

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Andressa Padilha de Oliveira

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP PARA  
A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS NA GERAÇÃO DE  
ENERGIA EM UMA TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL**

Santa Maria, RS  
2017

**Andressa Padilha de Oliveira**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP PARA A  
SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA  
TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Santa Maria, RS  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Oliveira, Andressa Padilha de  
APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP PARA A  
SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM  
UMA TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL / Andressa Padilha de  
Oliveira.- 2017.  
82 p.; 30 cm

Orientador: Nattan Roberto Caetano  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, RS, 2017

1. Geração de Energia Termelétrica 2. Carvão Mineral  
3. Tecnologias Limpas 4. Controle de Gases Residuais de  
Combustão I. Roberto Caetano, Nattan II. Título.

**Andressa Padilha de Oliveira**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP PARA A  
SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA  
TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

**Aprovado em 15 de dezembro de 2017:**

---

**Nattan Roberto Caetano, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Paulo Romeu Moreira Machado, Dr. (UFSM)**

---

**Caio Marcello Recart da Silveira, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, RS  
2017

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a todos os meus familiares, em especial à minha mãe, Vera Lúcia Valença Padilha de Oliveira, pelo apoio incondicional na busca de cada objetivo, ensinando-me a nunca desistir frente às adversidades. E pelo amor dedicado que me fortalece na conquista dos meus sonhos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, expressão de fé, força e coragem, pelo dom da vida, por me permitir viver este sonho, concedendo-me sabedoria e força para vencer esse desafio;

Aos meus pais, Adenir Rodrigues de Oliveira e Vera Lúcia Valença Padilha de Oliveira, agradeço por todo amor dedicado, pela educação, pelos esforços sem medida e por sempre me incentivar a ter e viver novos sonhos, sem vocês não seria possível concluir este trabalho. Obrigada a todos meus familiares pelas palavras de apoio;

Ao meu namorado Guilherme Moreira Dutra, por ser meu ombro amigo, por me incentivar nos momentos difíceis, encorajando-me a prosseguir e não desistir, por toda ajuda neste período, e sobretudo pelo carinho, obrigada;

Ao meu orientador professor Dr. Nattan Roberto Caetano por sua confiança, acompanhamento, ensino e estímulo ao longo desta jornada, auxiliando no que fosse possível para a realização desta pesquisa;

Aos professores Dra. Leoni Pentiado Godoy e Dr. Marcelo Romero de Moraes, pelas sugestões de melhoria do trabalho na banca de qualificação. Da mesma forma, ao Dr. Paulo Romeu Moreira Machado e Dr. Caio Marcello Recart da Silveira pelas contribuições na banca de defesa;

Aos amigos que fiz durante o mestrado, obrigada pela força e momentos de descontração e alegria;

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, pelo aprendizado proporcionado e pelas inúmeras oportunidades de crescimento pessoal e profissional que tive durante a realização deste mestrado, possibilitando o aperfeiçoamento e incentivo à pesquisa de maneira séria, responsável e renomada;

Enfim, minha gratidão a todos os que colaboraram na realização de cada etapa deste trabalho.

Muito obrigada!

## RESUMO

### APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA AHP PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL

AUTORA: Andressa Padilha de Oliveira

ORIENTADOR: Nattan Roberto Caetano

A expansão da oferta de energia é fundamental para o desenvolvimento econômico e social de um país, influenciando decisivamente na infraestrutura dos setores de produção. O carvão mineral é a principal fonte de geração de energia no mundo. A China, os Estados Unidos da América e a Índia são responsáveis por 70% do consumo total deste combustível. No Brasil, esse energético possui participação menor na oferta interna de energia, 5,5% do total. Apesar disso, questões de segurança energética, preços estáveis e baixos tornam essa opção economicamente atrativa considerando-a uma fonte estratégica, com as maiores reservas nacionais localizadas no Rio Grande do Sul. A pesquisa tem por objetivo estudar o gerenciamento das tecnologias limpas desenvolvidas para minimizar a emissão de poluentes atmosféricos oriundos da combustão do carvão mineral de uma termelétrica no sul do Brasil, e aplicar o método *Analytic Hierarchy Process* para a hierarquização das alternativas tecnológicas viáveis ao processo de produção. As informações adquiridas, no que diz respeito às ações emergentes dos processos de gestão ambiental, envolveram a aplicação de questionário, entrevista semiestruturada, lista de verificação e observação *in loco*. Além disso, foram analisados documentos formais, base de dados operacionalizados e publicações que relatam a atuação ambiental da empresa no mercado nacional. O trabalho abordou a relação direta entre os impactos ambientais mais relevantes, que correspondem às emissões aéreas liberadas durante o período de operação da usina e as opções tecnológicas adotadas no tratamento de gases e resíduos do complexo termelétrico. A aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* identificou o investimento em uma planta de beneficiamento do carvão mineral como a tecnologia mais acessível e compatível com o processo produtivo, o que contribui para aumentar a qualidade do combustível. O custo de investimento foi definido como o critério de maior importância se comparado ao tempo de implantação e custo de manutenção. Dessa forma, a articulação de métodos e tecnologias efetivas para o controle de emissões e particulados, juntamente com a valorização do sistema de gestão ambiental, se mostraram mais adequadas para suprir as demandas ambientais e otimizar a eficiência da planta de geração, convergindo os interesses técnicos, econômicos e comerciais à redução dos impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Carvão Mineral. Tecnologias Limpas. Controle de Gases Residuais de Combustão.

## **ABSTRACT**

### **APPLICATION OF THE AHP HIERARCHICAL ANALYSIS METHOD FOR THE SELECTION OF CLEAN TECHNOLOGIES IN THE GENERATION OF ENERGY IN A THERMOELECTRIC TO MINERAL COAL**

**AUTHOR:** Andressa Padilha de Oliveira

**ADVISOR:** Nattan Roberto Caetano

The expansion of energy supply is fundamental for the economic and social development of a country, influencing decisively the infrastructure of the production sectors. Coal is the main source of energy in the world. China, the United States of America and India account for 70% of total fuel consumption. In Brazil, this energy has a smaller share of the domestic energy supply, 5.5% of the total. Despite this, issues of energy security, stable prices and low prices make this option economically attractive considering it a strategic source, with the largest national reserves located in Rio Grande do Sul. The research aims to study the management of clean technologies developed to minimize the emission of atmospheric pollutants from the combustion of coal from a thermoelectric plant in southern Brazil, and to apply the Analytic Hierarchy Process to the hierarchy of viable technological alternatives to the production process. The information acquired, regarding the emerging actions of environmental management processes, involved the application of questionnaire, semi-structured interview, checklist and on-site observation. In addition, we analyzed formal documents, operational database and publications that report the environmental performance of the company in the national market. The paper addressed the direct relationship between the most relevant environmental impacts, which correspond to the air emissions released during the plant's operating period and the technological options adopted in the treatment of gases and wastes of the thermoelectric complex. The application of the Analytic Hierarchy Process has identified the investment in a coal beneficiation plant as the most accessible technology compatible with the production process, which contributes to increase the quality of the fuel. The investment cost was defined as the most important criterion when compared to the implementation time and maintenance cost. In this way, the articulation of effective methods and technologies for the control of emissions and particulates, together with the valorization of the environmental management system, proved to be more adequate to meet environmental demands and optimize the efficiency of the generation plant, converging technical interests, economic and commercial impacts on the reduction of environmental impacts.

**Keywords:** Mineral Coal. Clean Technologies. Control of Combustion Residual Gases.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes na geração de energia elétrica .....	16
Figura 2 – Maiores geradores de eletricidade a partir do carvão mineral .....	17
Figura 3 – Evolução da produção de carvão mineral no Rio Grande do Sul .....	24
Figura 4 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral .....	26
Figura 5 – Tipos de carvão mineral e seus usos .....	29
Figura 6 – Emissão mundial de dióxido de carbono OCDE e não-OCDE.....	32
Figura 7 – Geração global de eletricidade a partir do carvão mineral (TWh).....	34
Figura 8 – Cargos relacionados na pesquisa.....	47
Figura 9 – Diagrama simplificado da produção de energia com as tecnologias associadas ao processo.....	50
Figura 10 – Medições das estações de monitoramento de partículas inaláveis.....	55
Figura 11 – Percepção dos colaboradores quanto ao SGA.....	56
Figura 12 – Modelo hierárquico de estruturação do problema.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração por fonte na região sul .....	24
Tabela 2 – Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil, situação em 2015 .....	27
Tabela 3 – Propriedade dos carvões das jazidas do Rio Grande do Sul .....	28
Tabela 4 – Comparação entre emissões de combustíveis fósseis .....	30
Tabela 5 – Eficiência média de várias plantas, usando a tecnologia PCC .....	36
Tabela 6 – Escala numérica de Saaty .....	41
Tabela 7 – Índice de inconsistência aleatória .....	42
Tabela 8 – Tecnologias adotadas no tratamento de gases e resíduos da termelétrica .....	49
Tabela 9 – Emissões de GEE, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , e material particulado em toneladas métricas .....	54
Tabela 10 – Matriz de comparação entre os critérios .....	58
Tabela 11 – Obtenção das prioridades relativas de cada um dos critérios .....	59
Tabela 12 – Matriz de comparação dos pares a luz de cada critério .....	61
Tabela 13 – Índices de consistência e razões de consistência .....	62
Tabela 14 – Matriz das prioridades médias locais (PML) e prioridades globais (PG).....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BTU	Unidade Térmica Britânica
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CCT	<i>Clean Coal Technologies</i>
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EUA	Estados Unidos da América
FBC	Combustão em Leito Fluidizado
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i>
GW	Gigawatt
h	Hora
HELE	<i>High Efficiency Low Emissions</i>
Hg	Mercúrio
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGCC	Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado
kW	Quilowatt
MtCO <sub>2</sub> eq	Milhões de Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
Mtep	Milhões de Toneladas Equivalente de Petróleo
MW	Megawatt
NO <sub>x</sub>	Óxido de Nitrogênio
OCDE	Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCC	Carvão Mineral Pulverizado
PG	Prioridade Global
PIB	Produto Interno Bruto
PML	Prioridade Média Local
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
RS	Rio Grande do Sul
ROM	<i>Run of Mine</i>
SO <sub>x</sub>	Óxido de Enxofre
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional
TW	Terawatt
UTE	Usina Termelétrica
WRI	<i>World Resources Institute</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	PRODUÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL NO MUNDO.....	15
2.1.1	<b>Tecnologias limpas desenvolvidas pelos maiores geradores de energia no mundo</b> .....	<b>17</b>
2.1.1.1	<i>China</i> .....	18
2.1.1.2	<i>Estados Unidos da América</i> .....	19
2.1.1.3	<i>Índia</i> .....	21
2.1.1.4	<i>Relação com o cenário nacional</i> .....	22
2.2	CRESCIMENTO ENERGÉTICO NA REGIÃO SUL .....	23
2.3	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UMA TERMELÉTRICA .....	25
2.3.1	<b>Carvão mineral: Combustível para termelétricas</b> .....	<b>27</b>
2.3.2	<b>Aspectos Ambientais da Geração Termelétrica</b> .....	<b>30</b>
2.4	TECNOLOGIAS DE ABATIMENTO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	33
2.4.1	<b>Carvão mineral pulverizado</b> .....	<b>35</b>
2.4.2	<b>Usinas supercríticas e ultra supercríticas</b> .....	<b>36</b>
2.4.3	<b>Combustão em leito fluidizado</b> .....	<b>37</b>
2.4.4	<b>Gaseificação integrada com ciclo combinado</b> .....	<b>38</b>
2.5	PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
3.1	INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE INFORMAÇÕES.....	44
3.2	DEFINIÇÃO DA AMOSTRA RESPONDENTE.....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>
4.1	EFICIÊNCIA OPERACIONAL E TECNOLOGIAS LIMPAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....	48
4.2	SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL SOB A ÓTICA DE UM MODELO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL .....	51
4.2.1	<b>Política Ambiental</b> .....	<b>52</b>
4.2.2	<b>Inventário de Gases de Efeito Estufa</b> .....	<b>54</b>
4.2.3	<b>Práticas emergentes do SGA integrantes do planejamento estratégico</b> .....	<b>55</b>
4.3	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA .....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE A – ENERGIA ELÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE B – CARTA CONVITE E QUESTIONÁRIO DA PESQUISA</b> .....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE C – CARTA CONVITE, ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA E LISTA DE VERIFICAÇÃO DA PESQUISA</b> .....	<b>78</b>
	<b>ANEXO A – PRINCIPAIS PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO NO MUNDO E SEUS QUANTITATIVOS</b> .....	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos vêm sendo realizados sobre a geração de energia, com objetivo de melhor aproveitar os recursos disponíveis. Começou-se a pensar em fatores como sustentabilidade, sistema de gestão ambiental (SGA), poluição ambiental, custo social e segurança energética, principalmente nos países emergentes. Sendo que os aspectos econômicos exercem forte influência na definição da matriz energética de um determinado país. (BRANCO, 2011; KLEIN, 2013; LIMA, SOUZA, 2014).

No Brasil, utiliza-se preferencialmente a energia oriunda das hidrelétricas (61,18%), mas nem sempre estas podem gerar a demanda energética necessária para suprir toda a exigência de energia. Portanto, as termelétricas possuem um papel respeitável na geração de energia, complementando a energia vinda das hidrelétricas, quando estas passam por momentos de baixa de produção, como em períodos de estiagens. (LIMA; SOUZA, 2014).

A geração térmica no país tem sido diferente da praticada na maioria dos países, nos quais a produção de energia elétrica baseada no calor prevalece. (TOLMASQUIM, 2016; ANEEL, 2017). Ainda que o carvão mineral brasileiro apresente um baixo poder calorífico, elevados teores de cinzas e enxofre, a disponibilidade de reservas e o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes sugerem que a geração térmica apresente um grande potencial de expansão. (MÜLLER et al., 1987; FREITAS, 2012; DOMENICO, 2013).

O constante aumento da temperatura global tem alertado os cientistas quanto à queima de combustíveis fósseis e a consequente produção de gases de efeito estufa (GEE). (ROSO et al., 2016). O total de emissões poluentes associadas à matriz energética brasileira atingiu 428,95 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO<sub>2</sub>eq). O Brasil permanece menos intenso em carbono em relação às economias europeia (-11%), norte-americana (-50%) e chinesa (-70%). O setor elétrico brasileiro emitiu, em média, 101,3 kg CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh, índice baixo comparado com a União Europeia, Estados Unidos da América (EUA) e China. (BRASIL, 2017).

A cadeia produtiva do carvão mineral tem o desafio de garantir a sustentabilidade de suas atividades, por meio da adequação das usinas termelétricas operantes às tecnologias limpas disponíveis, incentivando a aplicação em projetos futuros. A dificuldade encontra-se em continuar gerando energia elétrica de maneira segura e eficiente ao mesmo tempo, em que mantém o equilíbrio do uso dos recursos naturais com as necessidades econômicas brasileiras.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o gerenciamento das tecnologias limpas desenvolvidas para minimizar a emissão de poluentes atmosféricos oriundos da combustão do carvão mineral de uma termelétrica no sul do Brasil, e aplicar o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para a hierarquização das alternativas tecnológicas viáveis ao processo de produção.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a. identificar as opções tecnológicas adotadas no processo de geração de energia elétrica para os impactos ambientais mais relevantes no complexo termelétrico;
- b. investigar como é efetuado o controle de emissões e particulados na busca de atender às exigências da legislação ambiental aplicável;
- c. verificar as ações emergentes do SGA referentes à redução de gases poluentes disseminadas entre os colaboradores, por meio da aplicação de questionários;
- d. destacar a tecnologia mais acessível e compatível com o processo produtivo por meio da aplicação do método AHP, a fim de auxiliar na tomada de decisão.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa da pesquisa provém da relevância do controle da poluição atmosférica oriunda dos processos de produção das usinas termelétricas a carvão mineral, dado que é o energético não renovável mais abundante no país. Por isso, a necessidade de otimizar o uso e torná-lo compatível com a preservação do meio ambiente, levando em consideração às exigências legais, visto que existem padrões de qualidade ambiental previamente fixados.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) apresenta como principal instrumento as suas resoluções. Por meio destas, são estabelecidas normas e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, para o licenciamento de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras. Em relação às usinas termelétricas, as resoluções nº 05/1989; 03/1990; 382/2006 e 436/2011 que estabelecem o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR) e

os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas devem ser consideradas para assegurar a execução de suas atividades.

Dentre as fontes de geração de energia, todas apresentam algum impacto na natureza. A energia solar vincula-se a extrair e processar silício para produzir os painéis solares, os custos são elevados e o rendimento é baixo, oscilando a produção com o clima. A hidráulica, em períodos de estiagens a produção é baixa, além de destruir ecossistemas, causar alagamentos e bloquear rios. Na eólica há impactos na instalação das usinas devido à alteração na paisagem local, ameaçando pássaros se forem colocadas em suas rotas de migração. A nuclear por sua vez, possui custos elevadíssimos para implementação, além de envolver altos riscos de contaminação em casos de acidentes. (FOGAÇA, 2016).

O carvão mineral torna-se uma opção importante no mix energético, devido à grande disponibilidade desse recurso energético no sul do país a preços estáveis e relativamente baixos. As tecnologias voltadas para o uso limpo devem ser desenvolvidas, demonstradas e melhoradas para acompanhar a evolução da legislação ambiental e para manter a competitividade dessa fonte energética em relação às demais. Destacando que, a adoção de tecnologias limpas com maior eficiência de conversão de energia têm se mostrado essencial para o maior aproveitamento da fonte.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado baseado em cinco capítulos, onde no capítulo inicial foi realizada uma introdução à pesquisa, bem como foram definidos os objetivos, geral e específicos, e a justificativa. O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica, buscando um apanhado geral referente à utilização do carvão mineral pelos maiores geradores de energia no mundo, o crescimento energético na região sul, os princípios de funcionamento de uma termelétrica movida a carvão mineral juntamente com os respectivos impactos ambientais, ressaltando as principais tecnologias de abatimento de emissões atmosféricas, e por fim a caracterização do processo de hierarquia analítica.

O capítulo três, materiais e métodos, apresenta os instrumentos de coleta e análise de informações, e a definição da amostra respondente. Nos capítulos quatro e cinco, encontram-se respectivamente, a discussão dos resultados obtidos, e as conclusões, contendo as limitações encontradas na execução e as sugestões para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de desenvolvimento sustentável foi proposto pela Comissão Mundial do Desenvolvimento do Meio Ambiente, em 1987. Essa comissão foi formada em 1984 pela Organização das Nações Unidas (ONU), que definiu em seu relatório final intitulado *Nosso Futuro Comum* o conceito de desenvolvimento sustentável como aquele que “atende as necessidades da geração presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades” (SEIFFERT, 2009, p. 26).

A sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e material sem agredir o meio ambiente, integrando dimensões econômicas, sociais e ambientais. Grande parte do desequilíbrio está relacionado às condutas humanas geradas por atitudes consumistas que geram desperdício, pelo uso inadequado dos recursos naturais. (GOIS; MACHADO; WEBER, 2010).

A educação ambiental tem o papel de sensibilizar os seres humanos como parte integrada ao meio ambiente, superando a visão antropocêntrica que faz com que o homem sintam-se o centro de tudo esquecendo a importância da natureza. (MOURA et al., 2010). A execução da gestão ambiental, nas empresas em geral, objetiva a adequação ao conceito de sustentabilidade com o propósito de reavaliar a exploração dos recursos naturais e diminuir os impactos ambientais causados pelo processo de negócio (GIESTA, 2009).

Este capítulo apresenta informações sobre o carvão mineral incluindo a localização das expressivas reservas mundiais, a contribuição de eletricidade produzida mundialmente e na região sul do Brasil. O processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral e a relação dos maiores geradores de eletricidade a partir do carvão mineral, contextualizando as principais tecnologias limpas desenvolvidas para minimizar a emissão de poluentes atmosféricos. Destacando, brevemente, as tecnologias que configuram alternativas efetivas na reversão de situações críticas no controle da poluição e implantação de processos tecnológicos menos poluentes, e os conceitos relacionados com o método AHP.

### 2.1 PRODUÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL NO MUNDO

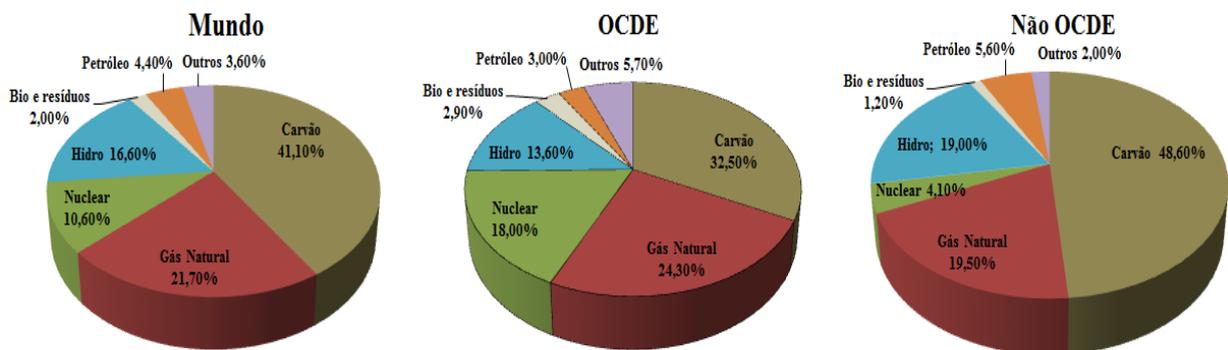
Fundamental para economia mundial, o principal uso do carvão mineral corresponde à geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Em segundo lugar a aplicação industrial para a geração de calor necessário aos processos de produção, tais como secagem de produtos, cerâmicas e fabricação de vidros. Além da utilização na siderurgia para produção de

coque, ferro-gusa e aço. A projeção para o minério é de manter posição semelhante nos próximos 30 anos. E, por ser o combustível fóssil com a maior disponibilidade do mundo, garante quantidade suficiente para atender a produção atual por 130 anos. (IEA, 2015).

As reservas mundiais de carvão mineral, ao contrário do que ocorre com petróleo e gás natural, não se localizam concentradas em poucas regiões, estando bem distribuídas pelos continentes, totalizando cerca de 850 bilhões de toneladas, com ênfase maior no hemisfério norte. Encontradas em quantidades expressivas em 75 países, sendo cinco deles EUA (28,6%), Rússia (18,5%), China (13,5%), Austrália (8,9) e Índia (7%) que concentram 76,5% do volume total. O Brasil mantém-se na 14ª posição em relação aos países que apresentam as maiores reservas de carvão mineral do mundo, com 0,5% das reservas globais. (IEA, 2016).

O carvão mineral contribuiu com 41,1% dos 23.391 TWh de eletricidade gerada no mundo, o que faz dele a principal fonte de geração elétrica, superando em quase duas vezes a participação do gás natural na matriz elétrica mundial (Figura 1).

Figura 1 – Participação das fontes na geração de energia elétrica



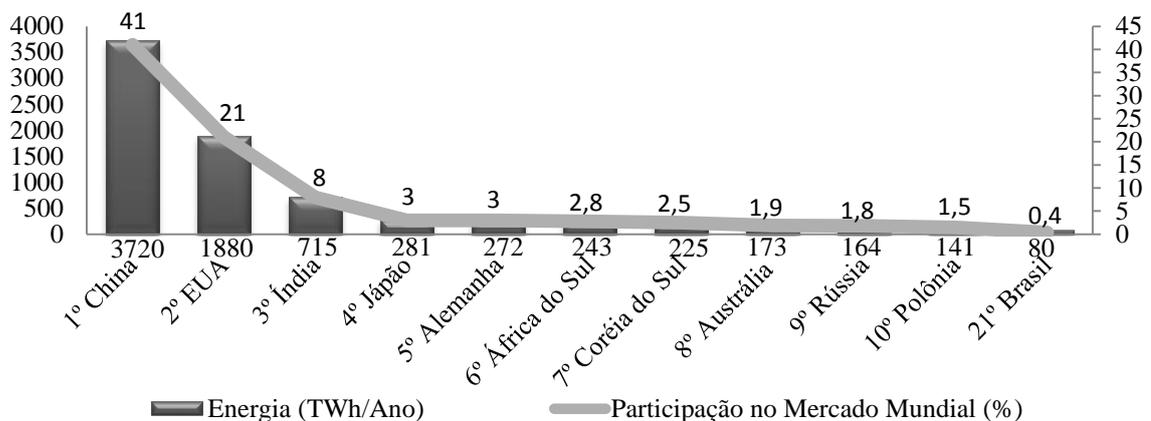
Fonte: Adaptação de IEA (2015).

A participação do carvão mineral na geração elétrica nos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) apresentou uma queda na última década. O resultado do consumo de 2013 foi 8% inferior ao verificado em 2003 devido à crise financeira global, aumento da produção de gás não convencional, referindo-se principalmente ao gás de xisto nos EUA e políticas de eficiência energética e descarbonização no setor energético. (IEA, 2015).

A China que havia ultrapassado os EUA na geração de energia a partir do carvão em 2006, passou a gerar quase o dobro. Os dois juntos são responsáveis por 62% da eletricidade gerada no mundo (Figura 2). Isto significa que, apesar de ser a fonte de energia mais utilizada

para a geração de energia elétrica, seu uso está muito concentrado em alguns países. De certa forma, o consumo do carvão mineral no mundo está intrínseco ao desenvolvimento econômico industrial que a China tem imposto ao longo da última década. O aumento de cinco pontos percentuais na participação do carvão mineral na matriz de energia primária, nos últimos dez anos, reforça a posição da fonte. (IEA, 2016).

Figura 2 – Maiores geradores de eletricidade a partir do carvão mineral



Fonte: Adaptação de IEA (2016).

A China, Estados Unidos e Índia são responsáveis por 70% do consumo mundial de carvão mineral para geração elétrica, ou seja, 4.500 milhões de toneladas. Em relação aos maiores exportadores de carvão mineral, a Austrália que dominava o mercado, foi ultrapassada pela Indonésia que é responsável por 33% das exportações mundiais deste produto. Nas importações, o Japão foi ultrapassado pela China, que é responsável por quase 18% do carvão importado no mundo. Apesar de ser o maior produtor mundial de carvão, a China ainda precisa importar este insumo energético para atender suas necessidades de geração de energia. O mesmo fenômeno ocorre com a Índia e a Alemanha. (IEA, 2016).

### 2.1.1 Tecnologias limpas desenvolvidas pelos maiores geradores de energia no mundo

Diante da importância na matriz energética, e como os efeitos para o meio ambiente são extremamente danosos, o uso das tecnologias limpas consolidam a indústria de baixa emissão de carbono, envolvendo um conjunto de tecnologias e processos que diminuem os impactos ambientais associados à mineração, ao processamento e à utilização do carvão. A queima do combustível pulverizado é o método mais usado mundialmente para gerar

eletricidade a partir do carvão. Além disso, a geração de energia por meio da gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC) é uma das mais promissoras tecnologias de carvão limpo. (GUO; HUANG; ZHOU, 2015).

#### *2.1.1.1 China*

A contínua dependência do carvão para geração de eletricidade é um dos principais desafios ambientais do mundo e, no entanto, o futuro do carvão depende em grande parte de apenas um país. A China é simultaneamente o líder mundial em capacidade de energia renovável e o maior emissor mundial de CO<sub>2</sub> relacionado à energia, com cerca de 50% dessas emissões provenientes de usinas a carvão. (IEA, 2017; WU, LIU, YANG, 2013). Desde 1985 destaca-se como a maior produtora de carvão em nível mundial, mais da metade de todo o carvão mineral produzido no mundo é consumido na China, ou seja, dois terços da energia primária consumida internamente advêm do carvão mineral. (LI J.; LI Z., 2011).

A participação do carvão mineral na matriz elétrica interna situa-se acima dos 70%, a hidroeletricidade com 25%. (IEA, 2015). Atualmente, a China possui mais de 900 GW de capacidade instalada de energia a carvão, representando quase 50% do total global, além de quase 200 GW em construção. A frota de carvão mineral da China é uma das mais jovens do mundo, com dois terços das usinas construídas desde 2005 e a maioria de suas plantas poderia funcionar por mais três ou quatro décadas. (IEA, 2017).

Com a economia crescendo a taxa média de 10% ao ano nas duas últimas décadas, a demanda por carvão no período de 2000 a 2006 cresceu 11% e 7% entre 2006 e 2012 e 5,3% em 2013. (TOLMASQUIM, 2016). Este decréscimo está associado ao estabelecimento de metas ambientais para redução de CO<sub>2</sub>, sendo comumente considerada a tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS), especialmente, a baseada em monoetanolamina, como também a diversificação do mix energético, promovendo fortemente fontes alternativas de energia como a solar, eólica e a hídrica. (HU; JIANG, 2013).

O setor de energia gerada com base na queima de carvão mineral enfrenta muitos problemas na China, e a emissão de GEE pelo país deve continuar a crescer. O objetivo da China é utilizar as mais recentes tecnologias para limitar o ritmo de alta. Devido às vantagens, como a alta eficiência da geração de eletricidade, a planta de energia IGCC representa a direção do desenvolvimento de todas as usinas de energia acionada na China. Em média, 60% das usinas novas estão sendo construídas com a utilização de tecnologia mais nova, altamente eficiente. (LIANG; XING; SHEN, 2013).

A China desenvolveu a capacidade de construir usinas de energia de alta tecnologia, mas isso aconteceu ao final de um período de construção acelerada de usinas acionadas a carvão, de baixa tecnologia. (ZHANG, 2014). Quando a usina oferece maior eficiência, ela precisa queimar menos carvão e emitir menos CO<sub>2</sub> por unidade de eletricidade que venha a gerar. Usinas de energia menos eficientes em operação na China convertem entre 27% e 36% da energia do carvão em eletricidade. As usinas mais eficientes atingem índice de conversão de 44%, o que significa que podem reduzir as emissões de GEE em mais de um terço, se comparadas às usinas de baixa eficiência. (IEA, 2015).

A China investiu US\$ 38 bilhões em plantas a carvão mineral no exterior entre 2010 e 2014, além de ter anunciado planos para mais US\$ 72 bilhões de investimentos. (PETTERS; TSE, 2015). No mercado energético brasileiro, a presença chinesa é crescente. O interesse no Rio Grande do Sul (RS) abrange exportar tecnologia, explorar carvão e produzir energia. A oportunidade de negócio no setor carbonífero esteve principalmente ligada às termelétricas que foram colocadas à venda pelo grupo *Engie*, na região sul do Brasil. Uma destas plantas, a usina térmica Pampa Sul está sendo construída em Candiota/RS, com tecnologia chinesa e uma capacidade de geração de energia de 340 MW. (KLEIN, 2013).

Os chineses participaram da construção de outra termelétrica no Brasil, a Fase C do complexo da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica. Se, por um lado, a China busca expandir seus investimentos na área do carvão em outros países, por outro, no plano interno, o país pretende reduzir o consumo de carvão em 4,1 bilhões de toneladas até 2020 e utilizar combustíveis mais limpos em sua matriz energética. Até 2020, a meta é reduzir a presença do carvão na matriz energética para menos de 62%. (EIA, 2017).

O mais importante seria definir com que velocidade os chineses avançarão na direção de usinas de energias que capturam suas emissões e as armazenam no subsolo. Tecnologia como essa poderia, criar usinas de energia cuja contribuição para o efeito estufa é zero. Muitos países têm a esperança de desenvolver esse tipo de usina, ainda que o progresso venha sendo hesitante.

#### *2.1.1.2 Estados Unidos da América*

O sistema energético da maior potência econômica do mundo é baseado em combustíveis fósseis, petróleo, em primeiro lugar, seguido de gás e carvão. Juntas, essas fontes respondem por 87,3% da produção energética. Embora o país não seja signatário do Protocolo de Kyoto, a matriz energética norte-americana ganhou eficiência entre 1990 e 2010,

pois a porcentagem de emissão de GEE cresceu menos, 10,63%, que o consumo de energia, 15,89%. (IEA, 2015). A diminuição do uso de combustíveis poluentes e o aumento de fontes limpas fizeram com os EUA perdessem para a China o título de maior poluidor.

A eficiência média das termelétricas acionadas a carvão nos EUA continua mais alta que a média das usinas chinesas, pois estes construíram inúmeras usinas ineficientes ao longo dos últimos anos. Contudo, os países ocidentais continuam a depender de usinas termelétricas acionadas a carvão e construídas décadas atrás, com tecnologias ineficientes que requerem a queima de muito carvão e resultam na emissão de volume considerável de CO<sub>2</sub>. Nos EUA, cerca de 80% das usinas têm mais de 20 anos de idade, as usinas mais eficientes conseguem atingir índices de conversão da ordem de 40%, porque elas não utilizam as temperaturas mais altas de vapor que estão sendo adotadas na China. (JELL, 2017).

A lei do ar limpo foi promulgada em 1970, não impondo controles rigorosos de poluição nas antigas usinas termelétricas, porque haveria a substituição pela geração mais atualizada de usinas com tecnologia mais limpa. No entanto, muitas das usinas antigas continuaram a operar. Tecnologias que controlam e reduzem drasticamente as emissões são amplamente disponíveis e utilizadas em muitas instalações, mas, até que o público e os políticos cobrem das usinas, os americanos vão continuar a suportar custos ambientais desnecessários. (HU; JIANG, 2013).

A produção de carvão mineral nos EUA estabeleceu, desde 2014, um plano para energias limpas onde para cada nova planta seria necessário o emprego de tecnologia de CCS conforme a orientação da meta de redução de emissões de 30% até 2030 em comparação aos níveis de 2005. (TOLMASQUIM, 2016). O controle ambiental sobre a produção de gases do tipo SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> possui 95% de suas emissões resolvidas com a instalação de equipamentos e sistemas de dessulfuração de gases de combustão. A tendência é aumentar a redução de CO<sub>2</sub> por meio do desenvolvimento e aplicação da CCS, conduzindo a uma diversidade de opções tecnológicas que permitirá emissões baixíssimas de qualquer tipo de poluente. (LINDSTROM, 2017).

As emissões durante o primeiro semestre de 2016 foram as mais baixas em 25 anos. Os preços da eletricidade caíram cerca de 2% comparados aos preços em 2015. De 2005 a 2016, as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia caíram a uma taxa anual média de 1,4%. De 2016 a 2040, as emissões tendem a cair 0,2% anualmente no caso de referência. A produção de carvão aumentará até 2020 para mais de 800 milhões de toneladas, devido a um aumento previsto dos preços do gás natural, melhorando a competitividade das unidades geradoras de carvão existentes. (EIA, 2017).

A administração de Donald Trump expressou apoio ao setor de carvão. No entanto, o consumo caiu quase 9% em 2016, após uma queda de 14% em 2015. No geral, o consumo de carvão diminuiu quase 38% desde 2005 e projeta uma redução de 51% na geração até 2040. Em cada um dos últimos 20 anos, o setor de energia respondeu por mais de 90% de consumo total de carvão dos EUA. (PLUMER, 2013; MOBILIA, 2017). Nos últimos dez anos a produção mundial não cessou de aumentar. Não obstante à crescente participação do gás natural na matriz elétrica mundial e à política energética dos EUA de menor utilização do carvão mineral para geração elétrica, o energético continuará sendo a principal fonte mundial.

### *2.1.1.3 Índia*

O consumo de carvão na Índia, particularmente no setor de energia elétrica, supera a produção interna da Índia. De 2005 a 2012, a produção de carvão da Índia cresceu apenas 4,7% ao ano para cerca de 600 milhões de toneladas, enquanto a capacidade de energia elétrica do carvão no país aumentou muito mais rapidamente, cerca de 9,4% ao ano, atingindo 150 GW. Para ajudar a resolver o déficit de oferta de carvão e apoiar a geração expandida de carvão, a Índia estabeleceu um objetivo de produção de carvão de 1,5 bilhão de toneladas em 2020. (WRI, 2012; KEARNEY, 2015).

Em 2012, a geração total de energia elétrica na Índia foi de 1.127,6 TWh. As fontes térmicas responderam por 81,4% da geração, enquanto as hídricas totalizaram 11,2%. Juntas, essas fontes representavam 92,6% da geração de eletricidade indiana. As fontes nucleares receberam um plano de estado para a expansão e aportaram 2,9% da geração, frente a 1,8% em 2008. O carvão mineral respondeu por 90,3% da geração térmica, seguido pelo gás natural (9,4%) e pelo diesel (0,3%). O mix energético para o ano 2100 prevê para o carvão mineral 50%, gás natural 25%, energia nuclear e renováveis 25%. A proeminência do carvão pode ser explicada pelas reservas abundantes desse recurso fóssil no país. (IEA, 2016).

O aspecto crítico da geração de energia a partir do carvão é a alta emissão de GEE e a Índia é o quarto maior emissor do mundo após a China, EUA e União Européia. Contudo, a Índia passou por uma impressionante reviravolta, motivada em grande parte pela integração ao acordo de Paris, adotando políticas para reduzir suas emissões de GEE em 33-35% até 2030 incluindo várias medidas que promovam uma produção de energia mais limpa e o desenvolvimento da CCS. Além de comprometer-se a obter 40% de sua eletricidade a partir de fontes não fósseis até 2030. (MAJOURD et al., 2017).

Em relação à tecnologia desenvolvida nas termelétricas indianas destacam-se as centrais termelétricas supercríticas a carvão pulverizado, a qual vem sendo aplicada há várias décadas nos países mais desenvolvidos, como os EUA, Japão, Alemanha e Dinamarca, que permite economizar energia e reduzir o CO<sub>2</sub> melhorando a eficiência térmica, por meio do vapor a pressão e temperatura elevadas. Além disso, outras tecnologias de mitigação de CO<sub>2</sub> como, CCS, dessulfurização de gás flexível e redução catalítica seletiva, estão sendo desenvolvidos e utilizados para reduzir os impactos ambientais das centrais elétricas. (SINGH; SHARMA; MAHAPATRA, 2016).

Aproximadamente, 70% das emissões de CO<sub>2</sub> de combustíveis fósseis na Índia são de carvão mineral, 22% de petróleo e 4% de gás natural. A Índia detém 10% das reservas de carvão mineral do mundo sendo responsável por cerca de 60% da potência total produzida. No atual ritmo da produção, tem carvão suficiente para os próximos 200 anos. (BECK et al., 2013). Atender a demanda de energia e simultaneamente satisfazer o CO<sub>2</sub> alvo de emissões traz a necessidade de desenvolver o carvão usando tecnologia mais avançada do que a existente. Nesse contexto, o IGCC com CCS emerge como uma opção prospectiva para o uso de carvão com CO<sub>2</sub> reduzido.

#### *2.1.1.4 Relação com o cenário nacional*

Ao estabelecer a comparação entre as tecnologias limpas predominantes no Brasil, China, EUA e Índia, é fundamental considerar a heterogeneidade das estruturas produtivas, destacando que o processo de industrialização ocorreu de forma mais acelerada nos países desenvolvidos, como é o caso dos EUA, e por último, nos países subdesenvolvidos. Essa diferenciação em relação ao grau de desenvolvimento é o que fortalece as desigualdades entre os processos produtivos, que acentuam os diferentes padrões tecnológicos. Coexistindo empresas avançadas tecnologicamente com outras mais defasadas, voltadas para atender, de forma complementar, o mercado interno, como ocorre com as termelétricas brasileiras.

O Brasil utiliza as plantas convencionais subcríticas a carvão pulverizado, tecnologia preponderante nas usinas térmicas a carvão mineral, combinada com sistemas de dessulfurização de gases. A planta de energia IGCC representa a direção do desenvolvimento das usinas de energia na China, implementada na maioria das novas usinas. (IEA, 2012; LIANG, XING, SHEN, 2013).

Nos EUA, a tendência está na redução de CO<sub>2</sub> por meio da aplicação da CCS permitindo diversas opções tecnológicas. Na Índia, destacam-se as plantas supercríticas a carvão pulverizado,

aplicadas há décadas nos países mais desenvolvidos, como os EUA. Contudo, de forma análoga, o IGCC com CCS emerge como uma opção prospectiva para o uso do combustível com CO<sub>2</sub> reduzido. (LINDSTROM, 2017; SINGH, SHARMA, MAHAPATRA, 2016).

A oportunidade para a difusão das tecnologias limpas varia em função da disparidade tecnológica entre as termelétricas, pois quando esta diferença é grande acaba por criar um avanço através da melhoria nas formas de produção das plantas térmicas mais defasadas, que buscam aderir a processos produtivos de menor impacto ambiental. Nesse caso, a política pública deveria servir como um agente facilitador para a transferência dessas tecnologias criando mecanismos de financiamento e outros incentivos ao aperfeiçoamento tecnológico.

Uma situação que acaba dificultando a inserção de tecnologias mais recentes para a combustão do carvão mineral envolve plantas industriais em que o capital instalado é relativamente recente e a adesão as tecnologias limpas exigiriam investimentos pesados sobre o parque instalado que ainda não foi financeiramente depreciado. Ainda que haja conhecimento de formas mais eficientes de produção, como ocorre com a Usina Termelétrica de Candiota (Fase C), as restrições de capital ou escala impedem a sua adoção, desenvolvendo em termos de gestão ambiental o tratamento e controle das emissões atmosféricas.

## 2.2 CRESCIMENTO ENERGÉTICO NA REGIÃO SUL

A região sul tem expressivas reservas de carvão mineral, que podem ampliar a capacidade instalada por meio da complementação da geração hidrelétrica e eólica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e aumento da segurança do suprimento. Embora haja restrições relacionadas às emissões de GEE e óxidos de nitrogênio e enxofre, a utilização de tecnologias mais modernas de geração termelétrica, como sistemas de combustão utilizando carvão mineral pulverizado, leito fluidizado ou gaseificação integrada com ciclo combinado, associado a equipamentos para controle das emissões, permitem mitigar uma parcela significativa desses impactos. (SIFERT FILHO et al., 2014).

Apresenta capacidade de geração a partir de fontes diversas que se traduzem em uma capacidade total instalada de geração de energia elétrica de quase 30 GW, representando 23% da capacidade total instalada do país. A geração hidrelétrica participa com 76%, a térmica com 24% desta capacidade instalada na região, sendo completada, mais recentemente, com a energia eólica. O estado do Paraná concentra 58% da capacidade instalada da região, principalmente em função da sua expressiva geração hidrelétrica. A capacidade de geração do

Rio Grande do Sul representa 24% do total da região e a de Santa Catarina, 18%. A Tabela 1 sintetiza o perfil da geração elétrica na região sul. (SIFFERT FILHO et al., 2014).

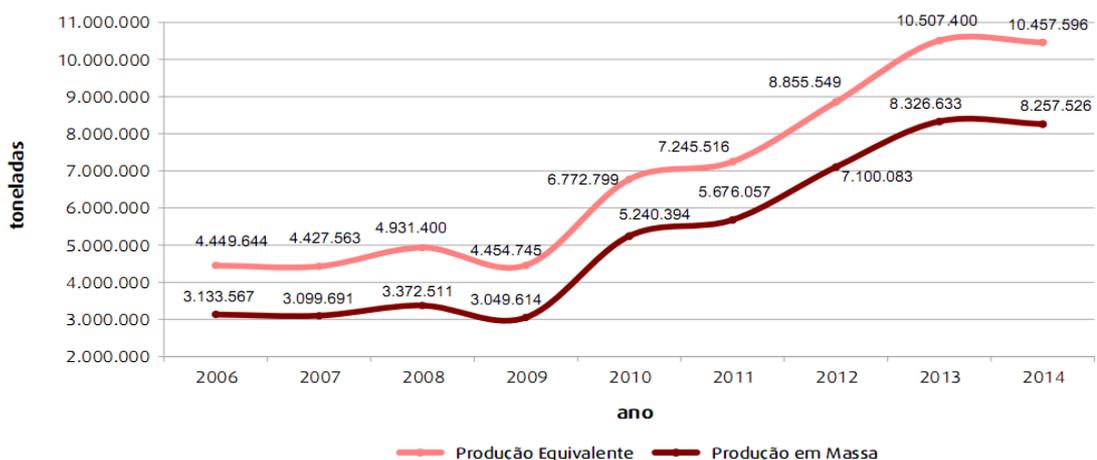
Tabela 1 – Capacidade instalada de geração por fonte na região sul

Fonte	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Total
				MW
Usina Hidrelétrica	15.671	3.486	3.880	23.037
Termelétrica	1.250	1.068	2.069	4.387
Pequena Central e Central Geradora Hidrelétrica	283	613	590	1.486
Eólica	3	236	880	1.119
Solar	0	3	0	3
<b>Total</b>	<b>17.207</b>	<b>5.406</b>	<b>7.419</b>	<b>30.032</b>

Fonte: (SIFFERT FILHO et al., 2014; SCHUBERT et al., 2014).

O consumo de energia elétrica na região deverá aumentar mais de 40% no período 2015-2024, com um crescimento médio de 3,8% ao ano. No tocante à produção de energia em 2014, o Rio Grande do Sul destacou-se na produção de carvão mineral, representando 10,458 milhões de toneladas equivalentes produzidas, ficando na primeira posição no cenário nacional. Nesse mesmo ano, foram produzidos 32.465 GWh de energia elétrica no estado. (CAPELETTO, 2015). A Figura 3 mostra a produção equivalente e em massa de carvão mineral no Rio Grande do Sul.

Figura 3 – Evolução da produção de carvão mineral no Rio Grande do Sul



Fonte: (CAPELETTO, 2015).

O crescimento a partir de 2010 está diretamente vinculado à entrada em operação da Fase C da usina térmica de Candiota. O Rio Grande do Sul detém as maiores reservas nacionais de carvão, medidas de ampliação da capacidade geradora de energia elétrica na última década conduziu o estado a um crescimento de 67,3% na capacidade de atendimento. A demanda máxima cresceu em 56,9%, equilibrando a relação entre a oferta e demanda de energia. Quanto ao perfil do consumo no estado, a indústria é o setor de maior consumo com 38,6%. O setor residencial consome 24,4%; o comercial 15,7%; o agropecuário 12,9% e o restante 8,4% é consumido pelo setor público e de transporte. (TOLMASQUIM, 2016).

A geração termelétrica na região é diversificada em relação às fontes primárias utilizadas, tanto as de origem fóssil quanto as renováveis. Entre as fósseis, destacam-se o carvão mineral (1.765 MW) e o gás natural (1.307 MW), sendo também utilizados o óleo combustível (99 MW), o diesel (86 MW) e o gás de refinaria (52 MW) e de processo (83 MW). As principais fontes renováveis utilizadas são o bagaço de cana (474 MW), o licor negro da indústria de celulose (295 MW), os resíduos de madeira (174 MW) e, em menor escala, a casca de arroz (29 MW). (TOLMASQUIM, 2016).

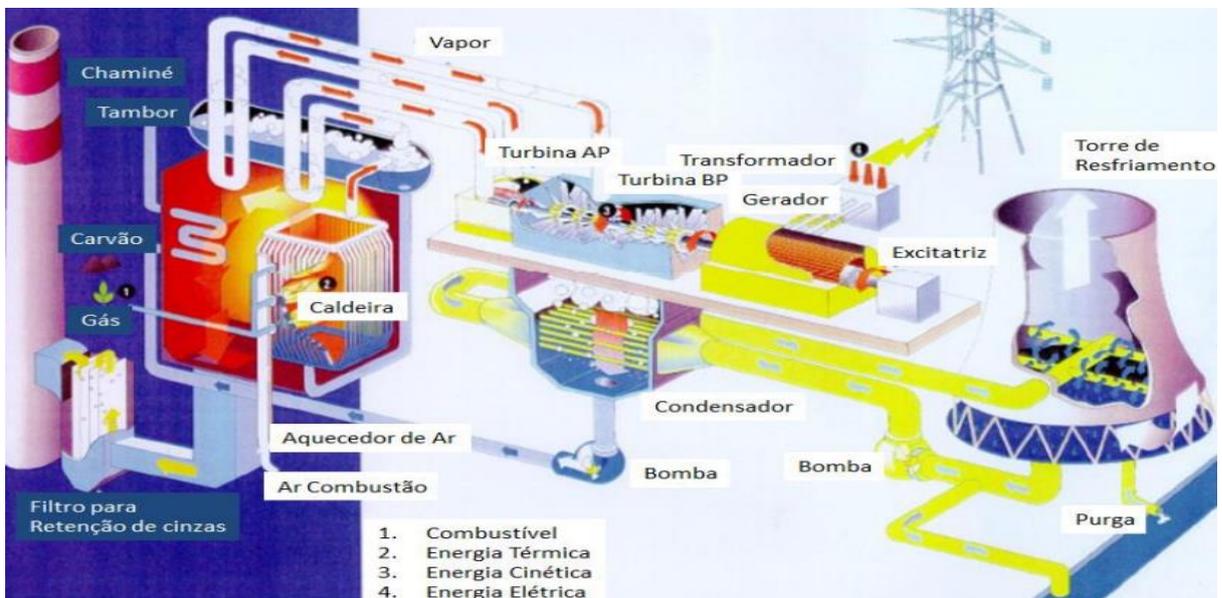
### 2.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UMA TERMELÉTRICA

A termelétrica representa uma instalação industrial usada para geração de energia elétrica a partir da energia liberada em forma de calor, normalmente por meio da combustão de combustível renovável ou não renovável. É baseada na conversão de energia térmica em energia mecânica, e da conversão desta em energia elétrica, sendo que qualquer produto capaz de gerar calor pode ser usado como combustível. Há vários tipos de usinas termelétricas, em que os processos de produção de energia são praticamente iguais, porém com combustíveis diferentes. Os combustíveis mais utilizados são: óleo combustível, óleo diesel, gás natural, urânio enriquecido e o carvão mineral. (TOLMASQUIM, 2016).

A termelétrica é produzida por um gerador e transportada até os locais de consumo por linhas de transmissão. O gerador é impulsionado pela queima do combustível. O calor gerado a partir destes elementos transforma em vapor a água presente em tubos localizados nas paredes da caldeira. Tal vapor, em condições de alta pressão, faz girar as pás de uma turbina, onde cada turbina é conectada a um gerador que produz eletricidade. Deste, a energia é conduzida até um transformador para ser distribuída para consumo, enquanto a água é resfriada em um condensador e redirecionada aos tubos da caldeira, para repetir o ciclo. (LIMA; SOUZA, 2014).

A turbina a vapor é um motor térmico rotativo de combustão externa, que possibilita unidades de grande potência, além de alta confiabilidade, vida útil e eficiência. Quanto mais elevada a temperatura, maior sua eficiência. O gás que flui pela turbina pode chegar a 1.260°C, mas alguns metais que a constituem não suportam temperaturas superiores a 900°C. Por isso, emprega-se ar para resfriamento dos componentes da turbina, o que acaba limitando a eficiência térmica. A Figura 4 ilustra o processo de produção de energia elétrica utilizando como fonte de combustível o carvão mineral. (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 4 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral



Fonte: (ANEEL, 2012).

Em contrapartida aos impactos ambientais, as termelétricas apresentam a possibilidade de construção em locais próximos aos centros consumidores, o que permite economia com as redes de transmissão e evita desperdício de energia elétrica. Além disso, a produção é constante durante o ano inteiro, uma vez que não depende de situações climáticas como é o caso das hidrelétricas, que podem ter a capacidade reduzida em períodos menos chuvosos. A abundância das reservas e o desenvolvimento de tecnologias limpas e combustão eficiente, conjugados à necessidade de expansão dos sistemas elétricos, indicam que o carvão mineral continuará sendo, por muitas décadas, uma fonte estratégica de reserva energética.

### 2.3.1 Carvão mineral: Combustível para termelétricas

O carvão mineral foi uma das primeiras fontes energéticas utilizada em larga escala pela humanidade, como um dos pilares da Primeira Revolução Industrial, no século XVIII, na geração de vapor para mover máquinas. No final do século seguinte, sua importância estendeu-se à geração de energia elétrica. Com o passar das décadas, o carvão mineral perdeu espaço na matriz energética global para o petróleo e o gás natural. Em meados dos anos 1970, o interesse pelo carvão mineral reacendeu, mantendo-se em alta até os dias atuais. (MÜLLER et al., 1987; FREITAS, 2012).

No Brasil, as reservas de carvão mineral são relativamente grandes e devem ser consideradas como uma importante fonte primária de energia a ser desenvolvida em curto prazo. Em função do possível esgotamento do potencial hidrelétrico economicamente e ambientalmente viável no horizonte de longo prazo, a disponibilidade desse recurso energético no sul do país a preços estáveis e relativamente baixos, torna o carvão importante no mix energético. Para isso, é necessário desenvolver tecnologias de geração com emissões reduzidas de gases poluentes e particulados a preços mais competitivos. (DOMENICO, 2013).

A capacidade instalada do parque gerador termelétrico a carvão mineral conforme apresentado na Tabela 2, totaliza 3,2 GW. Na região Sul, o empreendimento Presidente Medici Fase C, situado na cidade de Candiota no estado do Rio Grande do Sul, foi o último projeto a entrar em operação comercial com potência instalada de 350 MW, elevando a capacidade do complexo termelétrico para 796 MW instalados, que incrementa assim, a produção brasileira de energia elétrica a partir do carvão mineral. (ANEEL, 2015).

Tabela 2 – Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil, situação em 2015

Usina	Potência Nominal (MW)	Localização
Charqueadas	72	Charqueadas (RS)
Presidente Medici (A, B e C)	796	Candiota (RS)
Figueira	20	Figueira (PR)
Jorge Lacerda A	232	Capivari de Baixo (SC)
Jorge Lacerda B	262	Capivari de Baixo (SC)
Jorge Lacerda C	363	Capivari de Baixo (SC)
São Jerônimo	20	São Jerônimo (RS)
Porto do Pecém I	720	São Gonçalo do Amarante (CE)
Porto do Pecém II	365	São Gonçalo do Amarante (CE)
Porto do Itaqui	360	São Luis (MA)
<b>Total</b>	<b>3,2 GW</b>	

Fonte: (ANEEL, 2015).

Os recursos carboníferos do Brasil são da ordem de 32 bilhões de toneladas e estão concentrados no sul do país, assim distribuídos: 90,1% no estado do Rio Grande do Sul; 9,6% em Santa Catarina e 0,3% no Paraná. O ambiente em que foram formados os carvões brasileiros determinou suas características e possíveis aplicações nos dias de hoje. A Tabela 3 destaca as principais jazidas do Rio Grande do Sul, juntamente, com as propriedades específicas dos carvões produzidos. (TOLMASQUIM, 2016).

Tabela 3 – Propriedade dos carvões das jazidas do Rio Grande do Sul

Jazida	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Candiota	3200	23,3	52,5	1,6
Leão	2950	24,1	55,6	1,3
Charqueadas	2950	24,3	54,0	1,3
Iruí	3200	23,1	52,0	2,5
Capané	3100	29,5	52,0	0,8
Morungava/Chico Lomã	3.700 -4.500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6- 2,0
SantaTerezinha	3.800 -4.300	28,0-30,0	41,0-49,5	0,5-1,9

Fonte: (SATC, 2014).

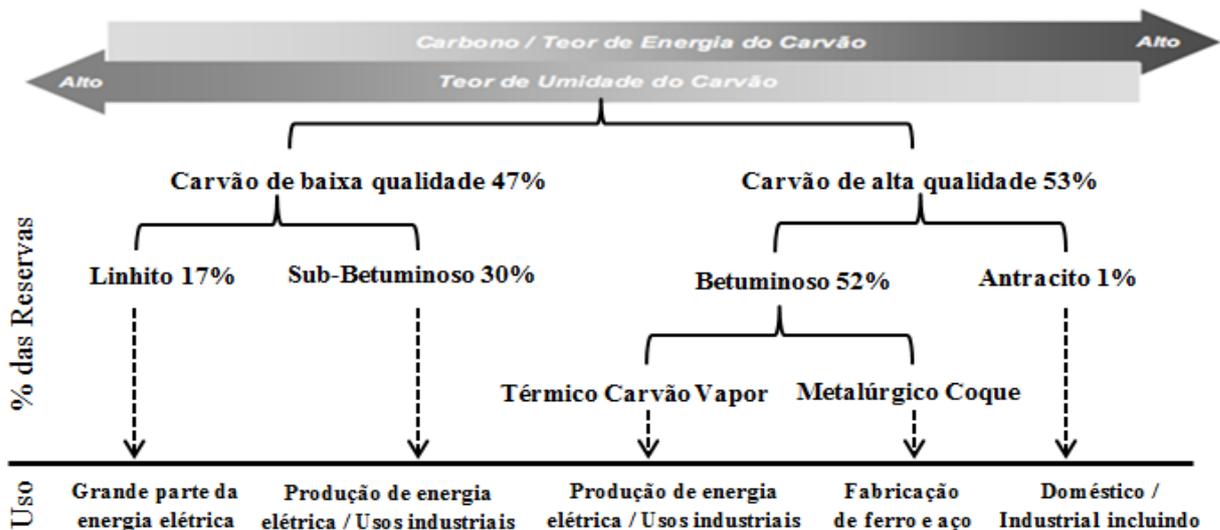
O carvão mineral brasileiro, por dispor tais propriedades, apresenta um alto conteúdo de impurezas, teor de cinzas em torno de 40 e 55,6% e de enxofre geralmente entre 0,5 e 2,5%, e um baixo poder calorífico, normalmente entre 2.950 e 4.500 kcal/kg. Essas características fazem com que seja difícil o seu beneficiamento, separação da matéria orgânica. O carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão originando diferentes camadas de carvão mineral. O carbono, em função do seu elevado teor, é o principal elemento químico no carvão mineral. (NUNES, 2012).

As propriedades físicas e químicas variam com o grau de maturidade, chamado de carbonificação ou rank. O grau de metamorfismo classifica o carvão mineral conforme o teor de carbono em turfa, com cerca de 60% de carbono, linhito com 70%, sub-betuminoso, betuminoso com 80% a 85% e antracito com 90% de carbono. Referindo-se a baixo rank o linhito e o sub-betuminoso, tipicamente moles, friáveis com aparência de terra, com altos níveis de umidade e baixo conteúdo de carbono e, por conseguinte, baixo poder energético. Quanto maior o rank do carvão mineral, maior é o conteúdo energético. A Figura 5 apresenta o diagrama do ranking do carvão mineral. (MATSINHE, 2012).

O antracito é o topo da escala e tem um teor de carbono elevado, alta capacidade energética e poder calorífico. Carvões de alto rank são tipicamente duros, robustos e

apresentam uma aparência preta e vítrea, caracterizado pela compactação e consequente eliminação de água. Em função do baixo poder calorífico do carvão mineral nacional, o seu transporte por longas distâncias não se justifica economicamente. Por outro lado, o carvão mineral importado possui qualidade bem superior ao nacional, permitindo seu transporte por grandes distâncias, o que tipicamente é feito por navios e trens. (DOMENICO, 2013).

Figura 5 – Tipos de carvão mineral e seus usos



Fonte: (ANEEL, 2012).

Algumas sinergias com outros setores no transporte marinho podem ser observados como é o caso, por exemplo, dos navios que levam minério de ferro do Brasil para a China e voltam carregados com carvão mineral, reduzindo os custos do frete. Dessa forma, pressupõe-se que todas as novas usinas que venham a ser implantadas na região sul deverão utilizar o carvão mineral nacional e ser localizadas próximas às minas enquanto que nas demais regiões do país, deverão utilizar o carvão mineral importado e ser localizadas nas proximidades de portos ou ferrovias que tenham conexão com esses portos. (TOLMASQUIM, 2016).

As usinas termelétricas a carvão mineral são largamente empregadas em todo o mundo e apresentam características técnicas, como alto fator de capacidade, que trazem ganhos de confiabilidade ao sistema elétrico. Contudo, o carvão mineral é uma das fontes primárias para produção de energia elétrica mais agressivas ao meio ambiente. Ainda que sua extração e posterior utilização na produção de energia gerem benefícios econômicos, o processo de produção, da extração até a combustão, provoca significativos impactos ambientais.

### 2.3.2 Aspectos Ambientais da Geração Termelétrica

Em virtude dos impactos negativos gerados pelo uso do carvão mineral e a atual atenção mundial voltada à preservação do ambiente, principalmente no que diz respeito ao efeito estufa e às mudanças climáticas, deve ser adotada uma nova postura frente ao processo de mineração e produção de energia. Logo, surge a importância de se investir em obras de mitigação e em desenvolvimento de tecnologias limpas.

A combustão do carvão mineral gera grandes quantidades de resíduos, entre eles as cinzas leves ou secas (fly ash), resultantes da captação de material, carregado das caldeiras pela corrente de gases de exaustão, pelos precipitadores; cinzas pesadas ou úmidas (bottom ash), que derivam da limpeza hidráulica das caldeiras sendo transportadas até as bacias de sedimentação; e lama do sistema de dessulfurização de gases que são gerados a partir de produtos químicos introduzidos junto aos gases de exaustão para remoção do enxofre. (CASTRO; ALMEIDA; RODRIGUES, 2012).

As cinzas recuperadas podem ser aproveitadas em processos de metalurgia e no campo da construção, onde são misturadas com o cimento. O maior impacto ambiental produzido pelas termelétricas que utilizam como combustível o carvão mineral são os gases, muitos deles de efeito estufa. Sendo produzidos a partir da combustão gases como óxidos e dióxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido e dióxido de carbono, entre outros e particulados. (NAIME, 2014). A comparação de emissão do carvão mineral em relação ao petróleo e ao gás natural consta na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre emissões de combustíveis fósseis

<b>Poluente</b>	<b>Gás Natural</b>	<b>Petróleo</b>	<b>Carvão mineral</b>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	117,000	164,000	208,000
Monóxido de Carbono (CO)	40	33	208
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	92	448	457
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	1	1,122	2,591
Particulados	7	84	2,744
Mercúrio (Hg)	0.000	0.007	0.016

Fonte: (CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, 2012).

Legenda: Emissões em libras por bilhão de Btu de energia fornecida.

A emissão de gases e particulados ocorre em função das características químicas dos combustíveis e das tecnologias utilizadas para geração, incluindo seus sistemas de retenção. Essas emissões geram alteração da qualidade do ar, efeitos na saúde da população local e acidificação da água das chuvas (SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>). Para mitigar esses efeitos deve-se realizar a

escolha de sítio que favoreça a dispersão atmosférica, utilizar equipamentos que reduzam as emissões, como queimadores de baixa emissão de NO<sub>x</sub>, dessulfurizadores, precipitadores eletroestáticos, chaminés adequadas para a dispersão dos poluentes e, como medida de controle, monitorar as emissões e realizar o inventário de GEE. (CEMIG, 2012).

O licenciamento ambiental, devido a sua relevância, exige que seja realizada a modelagem de dispersão dos poluentes emitidos para avaliar preliminarmente como a qualidade do ar na região será afetada e prevenir que as concentrações limite sejam ultrapassadas. Apesar de historicamente a mineração do carvão mineral no sul do país ter sido realizada com alto grau poluidor, na atualidade, os projetos de minas têm como concepção básica a implementação do controle ambiental no sentido de prevenir e mitigar os impactos ambientais. (CASTRO; ALMEIDA; RODRIGUES, 2012).

Para entendimento sobre os impactos ambientais da geração termelétrica a carvão mineral é necessário analisar a cadeia energética completa do combustível. A cadeia de produção energética a partir do carvão mineral inclui várias etapas que variam de acordo com a tecnologia empregada, podendo, no entanto, ser generalizada como se segue: Exploração e mineração do carvão mineral; beneficiamento do carvão mineral; transporte do carvão mineral; armazenamento do carvão mineral; queima do carvão mineral para produção de energia; disposição e gerenciamento dos resíduos. (TOLMASQUIM, 2016).

A mineração do carvão mineral causa a emissão do metano adsorvido, adesão de moléculas a uma superfície sólida, no mineral e necessita de um alto consumo de água para remover impurezas. Essa limpeza gera efluentes aquosos com metais pesados e resíduos sólidos resultantes da lavagem. Também há impactos no solo usado para a mineração e perturbações nas superfícies, quando a mina é subterrânea. (CEMIG, 2012).

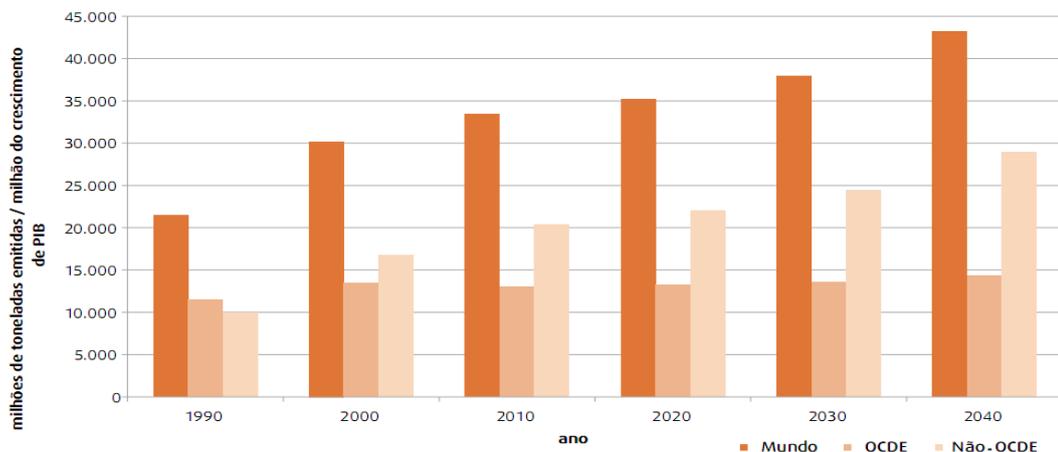
Após a mineração, o carvão mineral pode ser beneficiado, onde são empregadas técnicas como a lavagem e a jigagem a seco, que utilizam do mesmo princípio de diferença de densidade para separar as impurezas envolvidas, tais como a argila, elemento responsável pela formação das cinzas geradas após a combustão, e a pirita, elemento responsável pelo teor de enxofre, o qual é tóxico ao ambiente. Em seguida o carvão mineral é transportado para a usina termelétrica. No Brasil, os impactos do transporte são reduzidos, pois as usinas estão localizadas próximo à mina. (TORREZANI; OLIVEIRA, 2013).

A fase de combustão do carvão mineral consiste em uma série de reações exotérmicas entre o combustível e o ar ou oxigênio a altas temperaturas. Para que a reação ocorra é necessária uma quantidade suficiente de gás, de tempo de residência, de turbulência do meio e de temperatura. Este processo promove o lançamento de gases extremamente tóxicos e cinzas

que produzidas ao longo do processo também podem ser lixiviadas no próprio local, transportadas pelos ventos ou pela erosão hídrica, contaminando o solo e os recursos hídricos do entorno. É o processo que mais contribui para a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, seguido do setor de transportes (NUNES, 2012).

O crescimento mundial de emissões de gases do efeito estufa projeta um crescimento equivalente a 31,2 trilhões de toneladas, em 2010, para 45,5 trilhões de toneladas em 2040. O crescimento mais significativo provavelmente ocorrerá nos países não pertencentes à OCDE, em face ao elevado crescimento do carvão mineral para produção de energia. Em 2010, a emissão de gases de efeito estufa pelos países não pertencentes à organização superou a emissão oriunda dos países pertencentes em 38%. Em 2040, a produção de gases do efeito estufa será 127% maior nos países não pertencentes à OCDE, conforme a Figura 6. (CAPELETTO, 2015).

Figura 6 – Emissão mundial de dióxido de carbono OCDE e não-OCDE



Fonte: (EIA, 2013).

Apesar dos esforços para manter a matriz elétrica predominantemente baseada em fontes de baixa emissão de gases de efeito estufa e assim minimizar as consequências das mudanças climáticas, as características técnicas das novas hidrelétricas e das fontes renováveis intermitentes como a eólica e a solar não permitem que o planejamento setorial renuncie às opções termelétricas de fontes não renováveis. Neste sentido, o carvão mineral, por apresentar custo competitivo e características que agregam confiabilidade ao SIN, além de atualmente apresentar tecnologias de menor impacto ambiental, tem sido uma opção viável para a geração de energia. (TOLMASQUIM, 2016).

Diversas iniciativas têm sido empreendidas no sentido de reduzir as emissões de gases ou de mitigar seus efeitos. O setor tem investido na busca da eficiência e redução dos seus impactos ambientais com o desenvolvimento das tecnologia limpas do carvão mineral, *Clean Coal Technologies* (CCT). Contudo, estas tecnologias de uso do carvão mineral devem ser aprimoradas para acompanhar a evolução da legislação ambiental, cada vez mais restritiva, para manter a competitividade dessa fonte energética em relação às demais.

A escolha da melhor solução passa por pesar os custos, benefícios e impactos socioambientais. Adicionalmente, cada empreendimento é submetido ao licenciamento ambiental, no qual são avaliados se os impactos socioambientais gerados por suas atividades estão em níveis aceitáveis. Apesar de altamente poluente, o desenvolvimento de tecnologias limpas e a grande quantidade de reservas mundiais tornam o carvão mineral um combustível promissor para continuar sendo utilizado em grande escala, pois é livre de fatores limitantes como sazonalidade, preços flutuantes, dificuldade no transporte ou questões de segurança.

#### 2.4 TECNOLOGIAS DE ABATIMENTO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A consciência de que exploração do carvão mineral deve estar atrelada a investimentos em obras que busquem a mitigação e o desenvolvimento de tecnologias limpas, tendo em vista que este minério é responsável por entre 30 a 35% do total de emissões de CO<sub>2</sub> um dos principais gases do efeito estufa. A remoção ou redução de poluentes atmosféricos produzidos pelo setor energético inclui tecnologias que podem agir na pré-combustão, combustão ou pós-combustão. A tecnologia empregada depende das exigências legais, do combustível utilizado e do processo de geração de energia. (CEMIG, 2012).

Ainda que o carvão mineral brasileiro apresente baixo poder calorífico e elevados teores de cinzas e enxofre, a disponibilidade de reservas e o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes sugerem que a geração térmica a carvão mineral apresente um potencial de expansão, que atinge 17.000 MW. Em relação ao rendimento, a referência mundial aponta desempenho médio de 32%. Usinas mais novas, com plantas que utilizam tecnologia à combustão pulverizada, os rendimentos alcançam proveitos maiores (35%), podendo chegar a mais de 40% em plantas que operam com ciclo supercrítico ou ultra supercrítico com carvões de qualidade superior. (TORREZANI; OLIVEIRA, 2013).

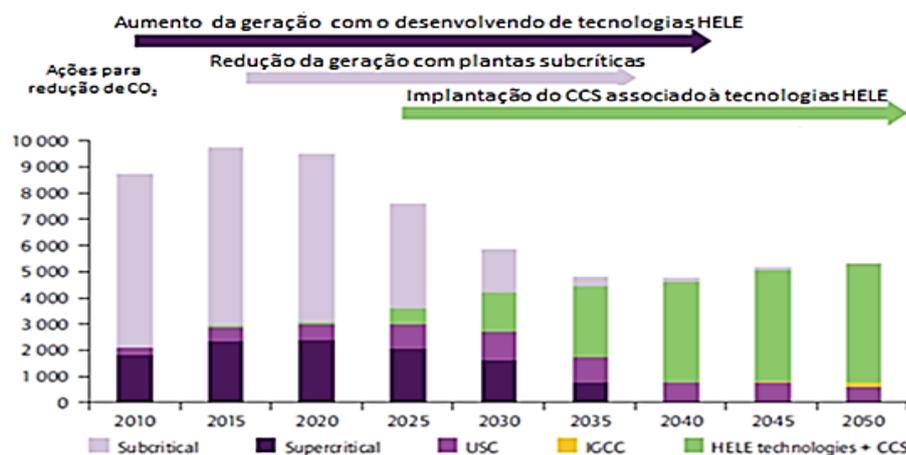
Para assegurar a utilização do carvão mineral em consonância com as restrições ambientais cada vez mais exigentes, têm se investido em remoção de impurezas antes da combustão, durante o processo de combustão, após a combustão e na conversão em

combustíveis líquidos (liquefação) ou gasosos (gaseificação). Os quais deverão conduzir a uma diversidade de opções tecnológicas para geração de eletricidade a carvão mineral com alta eficiência e baixas emissões (*High Efficiency Low Emissions – HELE Technology*). (TOLMASQUIM, 2016).

O documento *Technology Roadmap High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation* indica que as plantas subcríticas convencionais, tipo mais utilizado em usinas térmicas a carvão mineral, inclusive no Brasil, com eficiência que pode atingir até 38%, continuarão sendo as tecnologias preponderantes na expansão do parque gerador termelétrico no horizonte até 2025. (IEA, 2012).

A partir de 2030, essa tecnologia perderá participação no conjunto global em detrimento a uma participação maior de tecnologias com maior eficiência e baixa emissão, incluindo avanços para ciclos ultra supercríticos com eficiência superior a 50% e tecnologias de CCS até 2050. A partir de 2050 tecnologias de IGCC, tornam-se uma opção tecnológica viável e atraente do ponto de vista ambiental, contudo, ainda dependem de redução dos custos de investimentos para se viabilizarem no longo prazo. (IEA, 2012). Na Figura 7, estão apresentadas as tecnologias disponíveis e a respectiva estimativa de entrada em operação.

Figura 7 – Geração global de eletricidade a partir do carvão mineral (TWh)



Fonte: (IEA, 2012).

A eficiência média de plantas a carvão mineral depende do tipo de ciclo, pressão e temperatura, da tecnologia empregada e da qualidade do combustível. Plantas de carvão mineral pulverizado que operam em ciclo subcrítico podem ter um rendimento térmico abaixo de 30%, quando queimam carvão mineral de baixa qualidade, ou entre 34 e 36%, quando

queimam carvão mineral de melhor qualidade. Unidades novas e que operam com equipamentos de controle de emissões podem alcançar até 39% de rendimento térmico. As usinas mais recentes a carvão mineral pulverizado que operam em ciclo supercrítico apresentam rendimento térmico médio entre 42 e 45%. (TOLMASQUIM, 2016).

A utilização de carvão mineral na produção de energia envolve a escolha da tecnologia da caldeira, método de combustão e condições operacionais mais adequados para os poluentes envolvidos. Investimentos tecnológicos a fim de eliminar ou minimizar a emissão de pesadas cargas de gases poluentes tornam-se essenciais. Para o carvão mineral, há quatro tecnologias de utilização do combustível: carvão mineral pulverizado (PCC); usinas supercríticas e ultra supercríticas; combustão em leito fluidizado (FBC) e IGCC. (CEMIG, 2012).

#### **2.4.1 Carvão mineral pulverizado**

Sistemas de combustão pulverizada é a tecnologia mais utilizada para a combustão de carvão mineral e geração de energia elétrica no mundo, representando mais de 90% das unidades em operação. Desenvolvida em 1920, esta tecnologia consiste na redução do tamanho da partícula de carvão mineral para introduzi-lo na caldeira onde será queimado a altas temperaturas na faixa de 1300 a 1700 °C. Dessa forma, o carvão mineral antes de ser queimado é processado em moinhos até ser pulverizado. Como a queima é feita na forma pulverizada, há um aumento na eficiência, devido à grande área superficial existente para a reação. (TOLMASQUIM, 2016).

É utilizada para uma gama grande de carvões, entretanto com restrições a carvões com altos teores de cinzas. Para ser considerada uma tecnologia de queima limpa necessita ser complementada por sistemas modernos de controle de NOx, de dessulfurização de gases e de remoção de material particulado, filtros e outros sistemas de remoção de impurezas. Além disso, os sistemas de dessulfurização de gases podem ser projetados para utilizar calcário ou amônia como absorventes, possibilitando a remoção de até 96% do enxofre e de até 99,99% do material particulado. (NUNES, 2012).

O carvão mineral pulverizado chega a partículas menores que 0,074 milímetros e o tempo médio de permanência do combustível na caldeira equivale ao intervalo de 2 a 5 segundos. A maioria das tecnologias modernas de combustão pulverizada atinge 99% de eficiência na combustão. A eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica pode chegar a 43%, no caso de plantas com ciclo a vapor supercrítico com temperatura típica de 600°C. Ganhos adicionais de eficiência podem ser alcançados, mas atualmente o

encarecimento do sistema não os justifica. Todas as usinas brasileiras em operação e em construção usam essa tecnologia em ciclo subcrítico. (CEMIG, 2012).

#### 2.4.2 Usinas supercríticas e ultra supercríticas

As tecnologias de ciclo supercrítico e ultra supercrítico, também conhecida como tecnologia do carvão pulverizado avançado, são usinas PCC que operam em temperaturas e pressões maiores que as tradicionais, em busca de mais eficiência. Uma comparação entre elas e as usinas tradicionais ou subcríticas pode ser vista na Tabela 5. Os maiores problemas dessa tecnologia estão nos altos níveis de poluentes ( $\text{NO}_x$ ) e no fato de que não funcionam bem com carvão mineral de baixa qualidade, como o do Brasil. (CEMIG, 2012).

Tabela 5 – Eficiência média de várias plantas, usando a tecnologia PCC

<b>Plantas</b>	<b>Níveis médios de eficiência</b>
Baixa Eficiência	29%
Alta Eficiência	39%
Supercrítico	Até 46%
Ultra supercrítico	50 - 55%

Fonte: (CEMIG, 2012).

As termelétricas a carvão mineral no Brasil, com exceção de Candiota Fase C, são antigas e operam com rendimentos abaixo de 34%. A adoção de novas tecnologias como caldeiras supercríticas, podem proporcionar um rendimento acima de 40% com menores índices de emissões. A tecnologia do carvão pulverizado avançado apresenta sistemas modernos de controle de poluentes tais como: injeção de amônia, redução catalítica seletiva, filtros de mangas e sistema de dessulfurização úmida. (NUNES, 2012).

O vapor principal, na saída do superaquecedor, apresenta pressão superior ao ponto crítico da água e temperatura igual ou superior a 540°C, até cerca de 580°C no caso da supercrítica ou superior a 580°C no caso da ultra supercrítica, com temperatura similar ocorrendo no vapor reaquecido. (TOLMASQUIM, 2016).

Devido ao maior rendimento térmico das caldeiras supercríticas e ultra supercríticas há menor consumo de combustível e menores emissões de poluentes convencionais e de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Há também menores consumos de reagentes, resíduos sólidos, uso de água e de custos operacionais. A maior participação das usinas supercríticas ocorre na Coreia, Japão,

Cazaquistão, Ucrânia, Dinamarca, China e EUA. Os países com menores participações são Índia, Canadá e Austrália. Usinas termelétricas ultra supercríticas estavam em operação, em 2010, na Alemanha, Japão, Dinamarca, China e Itália, mas com participação global de geração de eletricidade inferior a 1%. (SILVA, 2016).

### **2.4.3 Combustão em leito fluidizado**

A combustão de carvão mineral em leito fluidizado comporta uma grande variedade de combustíveis sendo indicada para minerais de baixa qualidade, como os brasileiros. Consiste em formar um fino leito de cinzas, calcário para redução de enxofre, e partículas de carvão mineral em um forno e forçar a passagem do ar através da mistura, fazendo com que ela se torne suspensa ou fluidizada. Quando o combustível é adicionado ao leito fluidizado quente ocorre a combustão completa. O calor gerado é recuperado por meio de trocadores de calor e utilizado para a geração de energia elétrica ou para o uso industrial. (NUNES, 2012).

O ar a alta pressão é soprado através do carvão mineral moído, em torno de 3 milímetros. As partículas de carvão mineral são arrastadas no ar e formam um leito flutuante (leito fluidizado), que se comporta como um fluido em ebulição. O inventário de combustível no leito é apenas 5% sendo o restante material inerte, como cinza ou areia, sendo particularmente útil para carvões com alto teor de cinza. (TOLMASQUIM, 2016).

É uma tecnologia bastante versátil, sendo operada à pressão atmosférica ou com pressurização, assim como usando baixas velocidades de fluidização (leitos borbulhantes) ou altas velocidades (leitos circulantes). Nessa tecnologia, o leito sólido é constituído geralmente de calcário, cujo objetivo é acelerar a transferência da troca térmica no processo. Logo, propicia a redução de enxofre de até 90%, sem a necessidade de dessulfurizadores adicionais, e de 70 a 80% do nitrogênio devido ao uso de temperaturas inferiores ao processo convencional de pulverização, cerca de 800 a 900°C. (CEMIG, 2012).

A combustão permite flexibilidade no uso de combustíveis de baixa qualidade, de baixo poder calorífico, baixa volatilidade, alto teor de enxofre, alto teor de cinzas e alto teor de umidade, sendo as instalações relativamente menores quando comparadas às de carvões pulverizados convencionais. Outra vantagem está na redução de enxofre sem perdas de eficiência térmica, além da possibilidade da tecnologia ser implementada em usinas termelétricas existentes. As tecnologias de combustão pulverizada e leito fluidizado são as alternativas que apresentam as melhores perspectivas para aplicação nas futuras termelétricas a carvão mineral nacional. (SILVA, 2016).

#### 2.4.4 Gaseificação integrada com ciclo combinado

A tecnologia de gaseificação integrada com ciclo combinado é relativamente nova, o principal objetivo consiste em tirar vantagem da eficiência do ciclo combinado de combustíveis de baixa qualidade. O IGCC é um processo no qual o combustível é gaseificado com ar enriquecido ou com oxigênio e vapor d'água produzindo um gás combustível. Usa o ciclo combinado com turbina a gás impulsionada pela combustão do gás de síntese, enquanto os gases de escape da turbina a gás ainda quentes, cerca de 500°C geram, em uma caldeira de recuperação, vapor superaquecido para acionar uma turbina a vapor. (TOLMASQUIM, 2016).

Consiste na combinação de duas tecnologias, a gaseificação de carvão mineral para produção do gás de síntese, e a de turbina a gás de ciclo combinado para produção de eletricidade. O carvão mineral é alimentado no gaseificador onde é parcialmente oxidado a temperaturas de até 1500°C e sob pressões de até 80 bar. O termo gaseificação é definido como sendo a reação de um combustível sólido com o vapor d'água ou o dióxido de carbono a alta temperatura para gerar produto gasoso que servirá de energia ou matéria-prima para outro processo. (NUNES, 2012).

Entre as tecnologias limpas que utilizam carvão mineral, a gaseificação é particularmente interessante, uma vez que permite tanto gerar energia, principalmente utilizando a gaseificação integrada com ciclo combinado quanto produzir combustíveis limpos, com referência particular ao hidrogênio. Processos de gaseificação são os mais eficientes e ambientalmente corretos para a produção de eletricidade de baixo custo, entre outros produtos, e podem ser prontamente adaptados ao processo de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>. (DOMENICO, 2013).

Atualmente, existe uma quantidade muito menor de plantas de IGCC no mundo, comparativamente às plantas de carvão pulverizado, uma vez que as primeiras ainda são caras e complexas. O ANEXO A apresenta a seleção das usinas de gaseificação existentes no mundo que utilizam carvão mineral como matéria-prima. Dividida pelo nome da usina, país, tecnologia utilizada, ano de iniciação, realidade do projeto, status do gaseificador, número total de gaseificadores, capacidade de produção de gás de síntese, saída equivalente em MWth e produto resultante.

O movimento de tendência das tecnologias existentes para as novas tecnologias zero de emissões significa incorporar sistema de captura e armazenamento carbono e maiores custos para as tecnologias de carvão pulverizado e de IGCC. Os investimentos podem se

tornar de 56 a 82% maiores no caso da primeira tecnologia e de 27 a 50% maiores no caso da segunda tecnologia. (LIANG; XING; SHEN, 2013).

Dentre as outras tecnologias comerciais baseadas em carvão mineral é o processo mais limpo. A captura de CO<sub>2</sub> de uma planta de geração de energia utilizando gaseificação requer significativamente menor perda de energia e custo de capital adicional do que para outra tecnologia de geração de energia, como os processos de combustão utilizando carvão, óleo ou gás natural. Os processos baseados em gaseificação são também simples e menos caros para um posterior ajuste para habilitação na captura de CO<sub>2</sub>. (GUO; HUANG; ZHOU, 2015).

A usina IGCC apresenta alto rendimento térmico, 40 a 45% com potencial para 50% e com menos poluição atmosférica, quando comparada às tecnologias baseadas no carvão mineral como combustível. Com isso, uma ação essencial representa a melhoria da eficiência das plantas em operação no atual sistema elétrico nacional, tendo em vista que a perspectiva tecnológica mais concreta para o curto e médio prazo aponta para a continuidade do uso da tecnologia de carvão mineral pulverizado em ciclo subcrítico, com eficiência média na ordem de 33 a 35%. (SILVA, 2016).

A busca no incremento da eficiência na produção de energia elétrica e a ênfase na utilização de turbinas a gás, bem como de células combustíveis de alto rendimento, têm criado um forte incentivo para desenvolver sistemas de gaseificação de elevada eficiência, especificamente projetados para fornecer combustível para a geração de eletricidade. Tornando a gaseificação uma maneira eficiente de explorar e transformar o carvão mineral. De modo geral, o crescimento econômico e a proteção ao meio ambiente serão os principais motivadores de mudanças no setor energético, exigindo que grande parte da nova geração seja livre de carbono e que haja um forte aumento na eficiência do uso de combustíveis fósseis.

## 2.5 PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA

O Processo de Hierarquia Analítica, introduzido por Thomas Saaty, é uma ferramenta eficaz para lidar com a tomada de decisões complexas que envolvem problemas com múltiplos critérios e pode ajudar o tomador de decisões a estabelecer prioridades em função da melhor alternativa. Decisões complexas são reduzidas a uma série de comparações em pares, para sintetizar os resultados. (SAATY T., 1980). Na análise, é considerado um conjunto de critérios de avaliação e um conjunto de alternativas entre as quais a melhor decisão deve ser feita. Sendo que, a melhor opção é aquela que consegue o *trade-off* mais adequado entre os diferentes critérios.

Ao utilizar o método AHP para modelar um problema, torna-se necessário uma estrutura hierárquica ou de rede para representar esse problema e comparações em pares para estabelecer relações dentro da estrutura. O método divide o problema geral em avaliações de menor importância, enquanto mantém, ao mesmo tempo, a participação desses problemas menores na decisão global. (SAATY R., 1987). Para um problema complexo, é mais fácil dividi-lo em outros menores, porque, quando solucionados individualmente e depois somados, estes representam a decisão do problema inicial. O problema é estruturado como hierarquia e, posteriormente, sofre um processo de priorização.

As etapas de pensamento analítico compreendem a construção de hierarquias, a definição de prioridades e a consistência lógica. Na hierarquia, o primeiro nível corresponde ao propósito geral do problema, o segundo aos critérios e o terceiro as alternativas. As prioridades são fundamentadas na habilidade de perceber o relacionamento entre as situações observadas, comparando pares, à luz de um determinado critério. A consistência lógica estabelece as relações entre ideias de forma que elas sejam coerentes. (SAATY R., 1987).

A natureza de problemas de multicritérios soma-se aos processos de priorização, tendo em vista o envolvimento de decisões significativas, que requerem a atribuição de pesos para cada critério, quanto maior o peso, mais importante é o critério correspondente. O desenvolvimento do método contribuiu para a análise da possibilidade de um incremento tecnológico em longo prazo por parte da termelétrica, priorizando qual a alternativa tecnológica estaria mais acessível às demandas do processo de produção específico, objetivando a minimização de emissões de poluentes atmosféricos.

A hierarquia refere-se a uma estrutura que representa a dependência dos diversos níveis que a compõem de forma sequencial, ela deve ser desenvolvida com uma visão de cima para baixo, dos aspectos mais genéricos aos mais básicos, de forma que os níveis mais baixos detalhem os níveis superiores. É importante que os critérios aplicados em cada nível sejam homogêneos e não redundantes, pois devem apresentar a mesma importância relativa dentro do seu nível para evitar uma supervalorização deste critério. (MARTINS; COELHO, 2012).

A ordenação hierárquica possibilita uma visualização do sistema como um todo e seus componentes, bem como interações destes componentes e os impactos que os mesmos exercem sobre o sistema. E a compreender de forma global, o problema e a relação de complexidade, ajudando na avaliação dos critérios, através da comparação homogênea dos elementos. A ideia central é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações aos pares. Além disso, como os valores dos julgamentos das comparações paritárias são

baseados em experiência, intuição e em dados físicos, a AHP pode lidar com aspectos qualitativos e quantitativos de um problema de decisão. (SAATY R., 1987).

A comparação par a par se faz necessária logo após a construção da hierarquia, expressa em termos verbais, os quais serão convertidos em valores numéricos usando a Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos (Tabela 6). Essa escala de valores, que varia entre 1 e 9, é capaz de expressar o grau de importância de uma alternativa em relação a cada critério e os critérios de um determinado nível em relação ao critério do nível imediatamente superior, compondo a matriz de julgamento.

Tabela 6 – Escala numérica de Saaty

<b>Escala Numérica</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Ambos os elementos de igual importância.	Ambos os elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.

Fonte: (SAATY T., 1980).

O julgamento reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade. Sendo determinado o grau de importância do relacionamento de cada fator com o fator a ser comparado, estabelecendo as prioridades. O número de julgamentos necessários para completar a matriz de comparação entre os critérios mantém-se condicionada ao total de critérios estabelecidos, sendo que o número de elementos a serem comparados, corresponde: (SAATY T., 1980).

$$n(n-1) / 2 \quad (1)$$

O elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento-linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, coloca-se o valor recíproco na posição correspondente da matriz. Devido à relação de reciprocidade e à necessidade de consistência entre duas atividades ou critérios, os recíprocos dos valores acima de zero são inseridos na matriz criada quando uma comparação entre duas atividades já foi realizada. (BAINHA; VIANNA; MEZA, 2015).

A normalização dos valores obtidos na matriz tem por objetivo igualar todos os critérios a uma mesma unidade, sendo feita em seguida a média aritmética dos valores de cada linha, a fim de identificar a ordem de importância de cada critério. (SAATY T., 1990). O vetor de consistência é determinado a partir da divisão de cada peso pela sua respectiva prioridade. A média aritmética dos valores do vetor de consistência equivale à estimativa do maior autovalor de  $\lambda$ . (SAATY R., 1987). O índice de consistência (IC) para uma matriz de tamanho  $n$  é determinado pela equação:

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

Sendo que o  $\lambda_{\text{máx}}$  é o maior autovalor da matriz de julgamentos e “ $n$ ” o número de critérios. Para obter a Relação de Consistência (RC) basta dividir o IC pelo índice de Inconsistência Aleatória Média (IAM), uma constante cujo valor dependerá da dimensão da matriz analisada (Tabela 7). (SAATY T., 2012).

Tabela 7 – Índice de inconsistência aleatória

<b>Dimensão da Matriz</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Inconsistência Aleatória Média	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40

Fonte: (SAATY T., 2012).

O valor correspondente à relação de consistência é determinado pelo quociente entre índice de consistência e a inconsistência aleatória média, conforme equação:

$$RC = IC / IAM \quad (3)$$

A condição de consistência dos julgamentos considera que um valor aceitável para a relação de consistência deve manter-se inferior ou igual a 0,10. (SAATY T., 1990). Para finalizar os cálculos da análise, é necessário combinar as matrizes de comparação das alternativas com a matriz de importância dos critérios, desenvolvendo um vetor de prioridade global, por meio da equação: (SAATY T., 1980).

$$PG1 = PML(Cr1)*PML(a1)Cr1 + \dots + PML(Cr6)*PML(a1)Cr6 \quad (4)$$

A alternativa que apresentar a melhor prioridade global identifica a opção tecnologia mais acessível e compatível com o processo produtivo da UTE, possibilitando minimizar as emissões de poluentes atmosféricos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada em diversas fontes, buscando reunir as informações à respeito do assunto, o que forneceu um amplo conhecimento sobre a relação entre a energia elétrica e o desenvolvimento econômico brasileiro. Os princípios de funcionamento de uma termelétrica alimentada a carvão mineral também foram analisados juntamente com os respectivos impactos ambientais, ressaltando as principais tecnologias de abatimento de emissões atmosféricas.

As bases de dados internacionais utilizadas compreenderam *Web of Science*, *Science Direct* e a *Scopus*. Além disso, outras bases nacionais como bibliotecas virtuais e relatórios de órgãos governamentais foram consultadas. A escolha por essas bases ocorreu pelo fato de serem consideradas multidisciplinares, além de possuírem registros sobre a temática pesquisada permitindo exportar os dados de interesse. Outra fase da pesquisa bibliográfica foi destinada para analisar a produção térmica a carvão mineral no cenário mundial, relacionando as tecnologias que reduzem as impurezas do carvão e que estão sendo desenvolvidas pelos países que detêm o maior consumo da fonte energética para a geração de energia.

A utilização da metodologia adequada foi relevante para o bom andamento da pesquisa, possibilitando o devido planejamento das ações executadas como também a sistematização das informações coletadas, o que proporcionou maior confiabilidade nos resultados encontrados. A descrição deste capítulo possibilitou evidenciar os instrumentos de coleta e análise de informações, e a definição da amostra respondente.

#### 3.1 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE INFORMAÇÕES

Foram realizadas visitas na empresa com vistas à aplicação de questionário (APÊNDICE B) com os colaboradores dos diversos níveis hierárquicos, para verificar a compreensão frente às ações emergentes dos processos de gestão ambiental, juntamente com a realização de uma entrevista semiestruturada orientada pelo roteiro de execução e preenchimento da lista de verificação com o gerente/líder do setor do meio ambiente (APÊNDICE C), utilizando a observação *in loco* para obter dados complementares para a pesquisa, além de possibilitar a identificação de características intrínsecas aos processos de produção no que se refere às ações referentes ao controle ambiental.

Neste estudo, as informações coletadas advêm de fontes primárias e secundárias. As primárias envolveram a aplicação de questionário, entrevista semiestruturada, lista de

verificação e observação *in loco*, tendo como foco os objetivos propostos no gerenciamento ambiental. Enquanto as secundárias remeteram a análise em documentos formais, base de dados operacionalizados e publicações que relatam a atuação ambiental da empresa no mercado nacional.

Fundamentalmente, os procedimentos metodológicos desta etapa da pesquisa foram realizados em três fases: Levantamento de informações por meio da aplicação de questionário, entrevista semiestruturada e lista de verificação; Análise em documentos formais, publicações recentes e base de dados operacionalizados com o auxílio da disponibilização dos mesmos pela empresa; e a avaliação dos dados por meio da triangulação das informações obtidas.

O questionário foi elaborado levando-se em consideração as teses de doutorado dos autores Giesta (2009) e Souza (2010), envolvendo a avaliação do sistema de gestão ambiental em empresas, a proposta de questionário apresentado por Mol, Santos e Nunes (2013), as análises na 14ª pesquisa nacional sobre responsabilidade social e práticas sustentáveis desenvolvidas pelo instituto IRES (2013), e o questionário diagnóstico em relação a educação ambiental presente no documento ENCEA promovido pelo Ministério do Meio Ambiente em 2009, além da resolução CONAMA nº 436/2011, que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

Cabe ressaltar que todos estes documentos citados foram referenciados ao final do trabalho para possíveis consultas. Por conseguinte, o questionário contém em sua estrutura questões abertas e fechadas, com a predominância da segunda, sendo entregue em mãos aos colaboradores. As respostas classificaram-se em abertas, dicotômicas e de múltipla escolha, consideradas essencialmente pertinentes ao assunto.

As perguntas foram elaboradas de forma a não constranger o entrevistado sendo disponibilizado um termo de consentimento livre e esclarecido em participar da pesquisa, precedido de uma carta de apresentação e convite na qual consta a instituição e o curso de origem do pesquisador e o propósito da pesquisa. A aplicação do questionário piloto teve como finalidade analisar eventuais falhas na estrutura teórica e disposição das questões para evitar possíveis redundâncias, sendo esta aplicação considerada satisfatória em relação ao objetivo da pesquisa.

Fatores que poderiam afetar a decisão nas respostas dos questionários aplicados foram motivados devido à troca de funções de alguns colaboradores, sinalizando adaptação para estes nas atribuições da nova função. Outra situação percebida foi o desinteresse de alguns em participar. Esses fatores não interferiram nos objetivos da pesquisa, pois não acarretou grande

variação entre os resultados individuais, sendo esta minoria atribuída as diferenças reais, entre os indivíduos e em relação ao setor que atua na empresa.

A entrevista semiestruturada foi utilizada por facilitar a proximidade do pesquisador com o entrevistado e coletar dados e informações mais precisas. A vantagem deste instrumento de pesquisa é a flexibilidade atribuída ao pesquisador, buscando mais informações, que por ventura, não poderiam ter sido encontradas em fontes documentais. Orientada por algumas questões, a entrevista foi direcionada ao gestor/líder ambiental da termelétrica, a fim de coletar informações sobre os projetos desenvolvidos e as tecnologias limpas implementadas, além de outras questões pertinentes à pesquisa.

A organização em sua amplitude foi analisada e, especificamente, as ações vinculadas às atividades do sistema de gestão ambiental referentes à redução de gases poluentes na atmosfera, integrantes do planejamento estratégico priorizado, levando em consideração a política ambiental disseminada entre os colaboradores e o desenvolvimento de programas e práticas que proporcionem uma conscientização ambiental na execução das atividades.

### 3.2 DEFINIÇÃO DA AMOSTRA RESPONDENTE

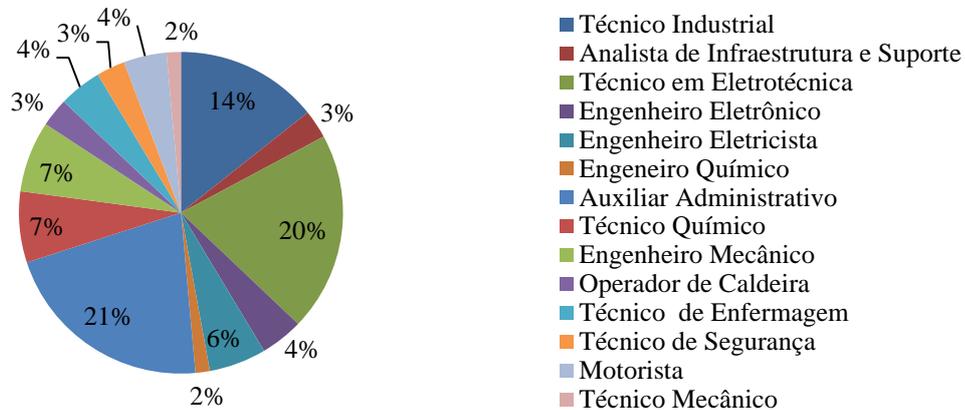
A formação desta amostra foi concebida de maneira aleatória, ou seja, a seleção dos colaboradores respondentes ocorreu totalmente ao acaso, vinculada apenas aos dias estabelecidos para aplicação dos questionários. Respeitando, desta forma, a escala de horários dos turnos semanais definida entre os colaboradores, impedindo que o mesmo seja selecionado novamente em outra aplicação.

Na amostragem aleatória simples todos os elementos que compõem o universo e estão descritos no marco amostral têm idêntica probabilidade de serem selecionados para a amostra, podendo ser com ou sem repetição. Sendo que, a amostragem sem reposição é mais eficiente pelo fato de permitir ter a mesma precisão utilizando uma amostra menor. (OCHOA, 2015).

O percentual de questionário considerado na pesquisa correspondeu a 40% do total de colaboradores que atuam no complexo termelétrico, totalizando 70 colaboradores. Dentre os cargos participantes, auxiliar administrativo e técnico em eletrotécnica foram os que possuíram maior representatividade na pesquisa. Além disso, buscou-se identificar o perfil dos colaboradores por meio do gênero, idade e tempo de atuação. Em relação ao gênero, mais de 75% dos respondentes são homens, a idade média equivale 39 anos, em relação a uma amplitude de 21-60 anos. O tempo de atuação na empresa obteve a média de 7 anos.

A Figura 8 apresenta os diversos cargos relacionados na pesquisa.

Figura 8 – Cargos relacionados na pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Em virtude da inviabilidade de interromper o processo produtivo da empresa, a aplicação dos questionários aconteceu *in loco*, isto é, no próprio local de trabalho onde a atividade é realizada, proporcionando maior articulação de conhecimento além de facilitar a compreensão das relações e dos processos que configuram a experiência cotidiana dos agentes envolvidos no contexto investigado. O propósito deste instrumento de coleta é verificar o impacto dos programas e das políticas atuais desenvolvidas na empresa, permitindo identificar áreas a serem melhoradas. As atitudes e opiniões dos seus funcionários foram totalmente ligadas ao SGA.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo objetiva apresentar os resultados obtidos por meio das etapas de campo, envolvendo a participação do gestor/líder ambiental e dos colaboradores do complexo termelétrico, no que se refere às respostas adquiridas nos instrumentos de coleta de informações. Além disso, indicadores baseados em sistemas de controle internos, documentos oficiais e relatórios gerenciais.

### 4.1 EFICIÊNCIA OPERACIONAL E TECNOLOGIAS LIMPAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A termelétrica é consciente que a utilização de novas tecnologias que permitam otimizar a utilização de recursos naturais, como o carvão mineral, seu principal insumo, viabiliza a geração termelétrica de forma sustentável, favorecendo o desenvolvimento econômico das comunidades do entorno de seus empreendimentos. O carvão consumido pela caldeira é *run of mine* (ROM), carvão bruto obtido diretamente da mina, suscetível a apresentar frequentes oscilações nas suas características básicas, pois variam em função da camada de carvão e com a própria frente de mineração.

O protótipo de jigagem a seco foi analisado para ser implementado pela usina, proporcionando benefícios na produção de carvão mineral com maior valor agregado, pois o carvão mineral jigado apresentou maior poder calorífico, do qual foi eliminado mais de 50% das impurezas. Além de que a viabilidade do beneficiamento a seco vai proporcionar abertura de novos mercados do produto gerado, considerando que este equipamento nunca foi utilizado no Brasil. Contudo, o projeto não teve andamento.

A combustão do carvão mineral ocorre de forma pulverizada, sendo processado em moinhos para alcançar a granulometria requerida no processo, o que melhora substancialmente a eficiência da combustão e da conversão da energia térmica em energia elétrica, mantendo uma eficiência de operação de 74%. Os impactos ambientais mais relevantes da queima deste combustível correspondem principalmente às emissões aéreas liberadas durante o período de operação da usina. O impacto na atmosfera determina que cuidados sejam tomados com a instalação de equipamentos que minimizem e controlem as emissões geradas.

A Tabela 8 apresenta as opções tecnológicas adotadas no tratamento de gases e resíduos do complexo termelétrico:

Tabela 8 – Tecnologias adotadas no tratamento de gases e resíduos da termelétrica

<b>Impactos Ambientais</b>	<b>Tecnologias de Tratamento</b>	<b>Redução Máxima</b>
<b>Particulados</b>	Filtragem de gases quentes	98%
	Lavador de gás	99,90%
	Precipitador eletrostático	99,99%
	Filtro de manga	99,99%
<b>Dióxido de Enxofre</b>	FGD com sistema de injeção de absorventes do tipo semi-seco	> 98%
<b>Óxido de Nitrogênio</b>	Controle de temperatura	70%
<b>Mercúrio</b>	Precipitador eletrostático	42%
	Filtros de manga	82%
	Lavador de gás	> 90%
<b>Cinzas</b>	Utilização como materiais de construção e engenharia civil	100%

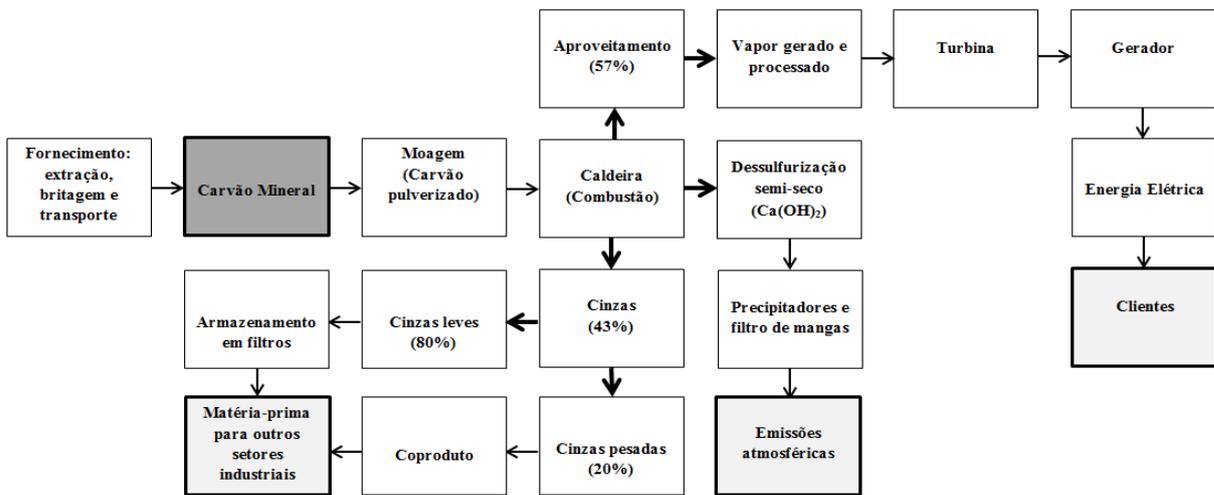
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Estas tecnologias de tratamento de gases efluentes representam as alternativas desenvolvidas para reduzir os níveis de emissões poluentes da termelétrica. O aumento da eficiência da planta de geração constitui-se na forma de melhor custo benefício e de resultados mais rápidos na redução destas emissões. Dessa forma, a articulação de métodos e tecnologias efetivas para o controle de emissões de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e particulados estão sendo adotadas, a tendência é que pressões ambientais aumentem para a redução de CO<sub>2</sub>.

Os padrões de emissões atmosféricas, definidos no licenciamento ambiental do empreendimento, respeitando a legislação, compreenderam: Material particulado, para operação com 80% da potência nominal: 265 mg/Nm<sup>3</sup>; Material particulado, para operação com 45% da potência nominal: 100 mg/Nm<sup>3</sup>; SO<sub>2</sub>: 1700 mg/Nm<sup>3</sup> e NO<sub>x</sub>: 680 mg/Nm<sup>3</sup>. Para garantir o atendimento dos padrões de emissão atmosférica fixados, o projeto adotou tecnologias modernas de abatimento de material particulado integrado ao sistema de dessulfurização, além da utilização de queimadores de baixa emissão de NO<sub>x</sub>.

A Figura 9 apresenta as tecnologias associadas no processo de produção de energia elétrica da usina.

Figura 9 – Diagrama simplificado da produção de energia com as tecnologias associadas ao processo



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

As emissões de  $\text{NO}_x$  são controladas diretamente no processo de combustão. Os queimadores de baixa emissão de  $\text{NO}_x$  garantem um melhor controle da temperatura de combustão reduzindo a oxidação do nitrogênio do ar de combustão. O sistema de dessulfurização adotado é do tipo semi-seco e emprega a cal virgem como agente dessulfurizante. As vantagens deste processo integrado ao sistema de coleta de pó compreende a alta eficiência proporcionada que permite índices superiores a 98% na redução das emissões de  $\text{SO}_2$ ; e 99% de abatimento de material particulado (fly ash), além de baixo consumo de água e sem gerar efluentes líquidos.

No tipo de caldeira utilizada na usina termelétrica, são produzidas cinzas de carvão como resíduos. Cerca de 80% das cinzas, resíduos minerais resultantes da queima do carvão do tipo leve são arrastados através do circuito de ar e gases de combustão, entrando nos filtros eletrostáticos, onde é captado de forma a atender o padrão de emissão estabelecido no processo de licenciamento ambiental. As cinzas pesadas, que representam 20% das cinzas totais, caem no fundo da fornalha do gerador de vapor, dentro de uma tremonha com água, onde é resfriada para a sua posterior extração.

As cinzas leves são coletadas por precipitadores eletrostáticos e transportadas pneumáticamente até os silos de armazenagem, para posterior transporte a outros setores industriais, utilizadas como matéria-prima. As cinzas pesadas são retiradas da fornalha pela sua base, caindo dentro de tanques com água de resfriamento e são removidas por arraste hidráulico para as bacias de decantação. Sedimentadas, poderão ser removidas para utilização.

As emissões de material particulado podem ser minimizadas empregando boas práticas de combustão e projeto. Os precipitadores eletrostáticos extraem o material particulado oriundo dos gases de combustão através do processo de ionização. Nestes, as partículas de cinza são carregadas eletrostaticamente com carga negativa e são, assim, atraídas por placas coletoras carregadas positivamente. A remoção das partículas aderidas às placas ocorre por meio de um sistema mecânico de batimento.

No filtro de mangas, os gases de combustão contendo partículas de cinza leve são forçados a passar do exterior para o interior das mangas, que são elementos filtrantes. Assim, o material particulado fica depositado em sua superfície externa. Os gases filtrados deixam o filtro através de um duto coletor e seguem para a chaminé para serem liberados para a atmosfera. Em tempos regulares é realizada na usina a remoção do particulado retido na parte externa das mangas.

Dessa forma, dentre as termelétricas, as usinas a carvão mineral são as que produzem maior quantidade de resíduos sólidos, incluindo cinzas leves e pesadas. Sedimentos do sistema de tratamento de efluentes líquidos e eventuais resíduos na preparação do combustível compõem os resíduos sólidos em menor escala. Contudo, para minimizar esses efeitos a usina mantém o gerenciamento destes resíduos, efetuando o tratamento e destinação adequada e prioriza, sempre que possível, o reaproveitamento.

#### 4.2 SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL SOB A ÓTICA DE UM MODELO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL

A usina de geração de energia elétrica a partir do carvão mineral, consciente do inevitável impacto causado por sua atividade fim à população e ao meio ambiente do entorno de seu empreendimento, investe em ações de responsabilidade socioambiental visando promover o desenvolvimento sustentável na área onde atua. As ações de cunho socioambiental são gerenciadas pela diretoria técnica e de meio ambiente, e executadas em parceria com todos os demais setores da usina. Em seu modelo de gestão ambiental, a existência de uma diretoria específica para gerenciar as questões socioambientais, corrobora o grau de aderência da alta gestão a estes compromissos.

No momento, a usina termelétrica não apresenta perspectiva de implantação de sistemas normativos ISO, devido ao processo produtivo manter uma estrutura robusta e a cultura que vem mantendo no decorrer dos anos, que promove à resistência às mudanças. Além de fatores econômicos em função da dificuldade em disponibilizar recursos financeiros

para possibilitar a aquisição de tecnologias mais avançadas visando adequação e melhoria dos processos. O SGA é o modo pelo qual a Usina Termelétrica (UTE) mobiliza-se, externamente e internamente para o alcance do atual desempenho ambiental.

Contudo, promove ações isoladas que buscam em síntese a melhoria operacional. Exemplos destas práticas compreendem adaptações recentes realizadas na estrutura da base da caldeira para melhorar sua eficiência; melhoria no controle de qualidade do carvão e de qualidade da cal; monitoramento on-line em todo o processo de dessulfurização; previsões de paradas anuais de manutenção com duração média de um mês para inspeção e reparação dos principais equipamentos, tais como: turbo-gerador, proteções contra desgastes em tubos de caldeira e auxiliares, moinhos, sistema de tratamento de gases, etc.

Para o controle do atendimento dos padrões de emissão, foram instalados equipamentos de monitoramento contínuo das emissões atmosféricas. Sendo realizado um levantamento dos níveis de partículas inaláveis, através de estações automáticas, em tempo integral na região, e semanalmente nos principais núcleos urbanos, com resultados que atendem o padrão de qualidade do ar definido pelo CONAMA 03/1990. Os pontos de análise da rede de monitoramento da qualidade do ar, qualidade das chuvas e condições meteorológicas, instalada na região de influência do complexo termelétrico, totalizam cinco estações automáticas.

Além disso, mantém o monitoramento de quatro pontos internos, facilitando a disponibilidade de acesso ao ponto de descarga para a verificação periódica das emissões, a fim de certificar que as exigências estabelecidas pela Resolução CONAMA 436/2011 estão sendo atendidos. Nos quatro pontos internos, o controle é mantido 24 horas por meio digital, sendo que a cada uma hora é realizada uma média equivalente a cada variável medida.

Caso detectado uma infração nos limites exigidos, o comando imediato compreende atuar na redução de carga até ser encontrada a causa principal. O monitoramento e controle dos poluentes atmosféricos apresentam equipamentos de medição apropriados, sendo que os registros de manutenção e calibração dos equipamentos de medição de gases são mantidos mensalmente, e os de materiais particulados trimestral. Mantendo as manutenções preventivas e em casos emergenciais a corretiva.

#### **4.2.1 Política Ambiental**

Conjunto de ações ordenadas e práticas que orientam o tratamento das questões ambientais em consonância com os princípios da sustentabilidade. Com a política, há um

alinhamento integrado na manutenção de um processo sistemático e contínuo de melhoria nas práticas de gestão, sobretudo na área de geração de energia. Para isso, a termelétrica desenvolve suas operações controlando os princípios de sustentabilidade e promove condutas junto a comunidade para garantir um aproveitamento consciente dos recursos naturais dispostos nas localidades que integram a atuação da usina. Sendo que os projetos de preservação ambiental surgiram, em sua maioria para atender a legislação vigente.

A política ambiental é definida por meio de reunião multidisciplinar corporativa para acompanhamento de tópicos. Concluídos todos os itens, inicia-se então a avaliação, a verificação e a validação. Estes processos são realizados pela alta direção, a qual é representada pelos diretores das unidades industriais. Uma sistemática para a avaliação de riscos ao meio ambiente foi estabelecida, a qual envolve a identificação dos aspectos ambientais em virtude de suas atividades, considerando todos os requisitos legais e outros requisitos aplicáveis, além da posterior avaliação dos impactos e riscos envolvidos, visando prover a infraestrutura necessária e determinar as demais medidas ao controle das operações.

Dentre os princípios da política ambiental desenvolvida destaca-se estar em conformidade com as políticas públicas, marcos legais e regulatórios pertinentes, bem como com os acordos internacionais dos quais o Brasil é signatário; assegurar a manutenção de um processo sistemático e contínuo de melhoria nas práticas de gestão bem como a incorporação da dimensão ambiental nos processos de produção, implantar programas e ações ambientais de forma articulada com outros setores e explorar as potencialidades de recursos energéticos locais e regionais, atendendo aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Os objetivos e metas são documentados, realistas, definidos no tempo e estabelecidos para cada função e níveis relevantes da UTE. Sendo considerada a ferramenta de gestão que permite o controle sobre aspectos e impactos ambientais nas atividades produtivas de forma interligada, e não isolada. São estabelecidos anualmente durante as reuniões de análise crítica e registrados na planilha de objetivos e metas do sistema de gestão. Para cada objetivo será definido um planejamento de ações, atividades necessárias para se atingir à meta estabelecida e os indicadores. Os objetivos mensuráveis serão avaliados mensalmente e as informações obtidas serão compiladas a fim de atender os processos de produção.

A UTE publica anualmente seu relatório de sustentabilidade para evidenciar o processo de transparência de suas práticas e resultados alcançados e seus impactos positivos e negativos nas dimensões social, econômica e ambiental, elaborado em conformidade com a quarta geração das diretrizes do *Global Reporting Initiative (GRI)* e orientações do Manual de Elaboração do Relatório Anual de Responsabilidade Socioambiental das Empresas de Energia

Elétrica, editado pela ANEEL. O objetivo da aplicação da metodologia da GRI é padronizar e aprimorar a qualidade da apresentação de desempenho do negócio e das práticas de gestão, visando incorporar padrões internacionais em seus modelos de relatório.

#### 4.2.2 Inventário de Gases de Efeito Estufa

Aliado à sua política de sustentabilidade, o inventário de emissões de GEE, com publicação anual, apresenta um diagnóstico da origem das emissões, quantidade emitida em determinado período e as causas que resulta para a atmosfera, permitindo à organização estabelecer estratégias para a redução e gestão desses gases. Além das emissões de GEE, também são apresentadas as emissões atmosféricas de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e material particulado baseado nas informações sobre consumo de carvão mineral da UTE. A abordagem de emissão por tipo de gás considerado para o ano de 2015 está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Emissões de GEE, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, e material particulado em toneladas métricas

GEE			SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	MP
CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
2.763.183	1.596	12.823	23.586	8.959	294

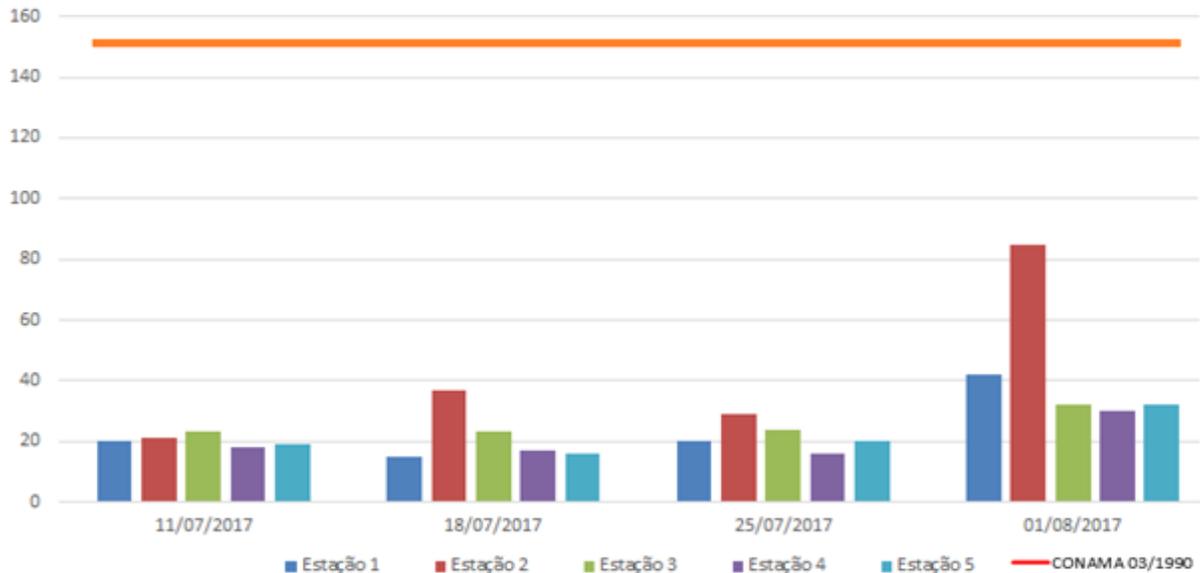
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Verifica-se que o CO<sub>2</sub> responde por aproximadamente 99,48% das emissões totais de GEE da empresa, seguido pelo óxido nitroso (0,46%) e o metano que representa menos de 0,1% das emissões totais (0,06%). A evolução temporal das emissões de GEE para os quatro últimos anos em toneladas equivalem: 2012 (3.322.914); 2013 (3.519.925); 2014 (2.875.018) e como já analisado em 2015 (2.777.602), mantendo uma redução gradual considerável. As emissões de SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> também possuíram reduções em comparação com o ano anterior, que resultaram na ordem de 24.420,33 e 9.274,98.

Para conferir as medições das estações de monitoramento de partículas inaláveis, foi possível acompanhar os índices mantidos em quatro dias no decorrer de um mês, mantendo a frequência de análise semanal. Estas partículas são substâncias que se encontram em suspensão na atmosfera, consideradas um dos poluentes mais graves em termos de consequências para a saúde pública porque afeta de forma mais significativa um maior número de pessoas num maior período de exposição. A Figura 10 relaciona as concentrações

de partículas inaláveis expressas em micrograma por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) com o limite aceitável definido pela legislação nacional.

Figura 10 – Medições das estações de monitoramento de partículas inaláveis



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A comparação dos resultados referentes às concentrações de partículas inaláveis, obtidas por meio do sistema de monitoramento de qualidade do ar, com o estipulado na Resolução do CONAMA 03/1990, revela que em nenhum ponto de análise houve concentrações que ultrapassem os padrões definidos e que os pontos que apresentaram os valores mais altos de partículas inaláveis podem estar associados a fatores meteorológicos, considerando a ação dos ventos como fator principal na dispersão do poluente. Este processo de monitoramento permite verificar possíveis alterações nas concentrações poluentes, auxiliando na tomada de decisão para minimizar os impactos ambientais.

#### 4.2.3 Práticas emergentes do SGA integrantes do planejamento estratégico

A política ambiental é documentada e transmitida perante os colaboradores a partir dos meios de comunicação interna. Evidenciada por 73% dos respondentes da pesquisa, que elencaram como pontos positivos a eficiência e articulação em relação ao plano ambiental, sendo desenvolvida e priorizada como um fator de redução de carga ou parada da usina caso

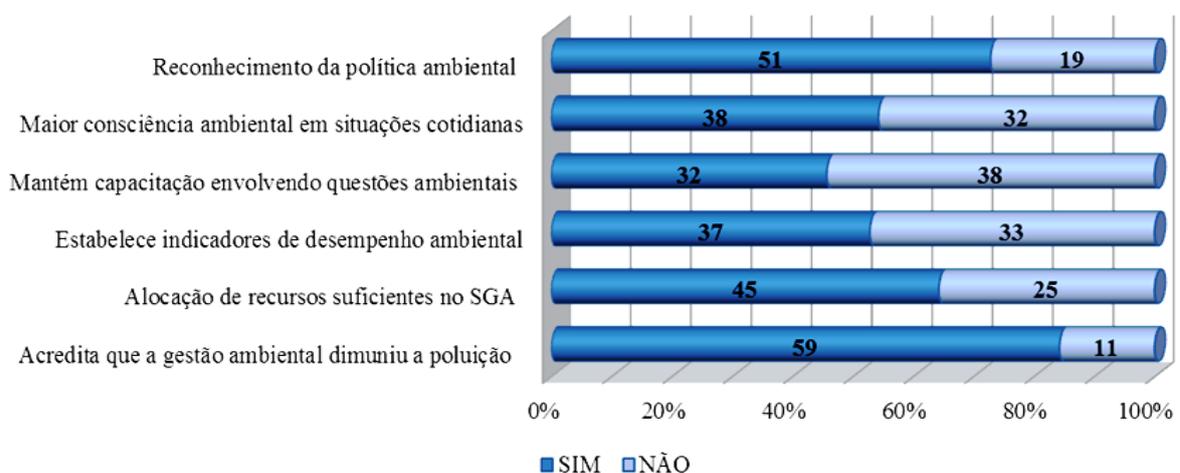
os índices exigidos pelos órgãos ambientais não forem atendidos. Como ponto negativo consideram ter inúmeros desafios para sua implementação, destacando a forma de divulgação de informações como não efetiva, restrita ao nível estratégico. Acrescentando que deveria contemplar treinamentos e palestras para aprofundar os conhecimentos sobre o tema.

Quando indagados se a política ambiental desenvolvida teria influenciado mudanças nas próprias atitudes ambientais fora da empresa, apenas 55% dos respondentes afirmaram ter observado uma maior consciência ambiental em relação a situações cotidianas, admitindo que a UTE não mantém programa de capacitação na intenção de assegurar práticas adequadas embasadas nas questões ambientais. Contudo, mais de 90% dos colaboradores considerados na amostra respondente declararam possuir conhecimentos específicos para realizar suas atividades na usina sem impactar o meio ambiente, sendo os conhecimentos adquiridos satisfatórios, em sua maioria, em relação a expectativa depositada pela UTE.

Os colaboradores sinalizaram a suficiência dos recursos alocados para o SGA, considerando os recursos humanos e habilidades especializadas, infraestrutura organizacional, tecnologia e financeiros. Conforme o percentual de colaboradores que indicam a carência de recursos alocados no SGA (36%), as principais observações compreendem os recursos: (1) Recursos humanos: investir na capacitação e valorização dos colaboradores; (2) Infraestrutura: que por falta destes investimentos ocorreu o fechamento de unidades geradoras no sistema de produção; (3) Tecnológico: investir em maquinários e ferramentaria.

A Figura 11 apresenta alguns dados quantitativos referente às respostas dos colaboradores.

Figura 11 – Percepção dos colaboradores quanto ao SGA



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A comunicação e divulgação relacionadas à governança corporativa para as partes interessadas são atendidas no conjunto dos procedimentos de gestão, bem como nos relatórios de gestão e de administração, publicados anualmente. Os colaboradores contam com a disponibilização eletrônica, através da intranet, de informações relevantes sobre projetos e programas de sustentabilidade desenvolvida pela UTE, bem como indicadores de desempenho ambiental, reconhecidos por 53% dos colaboradores.

Além dos métodos voltados aos colaboradores a UTE dispõe ainda de uma mídia, com tela estrategicamente posicionada nos locais de circulação da empresa, permitindo a divulgação de informações importantes de forma sintética e atualizada. No caso dos acionistas, são realizadas reuniões periódicas anuais, nas quais são discutidos temas relevantes de gestão. Para 95% dos colaboradores, a importância atribuída às ações ambientais desenvolvidas é de média à alta, sendo reconhecida a gestão ambiental, para 85% dos respondentes, responsável por diminuir a poluição e melhorar a qualidade do serviço oferecido, aumentando a eficiência operacional.

Relativamente às tecnologias que reduzem impactos ambientais pertencentes ao setor atuante da amostra de colaboradores, foi informado o uso de sensores de queima, gases e alarmes sonoros alertando para corrigir padrões, anastigadores de gases e de água para controle de emissões atmosféricas, trabalho de pesquisa com algas, manutenção de dessulfurizadores e precipitadores eletrostáticos, controladores eletrônicos de emissões de particulados e gases oriundos da queima do carvão, estações de monitoramento da qualidade do ar da região e água da chuva.

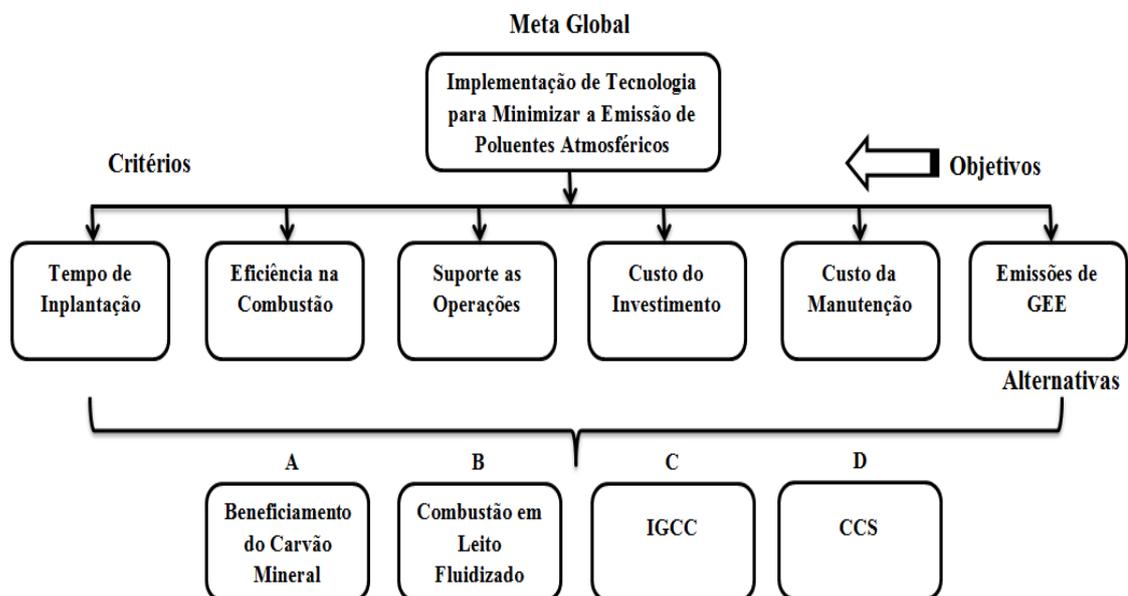
A gestão participativa cria estruturas descentralizadas, em que o relacionamento cooperativo passa a ser uma ferramenta essencial para superar conflitos internos nos processos produtivos. Considerando a amostra de colaboradores, 30% indicaram já ter contribuído com alguma sugestão para a gestão ambiental, incluindo melhorias no controle da queima do carvão, sensores de vazão, na análise de gases e de instrumentação analítica, bacias de sedimentação, construção de contenção de óleo lubrificante em alguns equipamentos, confiabilidade dos sistemas de redução de resíduos, sistema para amenizar particulados e fiscalização da planta industrial.

#### 4.3 APLICAÇÃO DO PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA

A aplicação do método foi concebida em quatro etapas: identificar as alternativas tecnológicas acessíveis e compatíveis com o processo produtivo que possibilitariam

minimizar as emissões de poluentes atmosféricos; propor critérios gerais para a seleção hierárquica das alternativas tecnológicas disponíveis; auferir pesos aos critérios propostos para cada alternativa tecnológica disponível; definir uma escala hierárquica das alternativas tecnológicas disponíveis, estando todas satisfazendo um conjunto de critérios de avaliação. A Figura 12 apresenta a estruturação do modelo hierárquico para o problema.

Figura 12 – Modelo hierárquico de estruturação do problema



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A comparação entre os fatores é realizada através de matriz de comparação ou de decisão. A matriz de comparação do estudo pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10 – Matriz de comparação entre os critérios

<b>Critérios</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>
<b>C1 – Tempo de Implantação</b>	1	1/2	1/3	1/5	1/2	1/3
<b>C2 – Eficiência na Combustão</b>	2	1	1/2	1/3	1/2	1/3
<b>C3 – Suporte as Operações</b>	3	2	1	1/3	2	1/2
<b>C4 – Custo do Investimento</b>	5	3	3	1	3	2
<b>C5 – Custo da Manutenção</b>	2	2	1/2	1/3	1	1/2
<b>C6 – Emissões de GEE</b>	3	3	2	1/2	2	1
<b>Total</b>	16,00	11,50	7,33	2,70	9,00	4,67

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Os elementos das diagonais serão sempre iguais às unidades, afinal, um elemento é igualmente importante a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com a classificação na escala de Saaty (Tabela 6), que apresenta as comparações empregadas no método. No caso específico, como foram considerados seis critérios, determinou a necessidade de quinze julgamentos essenciais, os quais foram supervisionados pelo gestor/líder ambiental da empresa em estudo.

Para as comparações inversas, isto é, na parte superior direita da matriz, colocam-se os valores recíprocos dos da parte inferior esquerda da mesma. Observa-se na parte inferior esquerda que a maioria dos elementos-linha são mais dominantes do que os elementos-coluna, pois quase todas posições estão com números maiores que a unidade. Cada valor obtido na tabela anterior é dividido pelo total de sua respectiva coluna. Desta forma obtêm-se as prioridades relativas dos critérios conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Obtenção das prioridades relativas de cada um dos critérios

<b>Critério</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>Prioridade Relativa</b>
<b>C1</b>	0,063	0,043	0,045	0,074	0,056	0,071	0,060
<b>C2</b>	0,125	0,087	0,068	0,123	0,056	0,071	0,088
<b>C3</b>	0,188	0,174	0,136	0,123	0,222	0,107	0,158
<b>C4</b>	0,313	0,261	0,409	0,370	0,333	0,428	0,352
<b>C5</b>	0,125	0,174	0,068	0,123	0,111	0,107	0,118
<b>C6</b>	0,188	0,261	0,273	0,185	0,222	0,214	0,224

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a ordem de importância relativa dos critérios corresponde: Custo do investimento (35,2%); Emissões de GEE (22,4%); Suporte as operações (15,8%); Custo da manutenção (11,8%); Eficiência na combustão (8,8%); e Tempo de implantação (6%). Essa análise deve ser feita para cada nível da hierarquia. Concluída a comparação dos critérios, as matrizes de comparação das alternativas foram estruturadas para cada critério de forma a manter a comparação, com a mesma escala de valores. O procedimento para o cálculo de  $\lambda_{\max}$ , o índice de consistência e o valor da relação de consistência encontra-se demonstrado a seguir.

Matriz de obtenção do vetor de peso:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1 & 1/3 & 2 & 1/2 \\ 5 & 3 & 3 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 3 & 2 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,060 \\ 0,088 \\ 0,158 \\ 0,352 \\ 0,118 \\ 0,224 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0,361} \\ \mathbf{0,538} \\ \mathbf{0,979} \\ \mathbf{2,192} \\ \mathbf{0,722} \\ \mathbf{1,396} \end{bmatrix}$$

$$0,060 + 0,044 + 0,053 + 0,070 + 0,059 + 0,075 = \mathbf{0,361}$$

$$0,120 + 0,088 + 0,079 + 0,117 + 0,059 + 0,075 = \mathbf{0,538}$$

$$0,180 + 0,176 + 0,158 + 0,117 + 0,236 + 0,112 = \mathbf{0,979}$$

$$0,300 + 0,264 + 0,474 + 0,352 + 0,354 + 0,448 = \mathbf{2,192}$$

$$0,120 + 0,176 + 0,079 + 0,117 + 0,118 + 0,112 = \mathbf{0,722}$$

$$0,180 + 0,264 + 0,316 + 0,176 + 0,236 + 0,224 = \mathbf{1,396}$$

O  $\lambda_{\text{máx}}$ , maior autovalor da matriz de julgamentos, foi determinado para então encontrar o valor do índice de consistência.

$$0,361 / 0,060 = 6,01667$$

$$0,538 / 0,088 = 6,11364$$

$$0,979 / 0,158 = 6,19620$$

$$2,192 / 0,352 = 6,22727$$

$$0,722 / 0,118 = 6,11864$$

$$1,396 / 0,224 = 6,23214$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 6,01667 + 6,1136 + 6,19620 + 6,22727 + 6,11864 + 6,23214 / 6 = 6,15076$$

$$IC = (6,15076 - 6) / (6 - 1) = 0,15076 / 5 = 0,03$$

A relação de consistência é determinada pelo quociente entre o IC e a IAM, resultando em um RC equivalente a 0,024. Como o valor correspondente à relação de consistência manteve-se inferior a 0,10, determinou que as comparações aos pares da matriz de comparação dos critérios possui ótima consistência. Para o julgamento paritário das alternativas a luz dos critérios de avaliação, foi adotada de forma similar a escala de Saaty T., destacando na última coluna a prioridade média local (PML) das alternativas (Tabela 12).

A obtenção da PML envolve tornar as matrizes normalizadas, procedimento este em que se dividem os elementos de cada célula da coluna pelo somatório dos elementos da coluna. Logo após, determina-se a média de cada linha obtendo-se os vetores de prioridades. Esses passos foram realizados para cada um dos critérios. É possível perceber que não existe

uma alternativa que seja melhor às demais globalmente, o propósito está na determinação de uma solução, alternativa mais satisfatória e não necessariamente ótima, em problemas onde múltiplos critérios são considerados. Em termos do método, a solução mais satisfatória é obtida a partir do cálculo da prioridade global de cada alternativa.

Tabela 12 – Matriz de comparação dos pares a luz de cada critério

<b>Critério 1</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>PML</b>
	<b>Tempo de Implantação</b>				
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	2	3	3	0,435
B – Combustão em Leito Fluidizado	1/2	1	3	3	0,309
C – IGCC	1/3	1/3	1	2	0,150
D – CCS	1/3	1/3	1/2	1	0,106
<b>Critério 2</b>	<b>Eficiência na Combustão</b>				<b>PML</b>
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	1/2	1/4	2	0,143
B – Combustão em Leito Fluidizado	2	1	1/3	3	0,239
C – IGCC	4	3	1	4	0,525
D – CCS	1/2	1/3	1/4	1	0,093
<b>Critério 3</b>	<b>Suporte as Operações</b>				<b>PML</b>
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	1/2	2	2	0,275
B – Combustão em Leito Fluidizado	2	1	2	2	0,388
C – IGCC	1/2	1/2	1	2	0,198
D – CCS	1/2	1/2	1/2	1	0,139
<b>Critério 4</b>	<b>Custo do Investimento</b>				<b>PML</b>
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	2	4	4	0,479
B – Combustão em Leito Fluidizado	1/2	1	3	3	0,294
C – IGCC	1/4	1/3	1	1/2	0,093
D – CCS	1/4	1/3	2	1	0,134
<b>Critério 5</b>	<b>Custo da Manutenção</b>				<b>PML</b>
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	2	3	3	0,435
B – Combustão em Leito Fluidizado	1/2	1	3	3	0,309
C – IGCC	1/3	1/3	1	1/2	0,106
D – CCS	1/3	1/3	2	1	0,150
<b>Critério 6</b>	<b>Emissões de GEE</b>				<b>PML</b>
A – Beneficiamento do Carvão Mineral	1	1/3	1/3	1/4	0,086
B – Combustão em Leito Fluidizado	3	1	1/2	1/3	0,177
C – IGCC	3	2	1	1/3	0,242
D – CCS	4	3	3	1	0,495

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

O mesmo procedimento foi aplicado para o cálculo da relação de consistência em todas as matrizes. Do ponto de vista do AHP é desejável que a relação para qualquer matriz

de comparação seja menor ou igual a 0,10, mantendo-se neste caso a condição de consistência entre os julgamentos (Tabela 13).

Tabela 13 – Índices de consistência e razões de consistência

<b>Crítérios</b>	<b>IC</b>	<b>RC</b>
<b>C1</b> – Tempo de Implantação	0,041	0,046
<b>C2</b> – Eficiência na Combustão	0,030	0,034
<b>C3</b> – Suporte as Operações	0,041	0,046
<b>C4</b> – Custo do Investimento	0,028	0,031
<b>C5</b> – Custo da Manutenção	0,041	0,046
<b>C6</b> – Emissões de GEE	0,049	0,055

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Cada matriz de comparação de critério deverá ser multiplicado pela tabela de vetor de prioridade de critérios, conforme a demonstração. Com a combinação das tabelas surge uma nova tabela com a pontuação final obtida para cada alternativa (Tabela 14).

Tabela 14 – Matriz das prioridades médias locais (PML) e prioridades globais (PG)

<b>Alternativas</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>Prioridade Global</b>
<b>A</b>	0,435	0,143	0,275	0,479	0,435	0,086	<b>0,321</b>
<b>B</b>	0,309	0,239	0,388	0,294	0,309	0,177	0,281
<b>C</b>	0,150	0,525	0,198	0,093	0,106	0,242	0,186
<b>D</b>	0,106	0,093	0,139	0,134	0,150	0,495	0,212

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

De acordo com a Tabela 14, a melhor alternativa é a “A” que consiste em investir em uma planta de beneficiamento do carvão mineral. Este recurso produtivo contribuiria para aumentar a qualidade do combustível consequentemente a eficiência da combustão, reduzir os custos de moagem na operação da caldeira, no circuito de cinzas e no tratamento das emissões gasosas. Nos critérios tempo de implantação, custo do investimento e custo da manutenção representou a alternativa que obteve os melhores percentuais, destacando que o custo de investimento foi definido como o critério de maior importância. Dessa forma, manteve-se como a alternativa mais equilibrada atingindo boas pontuações entre os critérios.

## 5 CONCLUSÃO

O carvão mineral representa uma das formas de produção de energia mais agressiva ao meio ambiente. Ainda que sua extração e sua posterior utilização na produção de energia gerem benefícios econômicos, como empregos diretos e indiretos, aumento da demanda por bens e serviços em uma determinada região, o processo de produção, da extração até a combustão, provoca significativos impactos ambientais. Contudo, o carvão mineral permanece como um importante energético para a economia de muitos países. O maior desafio consiste na redução dos impactos ambientais, tornando-o viável a partir da aplicação de tecnologias avançadas, limpas e eficientes, tanto na geração como no uso da energia.

A inovação tecnológica pode configurar uma alternativa efetiva na reversão de situações críticas, desenvolvendo métodos de planejamento e equipamentos para o controle da poluição e processos tecnológicos menos poluentes. Representa o elemento gerador de mudanças, pois não se relaciona apenas com questões de ordem técnico-científica, mas apresenta dimensões de ordem política, econômica e cultural. As tecnologias mais importantes representam a combustão pulverizada, usinas supercríticas e ultra supercríticas, combustão em leito fluidizado e IGCC, acrescido de sistema de CCS.

A maior parte dessas tecnologias existentes, em geral, ainda não foram aplicadas e dependem de ganhos de escala para permitir reduções de custos que tornem a sua implantação possível. O crescimento econômico e a proteção ao meio ambiente serão os principais motivadores de mudanças/crescimento no setor energético, exigindo que grande parte da nova geração seja livre de carbono e que haja um forte aumento na eficiência de uso de combustíveis fósseis. Embora o caminho até 2025 seja essencialmente evolucionário, a partir deste, a participação de novas tecnologias deverá crescer significativamente, com o conceito de sustentabilidade norteando essas mudanças.

A tendência mundial, ainda que seja de aumento da participação de fontes renováveis de energia, o carvão mineral continua a se destacar como a principal fonte mundial de energia elétrica. Os projetos de plantas supercríticas e ultra supercríticas estão em estágio avançado, contudo requerem grandes investimentos para a viabilização. A gaseificação integrada com ciclo combinado configura-se como tendência mundial apenas para o longo prazo, neste caso essa tecnologia constitui-se num processo que pode ser adaptável perfeitamente ao tipo de carvão encontrado no país. Assim, estas tecnologias desempenham um papel importante na realidade nacional.

As tecnologias de tratamento desenvolvidas para reduzir os níveis de emissões poluentes da UTE analisada representam a combustão do carvão mineral pulverizada, que melhora substancialmente a eficiência da combustão e da conversão da energia térmica em energia elétrica. As emissões de NO<sub>x</sub> são controladas diretamente no processo de combustão. O sistema de dessulfurização semi-seco que emprega a cal virgem como agente dessulfurizante, permite índices superiores a 98% na redução das emissões de SO<sub>2</sub> e 99% de abatimento de material particulado, extraído dos gases de combustão por meio de precipitadores eletrostáticos e filtro de mangas.

A comparação dos resultados referentes às concentrações de partículas inaláveis, obtidas por meio do sistema de monitoramento contínuo de qualidade do ar, com o estipulado na Resolução do CONAMA 03/1990, no período de amostragem revelou que em nenhum ponto de análise houve concentrações que ultrapassaram os padrões definidos e, que os pontos que apresentaram os valores mais altos de partículas inaláveis podem estar associados a fatores meteorológicos, considerando a ação dos ventos como fator principal na dispersão do poluente. Este processo de monitoramento auxilia na tomada de decisão para minimizar os impactos ambientais.

O gerenciamento ambiental desenvolvido pela UTE reconhece e promove mecanismos que possibilitam que os problemas ambientais sejam tratados de maneira vinculada a capacidade de produzir da empresa, articulando a necessidade de aumentar a eficiência de seus processos produtivos, de forma a convergir interesses técnicos, econômicos e comerciais na redução de poluentes atmosféricos gerados. A política ambiental disseminada entre os colaboradores prioriza a eficiência e articulação do plano ambiental, sendo desenvolvida como um fator de redução de carga ou parada da usina caso os índices exigidos pelos órgãos ambientais não forem atendidos.

O método *Analytic Hierarchy Process* identificou o investimento em uma planta de beneficiamento do carvão mineral como a tecnologia mais acessível e compatível com o processo produtivo, com 32,10% da prioridade global em relação às demais alternativas, contribuindo para aumentar a qualidade do combustível e conseqüentemente a eficiência da combustão. Nos critérios tempo de implantação, custo do investimento e custo da manutenção correspondeu à alternativa que obteve os melhores percentuais, destacando que o custo de investimento foi definido como o critério de maior importância.

Para ser economicamente viável, contudo, deve ser selecionado um processo que obtenha uma redução desses níveis de rejeitos sem que haja uma perda desproporcional de

carvão mineral e custos excessivos de capital e de operação, proporcionando um aumento na eficiência da planta industrial e, conseqüentemente, redução na emissão de GEE.

As circunstâncias que levam à adoção das tecnologias limpas e otimização de processos estão normalmente associadas a indústrias de processo contínuo, como o caso da termelétrica, onde a redução de efluentes pode representar uma economia considerável de custos. Contudo, a grande vantagem das tecnologias limpas encontra-se na possibilidade de reverter um custo de desperdício, ou seja, o que antes seria tratado como um problema, gastos adicionais para reverter emissões ou para pagar compensações, caso a redução não seja técnica ou economicamente viável, passa a ser uma vantagem com ganhos de rendimento e produtividade.

As principais limitações deste estudo referem-se a não representatividade no cenário mundial, não sendo possível generalizar os resultados para todo setor industrial apenas ao caso analisado, e a interpretação subjetiva na análise das informações documentais. Contudo, foram consideradas as mais diversas implicações reflexivas em relação aos documentos antes de formular uma conclusão definitiva. Apesar das limitações, a pesquisa procurou contribuir com a adequação das usinas termelétricas operantes às tecnologias limpas disponíveis, incentivando a aplicação em novos projetos.

Sugestões para futuras pesquisas contemplam um estudo técnico-econômico da implantação do processo de beneficiamento com jigue a seco para obter um carvão com menores percentuais de enxofre, calcários e de matéria mineral aplicado no complexo termelétrico. Apresentar a norma ISO 14001 como uma fonte de assistência e ordenação no aprimoramento do SGA. E para acelerar o desenvolvimento tecnológico nacional, podem ser realizadas pesquisas com este setor nos países de referências, tanto em relação às medidas adotadas por países que operam termelétricas antigas quanto com aqueles que estão adotando ou pretendem adotar as tecnologias limpas disponíveis.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **O processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral**, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf>> Acesso em: 5 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. **Banco de Informações de Geração – BIG**, 2015. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/carvao\\_mineral](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/carvao_mineral)> Acesso em: 5 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. **Banco de Informações de Geração – BIG**, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil>> Acesso em: 13 out. 2017.

BAINHA, F. S. A.; VIANNA, D.S.; MEZA, E. B. M. **Aplicação do método AHP à tomada de decisão gerencial: um estudo de caso em serviço de hotelaria offshore**. XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Ago. 2015. Disponível em: <<http://www.inovarse.org/node/4292>> Acesso em: 24 out. 2017.

BECK, R. et al. *Mapping Highly Cost-Effective Carbon Capture and Storage Opportunities in India*. **Journal of Environmental Protection**, v. 4, n. 10, p. 1088-1098, 2013. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/jep>> Acesso em: 25 jul. 2017. DOI: 10.4236410125.

BRANCO, R. Vantagens e desvantagens do carvão. **Manutenção & Suprimentos**, 2011. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4303>> Acesso em: 09 nov. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 05**, de 15 de junho de 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 07 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 03**, de 28 de junho de 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 26 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 382**, de 26 de dezembro de 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 26 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 436**, de 22 de dezembro de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/2024.pdf>> Acesso em: 20 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: MME, 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em: 11 nov. 2017.

CAPELLETTO, G. J. Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, **Balço Energético do Rio Grande do Sul 2015: ano base 2014**. Porto Alegre: Grupo CEEE, 2015.

CASTRO, S. M.; ALMEIDA, J. R.; RODRIGUES, M. G. Valoração de dados ambientais da geração termelétrica: usina de campos dos Goytacazes/RJ. **Revista Internacional de Ciências**, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2012. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br>> Acesso em: 11 jan. 2017.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

DOMENICO, M. D. **Gaseificação de carvão mineral brasileiro na presença de ortossilicato de lítio visando a produção aumentada de hidrogênio**. 2013, 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

EIA, *Energy Information Administration*. **International Energy Outlook**. 2013. Disponível em: <<http://www.eia.gov>> Acesso em: 20 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. **Annual Energy Outlook**. 2017. Disponível em: <<http://www.eia.gov/outlooks/aeo>> Acesso em: 26 jun. 2017.

ENCEA. Estratégia Nacional de Comunicação e Educação Ambiental. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação**. Brasília: MME, 2009.

FOGAÇA, J.R.V. Energia Limpa. **Mundo Educação**, 2016. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/química/energia-limpa.htm>> Acesso em: 11 out. 2017.

FREITAS, D. V. **Estudo geoquímico orgânico do perfil estratigráfico de carvão mineral fóssil de Candiota, RS, Brasil**. 2012. 66 p. Dissertação (Mestrado em Química)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012.

GIESTA, L. C. **Educação ambiental e sistema de gestão ambiental em empresas**. 2009. 147 p. Tese (Doutorado em Administração)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GOIS, R. W.; MACHADO, P.R.M.; WEBER, L. S. Uma abordagem de relacionamento no ensino de biologia com as questões ambientais meio ambiente e os efeitos sobre o corpo humano. **Monografias Ambientais**, v. 1, p. 96-107, 2010.

GUO, Y.; HUANG, Z; ZHOU, Z. Technology Roadmap of IGCC Industry in China. **Energy and Power Engineering**, v. 7, p. 535-545, 2015. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/epe>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/epe.2015.711050.

HU, D.; JIANG, J. *A Study of Smog Issues and PM<sub>2.5</sub> Pollutant Control Strategies in China*. **Journal of Environmental Protection**, v. 4, n. 7, p. 746-752, 2013. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/jep>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/jep.2013.47086.

IEA, *International Energy Agency. Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation*. 2012. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications.html>> Acesso em: 6 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. *Key electricity trends Excerpt from: electricity information*. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications.html>> Acesso em: 6 jan. 2017.

\_\_\_\_\_. *Key word energy statistics*. 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications.html>> Acesso em: 25 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. *The potential for carbon capture and storage in China*. 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/newsroom/news/2017/january/the-potential-for-carbon-capture-and-storage-in-china.html>> Acesso em: 19 jan. 2017.

IRES. Instituto Associação dos Dirigentes de Vendas e Marketing do Brasil (ADV B) de responsabilidade social. **14º Pesquisa Nacional sobre Responsabilidade Social e Práticas Sustentáveis nas empresas**. São Paulo, 2013.

JELL, S. *Most coal plants in the United States were built before 1990. Today in Energy*, 2017. Disponível em: <<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30812>> Acesso em: 26 jul. 2017.

KEARNEY, D. *India's coal industry in flux as government sets ambitious coal production targets. Today in Energy*, 2015. Disponível em: <<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=22652>> Acesso em: 14 jul. 2017.

KLEIN, J. Carvão volta a ocupar espaço na matriz elétrica. **Jornal do Comércio**, p. 01-10, 2013. Disponível em: <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia>> Acesso em: 15 jul. 2017.

LI, J.; LI, Z. *A Causality Analysis of Coal Consumption and Economic Growth for China and India. Natural Resources*, v. 2, n. 1, p. 54-60, 2011. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/nr>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/nr.2011.21007.

LIANG, D.; XING, X.; SHEN, W. *Technical and Economic Evaluation of China's Integrated Gasification Combined Cycle: The Case of Yantai Project. Low Carbon Economy*, v. 4, n. 3, p. 117-124, 2013. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/lce>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/lce.2013.43012.

LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, p. 17-23, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/pdf>> Acesso em: 5 jan. 2017. DOI:10.5902/2179460X18493.

LINDSTROM, P. *U.S. energy-related CO<sub>2</sub> emissions fell 1.7% in 2016. Today in Energy*, 2017. Disponível em: <<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30712>> Acesso em: 26 jul. 2017.

MAJOURMARD, M. et al. *Coal quality effects on the performance of an IGCC power plant with CO<sub>2</sub> capture in India. Energy Procedia*, v. 114, p. 6478-6489, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article>> Acesso em: 30 jul. 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1784.

MARTINS, F. G.; COELHO, L. S. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, nº 1, p. 65-80, 2012. Disponível em: <<http://www.gepros.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/viewFile/317/399>> Acesso em: 24 out. 2017.

MATSINHE, J. V. **Formulação de materiais vítreos a partir de cinza pesada resultante da queima de carvão mineral**: efeito de fundentes. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federa de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MOBILIA, M. *Even as renewables increase, fossil fuels continue to dominate U.S. energy mix. Today in Energy*, 2017. Disponível em: <<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=31892>> Acesso em: 26 jul. 2017.

MOL, M. P. G.; SANTOS, E. S.; NUNES, I. S. Proposta de questionário para auditoria em empresas de incineração de resíduos de serviço de saúde. IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, p. 01-08, 2013, Salvador. **Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento**. Salvador: ConGeA, 2013.

MOURA, B. F. et al. Educação ambiental: Um olhar sobre comunidades quilombolas na região central do Rio Grande do Sul. **Monografias Ambientais**, v. 1, p. 60-69, 2010.

MÜLLER, A. A. et al. **Perfil Analítico do Carvão**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1987.

NAIME, Roberto. Sobre os impactos de usinas termelétricas. **EcoDebate**, Cidadania e Meio Ambiente, n. 2194, nov. 2014. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br>> Acesso em: 12 jan. 2017.

NUNES, K. G. P. **Determinação dos parâmetros cinéticos da reação de oxcombustão de carvão mineral**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012.

OCHOA, C. **Amostragem probabilística**: Amostra aleatória simples. 2015. Disponível em: <<https://www.netquest.com>> Acesso em: 15 jul. 2017.

PETTERS, S.; TSE, K. *Clean Coal & High Carbon Efficiency Energy Engineering. Journal of Power and Energy Engineering*, v. 3, p. 348-355, 2015. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/jpee>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/jpee.2015.34047.

PLUMER, B. *Remember the war on coal? Coal is losing but only in the U.S. Washington Post*, 2013. Disponível em: <<http://www.washingtonpost.com/news>> Acesso em: 23 jul. 2017.

PORTAL BRASIL. Mercado espera maior crescimento para País em 2017. **Economia e emprego**, Jun. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/07/mercado-espera-mais-crescimento-para-pais-em-2017>> Acesso em: 10 jan. 2017.

ROSO, V. R. et al. Consumo de combustível e emissões de poluentes em um motor diesel convertido a etanol para geração térmica de energia elétrica. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 37, n. 1, p. 131-142, 2016. Disponível em: <<http://www.uel.br>>

/revistas/uel/index.php> Acesso em: 20 out. 2017. DOI: 10.5433/1679-0375.2016v37n1p131.

SALDANHA, M. M. Energia elétrica e meio ambiente: um novo paradigma para o desenvolvimento. **Direito em Debate**, Departamento de ciências jurídicas e sociais da unijuí, v. 21, n. 38, Jul./Dez. 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unijui.edu.br>> Acesso em: 4 jan. 2017. DOI: 10.21527/2176-6622.2012.38.123-150.

SAATY, R.W. **The analytic hierarchy process: what it is and how it is used**. Mathematical Modelling, v. 9, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

\_\_\_\_\_. **How to make a decision: the analytic hierarchy process**. European journal of operational research, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

\_\_\_\_\_. **Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world**. 3rd Revise ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 2012.

SATC, Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina. **Carvão Mineral**, 2014. Disponível em: <<http://www.institucional.satc.edu.br/biblioteca>> Acesso em: 4 jan. 2018.

SCHUBERT, C. et al. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SDPI: AGDI, 2014.

SEIFFERT, M. E. B. **Gestão ambiental: instrumentos, esferas de ação e educação ambiental**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SIFFERT FILHO, N. F. S. et al. O BNDES e a questão energética e logística da Região Sul. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, 2014. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bibliotecadigital>> Acesso em: 5 jan. 2017.

SILVA, D. C. **Análise termoeconômica comparativa de ciclos avançados de usinas termoeletricas a carvão mineral e usinas term nucleares**. 2016. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

SINGH, U.; SHARMA, N.; MAHAPATRA, S. *Environmental life cycle assessment of Indian coal-fired power plants*. **Int J Coal Sci Technol**, v. 3, n. 2, p. 215-225, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com>> Acesso em: 30 jul. 2017. DOI: 10.1007/s40789-016-0136-z.

SOUZA, M. A. B. **Modelo de avaliação das atividades da gestão do conhecimento no sistema de gestão ambiental**. 2010. 295 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão mineral, nuclear**. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2016.

TORREZANI, N. C.; OLIVEIRA, E. F. Problemas ambientais decorrentes da exploração do carvão mineral e a aplicação da ecotoxicologia aquática como ferramenta de biomonitoramento. **Oecologia Australis**, v. 17, n. 4, p. 509-521, 2013. Disponível em: <<http://www.oecologiaaustralis.org>> Acesso em: 13 jan. 2017. DOI: 10.4257/2013.1704.05.

U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. **Gasification world database 2012**. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasification-plant-databases>> Acesso em: 22 jul. 2017.

WRI, *World Resources Institute*. **Global Coal Risk Assessment: Data Analysis And Market Research**. 2012. Disponível em: <[http://pdf.wri.org/global\\_coal\\_risk\\_assessment.pdf](http://pdf.wri.org/global_coal_risk_assessment.pdf)> Acesso em: 26 jun. 2017.

WU, Y.; LIU, W.; YANG, Y. *Optimization of an Existing Coal-fired Power Plant with CO<sub>2</sub> Capture*. **Energy and Power Engineering**, v. 5, n. 4, p. 157-161, 2013. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/epe>> Acesso em: 10 jul. 2017. DOI: 10.4236/epe.2013.54030.

ZHANG, Z. X. *Energy prices, subsidies and resource tax reform in China*. **Nota di Lavoro**, v. 72, p. 01-28, 2014. Disponível em: <<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream>> Acesso em: 13 jul. 2017. DOI: 10.1002/app5.46.

## APÊNDICE A – ENERGIA ELÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO

A energia é essencial para desenvolvimento econômico e social de um país, influenciando decisivamente na infraestrutura para os setores produtivos. Um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de um país é a sua capacidade de prover logística e energia para o desenvolvimento de sua produção, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis. O crescimento econômico implica na expansão da escala de produção e dimensões físicas de um sistema econômico. (TOLMASQUIM, 2016).

Embora a energia seja crucial para as sociedades modernas, sua importância relativa varia de acordo com o estágio e o modelo de desenvolvimento de cada país. No entanto, os países não seguem um padrão uniforme de desenvolvimento. Assim, os EUA e o Canadá consomem praticamente o dobro de energia per capita do que os países desenvolvidos europeus e do Japão, embora esses países possuam rendas per capita muito próximas entre si. A razão dessa diferença reside em estilos de desenvolvimento. (SALDANHA, 2012).

A oferta interna de energia atingiu 288,3 milhões de toneladas equivalente de petróleo (Mtep) em 2016, redução de 3,8% em relação a 2015, acompanhando o enfraquecimento da atividade econômica, ano em que o produto interno bruto (PIB) nacional contraiu 3,6%. (BRASIL, 2017). O papel da energia torna-se mais importante nas primeiras etapas do desenvolvimento, quando a infraestrutura econômica ainda está em formação. Nos estágios mais avançados, o consumo de energia aumenta conforme o crescimento do PIB, porque as atividades econômicas que mais crescem são as industriais de alta tecnologia e os serviços.

A Tabela 1 mostra a projeção do consumo total de eletricidade e os valores médios quinquenais da elasticidade-renda resultante, assim como os valores pontuais da intensidade do consumo de energia elétrica em relação ao PIB.

Tabela 1 – Elasticidade-renda do consumo de energia elétrica

Ano	Consumo (TWh)	PIB (R\$ Bilhões de 2010)	Intensidade (kWh/ R\$ [2010])
2015	524,6	3.959	0,132
2019	613,4	4.378	0,140
2024	790,4	5.465	0,145
Período	Varição (% a.a.)	Varição (% a.a.)	Elasticidade
2014-2019	3,1	1,8	1,76
2019-2024	5,2	4,5	1,15
2014-2024	4,2	3,2	1,32

Fonte: (BRASIL, 2015).

A elasticidade-renda média do consumo de eletricidade, no período decenal, é superior à unidade (1,32). A intensidade elétrica da economia mantém uma trajetória crescente ao longo do período. Conseqüentemente, para a análise do desenvolvimento de um país o consumo de energia per capita é um importante indicador deste incremento. A projeção para o PIB de 2017 para o Brasil representa um crescimento de 1,10%, podendo chegar a 2,84%. Sendo a indústria o segundo melhor desempenho entre os setores da economia com expansão de 0,53%. (PORTAL BRASIL, 2017). A Tabela 2 apresenta a projeção do consumo nacional de energia elétrica na rede desagregada por classe de consumo.

Tabela 2 – Consumo de eletricidade por classe

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
	GWh				
2015	135.346	170.173	92.275	73.125	470.918
2019	156.267 (15,5%)	187.571 (10,2%)	109.183 (18,3%)	84.372 (15,4%)	537.393 (14,1%)
2024	197.193 (45,7%)	239.587 (40,8%)	147.806 (60,2%)	107.551 (47%)	692.137 (46,9%)

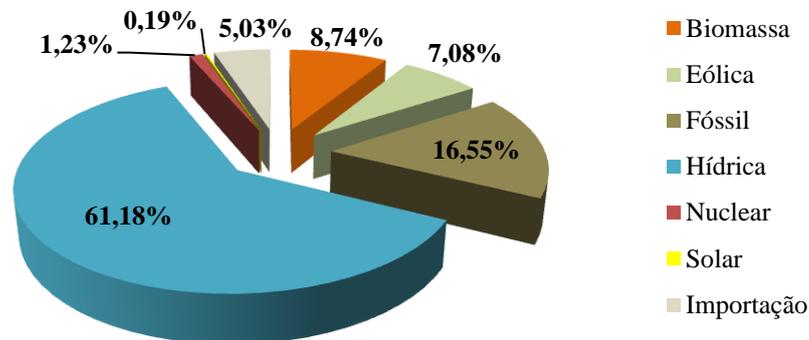
Fonte: (BRASIL, 2015).

Evidencia-se que a classe comercial é a que apresenta maior expansão no consumo, as classes residenciais e industriais mantiveram a participação apresentando uma taxa de crescimento média. Em termos de suprimento energético, a eletricidade tornou-se uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser um recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões.

### **O Crescimento Energético Brasileiro: Matriz energética**

A crescente necessidade de uso da energia elétrica faz com que sejam intensificadas as buscas por produções eficazes. A razão de tal aumento deve-se a construção de grandes indústrias que utilizam muita quantidade de energia elétrica produzida no país. Estas indústrias são, geralmente, localizadas perto de grandes centros distribuidores de energia, havendo um polo de produção energética que viabilize a implementação e principalmente o funcionamento. Em sua maioria, o Brasil mantém o desenvolvimento via energias hidráulica e térmica, porém as fontes alternativas e sustentáveis vêm ocupando espaço de forma considerável, como apresenta Figura 1. (LIMA; SOUZA, 2014).

Figura 1 – Matriz de energia elétrica



Fonte: (ANEEL, 2017).

Legenda: Potência (%) considerando a origem da fonte de geração.

Atualmente, o Brasil possui no total 4.734 empreendimentos em operação, sejam eles: pequenas centrais hidrelétricas, usinas hidrelétricas, usinas termelétricas, usinas termonucleares e as fontes alternativas: eólica e solar, totalizando 154.297.559 kW de potência instalada, conforme a Tabela 3. Além de que para os próximos anos está prevista uma adição de 23.416.219 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 252 empreendimentos atualmente em construção e mais 554 empreendimentos com construção não iniciada. (ANEEL, 2017).

Tabela 3 – Empreendimentos em operação, em construção e em construção não iniciada

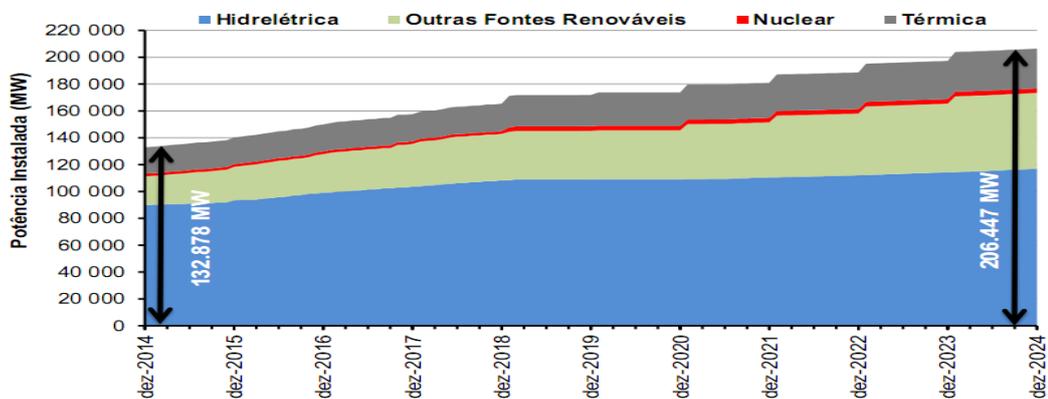
Fontes de Geração de Energia Elétrica	Capacidade de Geração Brasileira		
	Em operação Potência fiscalizada Kw	Em construção Potência outorgada kW	Construção não iniciada Potência outorgada kW
Central Geradora Hidrelétrica	(618) 564.824	(6) 9.398	(37) 26.531
Central Geradora Eólica	(470) 11.498.043	(148) 3.414.550	(130) 2.829.210
Pequena Central Hidrelétrica	(431) 4.955.175	(27) 369.980	(134) 1.758.220
Central Geradora Solar Fotovoltaica	(60) 311.732	(32) 911.400	(65) 1.651.093
Usina Hidrelétrica	(219) 93.877.884	(6) 1.922.100	(8) 731.540
Usina Termelétrica	(2.934) 41.099.901	(32) 3.238.154	(179) 5.203.993
Usina Termonuclear	(2) 1.990.000	(1) 1.350.000	-
Central Geradora Undi-elétrica	-	-	(1) 50
<b>Total</b>	<b>(4.734) 154.297.559</b>	<b>(252) 11.215.582</b>	<b>(554) 12.200.637</b>

Fonte: (ANEEL, 2017).

Legenda: Quantidade de empreendimento entre parênteses.

Comparando os valores percebe-se que as gerações do tipo hidráulica e térmica ocupam maior parte entre as outras fontes. O Brasil é rico em rios com excelentes potenciais hidrelétricos, e diferentemente da grande maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, não sustenta a base da geração de energia elétrica na utilização de fontes primárias não renováveis como derivados do petróleo e gás natural. A capacidade instalada do sistema interligado nacional (SIN) expandirá 55% em dez anos, com preponderância de geração hidrelétrica, como mostra a Figura 2, que expõe o crescimento contratado e planejado por fonte de geração de energia. (BRASIL, 2015).

Figura 2 – Evolução da capacidade instalada no SIN 2014-2024



Fonte: (BRASIL, 2015).

Existe um enorme potencial nas fontes renováveis, como a energia eólica e solar, para compor o novo quadro de matriz energética. Em relação à energia eólica, parte desse potencial pode ser aproveitada comercialmente nos litorais do nordeste, sudeste e sul do país. Em relação à energia solar, existe potencial a ser aproveitado, no entanto, é necessário investimentos em tecnologia para redução dos custos de implantação e geração. Além dessas fontes, as usinas termelétricas serão de extrema importância para prover a garantia de energia elétrica necessária ao atendimento do mercado. (BRASIL, 2015).

**APÊNDICE B – CARTA CONVITE E QUESTIONÁRIO DA PESQUISA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Prezado(a) Senhor(a),

Venho solicitar a vossa colaboração para responder as questões anexas, com o intuito de possibilitar o desenvolvimento da dissertação de mestrado, cujo título é “Aplicação do método de análise hierárquica AHP para a seleção de tecnologias limpas na geração de energia em uma termelétrica a carvão mineral”.

Gostaria de contar com a sua participação, pelo fato de esta pesquisa ser aplicada na sua área de atuação profissional além de ser fundamental para o bom andamento e o êxito deste trabalho. Desde já, manifesto os meus sinceros agradecimentos.

Informo, outrossim, que os dados coletados serão tratados com o sigilo próprio de um trabalho científico, garantindo o anonimato do respondente do questionário.

Atenciosamente,

Andressa Padilha de Oliveira, Eng.<sup>a</sup>  
Mestranda em Engenharia de Produção – PPGE/UFMS  
201660404

## QUESTIONÁRIO DA PESQUISA

Cargo:	
Tempo que trabalha na empresa:	
Idade:	Sexo: <input type="checkbox"/> Masculino <input type="checkbox"/> Feminino

**1.** Você possui conhecimentos específicos para realizar suas atividades na empresa sem impactar o meio ambiente?  Sim  Não

Caso afirmativo, estes conhecimentos adquiridos:

- Excedem a expectativa  
 São satisfatórios em relação a expectativa  
 São parcialmente satisfatórios a expectativa, buscando meios para aprimorá-los  
 Podem ser considerados não satisfatórios a expectativa

**2.** A política ambiental desenvolvida pela empresa é de seu conhecimento?

R.  Sim  Não

Qual sua opinião? \_\_\_\_\_

**3.** Esta política, mudou suas atitudes ambientais fora da empresa?

R.  Sim  Não

**4.** A empresa investe em programa de capacitação tendo como base as questões ambientais?

R.  Sim  Não

**5.** A empresa estabelece indicadores de desempenho ambiental deixando claro a todos quais são e como devem proceder?

R.  Sim  Não

**6.** São alocados recursos suficientes para a gestão ambiental? Considerar os recursos humanos e habilidades especializadas, infraestrutura organizacional, tecnologia e financeiros.

R.  Sim  Não

Se sua resposta for negativa, quais dos recursos citados a empresa deveria investir?

\_\_\_\_\_

**7.** Que nível de importância você conclui que a empresa atribui às ações ambientais?

R.  Alto  Médio  Baixo

**8.** Você acredita que a gestão ambiental da empresa contribua para diminuir a poluição e melhorar a qualidade do serviço oferecido, aumentando sua eficiência?

R.  Sim  Não

**9.** Você já contribuiu com alguma sugestão para a melhoria da gestão ambiental?

R.  Sim  Não

Qual? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**10.** Quais tecnologias são utilizadas no setor em que você atua para reduzir impactos ambientais? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**APÊNDICE C – CARTA CONVITE, ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA E LISTA DE VERIFICAÇÃO DA PESQUISA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Prezado(a) Gestor(a),

Venho solicitar a vossa colaboração para responder as questões anexas, com o intuito de possibilitar o desenvolvimento da dissertação de mestrado, cujo título é “Aplicação do método de análise hierárquica AHP para a seleção de tecnologias limpas na geração de energia em uma termelétrica a carvão mineral”.

Gostaria de contar com a sua participação, pelo fato de esta pesquisa ser aplicada na sua área de atuação profissional além de ser fundamental para o bom andamento e o êxito deste trabalho. Desde já, manifesto os meus sinceros agradecimentos.

Informo, outrossim, que os dados coletados serão tratados com o sigilo próprio de um trabalho científico, garantindo o anonimato do respondente.

Atenciosamente,

Andressa Padilha de Oliveira, Eng. <sup>a</sup>  
Mestranda em Engenharia de Produção – PPGE/UFMS  
201660404

## **ROTEIRO BÁSICO DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA COM O GESTOR/LÍDER AMBIENTAL DA EMPRESA**

- 1) Quais ações são mantidas no planejamento estratégico para reduzir os impactos ambientais decorrentes da ação principal da empresa?
- 2) A empresa possui um modelo de sistema de gestão ambiental? Caso afirmativo, quais os principais conflitos que surgiram quando a empresa decidiu implantá-los?
- 3) Em que fase a empresa está em seu modelo de gestão ambiental: planejamento, implementação e controle, verificação e ações corretivas e análise crítica da alta administração? A termelétrica promove ações isoladas?
- 4) Como ocorre o planejamento das ações ambientais na organização? A alta administração participa e se envolve?
- 5) Como surgiram os projetos de preservação ambiental? Foram mediante a imposição legal, obrigatória ou foram de forma espontânea e voluntária?
- 6) A empresa tem planos de aumentar os recursos aplicados em projeto socioambiental externo que vem desenvolvendo? Se sim, em quanto? \_\_\_\_\_ % em relação ao investimento atual.  
Qual o histórico de investimento?  
A empresa destina uma parcela dos recursos/ faturamento para a área ambiental?
- 7) Quais as tecnologias implementadas para viabilizar uma produção mais limpa com relação a emissão de gases poluentes? Em que fase do processo produtivo são implementadas?
- 8) Existe algum registro de análise de alternativas tecnológicas que comprove que a escolha das tecnologias adotadas estão de acordo com o conceito de melhor técnica disponível?
- 9) Qual o nível de capacidade de operação que é utilizado para cumprir os limites máximos de emissões de poluentes exigidos? Estes são devidamente arquivados?
- 10) O monitoramento e controle dos poluentes atmosférico apresentam equipamentos de medição apropriados? Estes possuem registros de manutenção e calibração?
- 11) A empresa possui procedimentos de tratamento/destinação final apropriada de cinzas e escórias?
- 12) Há disponibilidade de acesso ao ponto de descarga que permita a verificação periódica das emissões, a fim de certificar que os limites fixados pela Resolução CONAMA 436/2011 estão sendo atendidos? Qual a periodicidade?
- 13) Qual é a eficiência de operação do complexo termelétrico?

### LISTA DE VERIFICAÇÃO DA PESQUISA

Sistema de Gestão Ambiental	Reconhecimento		Intensidade		
	Sim	Não	Fraco	Moderado	Forte
1. A empresa possui um sistema de gestão ambiental definido?					
2. O sistema de gestão ambiental faz parte da estratégia empresarial?					
3. Na empresa, todos têm o conhecimento da existência deste sistema e de seu conteúdo?					
4. O sistema de gestão ambiental da empresa surgiu em função do reconhecimento da importância da variável ambiental e da necessidade em gerenciá-la?					
5. Clientes, fornecedores e sociedade em geral tiveram alguma influência na política ambiental da empresa?					
6. A política ambiental da empresa tem como pilares o atendimento à legislação, a melhoria contínua e a prevenção da poluição?					
7. A empresa tem conhecimento de suas atividades críticas que podem causar impactos negativos ao meio ambiente?					
8. Os funcionários sabem quais são os procedimentos de prevenção de impactos negativos ao meio ambiente, decorrentes de suas atividades?					
9. Na elaboração do sistema de gestão ambiental foram consideradas particularidades empresariais, tais como: porte; estrutura física e organizacional; cultura; sistemas de informação e comunicação e política de gestão de pessoas?					
10. A empresa utilizou e/ou se utiliza especialistas para auxiliá-la com conhecimentos técnicos em seu sistema de gestão ambiental?					
11. As pessoas têm conhecimento de suas responsabilidades quanto às questões ambientais na empresa?					
12. A empresa estabelece indicadores de desempenho ambiental, deixando claro a todos quais são e como devem proceder?					
13. Há uma revisão periódica deste sistema e de seus procedimentos por parte da empresa, com a possibilidade de participação de todos os níveis hierárquicos?					

**Tendo como base estes questionamentos, há alguma observação a ser feita? Se houver qual (is) é (são)?** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ANEXO A – PRINCIPAIS PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO NO MUNDO E SEUS QUANTITATIVOS

(Continua)

Usina	País	Tecnologia	Início	Realidade	Gaseificador	Nº	Produção	MWth	Produto
Sasol-I F-T Syngas Plant	África do Sul	Sasol Lurgi Dry Ash	1955	Ativo	Operando	17	7100000	970,6	Líquido FT
Lu Nan Ammonia Plant	China	GE	1993	Ativo	Operando	2	525000	71,8	PQ
Shanghai Coking & Chemical	China	GE	1995	Ativo	Operando	3	1530000	209,2	PQ
Shaanxi Ammonia Plant	China	GE	1996	Ativo	Operando	3	2040000	278,9	PQ
Ube City Ammonia Plant	Japão	GE	1984	Ativo	Operando	4	2150000	293,9	PQ
Great Plains Synfuels Plant	EUA	Sasol Lurgi Dry Ash	1984	Ativo	Operando	14	13900000	1900,3	Gasoso
Kingsport Integrated Coal Gasification	EUA	GE	1983	Ativo	Operando	2	1600000	218,7	PQ
Polk County IGCC Project	EUA	GE	1996	Ativo	Operando	1	3300000	451,1	Energia
Puyang Ammonia Plant	China	Sasol Lurgi Dry Ash	2000	Ativo	Operando	4	2282492	312	PQ
Ville Methanol Plant	Alemanha	GE	1985	Ativo	Operando	3	2231500	305,1	PQ
Buggenum IGCC Plant	Holanda	Shell	1994	Ativo	Operando	1	3408000	465,9	Energia
Puertollano IGCC Plant	Espanha	PRENFLO	1997	Ativo	Operando	1	4300000	587,8	Energia
Sasol Synfuels	África do Sul	Sasol Lurgi Dry Ash	1977	Ativo	Operando	40	39600000	7048	Líquido FT
Gasification East Plant	África do Sul	Sasol Lurgi Dry Ash	1982	Ativo	Operando	40	39600000	7048	Líquido FT
Shaanxi Ammonia Plant	China	Sasol Lurgi Dry Ash	1987	Ativo	Operando	4	2282492	312	PQ
Sanghi IGCC Plant	Índia	GTI U-GAS	2002	Ativo	Operando	1	804000	109,1	Energia
Wujing Gas Plant No. 2	China	GTI U-GAS	1994	Ativo	Operando	8	3000000	410,1	Gasoso
Hefei City Ammonia Plant	China	GE	2000	Ativo	Operando	3	1400000	191,4	PQ
Gorazde Ammonia Plant	Antiga Iugoslávia	LP Winkler	1952	Ativo	Operando	1	120000	16,4	PQ
Vresova IGCC Plant	República Tcheca	Sasol Lurgi Dry Ash	1996	Ativo	Operando	26	4700000	636,4	Energia
Mesaba Energy Project	EUA	E-GAS ConocoPhillips	2013	Planej.	Incremento	3	0	0	Energia
Steelhead Energy	EUA	E-GAS ConocoPhillips	2013	Planej.	Incremento	2	20600000	2810	Energia
Rentech & Royster Clark	EUA	E-GAS ConocoPhillips	2013	Planej.	Aplicando	0	2600000	194	Líquido FT
Shuanghuan Chemical	China	Shell	2006	Ativo	Operando	1	1320000	197	PQ
Sinopec. Yueyang	China	Shell	2006	Ativo	Operando	1	3410000	509	PQ
Sinopec. Zhijiang	China	Shell	2005	Ativo	Operando	0	X	273,4	PQ
Liuzhou Chemical Industry Corp. Ltd.	China	Shell	2005	Ativo	Operando	1	1720000	256	PQ
Sinopec	China	Shell	2006	Planej.	Iniciando	2	3410000	509	PQ
Dahua Chemicals	China	Shell	2007	Planej.	Iniciando	1	1700000	232	PQ
Yuntianhua Chemicals	China	Shell	2007	Planej.	Iniciando	1	3400000	465	PQ
China 1	China	GE	2004	Ativo	Operando	1	2045000	279,6	PQ
China 2	China	GE	2005	Ativo	Operando	1	1275000	174,3	PQ
China 5	China	GE	2006	Ativo	Operando	3	2080000	284,3	PQ
Jinling	China	GE	2005	Ativo	Operando	1	2100000	287,1	PQ

## ANEXO A – PRINCIPAIS PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO NO MUNDO E SEUS QUANTITATIVOS

(Conclusão)

China 4	China	GE	2005	Ativo	Operando	1	2100000	287,1	PQ
China 3	China	GE	2005	Ativo	Operando	3	2100000	287,1	PQ
Haolianghe Ammonia Plant	China	GE	2004	Ativo	Operando	1	2200000	300	PQ
Gas Plant No. 2	China	GE	1997	Ativo	Operando	1	765000	104,6	PQ
Zhong Yuan Dahua Group Ltd	China	Sasol Lurgi Dry Ash	2000	Ativo	Operando	X	2282492	312	PQ
Shaanxi Shenmu Chemical Plant	China	GE	2005	Ativo	Operando	X	1925000	263	PQ
Sinopec Wuhan, Hubei	China	Shell	2006	Ativo	Iniciando	X	3410000	509	PQ
Weihe Chemical	China	GE	2006	Ativo	Iniciando	X	2900000	395	PQ
Nakoso IGCC	Japão	Mitsubishi	2007	Planej.	Construção	X	3350000	455	Energia
Kaixiang Chemical Plant	China	Shell	2008	Planej.	Construção	X	1720000	257	PQ
Yongcheng Shell Plant	China	Shell	2008	Planej.	Construção	X	3120000	466	PQ
Puyang Plant	China	Shell	2008	Planej.	Construção	X	3410000	463	PQ
Tianjin Chemical Plant	China	Shell	2010	Planej.	Incremento	X	8250000	1124	PQ
Guizhou Chemical Plant	China	Shell	2010	Planej.	Incremento	X	4125000	562	PQ
Inner Mongolia Chemical Plant	China	Shell	2011	Planej.	Incremento	X	24750000	3373	PQ
Edwardsport IGCC	EUA	GE	2011	Planej.	Incremento	X	8450000	1150	Energia
East Dubuque Fischer	EUA	E-GAS ConocoPhillips	2011	Planej.	Incremento	X	4924800	673,284	Líquido FT
Taylorville Energy Center	EUA	GE	2012	Planej.	Incremento	X	8450000	1150	Energia
Secure Energy Systems SNG	EUA	Siemens SFG	2009	Planej.	Incremento	X	X	1000	Gasoso
Polk County IGCC Expansion	EUA	GE	2013	Planej.	Incremento	X	8450000	1150	Energia
Peabody SNG	EUA	E-GAS ConocoPhillips	2013	Planej.	Incremento	X	14774400	2019,852	Gasoso
Beaumont Chemical Facility	EUA	GE	2011	Planej.	Incremento	X	8450000	1150	PQ
Faustina Hydrogen Products LLC	EUA	GE	2010	Planej.	Incremento	X	8450000	1150	PQ
Orlando Gasification Project	EUA	KBR Transport Gasifi	2010	Planej.	Incremento	X	3817714	383	Energia
Sulcis IGCC Project	Itália	Shell	2009	Planej.	Incremento	2	7000000	956,9	Energia
Thermoselece Vresova	República Tcheca	GSP	2007	Planej.	Iniciando	1	5760000	787,4	Energia
Dong Ting Ammonia Plant	China	Shell	2006	Planej.	Iniciando	1	3410000	466,2	PQ
Hubei Ammonia Plant	China	Shell	2006	Planej.	Iniciando	1	3500000	466,2	PQ

Fonte: Adaptação de U.S. Department of Energy (2012).