnologias não dependem da extração de um combustível, confirmando ainda mais a sustentabilidade para esse indicador. A parcela de consumo de recursos naturais para essa fonte será relacionada aos recursos necessários para fabricação de peças da usina.

3.2.2.3. Área Transformada

O indicador área transformada também é bem representativo na literatura, pois o uso das áreas destinadas aos empreendimentos de geração de energia elétrica frequentemente competem com outras atividades como: agricultura, residências, locais de grande importância cultural. Esse indicador é geralmente representado

pela medida da área direta e indiretamente utilizada pelas tecnologias para a geração de energia elétrica. Além disso, devido à dificuldade em se definir um indicador para o impacto nos ecossistemas e biodiversidade, a área transformada também se encaixa para representar esse impacto. A pesquisa comparativa realizada em Evans [7] para o uso da terra é representado pela Tabela 9.

Tabela 9. Uso da terra para diferentes fontes de geração de energia elétrica.

Fonte	Uso da Terra (m ² /kWh)	
	Gagnon (apud [7])	Fthenakis (apud [7])
Solar (PV)	0,045	0,0003
Eólica	0,072	0,0015
Hidráulica	0,152	0,004
Geotérmica (Bertani 2005)	0,05	0,05
Biomassa (Resíduo)	0,533	0,0125
Biomassa	0,001	
Gás Natural		0,0003
Carvão	0,004	0,0004
Nuclear	0,0005	0,00005

Fonte: [7]

Conforme mencionado anteriormente, as fontes renováveis e a nuclear são competitivas quando se considera apenas a emissão de gases, pois ambas possuem valores baixos para tal indicador. No entanto, quando a área transformada é avaliada, a fonte nuclear apresenta a menor área dentre todas as tecnologias, enquanto as renováveis demandam grandes áreas. Dessa forma, esse é o ponto mais defendido pelos que acreditam na sustentabilidade da tecnologia nuclear. As tecnologias de gás e carvão também apresentam uma pequena área transformada.

Os números apresentados na Tabela 9 correspondem a usinas fotovoltaicas e toda a área de uma central eólica. No entanto é possível que esses números sejam menores se a tecnologia fotovoltaica for instalada nos telhados e se houver uso compartilhado para o caso das eólicas, pois o espaço ocupado, efetivamente, pelas turbinas é de 1-10% da área mencionada [7]. Em relação às demais renováveis, a hidrelétrica e a biomassa demandam uma utilização maior da terra, com grande destruição de ecossistemas e perda da possibilidade de utilização do solo.

O Estudo do IEA, [51] apresenta qualitativamente o impacto na área transformada para as etapas de geração de energia elétrica separadamente, enaltecendo a importância de se considerar o ciclo de vida das tecnologias. O estudo ainda contempla a área afetada em função de acidentes. A consideração deste quesito mudaria completamente a sustentabilidade da fonte nuclear. A Tabela 10 mostra os resultados do estudo de IEA [51].

Tabela 10. Área ocupada e área afetada para diversas fontes de geração de energia elétrica.

Fonte	Área Ocupada			Área de Impacto Ambiental	
	Geração	Combustível	Material	Acidente	Operação
Hidráulica	M	N	P	P-G	P
Solar	G	N	M	N	P
Eólica	G	N	M	N	P
Biomassa	P	G	P	P-G	M
Combustíveis Fósseis	P	M	P	M-G	Extra G (#)
Nuclear	P	M	P	S-Extra G (*)	P- Extra G (**)

N: Nenhum, P: Pequeno, M: Médio, G: Grande, Extra G: Extra Grande

Considera o impacto causado pela chuva ácida e efeito dos gases estufa

* Assume o acidente da classe de Chernobyl

** Considera difusão de núcleos radioativos por longos períodos.

Fonte: [51]

Uma limitação verificada é de que a utilização desse indicador é geralmente simplificada em analisar a quantidade de área afetada pelo empreendimento, sem levar em consideração de como essa área é utilizada e qual a atual ocupação da mesma. Alguns usos podem ser mais ou menos impactantes, da mesma forma que áreas mais conservadas tendem a ter um impacto maior do que áreas já antropizadas. Outro elemento que não costuma ser levado em consideração é o tempo que a área é utilizada, fato importante visto que as tecnologias tem vida útil distintas.

3.2.3. Social

Os critérios sociais tem pouca representatividade na literatura, pois são os indicadores mais difíceis de mensurar. Vários estudos consideram o impacto positivo da criação de empregos, por ser uma variável fácil de quantificar. Como forma de

introduzir a população na tomada de decisão, a questão da aceitação social é frequentemente considerada um critério fundamental para ser incluído na análise da dimensão social do planejamento do setor elétrico [83].

O estudo de Evans [7], além de avaliar os impactos de cada uma das fontes de geração de energia elétrica, realizou uma pesquisa com 282 respostas a cerca da preferência populacional para a fonte de geração de energia elétrica local (New South Wales) e nacional (Austrália). A Figura 10 mostra os resultados da pesquisa. Os gráficos mostram uma grande preferência pela fonte solar seguida da fonte eólica, tanto em escala local como nacional. A fonte hidráulica não tem tanta expressividade quanto as demais fontes renováveis, devido ao reconhecimento de que a inundação de grandes áreas causa um grande impacto aos ecossistemas [7].

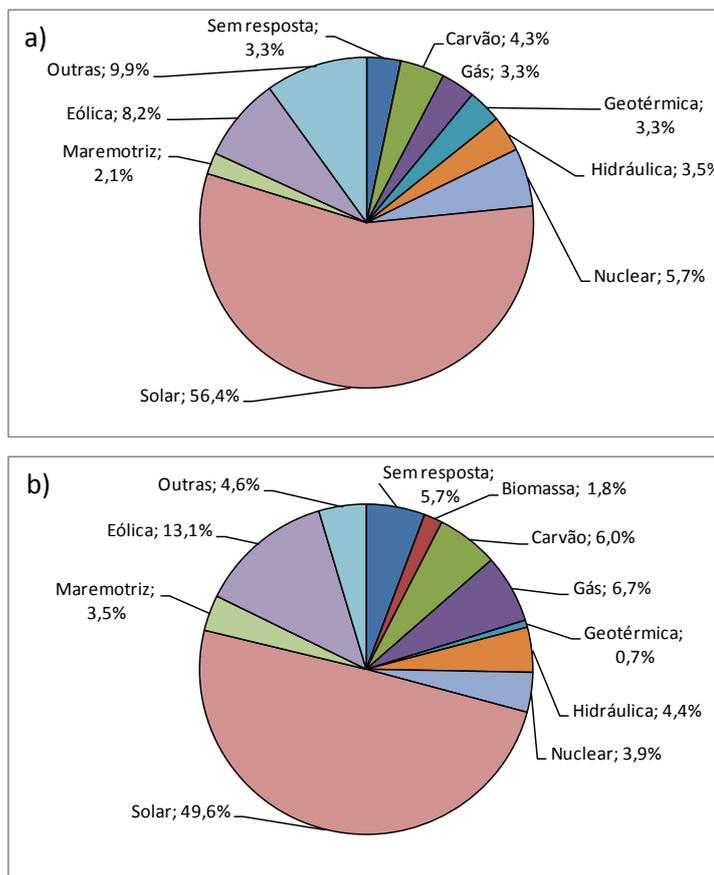


Figura 10. a) fontes preferíveis em nível nacional na Austrália. b) fontes preferíveis em nível local em New South Wales. Fonte: [7]

Na mesma pesquisa, a fonte nuclear foi considerada a fonte menos favorável, com cerca de 75% contra a instalação desse tipo de tecnologia para suprir a

demanda de energia elétrica no país. A Tabela 11 mostra os resultados de aceitabilidade das principais fontes de geração de energia elétrica.

Tabela 11. Posicionamento da população aos diferentes métodos de geração de energia elétrica.

Posicionamento	Fonte					
	Solar	Eólica	Hidráulica	Biomassa	Carvão	Nuclear
A favor	95,70%	91,10%	70,50%	31,20%	30,10%	23,80%
Contra	1,80%	6,40%	27,00%	66,00%	67,40%	74,80%
Sem resposta	2,50%	2,50%	2,50%	2,80%	2,50%	1,40%

Fonte: [7]

Além da aceitação da população, quanto a implantação de tais tecnologias, a saúde pública é um elemento importante a ser avaliado. Em relação às hidrelétricas é importante considerar as possíveis doenças que a implantação desse empreendimento trará para a região, como a malária e a esquistossomose [56]. Para o caso das térmicas, a saúde pública se concentra nas doenças respiratórias intensificadas com a emissão de poluentes aéreos. Para este caso, é necessário avaliar se o impacto já está sendo considerado no quesito emissões para evitar duplicação de dados.

Pode-se ainda considerar os impactos na população em função da ocorrência de acidentes, principalmente para as fontes hidráulica e nuclear. Da mesma forma que a saúde pública, é necessário certificar de que esse impacto só está sendo contabilizado uma única vez.

No Brasil, as externalidades sociais estão diretamente ligadas ao impacto causado em comunidades pela implantação dos projetos de geração de energia elétrica, principalmente usinas hidrelétricas. Dentre estas se destacam a desapropriação de terras e desalojamento de comunidades [87].

3.2.4. Técnicos

Um dos critérios técnicos mais utilizados é a eficiência de conversão do combustível ou outras formas de energia (fontes renováveis), em eletricidade. Esse indicador corresponde a razão entre a energia de entrada e a de saída. Esse parâmetro influencia tanto no preço quanto na sustentabilidade, pois processos

ineficientes geram grandes quantidades de resíduo [7]. A Tabela 12 mostra a eficiência de diversas tecnologias avaliadas no estudo de Evans, [7]. A variação de eficiência para uma mesma fonte ocorre em função da existência de diferentes tecnologias. Por exemplo, há diversos tipos de placas solares, diversos tipos de combustíveis para a fonte biomassa e até mesmo tecnologias mais antigas e tecnologias mais evoluídas devido ao desenvolvimento tecnológico.

Tabela 12. Eficiência de diversas fontes de geração de energia elétrica.

Fonte	Eficiência
Solar	4-22%
Eólica	23-45%
Hidráulica	>90%
Geotérmica	10-20%
Biomassa	16-43%
Gás Natural	45-53%
Carvão	32-45%
Nuclear	30-36%

Fonte: [7]

A fonte hidráulica é a que tem a maior eficiência dentre as fontes de geração de energia elétrica avaliadas. A fonte eólica é a segunda mais eficiente dentre as renováveis, caso a mesma esteja em uma área com ventos constantes. A grande problemática em relação às fontes renováveis, principalmente a eólica e hidráulica é que estas dependem de variáveis incontroláveis, como precipitação e vento. Dessa forma, apesar de serem eficientes, elas nem sempre estão disponíveis.

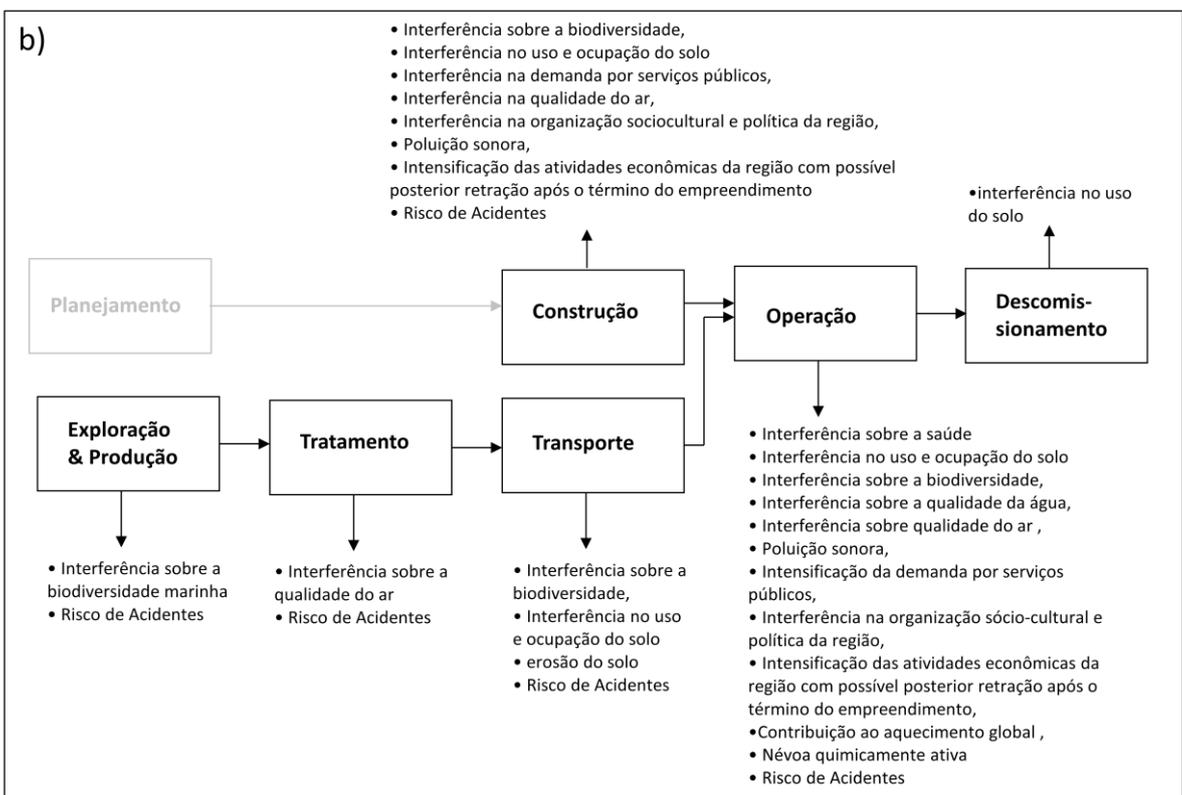
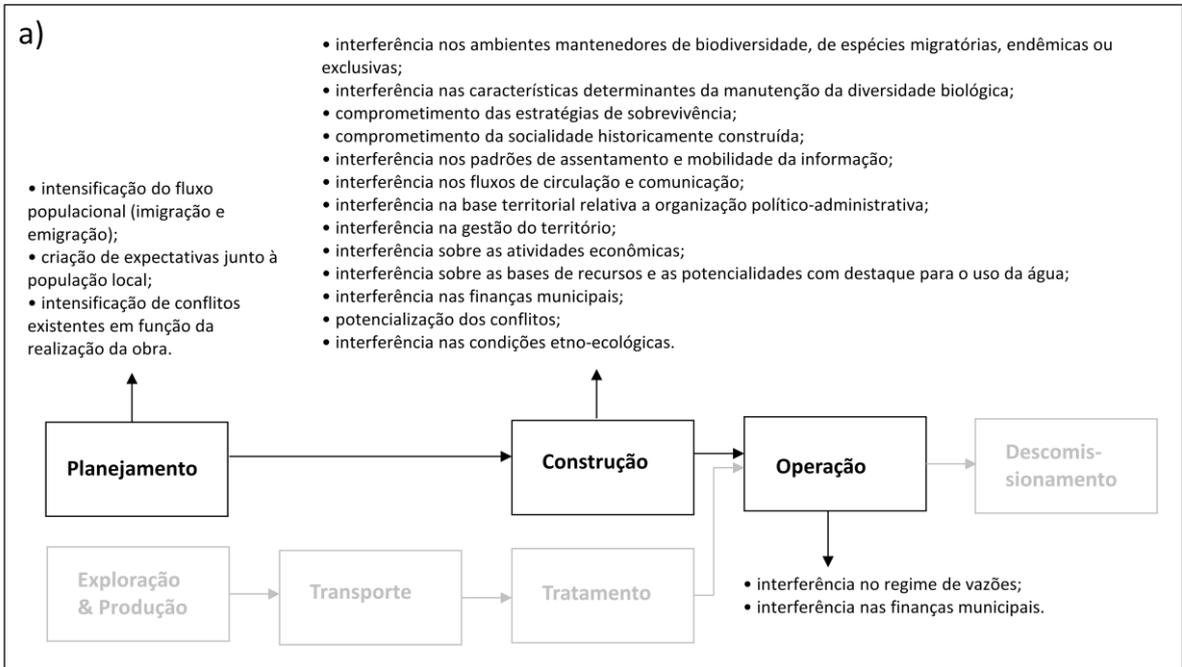
Para o caso das térmicas, o gás natural apresenta a segunda melhor eficiência dentre todas as fontes e a melhor dentre as térmicas. Para o caso da biomassa, os valores de eficiência são variáveis, pois dependem de que combustível será utilizado.

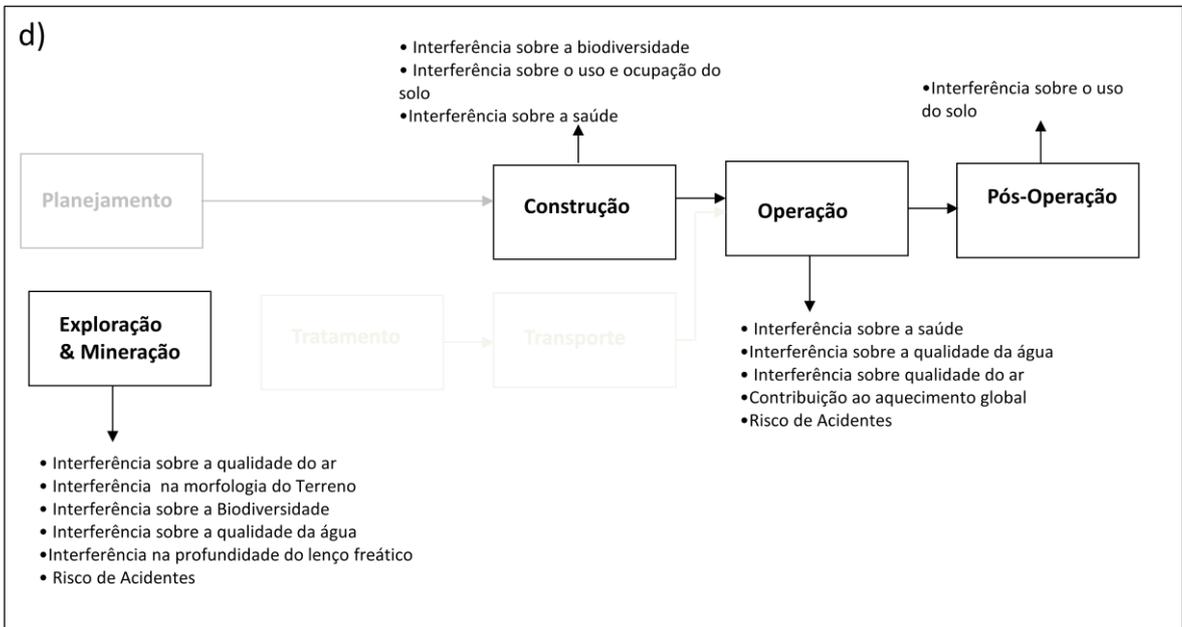
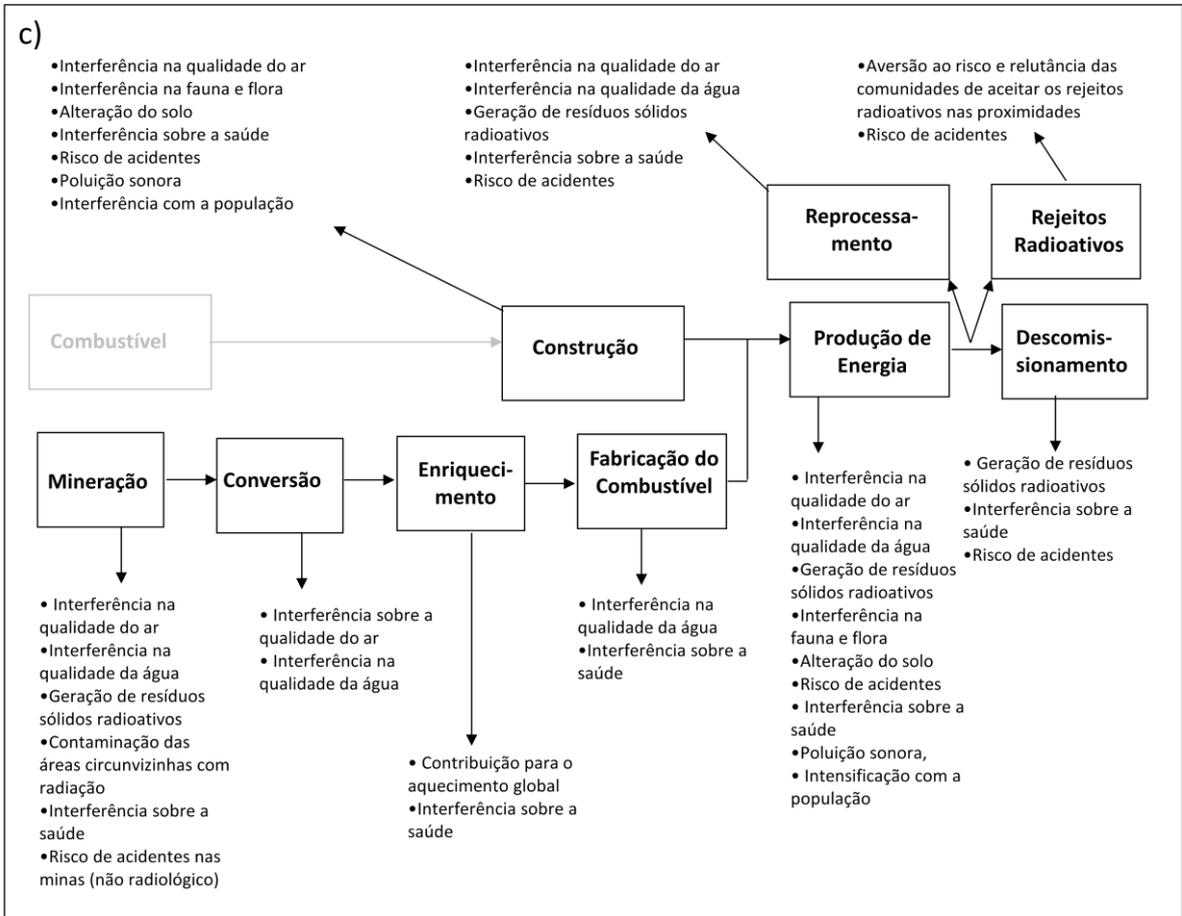
Outros fatores técnicos podem ser considerados tais como: suprimento da demanda de ponta pelas tecnologias, disponibilidade e limitações das tecnologias.

3.3. Metodologia do CEPEL – Detalhamento do cálculo do IAEXP

Um estudo realizado pelo CEPEL [57], composto de três relatórios técnicos, descreve uma metodologia para definição de um índice de impacto socioambiental de referência para a expansão da capacidade de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN) em função do mix de fontes de geração de energia elétrica definidos pelo PNE 2030. O estudo é uma ferramenta importante para verificar o impacto gerado fora da bacia em análise decorrente do aproveitamento parcial do potencial máximo da bacia hidrográfica analisada. Em linhas gerais, a hipótese é de que será necessária uma geração complementar, em outra bacia ou por outras fontes (o mix de fontes do SIN), a fim de atingir o potencial máximo da bacia em questão, geração tal que também tem impactos socioambientais e que devem ser avaliados para a tomada de decisão. Por vezes, no inventário, uma divisão de queda pode ser descartada devido aos impactos locais que ela causa, mas que se fossem considerados os impactos da geração complementar pelo mix de fontes de geração de energia elétrica disponível, os impactos poderiam ser ainda maiores. Para o presente trabalho, serão utilizados os impactos individualmente obtidos para cada fonte e não a união deles em um índice, conforme foi o objetivo do estudo do CEPEL [57].

Na primeira etapa da metodologia empregada em tal estudo, os pesquisadores envolvidos fizeram um levantamento dos impactos mais significativos das fontes de geração de energia elétrica, levando em consideração todas as fases do ciclo de vida. Esse levantamento foi baseado em referências bibliográficas de reconhecimento notório: Plano Nacional de Energia [29], do Projeto ExternE [88] e do Projeto GABE do Instituto Paul Scherrer (PSI). Os impactos para a fonte hidrelétrica, em particular, foram definidos conforme metodologia do inventário, com a adição da etapa de planejamento. A lista inicial consistia de 148 impactos socioambientais, que são apresentados na Figura 11, relacionando-os a etapa do ciclo de vida, e também ao final desse trabalho, no Anexo 1, em formato de listagem.





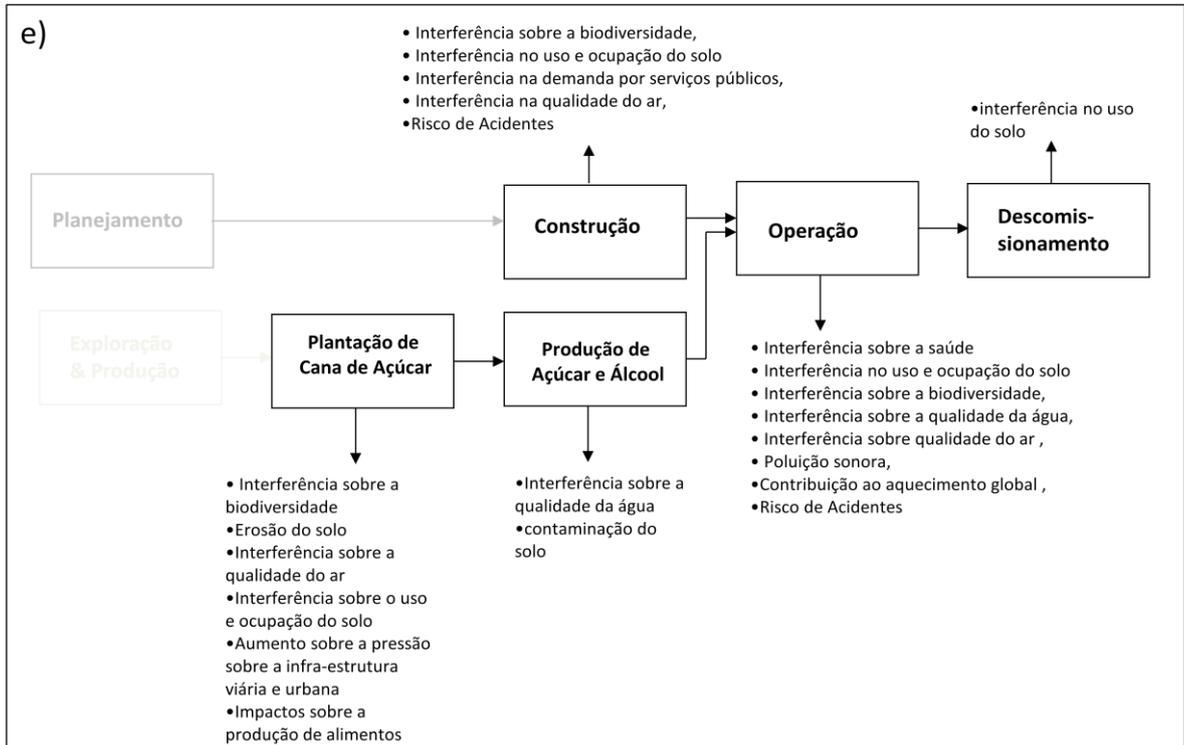


Figura 11. Fluxograma do ciclo de vida da geração de energia elétrica através de usinas a) hidrelétricas; b) térmicas a gás natural; c) térmicas nucleares; d) térmica a carvão e) térmicas biomassa de cana-de-açúcar; f) eólicas. Fonte: [57]

Devido à complexidade de se avaliar todos os impactos listados na primeira filtragem, foram utilizadas outras filtragens para selecionar os impactos mais

importantes para cada fonte de geração de energia elétrica. O processo das filtragens pode ser observado na Figura 12.

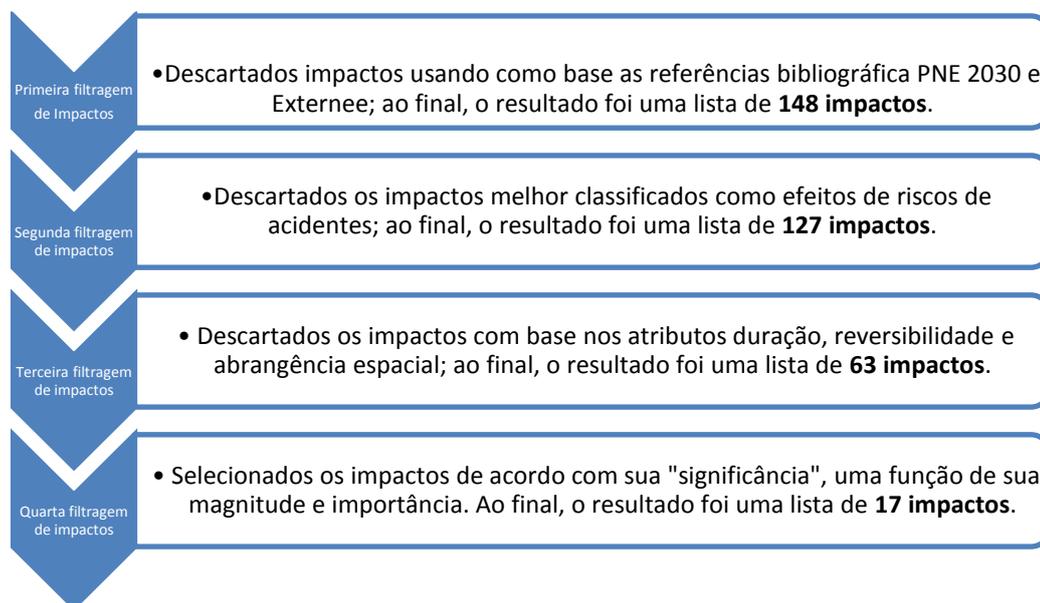


Figura 12. Passos para seleção dos impactos socioambientais. Fonte: [57]

A segunda filtragem consiste eliminar os impactos relacionados aos acidentes, de forma a considerar apenas o funcionamento rotineiro das instalações, em condições de operação dentro dos padrões exigidos na legislação e utilizando a melhor tecnologia disponível.

A terceira e quarta filtragens foram definidas levando em consideração as ferramentas e conceituação propostas na legislação ambiental vigente -- Resolução CONAMA [50], em seu artigo 6º, onde são apresentadas maneiras de se analisar os impactos socioambientais:

- *II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da **magnitude** e interpretação da **importância** dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais. (grifo próprio).*

Na terceira filtragem foram avaliadas as características: duração (permanente, temporário), reversibilidade (reversível, irreversível) e abrangência espacial (local, regional, global). E tendo como premissa a citação de Beanlands *apud* [52] segundo a qual “Em termos de atributos efetivamente utilizáveis para discutir a importância dos impactos é comum o entendimento de que impactos irreversíveis e permanentes sejam tidos como importantes”, foram descartados: os impactos temporários e reversíveis e os impactos de abrangência local e reversíveis.

Na quarta filtragem, foi levada em consideração a significância do impacto, que engloba os quesitos magnitude e Importância. Para melhor entender, a definição desses termos [57]:

Magnitude: é a grandeza de um impacto ambiental em termos absolutos, podendo ser definida como a medida de alteração no valor de um fator ou parâmetro ambiental, em termos quantitativos e qualitativos.

Importância: É a ponderação do grau de significância de um impacto em relação ao fator ambiental afetado e a outros impactos. Pode ocorrer que um certo impacto, embora de magnitude elevada, não seja importante quando comparado com outros.

A magnitude foi classificada em Baixa, Média e Alta. (considerando intensidade, periodicidade e amplitude temporal), enquanto a importância de um impacto foi considerada maior quanto maior for a qualidade e/ou especificidade do recurso ambiental afetado. Para a classificação da importância, foi realizada uma análise Hierárquica (Método Saaty) para classificar a importância relativa dos Impactos por fonte de geração de energia elétrica [89]. A média dos Ws foi usada como linha de corte para definir os impactos mais importantes e menos importantes, por conjunto de impactos comparados. Por fim, a combinação de magnitude e Importância gerou cinco níveis de significância, conforme a Tabela 13.

Tabela 13. Classificação dos níveis de significância dos impactos socioambientais.

		Importância	
		Baixa	Alta
Magnitude	Baixa	Nível 1	Nível 3
	Média	Nível 2	Nível 4
	Alta	Nível 3	Nível 5

Fonte: [57]

Para a seleção das etapas do ciclo de vida efetivamente relevantes para avaliação dos impactos de cada fonte de geração de energia elétrica, adotou-se como critério a ocorrência impactos socioambientais com nível de significância 5, 4 e 3 (apenas em casos de relevância). O resultado da filtragem identificou 17 impactos-fonte conforme listagem abaixo.

Geração hidrelétrica:

- 1- Interferência sobre o uso e ocupação do solo;
- 2- Interferência sobre os modos de vida; e
- 3- Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas).

Geração termelétrica a gás natural:

- 1- Interferência sobre o uso e ocupação do solo;
- 2- Interferência na qualidade do ar; e
- 3- Contribuição para o aquecimento global.

Geração nuclear:

- 1- Interferência sobre o uso e ocupação do solo;
- 2- Geração de resíduos sólidos radioativos;
- 3- Contaminação de áreas circunvizinhas; e
- 4- Aversão ao risco.

Geração termelétrica a carvão mineral:

- 1- Interferência sobre o uso e ocupação do solo;
- 2- Interferência na qualidade da água;
- 3- Interferência na qualidade do ar; e
- 4- Contribuição para o aquecimento global.

Geração termelétrica a biomassa:

- 1- Interferência na qualidade do ar.

Geração eólica:

- 1- Interferência sobre o uso e ocupação do solo; e
- 2- Poluição sonora.

Como podem ser observados, alguns impactos se repetem em diferentes fontes de geração de energia elétrica. Desta maneira, os 17 impactos-fonte foram agrupados em 10 tipos de impactos, conforme Tabela 14.

Tabela 14. Principais impactos-fonte explorados em CEPEL [57].

Impacto	Fonte Associada
Interferência na qualidade do ar	TC, TG, BIO
Interferência na qualidade da água	TC
Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação	TN
Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	TN
Poluição sonora	EOL
Contribuição para o aquecimento global	TC, TG
Interferência sobre o uso e ocupação do solo	UHE, TG, TN, TC, EOL
Interferência sobre os Modos de Vida	UHE
Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas)	UHE
Aversão ao Risco	TN

TC- Térmica à Carvão. TG – Térmica a Gás Natural, BIO – Térmica à Biomassa, TN – Termonuclear, EOL – Eólica, UHE – Usina Hidrelétrica.

Após a definição dos impactos a serem avaliados, foi estabelecido um conjunto de indicadores para representação dos impactos socioambientais mais significativos associados ao mix de fontes de geração de energia elétrica para a expansão. A escolha dos indicadores priorizou aqueles que atendiam a quatro ou cinco dos atributos mencionados anteriormente Mueller *et al apud* [79]: simplificação, quantificação, comunicação, validade, pertinência. A

Tabela 15 mostra um resumo dos indicadores e critérios de avaliação para os impactos selecionados.

Tabela 15. Resumo de indicadores e critérios de avaliação para os impactos selecionados

Impacto	Indicador	Valor Máximo Admissível (Ref. 1)	Justificativa
Interferência na qualidade do ar	Emissão média de SOx, NOx e material particulado (PM-10)	477,7 gSOx/GJ, 360g NOx/GJ e 191,1 g MP/GJ	<p>Os principais poluentes atmosféricos emitidos por termelétricas são NOx, SOx e Material Particulado, sendo que este último considera-se as partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM-10). Para tanto, obteve-se valores médios de emissões desses poluentes para os tipos de combustíveis utilizados na geração termelétrica considerada (carvão mineral, gás natural e biomassa).</p> <p>A Resolução CONAMA 008/90 forneceu uma referência para valores limite de emissão de SOx e MP, em função da quantidade de energia gerada, possível de ser comparada com os fatores de emissão obtidos na literatura (EEA, 2009).</p> <p>No caso do NOx, com a ausência de uma referência na literatura, adotou-se o valor máximo admissível igual ao pior caso, o carvão mineral.</p>
Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação	-	-	Estudos indicam que não é possível garantir com razoável nível de certeza a não contaminação das áreas próximas às minerações de urânio. Tal fato expõe a população destas áreas a um impacto sobre a sua saúde variável e de difícil detecção, e por isso adotou-se valor máximo para este impacto, ou seja, o valor 1.
Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	-	-	Como ainda não existe uma solução definitiva para os resíduos sólidos radioativos gerados na mineração de urânio e no descomissionamento das UT-Nucleares adotou-se o valor máximo para este impacto, ou seja, o valor 1

Poluição sonora	Nível de ruído	50 dB	<p>Considerou-se como indicador o ruído a 300 metros emitido por um aereo gerador turbina, considerando que 300 metros seja uma distância razoável para as construções mais próximas aos aereo geradores.</p> <p>Para a definição do valor máximo admissível utilizou-se a norma NBR 10151 e limites utilizados pela Organização Mundial de Saúde.</p>
Contribuição para o aquecimento global	Fator de Emissão Médio (tCO ₂ /TJ)	101,0 t CO ₂ /TJ	Fator de emissão médio da geração termelétrica a partir do linhito, que é o tipo de carvão que mais emite gases de efeito estufa 101,0 t CO ₂ /TJ (IPCC, 2006).
Interferência sobre o uso e ocupação do solo	Área média utilizada por GW	1.000 km ² /GW	O valor refere-se ao dobro da taxa média de uso da terra da fonte de geração de energia elétrica com maior taxa de uso considerada na análise, a saber, geração hidrelétrica.
Interferência sobre os Modos de Vida	Nota do componente-síntese Modos de Vida em Inventários recentes.	1	Como 90% do potencial a ser explorado no PNE2030 encontra-se na região amazônica, utilizou-se como indicador a nota do componente-síntese Modos de Vida dos estudos de inventários mais recentes nesta região. Foram consideradas as alternativas vencedoras dos estudos de inventário do Tapajós e Xingu. Para que o grau deste impacto fique coerente com os graus dos demais indicadores considerados nesta metodologia, foi utilizado um fator deflato de 0,8 neste impacto.
Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas)	Nota do componente-síntese Povos Indígenas e Populações Tradicionais em Inventários recentes.	1	O valor a ser atribuído a este impacto será considerado como a maior nota do componente-síntese Povos indígenas e Populações Tradicionais de Estudos de Inventário recentes na região amazônica, considerando apenas as alternativas vencedoras de cada inventário. Foram considerados os Estudos de Inventário das bacias do rio Xingu e Rio Tapajós. Para que o grau deste impacto fique coerente com os graus dos demais indicadores considerados nesta metodologia, foi utilizado um fator deflato de 0,8 neste impacto.

Aversão ao Risco	-	-	Eventos catastróficos em escala mundial relacionados à geração de energia elétrica por fonte nuclear foram responsáveis pela cristalização de uma imagem negativa extremamente forte desta categoria de geração de energia, e por isso assumiu-se o valor máximo para este impacto, ou seja, o valor 1.
Interferência na qualidade da água	Ph	3,75 Ph	<p>De acordo com a resolução CONAMA 357/2005 os corpos d água classes I e II devem ter pH entre 6-9. Levantamento bibliográfico indicou que em diversos locais onde foram feitas medições de pH os valores obtidos encontravam-se fora destes limites. O pH médio dessas medições foi 3,95 e o menor valor 2,25.</p> <p>Entretanto, os tratamentos apresentados na bibliográfica consultada conseguiram elevar os valores de pH ao nível requerido pelo CONAMA 357/2005. Por outro lado, apenas a partir de 2003 em Santa Catarina e 2006 no Rio Grande do Sul iniciou-se o tratamento ativo da DAM (Drenagem Ácida Mineração). Além disto, não há garantia que todos os pontos sejam monitorados para saber se o tratamento está funcionando e não está ocorrendo infiltrações. Considerou-se, então, como valor admissível o menor valor de pH encontrado no levantamento bibliográfico (2,25) e como valor <u>máximo</u> admissível a diferença entre este valor e o limite mínimo estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005, resultando em: $6,00 - 2,25 = 3,75$, que seria o valor máximo admissível necessário para atingir o limite mínimo da resolução.</p>

Fonte: [57]

Cada fonte foi avaliada em relação aos impactos selecionados. O grau atribuído a estes impactos-fontes foram graus entre zero e um. Quanto mais próximo do Impacto máximo admissível mais próximo da unidade será o grau. Para alguns impactos foi adotado um valor médio dos valores observados na prática, em outros casos, consideraram-se valores de graus atribuídos em diferentes Estudos recentes

(no caso da fonte hídrica seriam os Estudos de Inventário). A Tabela 16 exemplifica a definição do impacto de área transformada para as diversas fontes analisadas, em que o grau de impacto (GI) de cada fonte será a sua relação área por gigawatt gerado dividida pelo valor máximo admissível (1000 km²/GW).

Tabela 16. Área utilizada por GW e grau de impacto de cada fonte.

Fonte	Relação km ² /GW	GI
Hidroelétrica	500	0,5
Gás Natural	30	0,03
Nuclear	10	0,01
Carvão Mineral	10	0,01
Eólica	150	0,15

Fonte: [57]

Para agregar os impactos de cada fonte foi considerada a importância relativa entre eles, uma vez que não se espera que impactos distintos com importâncias diferentes tenham o mesmo peso (valor) no índice final da fonte. Para tal, foram definidos pesos relativos (p) através do método AHP [89], cuja soma é igual a 1,0. A Tabela 17 apresenta os valores de grau de impacto para cada fonte bem como o peso dos impactos-tipo.

Tabela 17. Grau de impacto modificado por impacto.

Impacto	GI	peso	GI*
Interferência sobre o uso e ocupação do solo na hidroelétrica	0,5	0,072	0,0359
Interferência sobre o uso e ocupação do solo na térmica a gás natural	0,03		0,0022
Interferência sobre o uso e ocupação do solo na nuclear	0,01		0,0007
Interferência sobre o uso e ocupação do solo na térmica a carvão mineral	0,01		0,0007
Interferência sobre o uso e ocupação do solo na eólica	0,15		0,0108
Interferência na qualidade da água na térmica a carvão mineral	0,825	0,072	0,0593
Interferência na qualidade do ar na térmica a gás natural	0,3705	0,072	0,0266
Interferência na qualidade do ar na térmica a carvão mineral	1		0,0720
Interferência na qualidade do ar na térmica a biomassa	0,879		0,0632

Impacto	GI	peso	GI*
Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação na nuclear	1	0,165	0,1650
Interferência sobre os Modos de Vida na hidroelétrica	0,392	0,072	0,0282
Interferência nas condições etno-ecológicas na hidroelétrica	0,632	0,165	0,1043
Contribuição para o aquecimento global na térmica a gás natural	0,56	0,165	0,0924
Contribuição para o aquecimento global na térmica a carvão mineral	0,94		0,1551
Poluição sonora na eólica	0,6252	0,026	0,0164
Aversão ao Risco na nuclear	1	0,026	0,0262

Fonte: [57]

A Tabela 18 mostra os valores finais do índice de impacto socioambiental para cada fonte. O índice de impacto por fonte (IF) foi calculado por:

$$IF_k = \sum_{j=1}^{NIT_k} GI_{k,j}^*$$

Onde:

$$GI_{k,j}^* = GI_{k,j} \cdot p_j$$

GI representa o grau de impacto

k representa a fonte, variando de 1 a no máximo 6, dependendo do número de fontes em que o tipo de impacto está presente, e

j representa o tipo de impacto, variando de 1 a 10.

NIT_k é o número de tipos de impactos que são considerados na análise da fonte k.

Tabela 18. Impacto por fonte final.

Fonte	IF
Hidráulica	0,1684
Nuclear	0,3569
Carvão Mineral	0,2871
Gás Natural	0,1212
Biomassa da Cana	0,0632
Centrais Eólicas	0,0272

Fonte: [57]

Conforme a Tabela 18 a fonte nuclear é a que tem o maior impacto socioambiental, seguida da fonte de carvão mineral e da fonte hidráulica. O estudo do CEPEL [57] prossegue a metodologia com a aplicação desses valores para a mix de usinas geradoras definida pelo PNE, tendo como resultado um único índice para o Plano, que posteriormente será utilizado para análise das alternativas de divisão de queda. Para a importância desse estudo, as demais etapas não tem relevância, visto que o essencial era a definição dos índices de cada fonte, para aplicação em uma metodologia multiobjetivo.

A vantagem dessa metodologia é a consideração de uma grande quantidade de critérios que refletem o conceito de sustentabilidade. Essa abordagem supera a abordagem tradicional de considerar apenas o critério de custo e também aquelas que consideram poucos impactos socioambientais – muitas vezes privilegiando algumas tecnologias e determinando o resultado do estudo. Além disso, a metodologia apresenta avaliação de questões pouco abordadas como populações afetadas com a instalação de empreendimentos, questões relacionadas com radiação de usinas térmicas, poluição das águas, e etc. A segunda vantagem é o fato de os critérios avaliados serem capazes de expressar o impacto das fontes de geração de energia elétrica durante todo o ciclo de vida das mesmas. Dessa forma a comparação dos impactos entre as fontes se torna mais coerente e eficaz.

4. Métodos de Apoio a Decisão para incorporar critérios socioambientais no Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo do Setor Elétrico.

A complexidade do planejamento sustentável da expansão da geração do setor elétrico está relacionada a necessidade de inclusão de diversos critérios conflitantes [83]. As fontes de geração de eletricidade têm características muito diferentes quanto a impactos socioambientais e econômicos de forma que se torna difícil a comparação entre elas. Mesmo havendo dados disponíveis sobre estas questões, o problema de difícil solução é de como incluí-los numa análise sustentável e realizar comparações entre as fontes de geração de energia elétrica [90]. Há diversas metodologias na literatura para atingir esse objetivo, que, em geral, se dividem em dois grupos: a) a definição de custos para os impactos socioambientais (monocritério), também conhecidos como custos de externalidade, b) a análise multicritério.

É importante observar que para qualquer metodologia escolhida, a comparação entre estudos que avaliam o setor elétrico em relação a critérios socioambientais deve ser realizada de forma muito cautelosa, uma vez que vários são os indícios de que a comparação é incompatível devido a diferenças em diversos aspectos tais como:

- localidade;
- metodologia;
- dimensões avaliadas (econômica, tecnológica, ambiental, social, etc.);
- escolha dos critérios para cada dimensão;
- definição dos impactos avaliados por critérios;
- quantificação dos impactos (subjetividade);
- definição dos pesos para cada categoria (subjetividade).

4.1. Método de Custo (Externalidade)

Nesse método, apesar do problema complexo possuir as várias dimensões (econômica, social, ambiental), o problema é resolvido como monocritério uma vez que todos os critérios são traduzidos a uma mesma unidade: valores econômicos. Nessa metodologia, um custo associado ao impacto ambiental é somado ao custo

total de uma dada fonte. Em linhas gerais, uma fonte não renovável, que cause maior impacto ambiental, pode ter um maior custo total maior, se comparada a uma fonte renovável mais limpa. Esse custo adicional servirá no modelo como uma forma de decidir quais fontes de geração de energia elétrica estarão presentes na expansão do sistema a fim de atingir um desenvolvimento mais sustentável. A principal vantagem dessa abordagem é a internalização de custos socioambientais

A tradução dos impactos como custos socioambientais, conferindo a eles um valor econômico, é a maneira mais prática para a modelagem, uma vez que isso coloca as variáveis de decisão em uma mesma escala, seja extinção de espécies, vida de pessoas e algum produto de consumo. No entanto, a definição de valores monetários não é tão simples, requer muitos recursos e não é facilmente transferível para outras análises [91]. De maneira geral, esses métodos de valoração se baseiam nas escolhas tomadas pelos consumidores por meio de pesquisas, por suas preferências, seja em mercados reais, substitutos ou hipotéticos [30].

Há na literatura várias publicações a cerca desse assunto, tratando das etapas de valoração, aplicação, imprecisão, entre outros [92]. O estudo de Sundqvist [93] fez uma revisão da literatura com 132 estudos que analisam as externalidades de usinas de geração de energia elétrica e constatou que os valores obtidos por eles variam consideravelmente. Por exemplo, a externalidade de uma usina a gás pode variar de 0.1 a 9.0 centavos americanos (1998) /kWh. Essas diferenças podem ser explicadas devido a diferença nos objetivos do trabalho, premissas econômicas, escolha dos critérios avaliados, escolha de metodologia ou simplesmente pela base de dados, que reflete características locais. Mesmo dentro de um mesmo continente, como mostrou o projeto ExternE [88] cada país possui um conjunto de fatores distintos que torna desaconselhável a simples transposição de resultados de valoração ambiental entre as nações [30]. Dessa forma, é necessário que os valores sejam coerentes e consistentes com a localidade em que o mesmo será aplicado, avaliando a necessidade de modificações e considerações para a utilização dos resultados de um estudo para outras localidades.

Dentre os estudos de externalidades, o projeto denominado ExternE [88] utilizou combinação da metodologia de ACV com a metodologia *Impact Pathway* (IPA) [91] e para a determinação dos custos externos causados pela produção de energia de diversos combustíveis e tecnologias no setor elétrico, de modo que esses

pudessem ser contabilizados e internalizados no processo de decisão das políticas públicas. Ele foi desenvolvido em 20 países por 50 equipes multidisciplinares. Os objetivos desse estudo foram:

- (1) medir os danos que incidem sobre a sociedade e não são pagos pelos atores principais;
- (2) traduzir esses danos em um valor monetário; e
- (3) explorar como esses custos externos (ou externalidades) poderiam ser cobrados aos produtores e consumidores – internalização nos custos.

Em relação aos resultados do projeto ExternE, verifica-se que na maioria dos países europeus as estimativas de custos externos ambientais são muito significativas, ascendendo, em alguns casos, a 1% do Produto Interno Bruto (PIB) [23]. Os pontos positivos desse estudo remontam na extensão e profundidade dos levantamentos dos principais impactos da atividade de geração elétrica, feito por equipe multidisciplinar com ênfase no levantamento de externalidades e utilizando ACV. Dessa forma esse documento é uma fonte de dados importante para identificação dos impactos ambientais do setor elétrico. Por outro lado, as diferenças da localidade não permitem que a metodologia seja aplicada diretamente para qualquer caso. Além disso, alguns impactos importantes, para os quais ainda não foi possível associar um valor monetário, não são considerados nesta análise.

A experiência internacional fomentou a elaboração de diversos trabalhos em âmbito nacional para a valoração econômica dos danos ambientais com vistas a sua incorporação no planejamento do setor elétrico brasileiro [30]. A motivação era atualizar os usuais modelos econômicos de minimização de custos para incorporar os custos ambientais gerados pelos impactos das usinas aos custos econômicos de construção, operação e manutenção, de forma que a sustentabilidade tenha importância na tomada de decisão.

Em 1996, Furtado [94] utilizou o método de valoração Contingente para avaliar a custo ambiental dos impactos gerados por três diferentes usinas de geração elétrica brasileiras: uma hidrelétrica, Belo Monte; uma térmica a carvão, Candiota III; e uma nuclear, Angra II. Uma vez que estas possuem características diferentes (tempo de vida útil e potência média gerada), o valor foi normalizado em unidades

monetárias por MWh de energia elétrica gerada (em condições de operação média). A Tabela 19 apresenta os valores obtidos nesse estudo.

Tabela 19. Faixa de valores monetários para as externalidades ambientais de projetos de usinas de geração elétrica.

Custo do Dano (US\$(2000) /MWh)	
Belo Monte	4,85-10,34
Candiota III	17,02-35,75
Angra II	37,84-75,82

Fonte: [30]

Em 1999, Tolmasquim [95] coordenou uma equipe técnica com a proposta de identificar e selecionar as principais externalidades provocadas pela geração hidrelétrica e termelétrica e a apresentar propostas de metodologias de valoração ambiental para cada uma dessas com o objetivo de inseri-las no planejamento. O estudo de Reis [58] é uma aplicação da metodologia abordada no trabalho de Tolmasquim e avalia três usinas, um conjunto de duas térmicas a gás e duas hidrelétricas. Para comparação dessas fontes de geração de energia elétrica foram utilizados sete impactos para as hidráulicas contra três para as térmicas. O estudo avalia impactos específicos das fontes como, por exemplo, o impacto da alteração do fluxo do rio sobre a população local para as hidrelétricas e emissões atmosféricas para as térmicas. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 20.

Tabela 20. Danos ambientais do para as fontes de geração de energia elétrica avaliadas por Reis [58].

Custo do Dano (US\$(2000) /MWh)	
Simplício	0,98
Serra da Mesa	8,96
RioGen/RioGen Merchant	12,69

Como as duas usinas analisadas neste trabalho possuem características bem distintas (Simplício com 0,068 km²/MWmédio e Serra da Mesa com 2,43 km²/MWmédio) os resultados de Reis [58] apresentam valores de impacto ambiental, por unidade de geração, muito diferentes. Com isso, a valoração realizada pode ser uma referência para indicar a relação existente entre área e custo ambiental, já que

duas hidrelétricas de tamanhos diferentes são analisadas utilizando o mesmo método.

Com relação a externalidades para as linhas de transmissão, poucos são os estudos disponíveis em nível local. Reis [96] valorou as externalidades referentes à construção do 3º circuito da Linha de Transmissão de 345kV Tijuco Preto – Baixada Santista. Apesar de serem listados vários impactos para as linhas de transmissão, o estudo considerou como externalidade apenas aqueles que não são tratados em programas sócio ambientais: perda de produtividade agrícola, ruído audível, acidentes, contaminação. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que a consideração dos impactos nas linhas de transmissão implica em um aumento de 1,87- 3,14% no custo inicial do empreendimento.

Com base nas bibliografias citadas anteriormente, Santos [30] aplicou uma metodologia de valoração ambiental em um sistema fictício, que representaria, em pequena escala, o funcionamento do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nessa metodologia, um custo associado ao impacto ambiental é somado ao custo total de uma dada fonte. Esse custo adicional servirá no modelo como uma forma de decidir quais fontes de geração de energia elétrica devem estar presentes na expansão do sistema a fim de atingir um desenvolvimento mais sustentável. O estudo utiliza os dados de custo ambiental de Furtado [94], mas cria uma distinção de pequena, média e grande porte para hidrelétricas, devido a contribuição do estudo de Reis [58]. Para o caso de óleo combustível e gás natural, o Externe foi utilizado como base de dados. Os valores de custos ambientais para o estudo são apresentados na Tabela 21. Além disso, o estudo também considera um custo ambiental para a transmissão de energia elétrica no valor de 2%, seguindo as premissas de Reis [96].

Tabela 21. Valores de custo ambiental considerados no estudo de [30].

Custo do Dano (US\$ (2000) /MWh)		
Usina Hidrelétrica (Reservatório)	Pequeno	0,6-1,27
	Médio	2,72-5,81
	Grande	4,85-10,34
Carvão	17,02-35,75	
Óleo Combustível	17,02-35,75	
Gás Natural	5,34-11,22	

No estudo de Santos [30], para a avaliação da inserção da variável ambiental, em forma de custos, no modelo de planejamento, foram considerados quatro cenários, um apenas econômico e três com variações dos valores do custo ambiental (valor mínimo, médio e máximo). A conclusão do estudo mostra que a consideração da variável relacionada às externalidades ao modelo causa diversas mudanças no cronograma de implantação de novos empreendimentos, de forma que esses “novos custos” influenciam nas decisões relativas ao planejamento do setor elétrico em longo prazo.

Apesar das dificuldades apontadas sobre essa metodologia, os resultados obtidos com a aplicação de métodos de avaliação dos custos externos ambientais têm contribuído para a análise da importância relativa dos danos associados aos diferentes ciclos de combustível [23].

4.2. Método Multicritério

O planejamento do setor elétrico implica em incorporar múltiplos objetivos técnicos, econômicos, sociais, ambientais e políticos, sendo requerida a aplicação de um processo mais complexo que integre essas variáveis, quase sempre conflitantes [4,97]. Nesse contexto Begic e Afgan [8] argumentam que a avaliação de sistemas complexos baseados em um único critério de decisão é inaceitável e que todas as dimensões da sustentabilidade devem ser consideradas. Quando os objetivos, ambiental e econômico, são considerados separadamente, sem agregá-los em um único objetivo econômico, os modelos matemáticos representam melhor a realidade [23].

A experiência mostra que a internalização dos custos externos aumenta a competitividade relativa das fontes de geração de energia elétrica renováveis e da nuclear. Por outro lado, para essa metodologia, é comum ter dificuldades de identificação, mensuração e valoração dos impactos, principalmente os sociais, implicando em consideráveis incertezas acerca dos custos ambientais dos empreendimentos do setor elétrico [30]. Para as questões sociais, que são critérios difíceis de mensurar e valorar há uma melhor representação dos impactos com a utilização da análise multicritério [57]. A mesma dificuldade é observada para a dimensão socioambiental, para impactos como perda de biodiversidade, por exemplo. Dessa forma, a análise multicritério pode ser mais adequada para auxiliar

o processo de tomada de decisão, pois possibilita considerar impactos que ainda não foram monetizados.

Em modelos multicritérios o conceito de solução ótima é alterado para o conceito de soluções não dominadas: soluções viáveis para as quais nenhuma melhora em qualquer função objetivo é possível sem sacrificar pelo menos uma das outras funções objetivo [18, 98]. Cesaretti [48] enfatiza que a escolha de critérios para comparar diferentes fontes de geração energia elétrica deve ser feita com cuidado, pois, de acordo com o conjunto escolhido, pode-se definir o resultado do processo de decisão entre as alternativas disponíveis.

Metodologias multicritério são ferramentas muito úteis para situações onde muitos critérios conflitantes devem ser considerados. Nesse processo é comum a interação de diversos tomadores de decisão, com apresentação de diferentes critérios e opiniões distintas sobre os mesmos. Essa variedade de interesses e valores torna bem difícil de atingir consenso para planejamento do setor elétrico. No entanto, mesmo que o consenso não seja atingido, a utilização da metodologia consiste em uma importante discussão [99].

O primeiro estágio para esse processo é chamado de estruturação do problema. Nessa etapa as partes interessadas são identificadas e o escopo e objetivo são definidos. Em seguida as fontes de geração de energia elétrica são definidas bem como os impactos dessas fontes e os critérios para avaliar o desempenho sustentável das alternativas. Esses critérios podem ser quantitativos ou qualitativos. O segundo estágio consiste na análise do problema, ou seja, as alternativas são avaliadas em função dos critérios selecionados no estágio anterior. O terceiro estágio consiste em aplicar a metodologia multicritério para selecionar as alternativas ou conjunto de alternativas. A Figura 13, apresenta os estágios descritos.

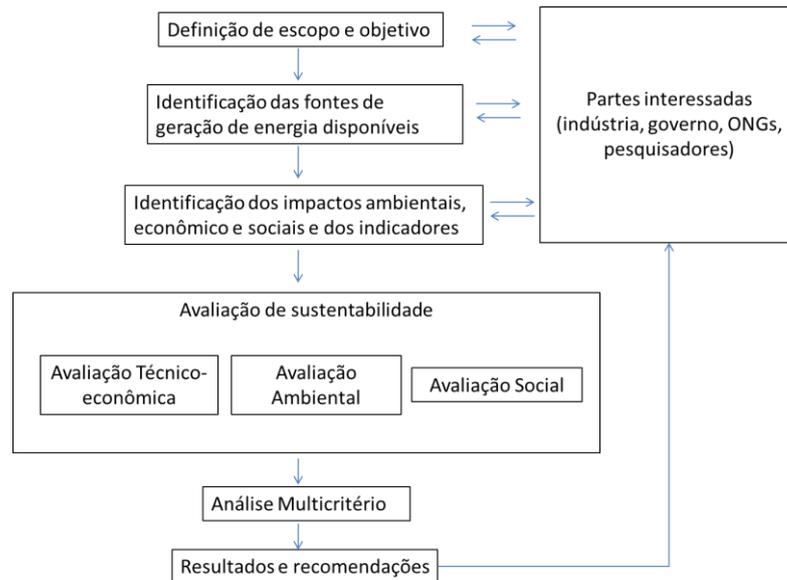


Figura 13. Metodologia multicritério para seleção de fontes de geração de energia elétrica.
Fonte: Adaptado de [55]

Segundo [100] as técnicas utilizadas na otimização multiobjetivo podem ser classificadas em dois tipos: aquelas que requerem a participação do tomador de decisão e aquelas baseadas na existência de uma função utilidade. No primeiro tipo se enquadram os métodos de decisão a posteriori (que consiste na construção de uma curva de Pareto eficiente para os objetivos considerados e subsequente escolha da melhor solução segundo algum critério), métodos de decisão a priori (os parâmetros são definidos previamente) e métodos de decisão interativos (existe uma sequência de interações com o decisor de forma a obter novas soluções eficientes). Dentre os estudos da literatura consultada as metodologias para avaliar a sustentabilidade do setor elétrico consistiram de: seleção de tecnologias, análises de cenários (pré-determinados) de expansão e a otimização da expansão.

A otimização multiobjetivo que utiliza métodos de solução a *posteriori* requer a construção da curva de eficiência. Na teoria, esta curva é formada pelo conjunto de soluções eficientes. Em problemas de otimização convexa (como em programação linear), esta curva pode ser facilmente obtida. Por outro lado, em problemas de otimização não convexa (como em programação inteira mista) as soluções eficientes devem ser obtidas através de algoritmos de otimização global (como o algoritmo *branch-and-bound*), onde a garantia de otimalidade exige um *gap* de dualidade nulo [38].

4.2.1. Utilização de métodos multicritério no setor elétrico

A literatura a cerca de métodos multicritério para a tomada de decisão no setor elétrico tem se expandindo consideravelmente em função da proposta de buscar o desenvolvimento sustentável. A revisão de um número grande de publicações existentes sobre o uso de métodos multicritério para tomada de decisão no planejamento elétrico enfatiza essa crescente preocupação com a sustentabilidade [6, 17, 84, 99, 101,102]. O presente estudo também fez uma revisão de alguns desses estudos, levando em consideração a avaliação dos critérios utilizados e o objetivo de cada um deles, que são apresentados na Tabela 22.

O estudo de Sabóia [38] faz uma revisão em que detalha dois estudos relevantes para essa dissertação [26,98]. Em [26], o problema de planejamento da expansão da geração (PPEG) é modelado como um problema de programação linear que tem por objetivos minimizar (i) custos de investimento e operação, (ii) impactos ambientais referentes a emissões de CO₂, (iii) importação de combustíveis e, (iv) riscos referentes a volatilidade nos preços dos combustíveis. A resolução do problema multiobjetivo baseia-se num método de decisão a posteriori e é composto por duas fases. Na primeira fase, sem a participação do decisor, um grande número de soluções não dominadas é calculado utilizando diferentes metodologias e diferentes conjuntos de pesos para cada objetivo. Estas soluções são posteriormente agrupadas de acordo a similaridade dos resultados com relação ao critério econômico utilizando o algoritmo *K-means* de agregação. Na segunda fase, as soluções agrupadas (alternativas de expansão) são hierarquizadas utilizando o Processo Analítico Hierárquico [89] e a melhor solução é encontrada. Nesta etapa existe a participação do decisor para estruturar o problema de decisão em níveis hierárquicos e para estabelecer a matriz de pesos (preferências relativas) utilizada nas comparações paritárias das alternativas de cada nível em relação ao nível imediatamente superior. O modelo proposto foi aplicado ao sistema interconectado do México para o horizonte de planejamento de 10 anos, o que resultou em um problema com 7390 variáveis contínuas e 7280 restrições.

Em [98] o PPEG é modelado como um problema de programação linear inteira mista que tem por objetivos a minimização de (i) custos de expansão, (ii) impactos ambientais associados com a capacidade instalada e, (iii) impactos ambientais associados com a operação das usinas. É utilizado o método de decisão interativo

em duas fases. O algoritmo é inicializado a partir das soluções ótimas individuais de cada função objetivo e adotando-se uma delas como referência. A seguir, dá-se início à primeira fase, com base na relaxação linear do problema e utilizando o método iterativo de Tchebycheff. O tomador de decisão analisa a solução encontrada em cada interação. Caso a mesma seja satisfatória (novo ponto de referência), inicializa-se a segunda fase, onde é resolvido o problema original de programação inteira mista minimizando a métrica de Tchebycheff com relação ao ponto de referência. Caso a solução inteira seja satisfatória o processo iterativo termina, caso contrário retorna-se à primeira fase do método, utilizando o último ponto de referência e/ou pesos. A metodologia é aplicada a um sistema teste de dimensões reduzidas envolvendo três funções objetivo, 93 restrições, 222 variáveis de decisão contínuas e 18 variáveis de decisão inteiras.

No Brasil, os estudos de caso realizados para análise da dimensão socioambiental no planejamento da expansão da geração de energia elétrica consideram casos simplificados ou fictícios, apenas com o intuito acadêmico de explicitar a importância de considerar os impactos socioambientais causados pela geração de energia elétrica. Até então nenhum estudo foi aplicado ao SIN, devido a tamanha complexidade do setor elétrico brasileiro. Esses estudos, apesar de simplificados, têm uma contribuição importantíssima para alertar os tomadores de decisão da importância da dimensão socioambiental. Dentre os trabalhos brasileiros avaliados, alguns autores se destacaram com a utilização de uma metodologia multicritério [20-22] em que as variáveis socioambiental e econômica formam duas parcelas distintas dentro da análise o autor utiliza o método de decisão proposto em [99] para a construção da curva de eficiência que se baseia na combinação convexa entre métricas (norma unitária e norma infinito) das funções objetivos relativizadas por seus supostos valores ideais e anti-ideais, as quais são ponderadas por pesos. Esses pesos foram definidos para os diversos decisores com base em uma metodologia AHP [89] e Programação de Metas [79]. Ao final de seu trabalho, Vila aplica a metodologia em um sistema fictício e de pequeno porte ao contemplar onze projetos de investimento e um horizonte de planejamento de 10 anos.

O estudo de Dester [21], levanta a discussão da integração das fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira mantendo a confiabilidade no atendimento a carga. O estudo propõe uma metodologia de obter um ranking das

opções tecnológicas para produção de energia elétrica utilizando a ACV e o método multicritério PROMETHEE [103]. Nesse processo são utilizados 18 critérios (discriminados na Tabela 22), divididos em três categorias: técnica, socioambiental e econômica. É realizada também uma análise de sensibilidade para os pesos de cada categoria de impacto para avaliar a influência dos critérios.

Conde [22] desenvolveu um método para a incorporação de critérios ambientais no processo de tomada de decisão do planejamento de longo prazo do setor elétrico. Esse método consistiu na adaptação de um modelo de otimização já existente (Modelo de Planejamento da Expansão do sistema Elétrico- PLANEL), com o objetivo de que este avaliasse a questão do planejamento de forma multiobjetiva, ao considerar questões ambientais, em adição as questões econômicas. Para tal foram definidos três indicadores relevantes e quantitativos (área transformada, consumo de água e emissões de gases de efeito estufa) bem como o peso relativo entre eles, por meio do método Delphi-AHP. Os resultados do estudo de caso demonstram a funcionalidade do método que, de modo geral, atendeu às expectativas em torno do modelo conceitual: a medida que aumenta a importância do meio ambiente, maior será a participação das fontes renováveis. O estudo, no entanto, apresenta fragilidades em relação aos impactos selecionados, visto que a dimensão social não é efetivamente considerada e também não há uma consideração para a análise do impacto ambiental das linhas de transmissão.

A Tabela 22 mostra a extensiva literatura avaliada neste presente trabalho que retrata a utilização de métodos multicritério para solução de questões relacionadas ao setor elétrico. Nessa mesma Tabela são apresentados também os critérios utilizados em cada estudo.

Tabela 22. Revisão da literatura sobre a utilização de métodos multicritério em temas do setor elétrico.

Estudo	Objetivo	Critérios e Indicadores	Tipo de Ind.	LT	ACV	Método Multicritério
Seleção de Tecnologias						
[9]	Define indicadores para avaliar a sustentabilidade de diversas tecnologias presentes no setor energético. Define um índice geral de sustentabilidade que possibilita um ranking das alternativas disponíveis em uma ilha fictícia.	R: Combustível, Aço inox, Cobre, Alumínio A: Emissões atmosféricas (CO ₂ , NO _x , SO ₂), Resíduo S: Empregos, Renda Local, Benefícios para comunidade. Ec: Eficiência da tecnologia, Custo de investimento, PIB	QT (11)	x	NE	Soma Ponderada (ASPID-3W)
[10]	Avalia alguns indicadores para tecnologias novas e sustentáveis de forma a definir um índice geral de sustentabilidade que possibilita um ranking dessas alternativas.	T: Eficiência SA: CO ₂ , Área transformada Ec: Custo de Investimento, Custo da energia	QT (5)	x	NE	Soma Ponderada (ASPID-3W)
[11]	Utilização de uma metodologia multicritério para difundir tecnologias energéticas sustentáveis em nível regional. A metodologia auxilia o tomador de decisão a selecionar a melhor tecnologia de acordo com determinados objetivos.	T: Quantidade de energia não gerada por combustíveis fósseis, maturidade e confiabilidade, existência de mão de obra local, previsão de performance, custo evitado pela não utilização de combustíveis fósseis A: Emissões de GEE, outros poluentes (emissões, líquidos e sólidos), área transformada, outros impactos. SEc: Emprego, maturidade do mercado, compatibilidade com situação política, legislativa e administrativa.	M (13)	x	NE	ELECTRE

[8]	Analisa várias tecnologias de geração de energia considerando múltiplos critérios. A metodologia é aplicada para selecionar a tecnologia mais indicada para aumentar a capacidade instalada de uma empresa de energia elétrica estatal na Bósnia.	R: Combustível, Aço inox, Aço carbono, Cobre, Alumínio, Isolantes térmicos A: Emissões atmosféricas (CO ₂ , NO _x , SO ₂) S: Empregos Ec: Eficiência da tecnologia, Custo de investimento, Custo da energia	QT (13)	x	NE	Soma Ponderada (ASPID-3W)
[12]	Avalia dez fontes de geração de energia elétrica considerando múltiplos critérios.	T: Eficiência, disponibilidade, capacidade A: Consumo de recursos não renováveis, custo de externalidades Ec: Custos (Investimento, operação e manutenção, combustível)	M (5)	x	x	AHP
[7]	Avaliação de tecnologias renováveis com base em indicadores sustentáveis. As tecnologias são hierarquizadas por indicador e posteriormente para o conjunto de critérios.	T: Disponibilidade e Limitação, Eficiência A: CO ₂ , Área transformada, Consumo de água S: Impactos Sociais Ec: Custo	M (7)	x	✓ **	Soma com pesos iguais para os critérios
[13]	Determina a melhor alternativa renovável para Istambul e seleciona o melhor local para implantação.	T: Eficiência técnica, eficiência energética A: CO ₂ , NO _x , Área transformada. S: Aceitação social, empregos Ec: Custo de investimento, Custo de operação e manutenção	QL (9)	x	NE	VIKOR-AHP
[14]	Avaliação de tecnologias de geração de energia que atendam critérios de desenvolvimento sustentável.	SA: CO ₂ Ec: Custo de geração de energia, <i>pay-backtime</i>	QT (3)	x	✓	Figure of Merit Based on Equal weighting

[4]	Seleção da melhor fonte de geração de energia renovável	T: Potência, horas de operação, período de implantação, vida útil A: CO ₂ evitado Ec: Custo de investimento, Custo de Operação e Manutenção	QT (7)	x	x	VIKOR-AHP
[15]	Proposta de uma metodologia para avaliar a sustentabilidade das tecnologias disponíveis para expansão da geração do sistema elétrico.	T: Disponibilidade, Eficiência, Duração de construção, Potencial de geração anual A: Emissões atmosféricas (CO ₂ , NO _x , SO ₂ , MP), Consumo de água, Área transformada, Percentual de uso efetivo de área S: Impactos Sociais Ec: Custo de Investimento, Índice custo-benefício, Percentual de custos de importação	M (15)	x	NE	Análise envoltória de Dados (DEA)
[16]	O objetivo é determinar a melhor fonte de geração de energia renovável para alcançar um planejamento energético sustentável	A: Emissões atmosféricas (CO ₂ , NO _x , SO ₂ , MP), Consumo de água, Área transformada, Percentual de uso efetivo de área S: Impactos Sociais S: Aceitação social, benefícios sociais Ec: Custo de investimento, custo de operação e manutenção, vida útil, payback	M (12)	x	x	AHP
Análise de Cenários de Expansão						
[19]	Determina uma metodologia para classificar alternativas de expansão de energia elétrica em função de múltiplos objetivos e incertezas.	A: CO ₂ , SO ₂ , Consumo de água Ec: Custo (investimento, combustível e operação e manutenção)	QT (4)	x	NE	Soma Ponderada (MAVT)

[17]	Avalia cenários sustentáveis para expansão do sistema energético Austríaco. Cada cenário é composto por um mix de tecnologias distintas a serem avaliados sob uma metodologia multicritério.	R: Combustível, Energia A: Emissões atmosféricas (CO ₂ , MP, SO ₂), Qualidade da água, Qualidade ambiental, T: Diversidade tecnológica, Dependência de importação S: Empregos, Poluição sonora Ec: Custos fixos e variáveis	M (17)	x	✓	PROMETHEE II
[18]	Desenvolvimento de uma ferramenta multicritério para avaliar diferentes cenários de geração de energia elétrica.	T: Dependência de Importação, Diversidade tecnológica, taxa de despacho SA: CO ₂ , Área transformada S: Empregos, Impacto visual, Impacto sonoro, Renda local, Saúde pública Ec: Custos fixos e variáveis, Indústria nacional, Custo de investimento em linhas de transmissão	M (13)	✓	NE	Soma Ponderada (Value measurement method)
[6]	Apresenta uma metodologia de auxílio à tomada de decisão para promover o desenvolvimento sustentável no planejamento de sistemas energéticos através da seleção de cenários.	A: Aquecimento global, depleção abiótica, acidificação, eutrofização, ecotoxicologia de rios e oceanos, toxicidade humana, camada de ozônio, smog, ecotoxicologia terrestre S: Segurança de suprimento e diversidade de fontes, aceitação da população, saúde pública e acidentes de trabalho, gerações futuras Ec: Custo (instalação, operação e manutenção, custo da energia)	M (17)	x	✓	Soma Ponderada (MAVT)

Otimização da Expansão						
[24]	Propõe uma metodologia que considera múltiplos objetivos para o planejamento de longo prazo do setor elétrico e aplica-a em um estudo de caso da Espanha.	SA: CO ₂ ,SO ₂ ,NO _x , lixo radioativo Ec: Custo	QT (5)	x	NE	AHP/ Programação de Compromisso
[23]	Apresenta um modelo linear inteiro-misto para auxiliar a tomada de decisão do planejamento da expansão da geração com múltiplos objetivos.	A: Área transformada, acidentes, efeito nos ecossistemas, Custo de Impacto Ambiental (emissões/saúde pública, acidentes ocupacionais) Ec: Custo (Investimento, operação e manutenção)	M (3)	x	NE	Minimizar a distância de Tchebycheff para a solução ideal
[25]	Aplica um modelo matemático multiobjetivo para auxiliar na escolha de tecnologias disponíveis para atendimento da demanda de energia (elétrica e térmica) em uma ilha grega.	A: CO ₂ Ec: Custo	QT (2)	x	NE	Pareto set
[26]	Descreve um modelo multiperíodo para a expansão de longo prazo do sistema elétrico que otimiza múltiplos objetivos e decide a localização das unidades geradoras.	A: Impacto ambiental Ec: Custo (Investimento, operação e manutenção, risco nuclear), Importação de combustível, risco de preço de combustível	QT (4)	✓ *	✓	AHP/Program ação de Compromisso

[20]	Aborda a questão do planejamento da expansão de sistemas de energia elétrica considerando o setor de gás natural e alguns critérios de desenvolvimento energético sustentável.	T: Diversificação energética SA: CO ₂ Ec: Custo (investimento e operação, geração e transmissão)	M (3)	✓*	✓	AHP/Programação de Compromisso
[21]	Discutir a integração das fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira mantendo a confiabilidade no atendimento a carga.	T: TEIF, fator disponibilidade, fator de flexibilidade, resposta aos picos de carga, fator de segurança de suprimento, fator de capacidade máximo SA: CO ₂ (diretas/indiretas), NO _x , SO ₂ , Riscos à saúde, Empregos diretos Ec: Custo investimento, custo de O&M, custo variável unitário, sensibilidade do preço do combustível, payback, custo de conexão	M (18)	✓ *	✓**	PROMETHEE II
[27]	Foi desenvolvido um modelo multi-objetivo linear para o planejamento energético descentralizado em que são considerados critérios ambientais e o lado da demanda.	Ec: Custo (investimento e operação) S: Empregos A: Consumo de água, Área Transformada, CO ₂	QT (5)	x	✓ **	Programação por Metas
[22]	Desenvolve um método para incorporação de critérios ambientais no processo de tomada de decisão sobre o planejamento da expansão da geração de energia elétrica no longo prazo.	Ec: Custo (investimento e operação) A: Consumo de água, Área Transformada, CO ₂	QT (4)	✓*	✓	Soma Ponderada (AHP)

Abreviações:

Critérios e Indicadores: R = Recursos; A= Ambiental; S= Social; Ec=Econômico; AS: Socioambiental; T= Técnico; SEc = Socioeconômico;

Tipo de indicador: QT= Quantitativo; QL= Qualitativo; M= Misto; (Número) = Número de indicadores avaliados no estudo;

Outros: LT = Linha de Transmissão, x=Não considera; ✓= Considera; * = Apenas no critério econômico; NE= Não está explícito; **= Considera apenas para GEE; Os diferentes métodos não são explicados nesse trabalho. Informações sobre os mesmo podem ser obtida na respectiva referência.

Da análise bibliográfica foi possível observar que cada estudo avaliado utiliza uma combinação de indicadores diferentes, seja por falta de dados ou pela maior importância de certos impactos perante outros em função das fontes de geração de energia elétrica utilizadas, localidade do estudo e propósito do estudo em função do interesse das partes interessadas.

Na literatura avaliada, todos os estudos consideram critérios econômicos e ambientais, por outro lado a utilização de critérios sociais para avaliar a sustentabilidade no setor elétrico ainda é pequena. Dos 23 estudos analisados, apenas 10 consideram os impactos sociais. Na maioria de casos um único critério: empregos. Para o sistema hidrotérmico brasileiro, o critério social é bastante importante uma vez que a instalação de usinas hidrelétricas tem grande impacto na população local. Alguns estudos também consideraram critérios técnicos. Em relação ao número de indicadores utilizados para análise multicritério em cada estudo foi possível verificar uma grande variação entre os estudos de dois [] até dezessete [6,17]. A integração dos indicadores nos estudos avaliados utilizou basicamente métodos de soma ponderada e AHP.

Apesar da importância do ACV, poucos estudos realizam essa análise. Quando esta é realizada, a ACV é aplicada apenas para os indicadores ambientais. A dissertação de mestrado de Stamford [54] foi o único documento analisado nesta dissertação que apresentou a ACV para todas as dimensões da sustentabilidade. É importante destacar que quando a ACV não é utilizada, os impactos de certas fontes de geração de energia elétrica podem ser subdimensionados.

Devido ao escopo e a aplicação de cada estudo, foi identificado uma grande variação na quantidade de fontes avaliadas. Dessa forma, fica ainda mais difícil utilizar os dados da literatura em outros estudos, pois dificilmente há todas as fontes em um mesmo estudo, que foram avaliadas em relação aos mesmos critérios. A Tabela 23 apresenta a diversificação de fontes de geração de energia elétrica que foram avaliadas em casa estudo, e o número de tecnologias distintas para uma mesma fonte, quando maior que 1.

Tabela 23. Fontes de geração de energia elétrica avaliadas em cada estudo avaliado neste trabalho.

Estudo	Tecnologias Avaliadas																	
	S	PV	E	UHE	B	G	N	C	O	GEO	ON	D	R	PCH	BG	BIO	DEM	OUT
[9]		✓	✓		✓				✓									
[10]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓							
[11]	✓ 2	✓	✓	✓ 2	✓ 2										✓			✓ 2
[8]		✓	✓	✓	✓	✓		✓ 3										
[12]		✓	✓	✓	✓	✓ 2	✓	✓	✓	✓								
[7]		□	□	□														
[13]	✓	✓	✓	✓	✓					✓								
[14]	✓	✓	✓											✓				
[15]			✓		✓ 3	✓		✓					✓			✓ 2		✓ 2
[4]	✓		✓	✓	✓ 5											✓		
[16]	✓	✓	✓	✓	✓													
Análise de Cenários de Expansão																		
[19]			✓	✓ *		✓ 3	✓ 2	✓ 2										
[17]		✓	✓		✓					✓			✓		✓			
[18]		✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓			✓				
[6]	✓	✓	✓	✓	✓	✓ 2	✓	✓ 4	✓	✓	✓							
Otimização da Expansão																		
[24]	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓ 3										✓
[23]						✓ 2		✓	✓								✓	
[25]	✓	✓	✓		✓					✓		✓						
[26]				✓	✓	✓		✓	✓	✓								
[20]			✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓			✓	
[21]	✓	✓	✓ 2	✓	✓	✓ 2	✓	✓	✓					✓				

[27]		✓	✓	✓						✓							✓	
[22]	✓		✓	✓	✓	✓ 2	✓	✓ 3	✓									

Abreviações: S= Solar; PF = Fotovoltaica; E= Eólica, UHE = Hidrelétrica; B= Biomassa; G = Gás Natural; N = Nuclear; C = Carvão; O = Óleo; GEO = Geotérmica; MAR = Maremotriz; D= Diesel; R= Resíduo; PCH= Pequena Central Hidrelétrica; BG = Biogás; BIO = Biodiesel; DEM = Redução no lado do Demanda; OUT = Outras.

5. Abordagem Proposta para Incorporação da dimensão socioambiental no modelo MELP

A revisão da literatura desse trabalho aponta uma urgência para definição de uma metodologia de planejamento do setor elétrico que considere critérios socioambientais em sua formulação. A partir da seleção de uma grande variedade de indicadores socioambientais baseados na ACV, o estudo pretende contribuir para a um enriquecimento da literatura de planejamento sustentável de longo prazo do setor elétrico.

Devido à complexidade do problema do planejamento da expansão de longo prazo, e, que no caso do sistema brasileiro, também é de grande porte, não é possível determinar um planejamento que os critérios socioambientais sem auxílio computacional. Sendo assim, para fazer esta análise, são utilizados instrumentos quantitativos de apoio à tomada de decisão [30]. No âmbito desse trabalho o modelo utilizado será uma adaptação do Modelo de Expansão de Longo Prazo (MELP) desenvolvido pelo CEPEL [36] para uma versão multiobjetivo e pretende sistematizar as principais questões socioambientais no planejamento do setor elétrico.

A aplicação do MELP ao sistema brasileiro, de forma similar ao que será utilizado neste trabalho, resulta em um problema de programação inteira mista de grande porte, com cerca de 8.000 variáveis de decisão inteiras (referentes aos investimentos), 90.000 variáveis de decisão contínuas (referentes à operação do sistema) e 170.000 restrições [38]. Dessa forma, a solução do problema exige elevado esforço computacional, o que impõe desafios à incorporação de múltiplos objetivos.

Em uma primeira proposta, foi realizada uma metodologia multiobjetivo com dois objetivos: minimizar o custo total e minimizar os impactos socioambientais. No entanto, essa metodologia aplicada para os mesmos critérios abordados na metodologia da restrição não teve êxito. Além de comprovar o grande esforço computacional, a tentativa mostrou outras questões importantes para que essa abordagem seja possível, uma delas é a necessidade de separar os indicadores socioambientais em duas etapas: investimento e operação, seguindo a formulação original do MELP. O impacto socioambiental associado apenas ao subproblema do

investimento, por exemplo, implica na instalação de usinas renováveis caras, que acabam não sendo utilizadas quando a variável econômica da operação é considerada. Para este caso o resultado indicou a instalação de usinas com baixo impacto socioambiental, mas que não são operadas. Outro problema se dá em relação a variável déficit em que seria necessário definir um valor para o impacto socioambiental do déficit de forma que o modelo não opte por não gerar energia elétrica a fim de manter um baixo impacto socioambiental.

Em função das dificuldades explicitadas, optou-se em formular o problema do planejamento da expansão de geração de energia elétrica de longo prazo com consideração de critérios socioambientais com base na metodologia proposta em [38] com a incorporação dos critérios socioambientais por meio de um método a *posteriori* das restrições. Nessa abordagem o objetivo de minimizar os impactos socioambientais causados pelo setor elétrico é representado como uma restrição, na qual, ao se variar o termo independente (RHS), tem-se o resultado equivalente ao método das funções objetivos (FOB) ponderadas. De forma análoga ao método FOB ponderadas, testado anteriormente, o mínimo socioambiental viável é equivalente ao método das restrições, com a restrição socioambiental mais apertada possível, ou seja, inviável. Essa abordagem foi selecionada por apresentar uma maior simplicidade e menor demanda computacional para um sistema grande e complexo como o Sistema Interligado Nacional brasileiro.

Segundo Sabóia, [38], o método a *posteriori* das restrições consiste de duas etapas. Na primeira define-se a curva eficiente para a relaxação linear do problema variando-se os valores da restrição socioambiental em um dado intervalo. Na segunda etapa, o decisor, com base na curva de eficiência construída, seleciona a solução de compromisso mais próxima de suas preferências, para posterior solução do problema de programação inteira mista considerando o valor da restrição socioambiental escolhido. O processo de decisão com base da curva de eficiência foge ao escopo deste trabalho, mas como sugerido em [26], pode-se recorrer a técnicas de agregação e hierarquização das soluções lineares para encontrar aquela que melhor atenda as duas funções objetivo. Neste trabalho serão avaliadas diversas soluções de compromisso para a solução inteiro mista.

A resolução de casos para o sistema brasileiro, com dimensões similares às daquelas do caso PNE 2030, tem sido viabilizada através da utilização de heurísticas

de busca local [104] associadas ao algoritmo *branch-and-cut* disponível do pacote computacional IBM/CPLEX Versão 11 [38].

5.1. Indicadores Socioambientais Selecionados

A revisão bibliográfica a cerca dos impactos socioambientais relativos à geração de energia elétrica pode levar a uma pesquisa exaustiva, ainda mais quando é levado em consideração a ACV dos processos. São incontáveis os estudos que avaliam esses impactos, seja quantitativamente ou qualitativamente, como mostra as Tabela 22 e Tabela 23. Para o modelo proposto, inserir todas essas variáveis socioambientais tornaria o problema ainda mais complexo.

Para a grande listagem de impactos socioambientais há na literatura uma grande variedade de indicadores para a análise da sustentabilidade do setor elétrico. No entanto não há uma metodologia padronizada que defina quais devem ser utilizados para realizar análises multiobjetivo do setor elétrico. Tampouco um estudo único que abrangesse um grande número de fontes e impactos da geração elétrica com foco no caso brasileiro [30]. Conforme foi observado, a maioria dos estudos considera o fator de mudanças climáticas, mas em alguns casos deixa de lado impactos importantes para a fonte nuclear ou hidráulica.

A literatura mundial e nacional serviu de base para a pesquisa, para avaliar quais os indicadores vem sendo utilizados. Neste trabalho, foram utilizados os indicadores do trabalho realizado por CEPEL [57], visto que compreende os principais indicadores mencionados na literatura bem como a consideração de indicadores que representam bem a realidade nacional, como a questão da dinâmica populacional, grande impacto da principal fonte de geração de energia elétrica no país. A utilização de indicadores de vários estudos poderia ser complexa visto que seria necessário verificar se ambos consideram as mesmas fases do ciclo de vida e as mesmas premissas. Os indicadores socioambientais e os pesos definidos no estudo do CEPEL [57] são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Indicadores socioambientais utilizados para o estudo e seus respectivos pesos.

Indicador	Peso
Interferência sobre o uso e ocupação do solo	0,072
Poluição sonora	0,026
Interferência sobre os Modos de Vida	0,072
Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas)	0,165
Aversão ao Risco	0,026
Interferência na qualidade da água	0,072
Interferência na qualidade do ar	0,072
Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	0,165
Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação	0,165
Contribuição para o aquecimento global	0,165

Fonte: [57]

Como o Brasil possui um Sistema Interligado Nacional (SIN), a classificação das fontes de geração de energia elétrica não é suficiente para um planejamento de longo prazo. É necessário avaliar, também, os impactos das linhas de transmissão, pois, dependendo de onde está localizada a demanda de energia elétrica e o projeto a ser instalado, estas serão imprescindíveis para o intercâmbio de energia entre os subsistemas.

5.2. Desenvolvimento do MELP-SUSTENTÁVEL

O MELP-SUSTENTÁVEL é uma reformulação do modelo MELP, de forma a incorporar critérios socioambientais em sua formulação e tornar a seleção do mix de expansão mais sustentável. Para tal o problema monoobjetivo foi transformado em multiobjetivo por meio da utilização do método a posteriori das restrições, com a adição de uma restrição dos impactos socioambientais. A metodologia envolveu as seguintes etapas:

1. Seleção das fontes de geração de energia elétrica presentes no portfólio de expansão.

2. Seleção de indicadores socioambientais para avaliar os impactos causados por cada tipo de fonte, levando em conta o ciclo de vida.
3. Definição de um índice de impacto socioambiental para cada fonte, de forma a hierarquizar as fontes de geração de energia elétrica disponíveis para a configuração de expansão do SIN.
4. Integração dos índices socioambientais por meio uma restrição para determinar o mix de expansão, levando em conta os impactos causados pelas fontes.

5.2.1. Função objetivo

O MELP-SUSTENTÁVEL consiste de dois objetivos: minimizar o custo total (instalação e operação) e restringir os impactos socioambientais. Para tal são definidos os seguintes de índices, conjuntos, parâmetros e variáveis:

k	Índice do estágio no tempo, que será definido em alguma unidade, tais como meses ou anos
j	Índice do empreendimento
J^H	Conjunto de usinas hidrelétricas
J^{HP}	Subconjunto projetos de usinas hidrelétricas
J^{GP}	Subconjunto projetos candidatos a motorização adicional
J^T	Conjunto de usinas termelétricas
J^{TP}	Subconjunto de projetos de usinas termelétricas
J^Z	Conjuntos de troncos de interligação
J^{ZP}	Subconjunto de projetos de troncos de interligação
J^W	Patamares de déficit de energia
K	Horizonte de planejamento: número de anos
τ	Taxa de desconto
xh_j^k	Construção da usina hidrelétrica j no estágio k
xg_j^k	Construção da motorização adicional j no estágio k
xt_j^k	Construção da usina termelétrica j no estágio k
xz_j^k	Construção da interligação j no estágio k
$\hat{t}_{j,l}^k$	Produção de energia pela termelétrica j no patamar l durante o estágio k em condições médias

γ_j^k	<i>Custo da produção térmica da usina j durante o estágio k</i>
$\delta_{j,l}^k$	<i>Custo do déficit j no patamar l durante o estágio k</i>
$\hat{w}_{j,l}^k$	<i>Não atendimento a demanda energética gerada pelo déficit j no patamar l durante o estágio k em condições médias</i>
$\emptyset P_j^k$	<i>Custo de investimento do projeto j no estágio k. Inclui gastos fixos de operação e manutenção do empreendimento</i>
$\emptyset g P_j^k$	<i>Custo de investimento do projeto de motorização adicional j no estágio k</i>
Cap_j	<i>Capacidade da usina j</i>
$Capinter_j$	<i>Capacidade da interligação j</i>
IA_j	<i>Índice de impacto socioambiental da usina j</i>
IA_{total}	<i>Impacto socioambiental do SIN para a simulação</i>
IA_{lim}	<i>Impacto socioambiental limite</i>
$IAEXP$	<i>Índice de impacto socioambiental unitário para mix da expansão da geração</i>

O objetivo econômico consiste em: custo de investimento (\$: no caso inteiro) de usinas térmicas e hidrelétricas, motorização adicional e intercâmbio; custo de operação e manutenção (\$/MWh); e o custo de déficit. Para determinar qual é o plano de investimentos é realizada a escolha do menor valor presente (VP, calculado a partir do somatório de todos os custos atualizados a valor presente). A Formulação desse objetivo é descrita pela equação 1.

$$E = \sum_{k=1}^K \frac{1}{(1+\tau)^k} \left[\sum_{j \in J^{HP}} \emptyset P_j^k \times xh_j^k + \sum_{j \in J^{GP}} \emptyset g P_j^k \times xg_j^k + \sum_{j \in J^{TP}} \emptyset P_j^k \times xt_j^k + \sum_{j \in J^{ZP}} \emptyset P_j^k \times xz_j^k + \sum_{l=1}^L \gamma_j^k \times \hat{t}_{j,l}^k + \sum_{l=1}^L \delta_{j,l}^k \times \hat{w}_{j,l}^k \right] \quad (1)$$

Em resumo:

Custo de Investimento:

$$\text{Hidrelétricas} = \sum_{j \in J^{HP}} \emptyset P_j^k \times xh_j^k$$

$$\text{Motorização Adicional} = \sum_{j \in J^{GP}} \emptyset g P_j^k \times xg_j^k$$

$$\text{Termelétricas} = \sum_{j \in J^{TP}} \emptyset P_j^k \times xt_j^k$$

$$\text{Intercâmbio} = \sum_{j \in J^{ZP}} \emptyset P_j^k \times xz_j^k$$

Custos de Operação

$$\text{Térmica} = \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J^T} \gamma_j^k \times \hat{t}_{j,l}^k$$

$$\text{Déficit} = \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J^W} \delta_{j,l}^k \times \hat{w}_{j,l}^k$$

O objetivo socioambiental é representado por uma restrição que representa o aumento da preocupação com impactos causados por todo ciclo de vida das fontes de geração de energia elétrica, definidos no item anterior. A Formulação dessa restrição é descrita pela equação 2 e 3. Na equação 3 determinou-se multiplicar o impacto socioambiental pela capacidade de projetos de forma a diferenciá-los, assumindo assim que projetos com maior capacidade têm maior impacto pois utilizaram uma área maior ou uma maior quantidade de combustível para gerar energia elétrica.

$$IA_{total} \leq IA_{lim} \quad (2)$$

Em que:

$$IA_{total} = \sum_{k=1}^K \sum_{j \in J^{HP}} Cap_j \times xh_j^k \times IA_j + \sum_{j \in J^{TP}} Cap_j \times xt_j^k \times IA_j + \sum_{j \in J^{ZP}} Cap_{inter_j} \times xz_j^k \times IA_j \quad (3)$$

Diferente do que foi realizada no estudo de Sabóia [38], a restrição socioambiental está associada apenas a variável binária de investimento, sem necessitar um acoplamento temporal da operação das usinas. Essa decisão favorece o modelo, no ponto de vista matemático e computacional. Apesar de não aparecerem explicitamente variáveis referentes ao impacto socioambiental da operação na restrição acima, os impactos socioambientais da operação dos empreendimentos são considerados implicitamente, uma vez que os índices de impacto socioambiental dos empreendimentos foram definidos a partir de uma análise do ciclo de vida.

De posse do valor de impacto socioambiental calculado para o SIN planejado, calcula-se o índice de impacto socioambiental unitário para o mix da expansão da geração (IAEXP) determinado pelo modelo MELP-SUSTENTÁVEL conforme a equação 4. O IAEXP é o resultado da divisão do IA_{total} pela capacidade das usinas e

interligações definidas para a expansão da oferta de energia elétrica no horizonte modelado.

$$IAEXP = \frac{IA_{total}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J^{HP}} Cap_j + \sum_{j \in J^{TP}} Cap_j + \sum_{j \in J^{ZP}} Cap_{inter_j}} \quad (4)$$

5.2.2. Restrições

As restrições definidas anteriormente para o modelo MELP foram mantidas. Houve apenas a adição de uma nova restrição para incorporar o objetivo de introduzir os critérios socioambientais na tomada de decisão, conforme definido no item anterior.

6. Estudo de Caso

Com o objetivo de testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida ao longo desse trabalho foi realizado um estudo de caso para o modelo multiobjetivo MELP-SUSTENTÁVEL. Os dados de entrada e premissas utilizados no modelo são baseados em um caso derivado do PNE2030 [29], com o intuito de reproduzir a realidade do sistema elétrico brasileiro. Há algumas adaptações e simplificações, para este estudo em particular, explicadas nos itens a seguir.

6.1. Dados de entrada e premissas básicas

6.1.1. Horizonte de Tempo

O horizonte de tempo analisado foi de 25 anos, o mesmo analisado pelo PNE: o período de 2006 a 2030, divididos em estágios anuais. Até o ano de 2015, a expansão é considerada obrigatória de forma a simular o que ocorre no PNE, que segue o cronograma de expansão do plano decenal PDE 2006-2015 [105]. Como consequência, as usinas com entrada anterior a 2016 não possuem um índice socioambiental associado.

A partir de 2016, toda expansão, usinas e troncos de interligação, é considerada opcional. Essa decisão permite que o modelo leve em conta o indicador socioambiental de cada fonte geradora/tronco de transmissão para a tomada de decisão e, portanto, verificar a funcionalidade do modelo multiobjetivo. A obrigatoriedade da expansão de algumas usinas após 2016 implicaria apenas em

decidir quando instalar certa usina, dado um período limite de entrada, mas não se a mesma deveria ou não ser instalada.

6.1.2. Sistema Existente

Apesar de somente a expansão pós 2015 fazer parte da decisão, conforme demonstrado anteriormente, todas as usinas de geração existentes no SIN foram mantidas de forma a representar o funcionamento real do sistema elétrico brasileiro. Da mesma forma, o sistema de transmissão existente também foi mantido. O sistema elétrico brasileiro em [29] é representado por nove subsistemas e três nós fictícios, conforme Figura 14.

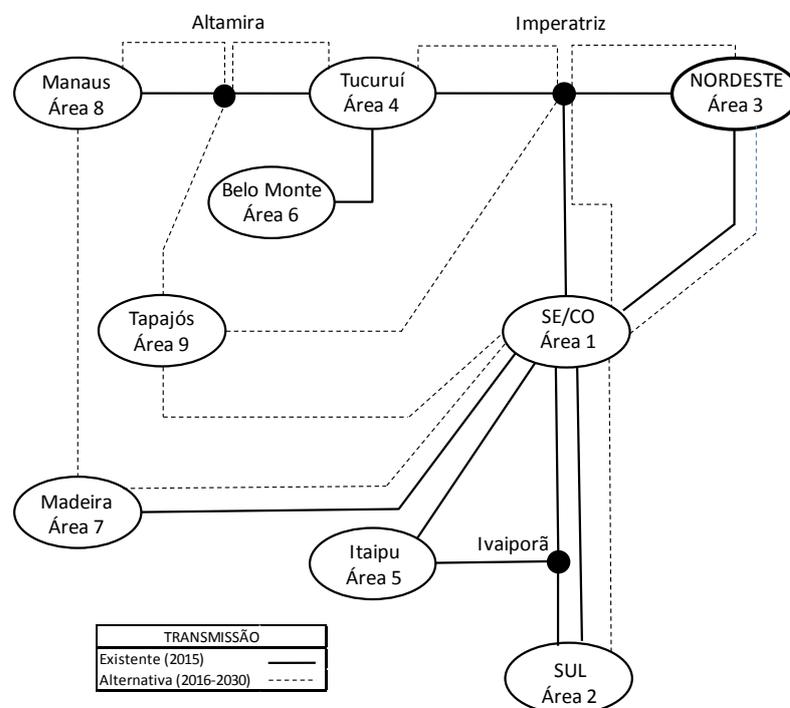


Figura 14. Sistema Interligado Nacional (2015) e possibilidades de expansão 2030. Fonte: Adaptado de [29]

6.1.3. Demanda

A consideração do sistema existente implica em definir a demanda de energia utilizada no modelo como a soma da demanda atual com o crescimento previsto da demanda. Os dados para demanda foram retirados do PNE [29]. A demanda de energia elétrica para o estudo utilizado é aquela referente ao cenário B1 do PNE,

representada pela Tabela 25. O incremento da demanda para o período em questão é de 79.473 MWmed.

Tabela 25. Projeção da carga de energia¹ (MWmédio)

Subsistema	2005	2010	2020	2030	Δ% AO ANO 2005-2030
Norte	3160	4204	7154	13265	7
Nordeste	6708	8801	12945	19988	4,5
Sudeste/Centro Oeste	28800	36693	50855	71841	3,8
Sul	7627	9910	14140	20674	4,1
TOTAL	46295	59608	85094	125768	4,08

¹ Exclui sistemas isolados remanescentes

Fonte: [29]

6.1.4. Portfólio de Projetos

O portfólio de projetos definido para esse estudo de caso engloba as mesmas fontes de geração de energia elétrica analisadas no PNE2030: Hidrelétrica, Gás, Nuclear, Carvão, Eólica, Biomassa, Biogás e Óleo Combustível. As características dessas usinas, como fator de capacidade e vida útil, também foram obtidas do PNE2030. Apesar de a fonte solar ser vantajosa em termos socioambientais, esta não será abordada neste estudo devido a não ter um índice de impacto socioambiental para esta fonte no estudo do CEPEL [57] e a ausência da mesma no estudo do PNE2030, escopo deste trabalho.

O estudo de caso se diferencia do estudo do PNE quanto a obrigatoriedade dos projetos. No estudo em questão os projetos obrigatórios são considerados apenas aqueles como data de entrada anterior a 2016. Essa premissa foi estipulada de forma que os efeitos das modificações socioambientais do modelo MELP-SUSTENTÁVEL sejam mais evidentes. A obrigatoriedade de projetos limita a quantidade de projetos opcionais serem implementados em função da nova abordagem multiobjetivo. Após 2016 todos os projetos são opcionais, seguindo as datas determinadas pelo estudo do PNE2030.

Além disso, o portfólio de projetos foi modificado, com base na previsão do PDE2024 [106], com adição de usinas candidatas, principalmente com relação às fontes renováveis. Como o estudo prevê o aumento da participação de fontes com

menor impacto socioambiental (eólica, biogás e biomassa) na matriz elétrica, o portfólio candidato definido no PNE2030 foi modificado de forma a evitar escassez de projetos com baixo impacto socioambiental para expansão, fato que obrigaria o sistema a expandir fontes com maior impacto socioambiental. É importante ressaltar que o aumento do portfólio não levou em consideração a viabilidade técnica de construção de tantas usinas renováveis

O aumento da capacidade do portfólio candidato para expansão em relação ao proposto pelo PNE2030 foi de 30900 MW para eólica, 1700MW para o biogás e 2750 MW para a biomassa. Além disso, houve aumento para outras fontes, nuclear em 4000 MW e carvão em 4000 MW, que são favoráveis em cenários mais econômicos. Com a complementação desse portfólio, a visualização dos efeitos da implementação multiobjetivo fica mais evidente. O conjunto de projetos de investimentos para o horizonte 2016 a 2030 inclui 273 usinas hidrelétricas, 16 usinas termelétricas a carvão, 24 usinas termelétricas a óleo combustível, 60 usinas termelétricas a gás natural, 39 usinas termelétricas a biomassa, 8 usinas nucleares e 84 usinas eólicas. A Tabela 26 apresenta a capacidade disponível para expansão do sistema por fonte.

Tabela 26. Capacidade disponível para a expansão do SIN.

Fonte	(MW)
	Período 2016-2030
Hidrelétricas	42233
Térmicas	42000
Gás Natural	24000
Nuclear	5000
Carvão	5000
Óleo	8000
Diesel	0
Alternativas	39400
Centrais Eólicas	33000
Biomassa da Cana	3600
Biogás	2800
TOTAL	123633
Intercâmbio	20295

A fim de diminuir o número de variáveis inteiras no problema de programação inteira mista a serem resolvidos pelo MELP, os projetos de pequenas centrais hidrelétricas foram representados de forma agregada nos arquivos de dados.

6.1.5. Dados Econômicos

Os custos de investimento e de operação dos projetos foram baseados no estudo do PNE2030 e atualizados conforme os valores no estudo de Sabóia [38]. A Tabela 27, representa o custo para as térmicas e eólica na Figura 15, para as hidrelétricas.

Tabela 27. Custo das fontes térmicas

Fonte	Custo unitário de investimento (MR\$/MW)	Custo unitário de operação (R\$/MWh)
Gás natural	1,38	97,2
Eólica	2,76	0
Óleo combustível	2,53	418,78
Carvão	3,68	42,55
Carvão Importado	3,68	47,61
Nuclear	4,6	36,8
Biogás	2,53	105,73
Biomassa	3,78/2,30/2,53	51,29

Fonte: Adaptado de [38].

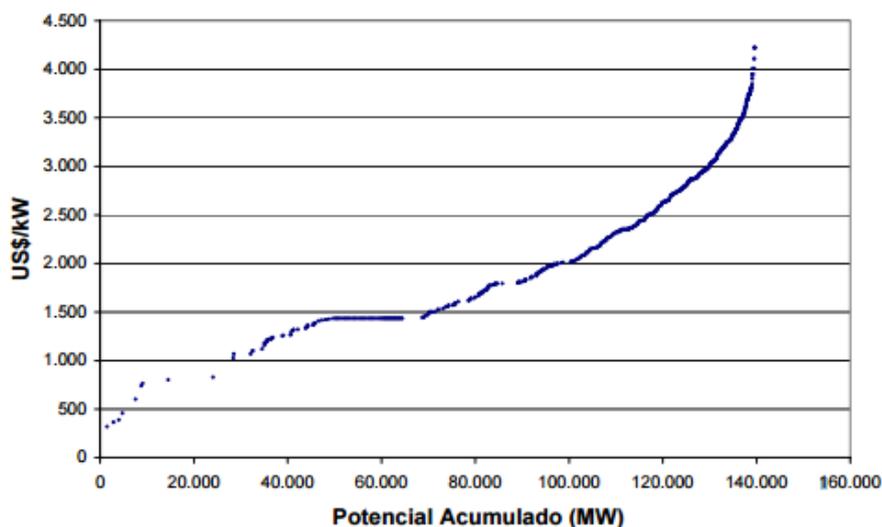


Figura 15. Custo unitário de investimento de projetos de usinas hidrelétricas. Fonte: [29]

6.1.6. Dados complementares

Além dos dados de entrada definidos anteriormente, o modelo MELP depende de mais algumas informações para a sua execução. Estes também foram obtidos a partir do PNE 2030, documento base para essa dissertação:

- Custo de Déficit (R\$/MWh) - 2286
- Taxa de Desconto - 8%
- Patamar de carga - um patamar de carga

6.1.7. Critérios socioambientais

Os indicadores socioambientais selecionados foram considerados apenas para as usinas em expansão após 2016, em que as usinas são opcionais, uma vez que o estudo em questão tem o objetivo de avaliar a determinar um plano de expansão e avaliar a mudança do mix de fontes geradoras em função da consideração de critérios socioambientais.

Os valores do índice de cada fonte são aqueles determinados no estudo do CEPEL [57]. A justificativa para tal escolha é a comparação a literatura existente e a constatação de este estudo considera um número maior de indicadores socioambientais além daqueles amplamente discutidos na literatura, além de melhor representar o cenário nacional. A consideração de um índice adimensional possibilita a consideração de impactos que não seriam possíveis em uma abordagem com índices apenas dimensionais, como por exemplo aqueles relacionados a populações ribeirinhas e tradicionais, que não é considerada em grande parte dos estudos que utilizam modelos matemáticos, mas sua importância é crucial visto que o maior potencial hidrelétrico do Brasil está localizado em uma região que compreende essas populações. Além disso, a consideração do ciclo de vida na definição dos indicadores também é de extrema importância para não subdimensionar os impactos das fontes de geração de energia elétrica.

As fontes de geração por diesel, óleo combustível e biogás não foram contemplados no referido estudo. Para preencher essas lacunas, optou-se por escolher índices de fontes já analisadas no estudo e que teriam a mesma ordem de grandeza em termos de impactos socioambientais. Para o óleo combustível e o para

diesel foi considerado o índice de 0,287 – o mesmo valor da fonte térmica a carvão- e para o biogás atribuiu-se o índice de 0,063 – o mesmo valor da biomassa.

No caso do índice para a transmissão de energia elétrica foi necessário avaliar quais dos impactos contemplados no estudo estariam relacionados à atividade. Para o estudo em análise, considerou-se o impacto da área transformada, com a atribuição de valor 1 – o maior valor, visto que as linhas de transmissão impactam longas faixas de terra. Com a atribuição do peso 0,072 (Tabela 17) desse impacto-tipo para o índice final, obteve-se o índice 0,072 para o impacto socioambiental das interligações. A Tabela 28 apresenta todos os índices utilizados nesta dissertação.

Tabela 28. Índice de impacto socioambiental por fonte utilizado no estudo de caso.

Fonte	Índice de Impacto Socioambiental
Hidrelétrica	0,168
Gás natural	0,121
Nuclear	0,356
Carvão	0,287
Eólica	0,027
Biomassa	0,063
Diesel	0,287
Óleo	0,287
Biogás	0,063
Intercambio	0,072

6.1.8. Critérios técnicos

O MELP já leva em consideração critérios técnicos em sua formulação: capacidade, eficiência da tecnologia, disponibilidade de combustível e limitação (renováveis) através dos fatores de capacidade mínimo e máximo e dos fatores de participação. Em um sistema predominantemente hidrelétrico, utilizam-se as térmicas apenas para complementar a geração hidráulica e garantir o suprimento da demanda de energia elétrica. No entanto, em situações em que o regime hidrológico é desfavorável, a geração térmica é fundamental. A operação complementar das térmicas está relacionada, basicamente, ao seu custo de geração e ao custo de

oportunidade associado ao uso da água nas hidrelétricas em cada estágio de decisão. De maneira geral, sob condições hidrológicas ruins o “valor da água” aumenta e opta-se por utilizar uma maior fração da capacidade instalada das térmicas. Em condições favoráveis de chuva a utilização da água se torna mais barata e é diminuída a geração de UTEs [107]. O fator de participação de uma térmica, para condições de hidrologia média e para condições críticas, pode ser definido conforme Figura 16.

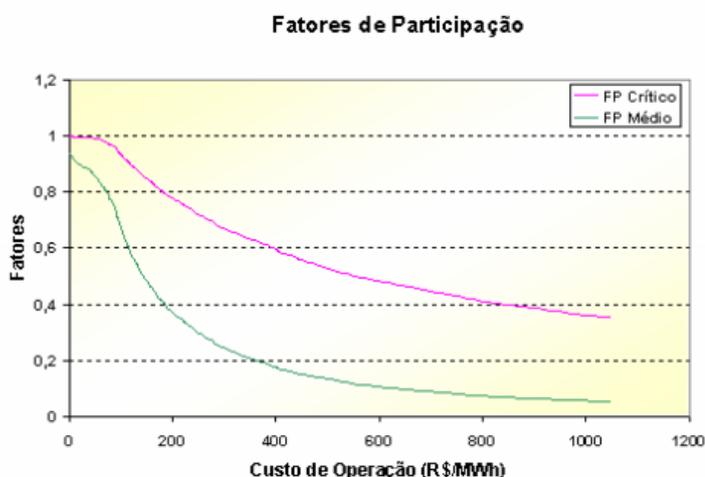


Figura 16. Fatores de participação térmicos. Fonte: [29]

As informações sobre as características das usinas para este estudo foram extraídas do PNE e algumas foram atualizadas conforme Sabóia [38]. A Tabela 29 mostra os valores do fator de capacidade mínimo e máximo (já considerando o fator de participação) considerados para as fontes de geração de energia elétrica avaliadas.

Tabela 29. Fatores de capacidade final para diversas fontes de geração de energia elétrica.

Fonte	Fcmin	Fcmax
Gás natural	25%	95%
Eólica	0%	30%
Óleo combustível	0%	88%
Carvão	40%	86%
Nuclear	60%	90%
Biogás	30%	60%
Biomassa	60%	70%

Fonte: [38]

7. Análise de Resultados

Foi realizada uma rodada inicial do modelo linear sem considerar a restrição socioambiental, de forma a obter o valor de impacto para a solução mínimo econômico viável, que se baseia apenas na redução dos custos econômicos e na garantia de suprimento, independente do impacto que causará ao meio ambiente e sociedade. O valor de impacto socioambiental calculado (IA_{total}) é considerado o limite superior da restrição socioambiental para as próximas simulações, uma vez um impacto maior não ocorrerá devido a otimização em relação ao custo; mesmo que fosse admitido um impacto maior, o modelo optaria pela opção mais econômica, aquela definida sem a existência de restrição socioambiental.

Em seguida, foram realizadas algumas rodadas do modelo em sua versão linear de forma a determinar o limite inferior da restrição, ou seja, o impacto mínimo que o sistema consegue atingir em função da variação de usinas presentes no portfólio de expansão, sem comprometer o atendimento a demanda no período crítico. De posse do valor máximo definido para a restrição, pelo resultado do problema do mínimo econômico viável, os valores para formação da curva tomou valores percentuais (100%, 90%, 80%, 70%, 60% e 50%) do valor máximo obtido (cenário econômico) para variar os valores da restrição e definir a curva de eficiência, até que o problema se mostra inviável, o que denota não ser possível alterar o mix de expansão de forma a reduzir o impacto socioambiental causado. Para uma análise mais próxima da realidade, o modelo foi rodado na versão inteiro-misto, para os mesmos valores de restrição utilizados na versão linear, de forma a verificar de fato que usinas compõem o mix de expansão.

Com base nos dados do sistema descrito na seção anterior, foram feitas diversas simulações com o modelo MELP-SUSTENTÁVEL utilizando sua formulação de relaxação linear, e posteriormente a formulação inteira, adotando um gap relativo de convergência de 1%. O índice de impacto socioambiental variou, na relaxação linear, de 17739,70 (associado a solução de mínimo viável econômico) a 8515,06 (associado a solução de mínimo viável socioambiental), equivalente a 48% da restrição máxima, ponto em que o problema torna-se inviável, visto que o modelo não consegue mais atender a demanda de energia do sistema e reduzir o impacto socioambiental.

O valor de 17739,70 do modelo com formulação inteira corresponde ao cenário em que o objetivo socioambiental não é levado em consideração na tomada de decisão, ou seja, um cenário com o mínimo econômico viável. Ainda na formulação inteira, o modelo aceitou a restrição até o valor de 50%, ponto a partir do qual o problema se mostrou inviável. Neste valor (50%), pode-se considerar o cenário com o mínimo socioambiental viável, visto que não é possível reduzir os impactos, sem comprometer o atendimento a demanda de energia. A Tabela 30 apresenta a nomenclatura dos cenários avaliados nesse trabalho, de forma a facilitar o entendimento dos resultados.

Tabela 30. Cenários avaliados no estudo.

Tipo	Cenário	Linear		Inteiro	
		Índice de impacto socioambiental (IAEXP)	Custo (MR\$)	Índice de impacto socioambiental (IAEXP)	Custo (MR\$)
100%	Cenário 1	0,163	263827,26	0,166	265737,77
90%	Cenário 2	0,154	264714,05	0,152	266589,98
80%	Cenário 3	0,137	266897,86	0,134	268915,04
70%	Cenário 4	0,113	272075,82	0,114	274347,78
60%	Cenário 5	0,102	282806,42	0,102	285399,48
50%	Cenário 6	0,089	301256,74	0,089	306570,21
48%	Cenário 7	0,088	307021,52	INVIÁVEL	

A partir dos resultados das simulações pôde-se construir a curva de eficiência ilustrada na Figura 17.

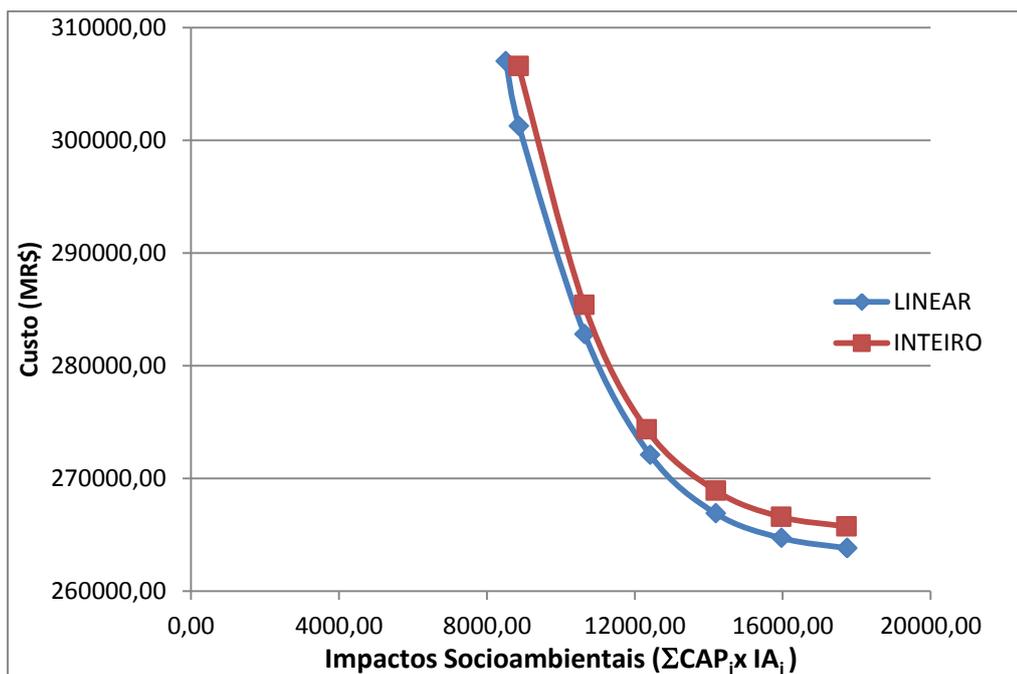


Figura 17. Curva de eficiência

De acordo com a Figura 17, os custos totais de investimento e operação crescem à medida em que procura-se restringir o impacto sócio-ambiental. Quando os custos de operação e investimento são avaliados separadamente, percebe-se que, a medida que busca-se reduzir o impacto socioambiental, o custo de operação aumenta, conforme Figura 18.

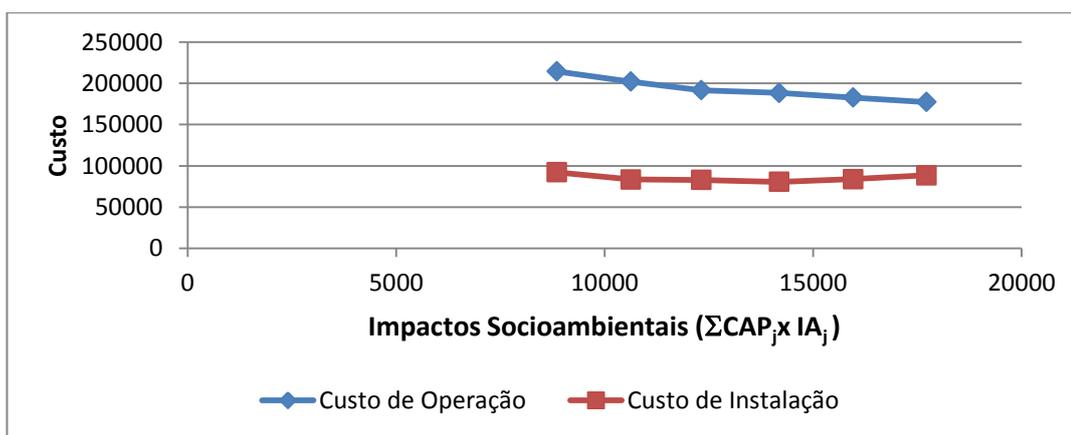


Figura 18. Relação dos custos individuais com os impactos socioambientais.

O aumento de custos ocorreu devido à necessidade de investir em tecnologias mais limpas, principalmente em projetos eólicos, que apresentam fatores de capacidade baixos, da ordem de 30%, implicando na necessidade de construção de várias usinas para contribuir efetivamente para um aumento da capacidade de

geração. Além desta, as demais fontes exploradas pelo modelo, como o caso do gás natural e do biogás, tem baixo impacto, mas alto custo operacional. A redução do custo de instalação, por sua vez, pode ser explicada pela redução da participação da fonte hidrelétrica, devido ao seu grande impacto no quesito social.

Em seguida, foi realizada uma verificação do funcionamento do modelo para os cenários extremos 1 e 6. A Figura 19 confirma um funcionamento coerente do modelo para essas duas situações, uma vez que atende à curva de crescimento da demanda de energia e por mostrar um cronograma de investimentos coerente com o aumento da capacidade de geração. A parcela econômica e a restrição de atendimento a demanda são muito importantes para que o modelo não opte por não expandir o sistema em função dos impactos de cada fonte.

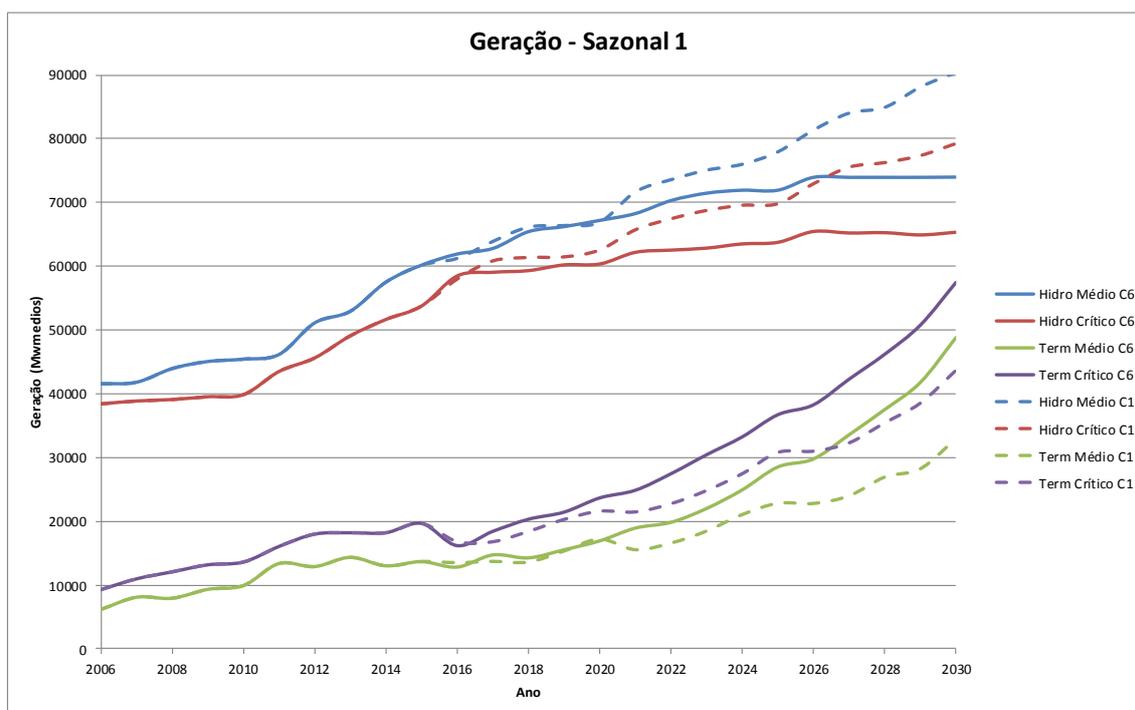


Figura 19. Geração de energia elétrica ao longo do horizonte de estudo.

C1- Cenário 1, C6- Cenário 6

Em relação aos cenários avaliados, foi possível observar que a capacidade instalada para o intercâmbio no período de 2016-2030 se mostrou decrescente a medida que se reduz os impactos socioambientais, conforme Figura 20. Do cenário 1 (econômico) para o cenário 6 foi observado uma redução de 63% para a capacidade de intercâmbio.

Como não foi observada a existência de déficit em nenhum dos cenários, a redução da evolução da capacidade de transmissão pode ser explicada como uma transição de um sistema no qual as usinas hidrelétricas de um subsistema atendiam a demanda de outros subsistemas, para um sistema em que as usinas implantadas atendem a demanda do subsistema em que estão inseridas. Com isso, reduz-se a necessidade das extensas linhas de transmissão. É importante observar que a solução seguiu esse caminho devido ao portfólio utilizado ter uma capacidade considerável de biogás, que apesar de ser uma tecnologia cara, apresenta baixos impactos socioambientais (definido como da mesma ordem de grandeza da biomassa de cana). Neste caso, para cenários com maior consideração do impacto socioambiental, o modelo opta por gastar mais e implantar as usinas de biogás a fim de atender a restrição socioambiental.

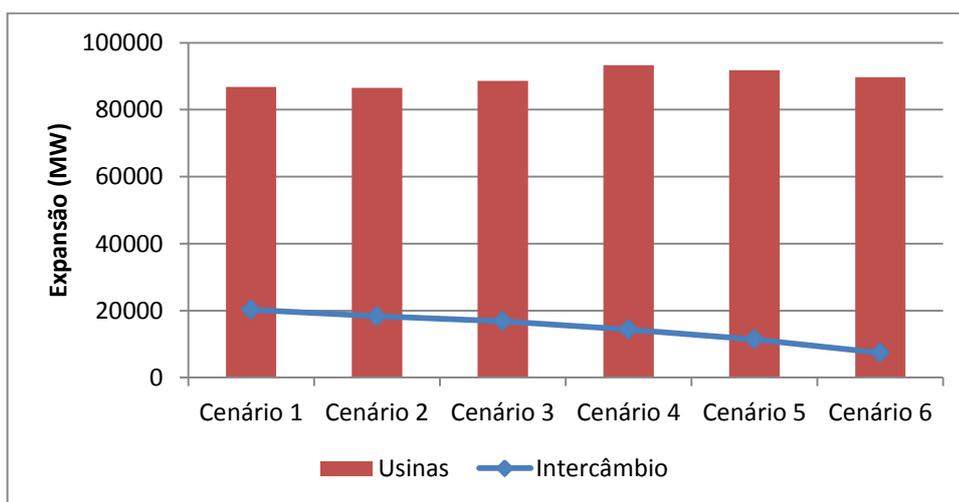


Figura 20. Expansão da capacidade de geração total para cada cenário avaliado de 2016-2030.

Para uma visão mais detalhada do que ocorre com a expansão da capacidade instalada de 2016 a 2030, a mesma foi avaliada por fonte, para os diversos cenários considerados, conforme a Figura 21. As fontes óleo combustível e diesel não estão presentes nessa análise, pois não foi observada a expansão dessas fontes para nenhum dos cenários.

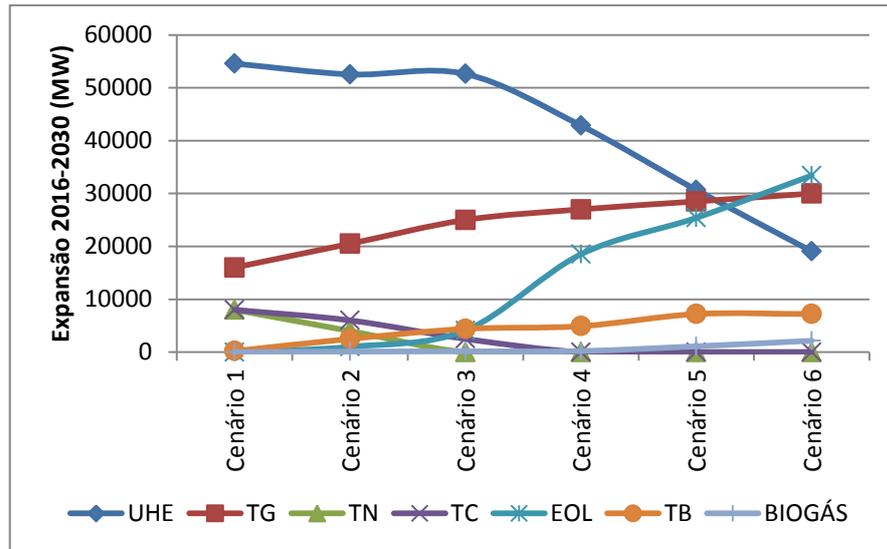


Figura 21. Expansão da capacidade de geração por fonte para cada cenário avaliado de 2016-2030.

Pela Figura 21, percebe-se que a medida restringem-se os impactos socioambientais (do cenário 1 para o cenário 6), as usinas classificadas no estudo de CEPEL [57] como mais impactantes, ou seja, as termelétricas nuclear e à carvão e a fonte hidráulica, tem suas expansões reduzidas. Por outro lado, as usinas que têm o menor impacto socioambiental, como eólica, biogás e gás natural aumentam sua participação na matriz elétrica. Do cenário 1 para o 6, as expansões em projetos eólicos aumentam em 33400 MW, os de gás natural em 14000 MW, os de biomassa em 7000MW e os de biogás em 2150 MW. Por outro lado, as expansões em termelétricas à carvão, nuclear e a fonte hidráulica, reduzem cerca de 8000 MW, 8000MW e 35500 MW, respectivamente.

Com base na curva de eficiência (Figura 17) e nos resultados da Figura 21, o decisor obtém informações importantes para escolher a solução mais apropriada para planejamento de longo prazo da expansão da geração.

7.1. Mix de expansão

A inserção das variáveis socioambientais no “MELP-SUSTENTÁVEL” gera mudanças na indicação do planejamento ótimo da expansão do setor elétrico fornecida pelo modelo. A Figura 22 mostra a participação das diversas fontes de geração de energia elétrica na expansão ocorrida no período de 2016-2030 para os cenários 1 a 6.

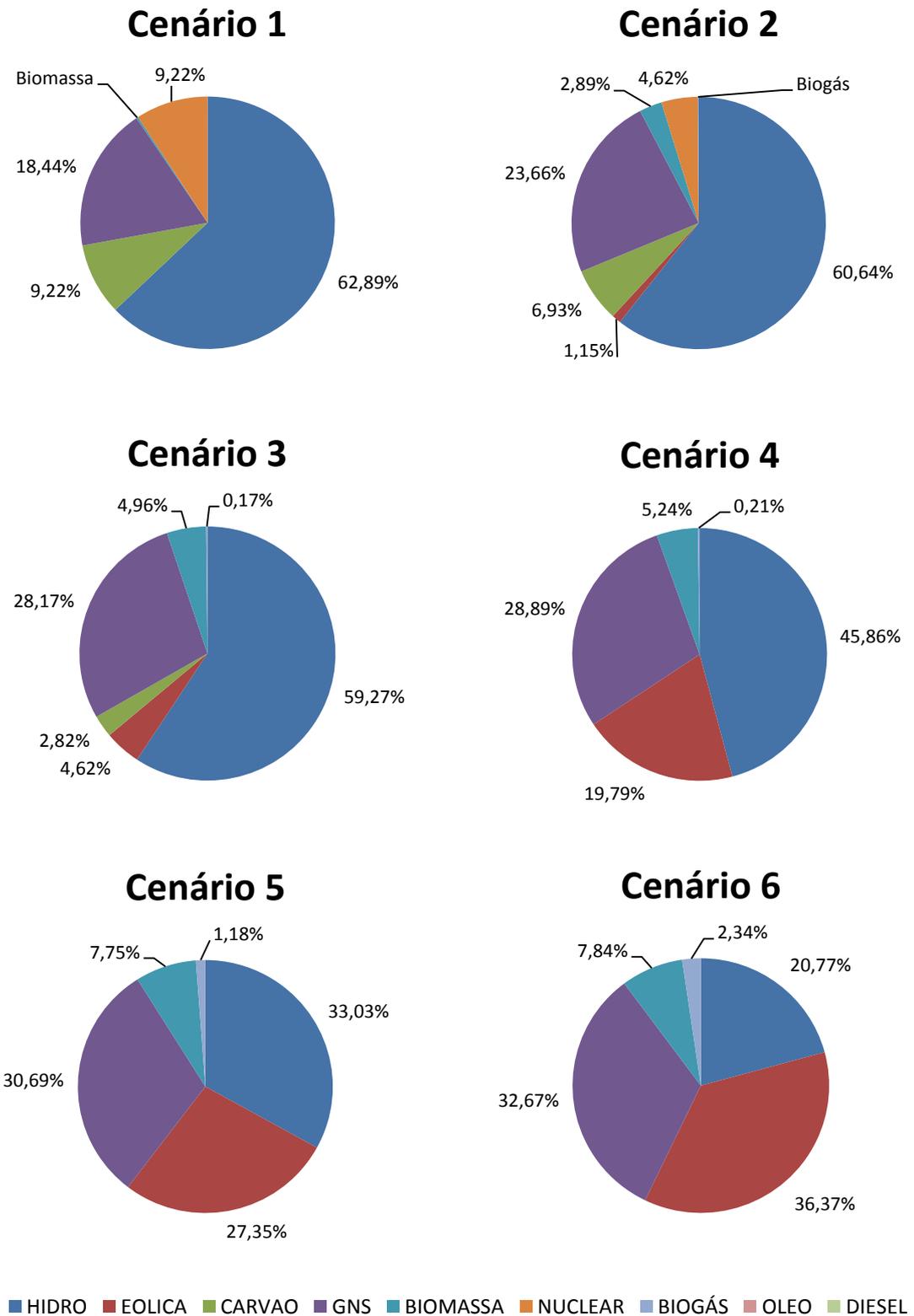


Figura 22. Mix de expansão para os cenários de 2016-2030.

Pode-se perceber que, ao levar em consideração a restrição socioambiental, ocorre uma maior expansão de usinas eólicas, térmicas a gás natural e biogás, e uma menor expansão de usinas termelétricas a nuclear e carvão e hidrelétricas a medida que há uma maior redução no valor de impacto admitido pela restrição. Foi possível verificar que a partir do cenário 3, não houve expansão da fonte nuclear e que a partir do cenário 4, a expansão da fonte a base de carvão também foi substituída por fontes de geração de energia elétrica menos impactantes. O crescimento da participação da fonte eólica e da fonte térmica a gás é considerável do cenário 1 para o cenário 6, de: 0% para 36,37% e 18,44% para 32,67%, respectivamente.

Devido a avaliação mais criteriosa na definição do índice de impacto socioambiental proposto pelo CEPEL [57], os impactos sociais para as usinas hidrelétricas se tornam mais relevantes e a fonte hidráulica, apesar de renovável, é penalizada. Esse fato leva a uma redução considerável na expansão da fonte hidráulica do cenário 1 para o cenário 6: de 62,89% para 20,77%. A redução da expansão também é explicada pela consideração do impacto socioambiental das interligações, uma vez que muitas hidrelétricas são instaladas em locais afastados dos centros consumidores. Dessa forma, os impactos socioambientais das interligações estão associados as usinas hidráulicas e prejudicam a sua expansão em cenários com maior restrição socioambiental.

Para o problema sem restrição socioambiental (Cenário 1) a solução foi obtida com um custo total de MR\$ 263827,26 e um índice de impacto socioambiental (IAEXP) de 0,166. Comparativamente ao cenário 1, o cenário 6 (mínimo socioambiental viável) representa uma redução de cerca de 46% dos impactos socioambientais a um custo total 14% superior. A Tabela 31 mostra como se dá a variação de custo em relação à redução dos impactos para os cenários avaliados.

Tabela 31. Relação entre o impacto socioambiental e o custo total.

Cenário	Status	Índice de Impacto Socioambiental	Redução do Impacto	Custo (MR\$)	Aumento do Custo
Cenário 1	Mínimo econômico viável	0,166	-	263827,26	-
Cenário 2	↓	0,152	8,12%	264714,05	0,34%
Cenário 3		0,134	18,81%	266897,86	1,16%
Cenário 4		0,114	30,95%	272075,82	3,13%
Cenário 5		0,102	38,40%	282806,42	7,19%
Cenário 6	Mínimo socioambiental viável	0,089	46,07%	301256,74	14,19%

Mesmo com a consideração de critérios socioambientais, o custo continua a ser um critério fundamental na tomada de decisão. Por mais que o objetivo seja tornar a matriz elétrica sustentável há um custo por essa mudança. Em muitos casos a expansão de fontes renováveis só é possível com incentivos, devido ao alto custo dessas tecnologias.

7.2. Avaliação do Portfólio

Conforme mencionado na seção de dados de entrada, o presente estudo considerou um portfólio baseado no PNE, com algumas adições para facilitar a visualização dos efeitos da nova metodologia multicritério. A Figura 23 mostra quanto foi utilizado da capacidade disponível para os cenários mínimo econômico viável (cenário 1) e mínimo socioambiental viável (cenário 6).

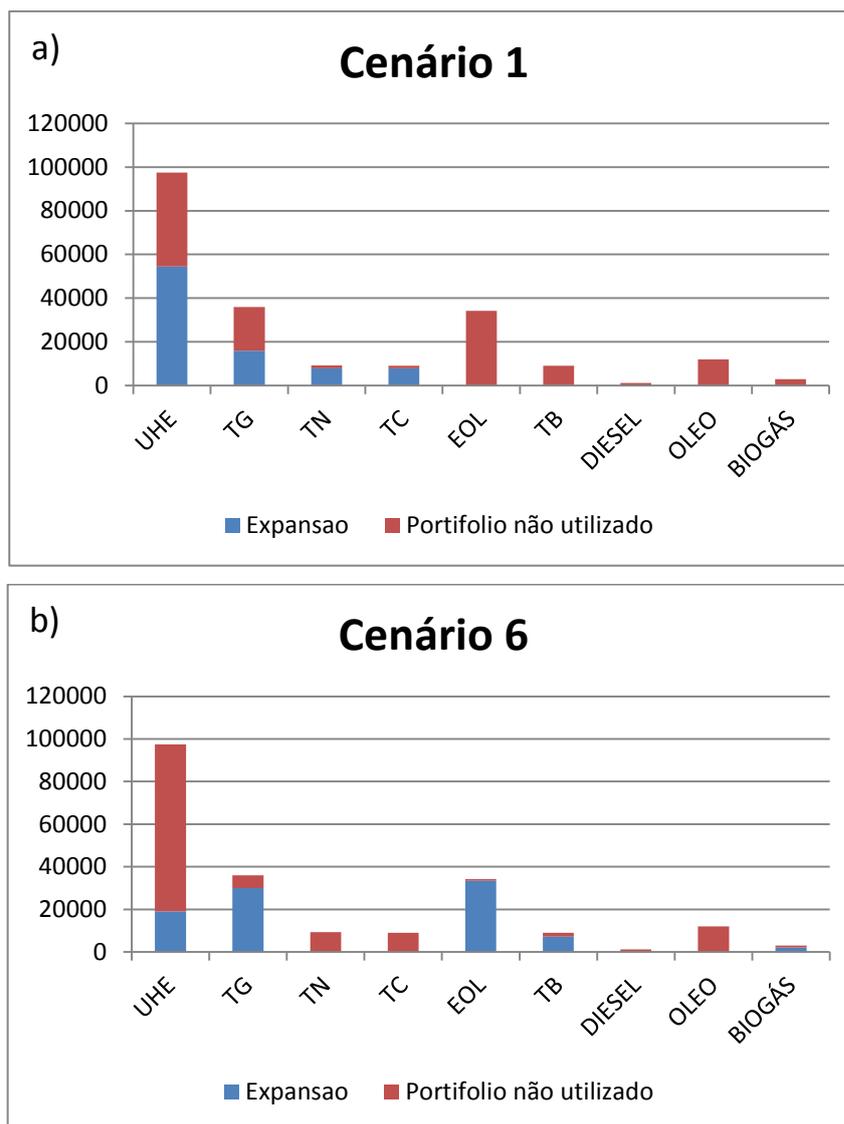


Figura 23. Utilização do portfólio disponível para os cenários extremos em todo horizonte de planejamento a) cenário 1 e b) cenário 6.

Pode-se observar pela Figura 23 novamente que a restrição de impactos socioambientais remete em utilizar mais aquelas que têm o menor índice de impacto (definido em [57]). Ainda analisando a Figura 23 ainda há um pouco de capacidade de biomassa e gás natural a ser explorado. Os projetos de usina de fontes eólica e biogás do portfólio utilizado neste estudo foram implantados em grande escala, quase que a totalidade de projetos oferecidos. A adição de usinas desses tipos de fontes apresentam baixo impacto socioambiental, e provavelmente resultaria na utilização de toda a capacidade adicional instalada nos cenários mais ambientais. Outra fonte renovável e com baixo impacto socioambiental que poderia tornar o mix mais sustentável é a fonte solar, amplamente discutida na literatura. Para esse

trabalho essa fonte não foi considerada, pois não se dispunha de análise dos impactos da mesma no relatório do CEPEL [57], além da pouca expressividade desta fonte no PNE 2030, documento de apoio dessa dissertação.

Com relação as características técnicas da usina, é muito importante que os fatores de participação e capacidade sejam considerados, uma vez que apesar de economicamente atraente, a eficiência de uma usina pode torná-la mais cara. Um exemplo é a usina eólica, que apresenta baixo custo de instalação e custo nulo de operação, mas não é considerada no cenário econômico, uma vez que o seu fator de capacidade é muito baixo e implicaria na instalação de inúmeras centrais eólicas para atingir a capacidade desejada.

7.3. Indicadores socioambientais

Os índices socioambientais atribuídos para cada fonte de geração de energia elétrica sintetizam em um único valor os impactos referentes às etapas de instalação e operação ao longo de toda a sua vida útil. Dessa forma, não é possível verificar quanto impacto é resultante da fase de geração de energia elétrica de uma dada fonte, ou seja, se mais energia elétrica for produzida, mais impacto deveria ser gerado. Para alcançar esse tipo de análise seria necessário desenvolver índices de impacto socioambientais separados por etapa: instalação e operação. Como consequência da ausência de valores distintos por etapas, os índices definidos nesse estudo de caso não permitem uma relação direta do critério socioambiental com a questão temporal, ou seja, estes não influenciam na determinação de quando certo tipo de usina deverá ser instalada dentro do horizonte do planejamento.

Na forma como o problema foi tratado, o critério econômico é o determinante temporal do planejamento de longo prazo, conforme a Figura 24. O critério socioambiental e o critério econômico determinam quais as fontes de geração de energia elétrica deverão estar presentes no mix de expansão, mas é a taxa de desconto do critério econômico que determina quando é melhor investir em cada tipo de fonte. Para o cenário 6 essa questão fica evidente, uma vez que a fonte eólica é essencial para que o mix seja sustentável, no entanto quase todas as usinas estão locadas para o final do período de planejamento. Isso ocorre exatamente pelo fato de que o critério econômico é o responsável por essa decisão, visto que a fonte

eólica é uma solução cara e, portanto só será utilizada ao final do período. Enquanto não se define uma formulação para que o critério socioambiental também determine quando uma dada usina deve ser instalada, uma melhoria para a distribuição dessas fontes ao longo do período de planejamento pode ser obtida por meio de restrições de instalação máxima da fonte por ano/período. Dessa forma pode-se incorporar a questão técnica e também socioambiental para evitar a construção de um grande número de usinas de uma mesma fonte, em um mesmo ano.

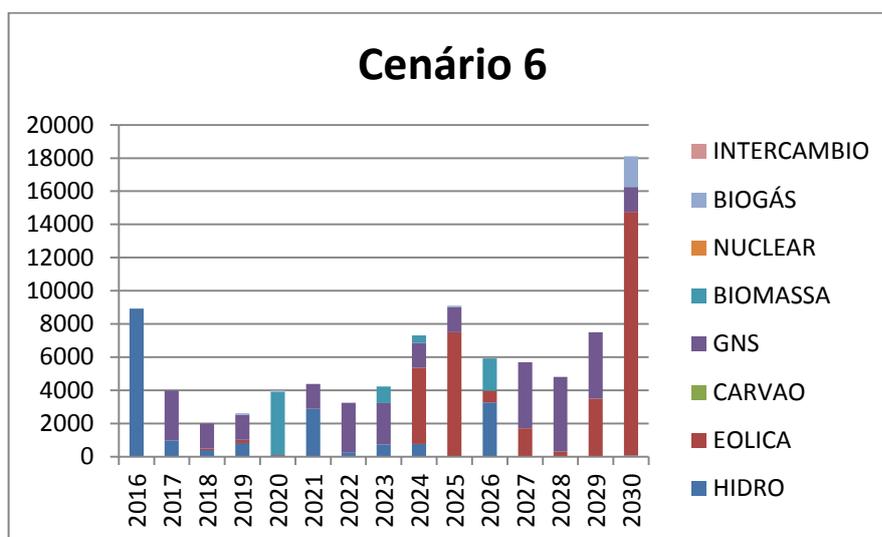


Figura 24. Mix de expansão anual para o cenário 6 (mínimo socioambiental viável)

7.4. Expansão da Transmissão

Conforme comentado anteriormente, para o estudo em questão, a evolução da capacidade do intercâmbio para o período 2016-2030 se mostrou decrescente a medida que restringe-se o impacto socioambiental. A definição de um impacto socioambiental associado a transmissão é importante visto que a construção de uma linha de transmissão que percorre grandes distâncias tem um impacto socioambiental considerável que não deve ser desprezado.

Em adição as análises já realizadas, a relaxação linear do problema inteiro foi aplicada para o cenário 6 em duas situações: com e sem a consideração do índice de impacto socioambiental para o intercâmbio. A Figura 25, mostra a importância em se considerar o impacto do intercâmbio juntamente com o impacto das fontes de geração de energia elétrica. Para o caso analisado, é possível verificar uma redução

de cerca de 60% da capacidade das linhas de transmissão quando o impacto das mesmas é considerado.

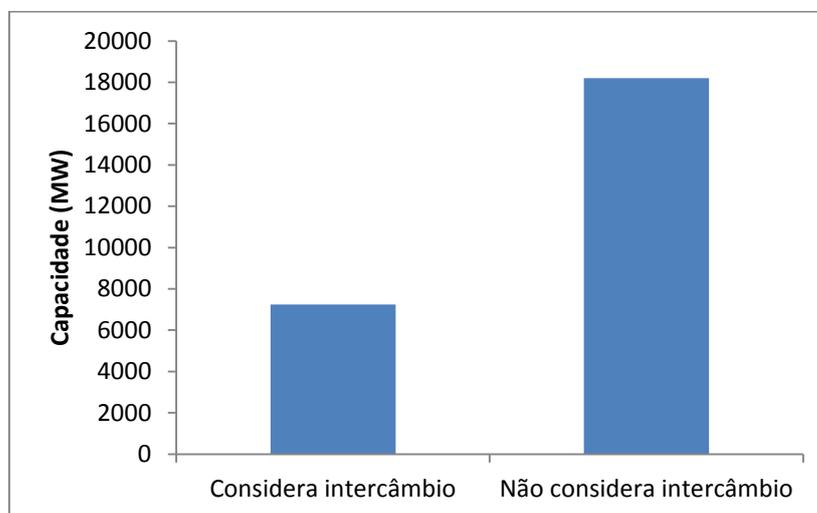


Figura 25. Capacidade do intercâmbio considerando ou não o impacto das linhas de transmissão.

Quanto ao mix de expansão de 2016-2030 de forma coerente a consideração do impacto socioambiental das linhas de transmissão resulta numa redução da participação da fonte hidrelétrica, e no aumento da participação de gás biogás e centrais eólicas, conforme a Figura 26. Com a consideração do impacto do intercâmbio, a capacidade da expansão de 2016-2030 para as usinas reduz cerca de 3,76%. Parte dessa redução pode estar associada à redução das perdas totais nas linhas de transmissão, que no problema proposto varia de 2-4% em determinadas interligações. Além disso, o custo aumenta com a consideração dos impactos socioambientais no intercâmbio, de MR\$290718,82 para MR\$301256,74.

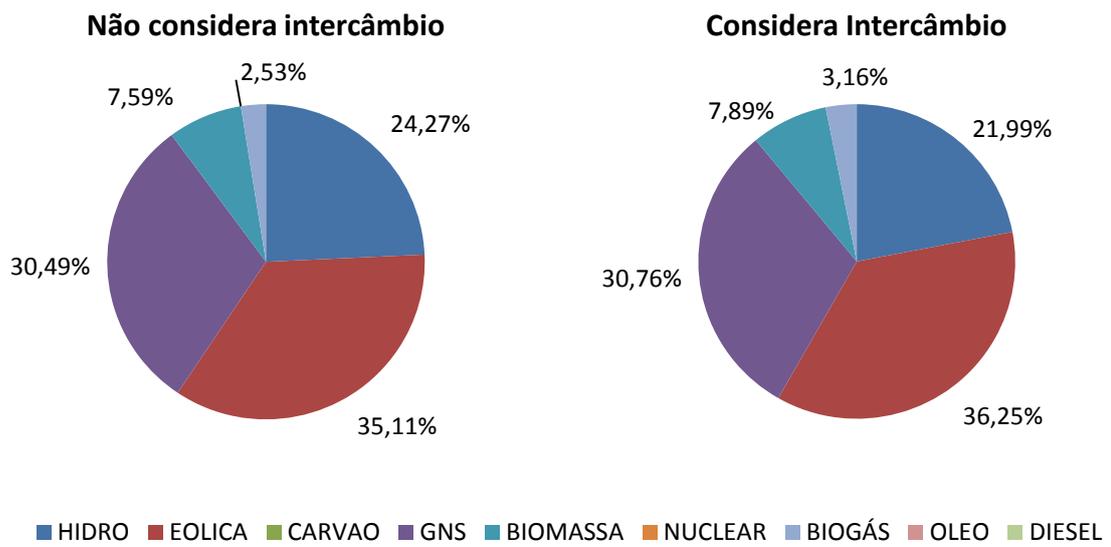


Figura 26. Mix de expansão para os cenários de 2016-2030, considerando ou não o impacto das linhas de transmissão.

8. Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho foi uma adaptação do modelo MELP para uma modelagem multiobjetivo utilizando o tradicional método *a posteriori* das restrições, com o intuito de desenvolver uma ferramenta computacional mais adequada para estudos de planejamento da expansão sustentável. O objetivo incluído na formulação do MELP consiste em minimizar os impactos socioambientais de todas as fontes de geração de energia elétrica disponíveis no portfólio candidato para expansão (previamente definidos e representados por meio de indicadores), ao longo do horizonte de planejamento de longo prazo. Esse objetivo foi tratado como uma restrição, devido ao problema de grande porte que o SIN representa. Através do caso exemplo foi possível constatar a mudança de decisão no planejamento da expansão quando os critérios socioambientais são considerados. A curva de eficiência definida com base na metodologia proposta oferece ao decisor a possibilidade de analisar diretamente o impacto da restrição socioambiental nos custos totais de expansão e operação do sistema elétrico.

O estudo de caso do modelo matemático MELP-SUSTENTÁVEL em um caso real apontou resultados interessantes de como a expansão do sistema varia em função da crescente preocupação com impactos socioambientais. É possível observar que a matriz energética brasileira se modifica ao longo dos anos em que a geração hidrelétrica, as fontes a carvão mineral e nuclear tendem a diminuir a sua presença no mix de fontes, dando lugar aos projetos eólicos, ao gás natural, biomassa e biogás. Apesar de ser uma fonte considerada limpa, principalmente em termos de emissão de gases atmosféricos, a geração hidrelétrica apresenta uma grande redução de expansão quando outros critérios são levados em consideração, principalmente relacionados aos impactos sociais (como o deslocamento das populações na região onde será implantada a usina).

Com relação a literatura existente o presente trabalho considera um número maior de indicadores socioambientais além daqueles amplamente discutidos na literatura, de forma a melhor representar o cenário nacional. A consideração de indicadores relacionados a populações ribeirinhas e tradicionais, por exemplo, não é considerada em grande parte dos estudos que utilizam modelos matemáticos, mas sua importância é crucial visto que o maior potencial hidrelétrico do Brasil está

localizado em uma região que compreende essas populações. Além disso, a consideração do ciclo de vida na definição dos indicadores também é de extrema importância para não subdimensionar os impactos das fontes de geração de energia elétrica.

A metodologia apresentada permite que critérios socioambientais sejam considerados de forma sistemática no planejamento de longo prazo da expansão de geração de energia elétrica. Para que vários estudos sejam comparáveis, é necessário que a metodologia e os critérios sejam padronizados. O estudo de caso confirmou a aplicabilidade do modelo e o seu potencial para auxiliar a tomada de decisão pautada no desenvolvimento sustentável, com a consideração de critérios socioambientais.

Ao evidenciar a importância dessa abordagem, este trabalho pretende motivar a consideração das questões socioambientais na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração elétrica, deixando de ser apenas um fator de atraso na implantação das usinas. No entanto, o planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro não deve ser baseado somente no resultado de saída do modelo, sendo estes resultados o ponto de partida para a tomada de decisão. A questão socioambiental também deve entrar em outras etapas do processo a fim de considerar outros impactos específicos que não foram considerados no modelo.

9. Discussão e Recomendações

Os impactos definidos neste trabalho foram relevantes para a representação da realidade nacional. No entanto, a utilização de outro conjunto de critérios ou até a adição de critérios diferentes dos adotados nesta dissertação, é um trabalho de importante, uma vez que será possível comparar os resultados referentes a composição do mix de expansão com base em outros critérios. Além disso, a atualização dos valores adotados para os critérios definidos em CEPEL [57] é essencial a fim de atingir uma melhoria contínua na incorporação da complexa dimensão socioambiental de forma sistemática no planejamento de longo prazo do sistema elétrico brasileiro.

Outra análise que pode ser realizada está relacionada à metodologia multicritério utilizada. Uma sugestão seria aprimorar a construção de uma formulação matemática que considere os dois objetivos explícitos: minimizar o custo total e minimizar os impactos socioambientais. Para tal, seria necessária a definição de diferentes critérios socioambientais, indisponíveis de forma explícita na literatura brasileira, o que levaria a execução de outro trabalho. Os critérios deverão ser distintos para as duas etapas: investimento e operação. Para finalizar seria necessário definir um valor para o impacto socioambiental do déficit, tema que tem pouca expressividade na literatura. Outras recomendações a fim de detalhar mais o estudo consistem em:

- Levar em consideração da localidade em que o impacto socioambiental ocorre. Como motivação pode-se cita o estudo de Freeman [108], que aponta a diferença existente para a valoração dos impactos socioambientais em função da localidade dos mesmos. Para o indicador área utilizada, por exemplo, não importa apenas o valor numérico de quantos km² serão utilizados para instalação da fonte, mas também o uso e ocupação do solo da região utilizada. É necessário avaliar também em que bioma a mesma se insere [48]. Dessa forma, espera-se que regiões de Mata Atlântica tenham uma maior importância se comparado ao bioma do serrado, em termos de biodiversidade. Na dimensão social, a densidade demográfica da região pode impactar em dois quesitos: na quantidade de pessoas removidas para alagamento de uma região, no caso da implantação da fonte hidrelétrica, ou na

quantidade de pessoas sujeitas a doenças respiratórias, em função operação das térmicas. Em ambos os casos, quando a maior densidade demográfica no local de implantação, maior o impacto social.

- Implementar uma taxa de desconto socioambiental para que esta dimensão esteja relacionada com a variável temporal e assim traduzir o efeito dos impactos ao longo do tempo, sejam estes reversíveis, irreversíveis, cumulativos, e etc. Com isso, será possível ter uma visão melhor sobre quando é preferível impactar o meio ambiente, seja impactando as gerações atuais ou as gerações futuras.
- Calcular os indicadores para as tecnologias de biogás, óleo combustível, óleo diesel e para o intercâmbio uma vez que esses valores foram estimados para o estudo em questão;
- Introduzir a fonte solar e definir o seu índice de impacto. Como a fonte tem baixos impactos socioambientais associados, espera-se que ocorra uma considerável modificação no mix de expansão;
- Consideração de restrições que limitem o impacto, não apenas minimiza os mesmos. Como há outros impactos envolvidos, como biodiversidade, impactos sociais entre outros, pode ocorrer do SIN minimizar, mas ainda assim emitir mais GEE do que o permitido pelo Protocolo de Paris. Por esse motivo pode ser interessante contar com restrições. Como por exemplo: limite de área utilizada, diversificação mínima do mix, limite de emissões (conforme estudo de [38]);
- Como a metodologia envolve vários fatores subjetivos (valoração dos indicadores por fonte e pesos entre os indicadores), deve-se incluir uma variedade de especialistas de diferentes áreas. Em adição a isso, é interessante realizar uma análise de sensibilidade, a fim de verificar como o resultado do modelo é afetado em função das preferências dos decisores;

- Separação dos impactos entre instalação (investimento, para a nomenclatura do MELP) e operação e também entre as dimensões da sustentabilidade (social e ambiental);
- Contabilizar os impactos separadamente após a definição do mix pelo modelo MELP. De forma a quantificar os impactos quantitativos: quanto será emitido pelo plano, quanto de área será utilizada, entre outros;
- Considerar a variação do custo das fontes de geração de energia elétrica ao longo do tempo, uma vez que os custos das fontes renováveis, como eólica e solar, tem a tendência de diminuir ao longo do tempo e tornar essas fontes mais competitivas. Por outro lado, os custos das fontes convencionais podem sofrer aumento de custo uma vez que as reservas de combustíveis estão sendo constantemente consumidas [51,85].
- Definição de indicadores para as usinas já existentes, uma vez que pode ser um dos objetivos a modernização ou substituição de usinas, de forma a permitir ampliar o parque termelétrico sem grandes aumentos nos impactos socioambientais [59]. Outra questão é contabilizar os impactos das usinas existentes, fato que pode determinar mudanças mais imediatas para um mix de expansão mais sustentável;
- Em uma análise mais detalhada, pode-se avaliar a valoração dos indicadores para cada projeto, de forma a penalizar corretamente pela tecnologia e tamanho da usina. No estudo foram determinados indicadores genéricos, em o impacto se mostra maior em função de uma maior capacidade da usina. Para o propósito de longo prazo do estudo e as poucas informações que estão disponíveis sobre o portfólio, essa representação é coerente. No entanto, dependendo do nível de detalhe requerido no estudo, pode ser interessante verificar as diferenças entre as tecnologias dentro da utilização de um mesmo combustível. Como exemplo pode-se citar a utilização do ciclo combinado ou simples para o carvão, que apresenta intensidades diferentes de impacto. Pode-se também realizar uma hierarquização dentre as opções de tecnologia para cada fonte.

Todas essas recomendações são temas de pesquisas que permitem realizar uma comparação com a metodologia aqui utilizada e enriquecer o debate em torno definição de uma metodologia padronizada para o planejamento de longo prazo da geração de energia elétrica. É importante também se atentar a sempre atualizar os valores de impacto considerados pelos estudos.

10. Referências

- [1] CASTRO, N.J.;DANTAS, G.A.;TIMPON, R.R. **A construção de Centrais Hidroelétricas e o Desenvolvimento Sustentável**. Economia e Energia, ano XV, n. 81, 2011.
- [2] HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J. **Climate change: The IPCC scientific assessment**. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [3] IPCC—INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007**, Assessment Report Four, 2007.
- [4] SAN CRISTÓBAL, J.R. **Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method**. Renewable Energy, v.36, pp. 498–502, 2011.
- [5] HEINRICH, G.;BASSONC, L.; COHENA, B.; HOWELLS, M.; PETRIEA, J. **Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty**. Energy, v.32, pp. 2350-2369, 2007.
- [6] SANTOYO-CASTELAZO, E.; AZAPAGIC, A. **Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects**. Journal of Cleaner Production, v. 80, pp. 119-138, 2014.
- [7] EVANS, A., STREZOV V.; TIM J.EVANS. **Comparing the sustainability parameters of renewable, nuclear and fossil fuel electricity generation**. Technologies. World Energy Council for Sustainable Energy, Congress Papers, Montreal, Canada, v. 27, 2010.
- [8] BEGIC, F.; AFGAN, N.H. **Sustainability assessment toll for the decision making in selection of energy system – Bosnian case**. Energy, v. 32, pp. 1979-1985, 2007.
- [9] AFGAN, N.H.; CARVALHO, M.G.; HOVANOV, N.V. **Energy system assessment with sustainability indicators**. Energy Policy, v.28, pp. 603-612, 2000.
- [10] AFGAN, N.H.; CARVALHO, M.G. **Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants**. Energy, v.27, pp. 739-755, 2002.
- [11] BECCALI, M.;CELLURA, M.;MISTRETTA, M. **Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology**. Renewable Energy, v. 28, pp. 2063-2087, 2003.
- [12] CHATZIMOURATIDIS, A.I.; PILAVACHI, P.A. **Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process**. Energy Policy, v.37, pp. 778-787, 2009.
- [13] KAYA T.; KAHRAMAN,C. **Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul**. Energy, v. 35, pp. 2517-2527, 2010.
- [14] VARUN; PRAKASH, R.; BHAT,I.K. **Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, pp. 2716-2721, 2009.
- [15] LA ROVERE, E. L.; SOARES, J. B.; OLIVEIRA, L. B.; LAURIA, T. **Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to**

support decision making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.14, pp. 422-429, 2010.

[16] DEMIRTAS, O. **Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning.** International Journal of Energy Economics and Policy, v. 3, pp.23-33, 2013.

[17] KOWALSKI, K.; STAGL, S.; MADLENER, R.; OMANN, I. **Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis.** European Journal of Operational Research, v.197, pp. 1063-1074, 2009.

[18] RIBEIRO, F.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. **Evaluating future scenarios for the power generation sector using a multi-criteria decision analysis (MCDA) tool: The Portuguese case.** Energy, v. 52, pp. 126-136, 2013.

[19] HEINRICH, G.; BASSONC, L.; COHENA, B.; HOWELLS, M.; PETRIEA, J. **Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty.** Energy, v.32, pp. 2350-2369, 2007.

[20] VILA, C. U. **Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas Elétricos e Gás Natural com Critérios de Desenvolvimento Energético Sustentável.** Tese D.Sc, IFI, Itajubá, 2009.

[21] DESTER, M. **Propostas para a construção da matriz de energia elétrica brasileira com foco na sustentabilidade do processo de expansão da oferta e segurança no suprimento da carga.** Tese D.Sc, Unicamp, Campinas, 2012.

[22] CONDE, M. R. **Incorporação da Dimensão Ambiental no Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração de Energia Elétrica por meio de Técnicas Multicritério de Apoio a Tomada de Decisão.** Dissertação M.Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

[23] ANTUNES, P.; SANTOS, R.; MARTINHO, S.; LOBO, G. **Estudo sobre sector eléctrico e ambiente - Relatório Síntese.** Centro de Economia Ecológica e Gestão do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa, 2003.

[24] LINARES, P.; ROMERO, C. **A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: economic versus environmental objectives.** Journal of Operational Research Society, v.51, p. 736-743, 2000.

[25] KORONEOS, C.; MICHALIDIS, M.; MOUSSIOPOULOS, N. **Multi-objective optimization in energy systems: the case study of Lesbos Island, Greece.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 8, pp. 91-100, 2004.

[26] MEZA, J. L. C., M. B. YILDIRIM, MASUD, A. S. M. **A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem.** IEEE Transactions on Power Systems, v.22, pp. 871 – 878, 2007.

[27] KAZEMI, S. M.; RABBANI, M. **An Integrated Decentralized Energy Planning Model considering Demand-Side Management and Environmental Measures.** Journal of Energy, pp.1-6, 2013

[28] PIRES, S. H. M.; NUTTI, M. R.; LACORTE, A. C.; FARAH, P. M. K.; SERRAN, F.P.; MENEZES, P.C. **Avaliação Ambiental no Planejamento da Expansão de Sistemas de Energia Elétrica.** XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, 1999.

- [29] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030 – Documento Final**, Brasília, 2007.
- [30] SANTOS, H.L. **Inserção dos Custos Ambientais em um Modelo de Expansão da Geração a Longo Prazo**. Dissertação de M.Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [31] COSTA, F.S; DAMÁZIO, J.M; RAUPP, I.P. **SINV- Sistema para Estudos Energéticos e Sócio-Ambientais de inventários hidroelétricos de bacias hidrográficas**. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2007.
- [32] RAUPP, I.P.; COSTA, F.S; DAMÁZIO, J.M; CHAN, P.D.S. **Propostas de aperfeiçoamento na seleção de alternativas de divisão de quedas em estudos de inventário e a explicitação de suas consequências**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015.
- [33] ZIMMERMANN, M.P. **Aspectos técnicos e legais associados ao planejamento da expansão de energia elétrica no novo contexto regulatório brasileiro**. Dissertação de M.Sc, PUC, Rio de Janeiro, 2007.
- [34] GORENSTIN, B.G.; CAMPODONICO, N.M.; COSTA, J.P., PEREIRA, M.V.F. **Power System Expansion Planning Under Uncertainty**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 8, pp. 129-136,1993.
- [35] ELETROBRÁS. **Plano Diretor de Meio Ambiente do Setor Elétrico 1991/1993**. Rio de Janeiro, v.1, pp.114, 1991
- [36] LISBOA, M. L. V. ;MARZANO, L. G. B. ; SABÓIA, C. H. M. ; MACEIRA, M. E. P. **A mixed-integer Programming Model for Long Term Generation Expansion Planning of the Brazilian system**. Proceedings of the 16th PSCC, Glasgow, Escócia, 2008.
- [37] IBM ILOG - AMPL/CPLEX **A user's guide**, pp.1-102, 2008.
- [38] SABÓIA, C. H. M.; LISBOA, M. L. V.; MARZANO, L. G. B.; MACEIRA, M. E. P. **Modelo de Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo do Sistema Elétrico Brasileiro Considerando Restrições Ambientais**. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, 2012.
- [39] SABÓIA, C. H. M. **Um algoritmo branch-and-price para instâncias de grande porte do modelo brasileiro de planejamento da expansão da geração de energia elétrica a longo prazo**. Tese D.Sc, COPPE/PSC/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [40] HACATOGLU, K.A. **Systems Approach to Assessing the Sustainability of Hybrid Community Energy Systems**. Tese D.Sc, University of Ontario, 2014.
- [41] TAINTER, J.A. **The collapse of complex societies**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1988.
- [42] BROWN, M.T.; ULGIATI, S. **Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems**. Journal of Cleaner Production,v.10, pp.321–334, 2002.

- [43] WCED- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**. Oxford University Press, Oxford, 1987.
- [44] MEADOWS, D.H.; MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W.W. **The Limits to Growth: a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. New York: Universe Books.
- [45] HUGÉ, J.; WAAS, T.; EGGERMONT, G.; VERBRUGGEN, A. **Impact assessment for a sustainable energy future—Reflections and practical experiences**. Energy Policy, v. 39, pp. 6243-6253, 2011.
- [46] VERBRUGGEN, A. **A normative structure for the European energy market**. Energy Policy, v.25, pp.281–292, 1997.
- [47] SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Ed. Garamond, Rio de Janeiro; 2000.
- [48] CESARETTI, M. DE A. **Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos**. Dissertação de M.Sc., UFABC, São Carlos, SP, 2010.
- [49] GOLDEMBERG, J.;LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- [50] CONAMA. **Resolução CONAMA nº 001**, de 23 de Janeiro de 1986.
- [51] IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Environmental and Health Impacts of Electricity Generation: a comparison of the environmental impacts of Hydropower with those of other generation technologies**. Relatório Técnico, pp. 221, 2002.
- [52] SANCHEZ, L.E. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**. Editora Oficina de Textos, 2013.
- [53] MANZINI, E.;VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Editora da Universidade, 2002.
- [54] STAMFORD, L.J. **Life cycle sustainability assessment of electricity generation: a methodology and an application in the UK context**. Dissertação D.Sc, University of Manchester, Inglaterra, 2012.
- [55] STAMFORD, L.J.;AZAPAGIC, A. **Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070**. Energy for Sustainable Development, v. 23, pp. 194–211, 2014.
- [56] MIRANDA, J.V.M. **Aplicação da análise do ciclo de vida na avaliação de impactos ambientais urbanos**. Monografia de conclusão de curso de Engenharia Ambiental, UFF, Rio de Janeiro, 2012.
- [57] CEPEL – CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Levantamento Bibliográfico como Subsídio para Construção de Metodologia para Definição de Índice de Impactos Socioambiental Negativo do Não-Aproveitamento de Potenciais Hidroelétricos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográfica**. Relatório Técnico no. 39240/2011. Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente – DEA, 2011.

- [58] REIS, M.M. **Custos ambientais associados à geração elétrica: hidrelétricas x termelétricas**. Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [59] MEDEIROS, A.M. **Bases metodológicas para a incorporação da variável ambiental no planejamento da expansão termelétrica no Brasil**. Dissertação M. Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [60] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Edição, pp. 243 Brasília, 2005.
- [61] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. Edição, p. 236 Brasília, 2008.
- [62] VERBRUGGEN, A. **Renewable and nuclear power: a common future?** Energy Policy, v.36, pp. 4036–4047, 2008
- [63] ABBASI, S. A. AND ABBASI, N. **Likely adverse environmental impacts of renewable energy sources**. Applied Energy, v. 65, pp. 121-144, 2000.
- [64] GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J.R. **Política energética no Brasil**. Estudos Avançados, v. 19, pp. 215-228, 2005.
- [65] KOIFMAN, S. **Geração e transmissão da energia elétrica: impacto sobre os povos indígenas no Brasil**. Cadernos de Saúde Pública [online], vol.17, pp.413-423, 2001
- [66] EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação Ambiental Integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires**. Relatório Final-sumário Executivo, 2009.
- [67] ALSEMA, E.A.; NIEUWLAAR, E. **Energy viability of photovoltaic systems**. Energy Policy, v. 28, pp. 999-1010, 2000.
- [68] WOLSINK, M. AND SPRENGERS, M. **Windturbine noise: a new environmental threat?** Noise as a public health problem, v. 2, pp. 235-238, 1993.
- [69] PHILLIPS, J. **A quantitative-based evaluation of the environmental impact and sustainability of a proposed onshore wind farm in the United Kingdom**. Renewable and Sustainable Energy Reviews.v.49, pp.1261–1270, 2015.
- [70] WOLSINK, M. **Wind power implementation: The nature of public attitudes: Equity and fairness instead of 'backyard motives'**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 11, Issue 6, p. 1188-1207, 2007
- [71] SAIDUR, R.; RAHIM, N.A; ISLAM, M.R.; SOLANGI, K.H. **Environmental impact of wind energy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, pp. 2423–2430, 2011.
- [72] WEC- WORLD ENERGY COUNCIL.2007 **Survey of Energy Resources**, 2007
- [73] PIRES, L. F. A. **Gestão ambiental da implantação de sistemas de transmissão de energia elétrica – Estudo de caso: Interligação Norte/Sul I**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Niterói, 2005.
- [74] CARVALHO, E.C. **Desenvolvimento de Procedimentos e Métodos para Me**

nsuração e Incorporação das Externalidades em Projetos de Energia Elétrica: Uma Aplicação às Linhas de Transmissão Aéreas. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2005

[75] SILVA, V. C. R. **Planejamento do Sistema de Gestão Ambiental de Linhas de Transmissão Aéreas Localizadas em Área Serrana com Unidade de Conservação.** Tese D.Sc – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

[76] PREECE, A. W.; HAND, J. W.; CLARKE, R. N.; STEWART, A. **Power frequency electromagnetic fields and health. Where's the evidence.** Physics in Medicine and Biology, v.45, pp.139-154, 2000.

[77] OLIVEIRA, L.B. **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil.** Tese D.Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

[78] HAMMOND, A.; ADRIAANSE, A.; RODENBURG, E.; BRYANT, D.; WOODWARD, R. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development.** Washington, D.C.: World Resources Institute, 1995.

[79] ROMERO, M.; ANDRADE, L.; GUIA, G; SILVEIRA, A.L.; MORAIS, V. **Construindo um sistema de indicadores de sustentabilidade intra urbana.** XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional – ANPUR, Salvador, 2005.

[80] ROTMANS, J. **Tools for integrated sustainability assessment: a two-track approach.** The Integrated Assessment Journal, v. 6, pp. 35–57, 2006.

[81] MUSANGO, J. K. **Technology assessment of renewable energy sustainability in South Africa.** Tese D.Sc, Philosophy School of Public Leadership, Stellenbosch University, 2012.

[82] DEL RÍO, P.; BURGUILLO, M. **Assessing the impact of renewable energy deployment on local sustainability: Towards a theoretical framework.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, pp. 1325-1344, 2008.

[83] FERREIRA P.; ARAÚJO, M.; O'KELLY, M.E.J. **The Integration of Social Concerns into Electricity Power Planning: A Combined Delphi and AHP Approach.** Handbook of Power Systems I, pp. 343-364, 2010.

[84] WANG, J.J; JING, Y.Y; ZHANG, C.F; ZHAO. J.H. **Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p.2263 – 2278, 2009.

[85] EL-KORDY, M.N.; BADR, M.A; ABED, K.A; IBRAHIM S.M. **A Economical evaluation of electricity generation considering externalities.** Renewable Energy, v.25, pp. 317-328, 2002.

[86] PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN.G.A. **Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems.** Energy Policy, v. 35, pp. 3316-3326, 2007.

[87] PIRES, S.H.M. **Planejamento ambiental da expansão da oferta de energia elétrica: subsídios para a discussão de um modelo de desenvolvimento sustentável para a Amazônia.** Parcerias Estratégicas, v. 12, pp. 160-184, 2001.

- [88] EC – EUROPEAN COMMISSION. **ExternE, Externalities of Energy**, Vol. 2 – Methodology, 1 ed., Bruxelas e Luxemburgo, Publications of the European Commission, pp.571, 1995
- [89] SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**, N. York, USA: MacGraw-Hill, 1980.
- [90] GAGNON, L.; BÉLANGER; C., UCHIYAMA; Y. **Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001**. Energy Policy, v.30, pp.1267–1278, 2002.
- [91] KREWITT, W.; MAYERHOFER, P.; TRUKENMILLER, A.; FRIEDRICH R. **Application of the Impact Pathway Analysis in the Context of LCA - The Long way from Burden to Impact**. International J. of Life Cycle Assessment, v.3, pp.86 – 94, 1998.
- [92] SEROA DA MOTTA, R. **Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais**, IPEA/MMA/PNUD/CNPq, Rio de Janeiro, 1997.
- [93] SUNDQVIST, T. **What causes the disparity of electricity externality estimates?** Energy Policy, v.32, pp. 1753-1766, 2004.
- [94] FURTADO, R.C. **The incorporation of environmental costs into power system planning in Brazil**. Tese de D.Sc., Imperial College, University of London, Londres, Inglaterra, 1996
- [95] TOLMASQUIM, M.T. (Coordenador) **Metodologias de valoração de danos ambientais causados pelo setor elétrico**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.
- [96] REIS, L.B.; GRIMONI, J. A. B.; CARVALHO, C. E.; BARCAUÍ, A. B.; FURTADO, J. S.; FERRAZ, M. P. R. P.; CRISTIANO, M. J. **Desenvolvimento de sistema para mensuração das externalidades de projetos de linhas de transmissão**. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica, Curitiba, Brasil, 2005.
- [97] BONATTO, F.; SOARES, D. F.; VIEIRA, E. D. R. ; SILVA, G. M.; MEDEIROS, A. M.; MENEZES, P. C. P. ; DAMÁZIO, J. M. **Metodologia para a incorporação da dimensão socioambiental ao planejamento da transmissão de energia elétrica**. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2005, Curitiba. Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2005.
- [98] ANTUNES, C.H.; MARTINS A.G.;BRITO,I. S. **A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning**. Energy, v.29, p.613–627, 2004.
- [99] HOBBS, B.F.; MEIER, P. **Energy Decisions & The Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods**. International Series in Operations Research & Management Science, Kluwer Academic Publishers, Boston/ Dordrecht/London, 2000, 257 pp.
- [100] MIETTINEN, K. M. **Nonlinear Multiobjective Optimization**, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [101] LOKEN, E. **Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 11, pp. 1584-1595, 2007.

- [102] POHEKAR, S.D.; RAMACHANDRAN, M. **Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review.** Renewable and sustainable Energy Reviews, v. 8, pp. 365-381, 2004.
- [103] BRANS, J. P.; VINCKE, P. **Note—A Preference Ranking Organisation Method.** Management Science, v.31, pp.647-656,1985.
- [104] FISCHETTI, M.; LODI, A. **Local Branching.** Mathematical Programming, 98, pp.23-47, 2002.
- [105] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de energia 2006-2015.** MME colaboração EPE, Brasília, 2006.
- [106] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de energia 2024 – Documento Final.** MME colaboração EPE, Brasília, 2015.
- [107] MACHADO JÚNIOR, Z. S. **Modelo da Expansão da Geração a Longo Prazo Considerando Incertezas e Garantia de Suprimento.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,2000.
- [108] FREEMAN, A.M.; ROWE R. **Ranking electric generating technologies with external costs.** The Electricity Journal, v.8, pp. 48-53,1995.

Anexos

ANEXO 1: IMPACTOS SELECIONADOS AO FINAL DO RELATÓRIO 1 DO PRESENTE PROJETO

1.1 Geração Hidrelétrica

Etapa	Componente-Síntese	Impacto
Hidrelétricas		
Planejamento (1)	Modos de Vida	Intensificação do fluxo populacional (imigração e emigração)
		Criação de expectativas junto à população local
		Intensificação de Conflitos existentes em função da realização da obra.
Construção (2)	Ecosistemas Aquáticos	Interferência nos ambientes mantenedores de biodiversidade, de espécies migratórias, endêmicas ou exclusivas (e de outros grupos da fauna vertebrada).
	Ecosistemas Terrestres	Interferência nas características determinantes da manutenção da diversidade biológica (comprometimento dos ecossistemas e de espécies)
	Modos de Vida	Comprometimento das estratégias de sobrevivência
		Comprometimento da socialidade historicamente construída
	Organização Territorial	Interferência nos padrões de assentamento e mobilidade da informação
		Interferência nos fluxos de circulação e comunicação
		Interferência na base territorial relativa a organização político-administrativa
		Interferência na gestão do território
	Base Econômica	Interferência sobre as atividades econômicas
		Interferência sobre as bases de recursos e as potencialidades com destaque para o uso da água
		Interferência nas finanças municipais
	Povos Indígenas e Populações Tradicionais	Potencialização dos conflitos
		Interferência nas condições etno-ecológicas
Operação (3)	Ecosistemas Aquáticos	Interferência no regime de vazões (efeitos a jusante do reservatório);
	Base Econômica	Interferência nas finanças municipais

18 IMPACTOS LISTADOS

1.2 Geração Termelétrica a Gás Natural

Etapa	Impacto	Dimensão
Termelétrica a Gás Natural		
Exploração/ Produção (1)	Risco de acidentes (vazamento, explosão, etc.).	Socioeconômica
	Interferência sobre a biodiversidade marinha (emissão de fluidos e sólidos)	Ambiental
Transporte (gasoduto) (2)	Interferência sobre a biodiversidade (alterações da cobertura vegetal)	Ambiental
	Erosão do solo (terraplanagem e desmatamento durante a construção do duto)	Ambiental
	Risco de acidentes (vazamento, explosão, etc.).	Socioeconômica
	Interferência no uso e ocupação do solo	Socioeconômica
Tratamento (3)	Interferência sobre a qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Risco de acidentes (vazamento, explosão, etc.).	Socioeconômica
Construção da Usina (4)	Interferência sobre qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Poluição sonora	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (alterações da cobertura vegetal)	Ambiental
	Interferência da organização sócio-cultural e política da região	Socioeconômica
	Interferência no uso e ocupação do solo	Socioeconômica
	Intensificação das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento	Ambiental
	Intensificação da demanda por serviços públicos	Socioeconômica
	Risco de acidentes (vazamento, explosão, etc.).	Socioeconômica
Operação da Usina (5)	Interferência na biodiversidade (emissões aéreas de poluentes/partículas)	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento - <i>sistema aberto</i>)	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento da água e purgas de processos).	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade da água (temperatura e oxigênio dissolvido) no corpo receptor (produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento - <i>sistema aberto</i>)	Ambiental

	Interferência sobre a qualidade da água (teor de sólidos suspensos e dissolvidos) no corpo receptor (produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento da água e purgas de processos).	Ambiental
	Interferência sobre qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Névoa quimicamente ativa (biocidas e agentes anticorrosivos) devido à produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento considerando a tecnologia <i>Sistema fechado/torre úmida</i>	Ambiental
	Contribuição ao aquecimento global (emissão de gases de efeito estufa)	Ambiental
	Poluição sonora	Ambiental
	Interferência na organização sócio-cultural e política da região	Socioeconômica
	Intensificação das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento	Socioeconômica
	Interferência sobre a saúde (emissões aéreas de poluentes/partículas)	Socioeconômica
	Interferência no uso e ocupação do solo	Socioeconômica
	Intensificação da demanda por serviços públicos	Socioeconômica
Descomissionamento (6)	Interferência sobre o uso do solo (deposição de resíduos sólidos)	Ambiental

31 IMPACTOS LISTADOS

1.3 Geração Termonuclear

Etapa	Impacto	Dimensão
Nuclear		
Mineração (1)	Interferência na Qualidade do Ar (Emissão de particulados e gases radioativos para a atmosfera)	Ambiental
	Interferência na qualidade da água (efluentes líquidos)	Ambiental
	Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	Ambiental
	Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação	Ambiental
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
	Risco de acidentes (não radiológicos)	Socioeconômica
Conversão (2)	Interferência na Qualidade do Ar (Emissão de particulados e gases radioativos para a atmosfera)	Ambiental
	Interferência na qualidade da água (efluentes líquidos)	Ambiental
Enriquecimento (3)	Contribuição para o Aquecimento Global (Emissões fugitivas de clorofluorcarbonetos)	Ambiental
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
Fabricação do Combustível (4)	Interferência na qualidade da água (efluentes líquidos)	Ambiental
	Interferência sobre a saúde (exposição dos trabalhadores à radiação)	Socioeconômica
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
Produção de Energia (5)	Interferência na Qualidade do Ar (Emissão de particulados e gases radioativos para a atmosfera)	Ambiental
	Interferência na qualidade da água (efluentes líquidos)	Ambiental
	Interferência na qualidade da água (aquecimento da água)	Ambiental
	Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	Ambiental
	Interferência na fauna e flora	Ambiental
	Alteração do solo	Ambiental
	Poluição Sonora	Ambiental
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
	Risco de Acidentes	Socioeconômica
Interferência com a população	Socioeconômica	

Construção (6)	Interferência na Qualidade do Ar (emissão de poeira)	Ambiental
	Interferência na fauna e flora	Ambiental
	Alteração do solo	Ambiental
	Poluição Sonora	Ambiental
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
	Interferência com a população	Socioeconômica
	Risco de Acidentes	Socioeconômica
Descomissionamento (7)	Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	Socioeconômica
	Interferência sobre a saúde (exposição dos trabalhadores à radiação)	Socioeconômica
	Risco de Acidentes (com exposição à radiação)	Socioeconômica
Reprocessamento (8)	Interferência na Qualidade do Ar (Emissão de particulados e gases radioativos para a atmosfera)	Ambiental
	Interferência na qualidade da água (efluentes líquidos)	Ambiental
	Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	Ambiental
	Interferência sobre a Saúde (inalação/contato/ingestão de produtos tóxicos)	Socioeconômica
	Risco de acidentes (com exposição à radiação)	Socioeconômica
Deposição de Rejeitos Radioativos (9)	Aversão ao risco e relutância das comunidades de aceitar a implementação de repositórios de rejeitos radioativos nas proximidades.	Socioeconômica
	Risco de Acidentes (vazamento radiativo)	Socioeconômica
Transporte (10)	Risco de acidentes (com exposição à radiação)	Socioeconômica

41 IMPACTOS LISTADOS

1.4 Geração Termelétrica a Carvão Mineral

Etapa	Principais Impactos	Dimensão
Térmicas a carvão		
Exploração e Mineração do Carvão (1)	Interferência sobre a qualidade do ar (emissão de Poeira)	Ambiental
	Interferência na morfologia do terreno	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (alteração da cobertura vegetal)	Ambiental
	Interferências sobre a qualidade da água nos mananciais hídricos	Ambiental
	Interferência na profundidade do lençol freático	Ambiental
	Risco de Acidentes	Socioeconômica
	Interferência sobre o uso do solo	Socioeconômica
Construção (2)	Interferência sobre a biodiversidade	Ambiental
	Interferências sobre a saúde	Socioeconômica
	Interferências sobre o uso e ocupação do solo	Socioeconômica
Operação (3)	Contribuição ao aquecimento global (emissão de gases de efeito estufa)	Ambiental
	Interferência sobre qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade da água	Ambiental
	Interferências sobre a saúde (emissão de poluentes aéreos)	Socioeconômica
	Risco de Acidentes	Socioeconômica
Pós-Operação (4)	Interferência sobre o uso do solo	Socioeconômica

16 IMPACTOS LISTADOS

1.5 Geração Termelétrica a Biomassa

Etapa	Impacto	Dimensão
Termelétricas a Biomassa		
Plantação das culturas de Cana de Açúcar (1)	Interferência sobre a biodiversidade (alterações da cobertura vegetal)	Ambiental
	Erosão do Solo e Assoreamento dos corpos d'água superficiais.	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade do ar (emissões devido às queimadas - produção de material particulado, CO, CO ₂ , CH ₄ , NO _x e SO _x).	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (implantação da monocultura)	Ambiental
	Interferência sobre o uso e ocupação do solo	Socioeconômica
	Aumento da pressão sobre a infra-estrutura viária pelo tráfego de veículos pesados.	Socioeconômica
	Aumento da pressão sobre a infra-estrutura urbana dos municípios sob influência da cultura.	Socioeconômica
	Impacto sobre a produção de alimentos	
Produção de açúcar e Álcool nas Usinas (2)	Interferência sobre a qualidade da água (disposição de vinhaça/ água utilizada no processo)	Ambiental
	Contaminação do solo (disposição de vinhaça/ torta do filtro)	Ambiental
Construção da Usina (3)	Interferência sobre a biodiversidade (alterações da cobertura vegetal)	Ambiental
	Interferência sobre qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Interferência sobre a demanda por serviços públicos	Socioeconômica
	Interferência no uso e ocupação do solo	Socioeconômica
	Poluição sonora	Socioeconômica
	Risco de acidentes	Socioeconômica
Operação da Usina (4)	Interferência sobre a biodiversidade (produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento - <i>sistema aberto</i>)	Ambiental
	Interferência na biodiversidade (emissões aéreas de poluentes/partículas)	Ambiental
	Interferência sobre a biodiversidade (produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento da água e purgas de processos).	Ambiental

	Interferência sobre a qualidade da água (teor de sólidos suspensos e dissolvidos) no corpo receptor (produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento da água e purgas de processos).	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade da água (temperatura e oxigênio dissolvido) no corpo receptor (produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento - <i>sistema aberto</i>)	Ambiental
	Interferência sobre qualidade do ar (emissão de poluentes/partículas)	Ambiental
	Contribuição ao aquecimento global (emissão de gases de efeito estufa)	Ambiental
	Poluição sonora	Ambiental
	Interferência sobre a saúde	Socioeconômica
	Risco de Acidentes	Socioeconômica
Descomissionamento (5)	Interferência no uso do solo (deposição de resíduos sólidos)	Ambiental

27 IMPACTOS LISTADOS

1.6 Geração Eólica

Etapa	Impacto	Dimensão
Eólica		
Processamento do material (1)	Contribuição ao aquecimento global (emissão de gases de efeito estufa)	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade do ar (emissão de poluentes)	Ambiental
Manufatura dos equipamentos (2)	Contribuição ao aquecimento global (emissão de gases de efeito estufa)	Ambiental
	Interferência sobre a qualidade do ar (emissão de poluentes)	Ambiental
Construção (3)	Interferência sobre a biodiversidade	Ambiental
	Interferências sobre a saúde (emissão de material particulado)	Socioeconômico
	Interferência sobre o uso do solo	Socioeconômico
	Interferência com atividade turística	Socioeconômico
	Intensificação da demanda por serviços públicos	Socioeconômico
	Interferência sobre a organização sócio-cultural e política da região	Socioeconômico
	Intensificação das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento	Socioeconômico
Operação (4)	Interferência sobre a fauna alada	Ambiental
	Poluição Sonora	Ambiental
	Poluição Visual	Socioeconômico
	Risco de Acidentes	Socioeconômico

15 IMPACTOS LISTADOS

TOTAL DE 148 IMPACTOS LISTADOS