

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas  
Supercríticas e Ultrassupercríticas**

**Autor: Danilo Henrique Donato Rocha**

**Orientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva**

**Itajubá, Fevereiro de 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Danilo Henrique Donato Rocha**

**Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas  
Supercríticas e Ultrassupercríticas**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica como  
parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração:** Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo

**Orientador:** Prof. Dr. Rogério José da Silva

**Itajubá, Fevereiro de 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Danilo Henrique Donato Rocha**

**Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas  
Supercríticas e Ultrassupercríticas**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Eduardo José Cidade Cavalcanti - UFRN

Prof. Dr. Dagoberto Cássio da Silva – CEFET - MG

Prof. Dr. Genésio José Menon – UNIFEI

Prof. Dr. Rogério José da Silva – UNIFEI (Orientador)

**Itajubá, Fevereiro de 2019**

*"Não creia no que os seus olhos lhe dizem.  
Tudo o que mostram é limitação.  
Olhe com o entendimento, descubra o que você já sabe e verá como viver"*

*Richard Bach (Fernão Capelo Gaivota)*

***Dedicatória***

*Primeiramente a Deus.*

*A meus pais e meu irmão.*

*E a todos os professores que tive nesta caminhada até aqui.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus pela saúde, pelas oportunidades que me proporcionou durante toda minha caminhada até aqui, e pelas pessoas que fizeram e fazem parte de minha vida.

Aos meus pais, Carlos e Maria, e ao meu irmão Jean, por todo o apoio que recebi nesta jornada.

Aos meus demais familiares que confiaram em mim, e estiveram sempre dispostos a ajudar no que fosse preciso.

A todos os meus amigos, em especial aos de Itajubá que vivenciaram de perto toda a caminhada. A toda a galera da República TatuRodando, pelo apoio, pelas festas, pelo futebol, pelo aprendizado, enfim, por toda a convivência nestes anos.

A todos os colegas da pós-graduação, por todo conhecimento compartilhado e boas conversas que tornaram a caminhada ainda mais agradável.

A meu orientador Rogério José da Silva, que desde a graduação vem compartilhando seus conhecimentos e me mostrando bons caminhos a seguir.

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, e a todos os professores desta instituição que de alguma forma têm participação nesta conquista.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa oferecida, a qual me permitiu dedicação exclusiva para realização deste trabalho.

E a todos que aqui não mencionei, mas que de alguma forma contribuíram para que essa pesquisa fosse concretizada.

Muito Obrigado!

## Resumo

**ROCHA, D. H. D. (2019).** *Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas Supercríticas e Ultrassupercríticas.* Itajubá, 215p. Dissertação; Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A utilização do carvão mineral para a geração de eletricidade tem importante participação na matriz elétrica global, totalizando quase 40% do total de geração. A perspectiva das agências especializadas é que o cenário de grande importância do carvão para geração de eletricidade seja mantido em longo prazo, devido a sua abundância, baixo custo, e ao mercado estável e diversificado. Neste contexto a busca por melhorias que proporcionem o aumento de eficiência das centrais termelétricas tornou-se prioridade, na intenção de minimizar os impactos oriundos da utilização do carvão, principalmente relacionado às emissões de CO<sub>2</sub>, além de maximizar o aproveitamento energético do recurso mineral. Sendo assim, a utilização das centrais supercríticas e ultrassupercríticas tem sido priorizada em detrimento das centrais convencionais subcríticas no intuito de atingir altas eficiências. Esse trabalho objetiva a aplicação da análise exergoambiental conforme foi apresentada por Meyer et al. (2009), no intuito de quantificar a redução de impacto ambiental proporcionada pelas centrais termelétricas com tecnologias supercríticas e ultrassupercríticas. Foram realizadas as análises exérgicas dos sistemas de geração de energia abordados, uma análise de ciclo de vida (ACV) de cada componente relevante dos sistemas, assim como dos fluxos de entrada, e por fim a atribuição dos impactos ambientais determinados pelo ACV aos fluxos exérgicos dos sistemas, possibilitando o cálculo das variáveis exergoambientais. Os resultados apontam que para as três centrais estudadas a caldeira se mostra como a principal fonte de irreversibilidades, conforme esperado. O subsistema das turbinas obteve maior eficiência exérgica tanto na central supercrítica quanto na ultrassupercrítica, resultado das condições de vapor com altas pressões e temperaturas. A eficiência exérgica obtida para a central subcrítica foi de 35,82%, para supercrítica 37,85% e para ultrassupercrítica 41,54%. Identificou-se incremento de impacto ambiental nos fluxos exérgicos que passam por componentes nos quais há fornecimento de calor, trabalho ou combustível, de forma que os fluxos que passam pela caldeira são aqueles que sofrem maior incremento de impacto ambiental. A água de resfriamento, que constitui um rejeito do sistema, apresentou uma taxa de impacto ambiental de 3,13 mPts/kWh para a central subcrítica, 3,09 mPts/kWh para a supercrítica e 1,57 mPts/kWh para ultrassupercrítica. A eletricidade gerada apresentou uma taxa de impacto ambiental de 41,40 mPts/kWh, 38,90 mPts/kWh, e 36,04 mPts/kWh, para as centrais subcrítica, supercrítica e ultrassupercrítica, respectivamente. Verificou-se que para nenhum dos sistemas estudados a taxa de impacto ambiental associada ao componente é significativa nas análises, representado em geral menos de 1% da taxa de impacto ambiental total do sistema. As taxas de impacto relacionadas à destruição de exergia, e a formação de poluentes foram diagnosticadas como principais fontes de impacto ambiental. Foi verificado, portanto, um importante aumento na eficiência das centrais, assim como uma redução significativa do impacto ambiental originado pela geração de eletricidade por centrais supercríticas e ultrassupercríticas.

**Palavras-chave:** Carvão, Exergoambiental, Supercrítica, Ultrassupercrítica, Subcrítica, Impacto Ambiental, Energia.

# Abstract

**ROCHA, D. H. D. (2019).** *Exergoenvironmental analysis of Supercritical and Ultra-Supercritical Thermal Power Plants*. Itajubá, 215p. Dissertation – Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajuba.

The use of coal for the generation of electricity has an important participation in the global electric matrix, totalizing almost 40% of the total generation. The perspective of the specialized agencies is that the scenario of great importance of coal for electricity generation is maintained in the long term, due to its abundance, low cost, and the steady and diversified market. In this context, the demand for improvements that increase the efficiency of thermal power plants has become a priority, with the intention of minimizing the impacts from the use of coal, mainly related to CO<sub>2</sub> emissions, in addition to maximizing the energy utilization of the mineral resource. Thus, the use of supercritical and ultra-supercritical power plants has been prioritized to the detriment of conventional subcritical power plants in order to achieve high efficiencies. This work aims at the application of the exergoenvironmental analysis as presented by Meyer et al. (2009), in order to quantify the reduction of environmental impact provided by power plants with supercritical and ultra-supercritical technologies. Exergy analyzes of the energy generation systems were carried out, a life cycle analysis (LCA) of each relevant component of the systems, as well as the input flows, and finally the attribution of the environmental impacts determined by the LCA to the exergy flows of the systems, making possible the calculation of exergoenvironmental variables. The results indicate that for the three plants studied the boiler is the main source of irreversibilities, as expected. The turbine subsystem obtained greater exergy efficiency in both the supercritical power plant and the ultra-supercritical, resulting from the high pressure and temperature steam conditions. The exergy efficiency obtained for the subcritical power plant was 35.82%, for supercritical 37.85% and for ultra-supercritical 41.54%. It has been identified an increase of environmental impact in the exergy flows that pass through components in which there is supply of heat, work or fuel, so that the flows that pass through the boiler are those that suffer greater increase of environmental impact. The cooling water, which is a waste of the system, presented an environmental impact rate of 3.13 mPts/kWh for the subcritical power plant, 3.09 mPts/kWh for the supercritical and 1.57 mPts/kWh for ultra-supercritical. The electricity generated had an environmental impact rate of 41.40 mPts/kWh, 38.90 mPts/kWh, and 36.04 mPts/kWh for the subcritical, supercritical and ultra-supercritical power plants, respectively. It was verified that for any of the systems studied the environmental impact rate component-related is significant in the analyzes, represented in general only 1% of the total. The impact rates related to the destruction of exergy, and the pollutants formation were diagnosed as main sources of environmental impact. Therefore, a significant increase in the efficiency of the plants was verified, as well as a significant reduction of the environmental impact caused by the generation of electricity by supercritical and ultra-supercritical power plants.

**Keyword:** Coal, Exergoenvironmental, Supercritical, Ultra-supercritical, subcritical, Environmental Impact, Energy.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Geração global de eletricidade mundial entre 1973 e 2015 por tipo de fonte. ....	23
Figura 2.1 - Representação esquemática do processo evolutivo de origem das reservas de carvão mineral atualmente existentes. ....	30
Figura 2.2 - Relação de diferentes bases analíticas para componentes do carvão. ....	32
Figura 2.3 - Diagrama para classificação de carvões pelo Rank. ....	33
Figura 2.4 - (a) Relação reservas/produção (R/P) por região; (b) Histórico (1996-2016) da relação R/P por região. ....	36
Figura 2.5 - Evolução histórica da distribuição das reservas provadas, para os anos de 1996, 2006 e 2016, por região. ....	36
Figura 2.6 - Turbina a vapor da usina de geração de energia Pearl Street, apelidada de “Mary Ann”. ....	37
Figura 2.7 - (a) Produção de carvão mineral por região 1991-2016; (b) Consumo de carvão mineral por região 1991-2016. ....	39
Figura 2.8 - Resultado de geração a carvão da Grã-Bretanha no período de 15 a 21 de Abril de 2017, indicando o período sem geração a carvão no dia 21 de Abril. ....	40
Figura 2.9 - Projeção de consumo mundial de carvão mineral por região, para o período 2015-2040. ....	40
Figura 3.1 - Desenvolvimento histórico das plantas de geração a carvão. ....	43
Figura 3.2 - Esquema de uma planta de geração de energia elétrica a carvão. ....	44
Figura 3.3 - Processo de Conversão de Energia para usinas térmicas. ....	45
Figura 3.4 - (a) Representação esquemática dos componentes principais do ciclo Rankine; (b) Diagrama Temperatura-Entropia do ciclo Rankine ideal. ....	46
Figura 3.5 - (a) Representação esquemática dos componentes principais do ciclo Rankine ideal com reaquecimento; (b) Diagrama Temperatura-Entropia do ciclo Rankine ideal com reaquecimento. ....	47
Figura 3.6 - Representação esquemática de um aquecedor fechado de água de alimentação. ....	48
Figura 3.7 - Diagrama T-s de um ciclo Rankine Supercrítico / Ultra supercrítico, com duplo reaquecimento de vapor (r1 e r2). ....	50
Figura 3.8 - Estrutura de aço estrutural do gerador de vapor da planta de Eddystone 1. ....	52
Figura 3.9 - Conceitos de projeto de geradores de vapor do tipo de tambor e de uma passagem. ....	53

Figura 3.10 - Absorção de calor relativa para condições operacionais do ciclo de potência normalizadas para absorção por kWh no ciclo de 16,55 MPa.....	54
Figura 3.11 - Efeito de várias medidas para aumento da eficiência de uma planta de geração a carvão supercrítica de carvão pulverizado.....	55
Figura 3.12 - Diagrama Entalpia-Entropia (h-s) do processo de expansão na turbina vapor para um ciclo supercrítico nas condições de: (a) único reaquecimento e (b) duplo reaquecimento.....	56
Figura 3.13 - Emissões de CO <sub>2</sub> Vs. Eficiência da Planta (base HHV).....	57
Figura 3.14 - Resultado de um teste de fluência de 100.000 horas. ....	62
Figura 3.15 - Relação entre a temperatura admissível do metal a 49 MPa de tensão e o custo relativo do material.....	63
Figura 3.16 - Mapa de corrosão das tubulações do SH/RH para o material Ka-SUS304J1HTB. ....	65
Figura 3.17 - Materiais utilizados na caldeira para determinadas condições de vapor. ....	67
Figura 4.1 - Redução das emissões de CO <sub>2</sub> na geração de energia a carvão com base na utilização de tecnologias de convencionais e de alta eficiência. ....	71
Figura 4.2 - Parcela de unidades supercríticas e ultrahipercríticas na capacidade instalada dos principais países no cenário da utilização do carvão mineral para geração de eletricidade. ....	72
Figura 4.3 - Perfil do parque térmico a carvão da China, por tecnologia e por idade das unidades.....	73
Figura 4.4 - Mudanças na estrutura da geração a carvão na China, em relação ao tamanho das unidades de geração.....	74
Figura 4.5 - Média nacional de consumo de carvão na geração de eletricidade. ....	75
Figura 4.6 - Comparativo de eficiência média para os parques de geração fóssil de alguns países. ....	77
Figura 4.7 - Perfil do parque térmico a carvão indiano, quanto à tecnologia utilizada e ano de comissionamento das unidades.....	79
Figura 4.8 - Perfil do parque térmico a carvão dos EUA, por tecnologia e por idade das unidades.....	82
Figura 4.9 - Planta a carvão John W. Turk Jr de 600 MWe localizada no Arkansas. ....	83
Figura 4.10 - Perfil do parque térmico a carvão da União Européia, por tecnologia e por idade das unidades.....	84
Figura 4.11 - Estrutura do parque térmico a carvão da União Européia. ....	84
Figura 4.12 - Planta a carvão Maasvlakte de 1100 MWe localizada na Holanda. ....	85
Figura 4.13 - Planta a carvão Lünen de 750 MWe localizada na Alemanha. ....	86
Figura 4.14 - Dinâmica da geração a carvão nos países do G7 no período de 2010-2015.....	87
Figura 4.15 - Emissões regionais de CO <sub>2</sub> previstas para unidades a carvão em operação, e em diferentes estágios de planejamento, indicando a parcela de contribuição de cada grupo. ....	89
Figura 4.16 - Status das usinas nucleares de geração de eletricidade no Japão. ....	90
Figura 4.17 - Transição na matriz de energia elétrica japonesa ao longo dos anos.....	90

Figura 4.18 - Perfil do parque térmico a carvão do Japão, por tecnologia e por idade das unidades.....	91
Figura 4.19 - Fatores de emissão atingidos pelos países para suas respectivas matrizes de energia elétrica, e a meta do Japão para FT2030.....	92
Figura 4.20 - Planta a carvão Isogo de 1200 MW localizada no Japão.....	93
Figura 5.1 - Comparação de exergia aprisionada e exergia livre. ....	97
Figura 5.2 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a destruição de ordem/criação de caos, degradação de recursos, e emissões de resíduos com exergia. ....	98
Figura 5.3 - Ilustração qualitativa da relação entre o impacto ambiental e a sustentabilidade de um processo e sua eficiência exergética. ....	99
Figura 5.4 - Estrutura do método Exergoambiental. ....	102
Figura 5.5 - Representação geral dos fluxos de um ciclo de vida. ....	103
Figura 5.6 - Estrutura geral da metodologia do método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) do Ecoindicador 99.....	103
Figura 5.7 - Esquema conceitual do sistema de estudo, identificando recursos (eletricidade auxiliar, carvão) e produtos (emissões, eletricidade) a serem considerados na análise. ....	105
Figura 5.8 – Parcelas da exergia total.....	112
Figura 5.9 – Apresentação esquemática do balanço exergético para um volume de controle. ....	116
Figura 5.10 – Representação gráfica do balanço global de exergia. ....	117
Figura 5.11 - Esquema de um trocador de calor.....	120
Figura 6.1 - Diagrama Esquemático da Usina Subcrítica 500 MW. ....	128
Figura 6.2 - Matriz de Incidência <b>A</b> [36x36] da unidade termelétrica subcrítica.....	132
Figura 6.3 - Diagrama Esquemático da Usina Supercrítica 660 MW. ....	138
Figura 6.4 - Matriz de Incidência <b>A</b> [43x43] da unidade termelétrica supercrítica.....	142
Figura 6.5 - Diagrama Esquemático da Usina Ultrasecrítica 800 MW. ....	148
Figura 6.6 - Matriz de Incidência <b>A</b> [45x45] da unidade termelétrica ultrasecrítica.....	152
Figura 6.7 - Participação de cada subsistema na destruição de exergia total do sistema. ....	157
Figura 6.8 - Diagrama T-S dos estágios de superaquecimento, reaquecimento e expansão nas turbinas para os ciclos estudados.....	158
Figura 6.9 - Eficiência exergética da caldeira, turbinas, bombas e gerador para os sistemas subcrítico, supercrítico e ultrasecrítico. ....	159
Figura 6.10 - Eficiência Exergética dos preaquecedores de água de alimentação de baixa e alta pressão. ....	160
Figura 6.11 - Eficiência exergética total das centrais analisadas. ....	160
Figura 6.12 – Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da caldeira, e seu respectiva taxa de impacto ambiental específica.....	163

Figura 6.13 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central subcrítica.....	164
Figura 6.14 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central supercrítica.....	164
Figura 6.15 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central ultrassupercrítica.....	165
Figura 6.16 - Taxas de Impacto ambiental da água de resfriamento rejeitada para o ambiente no condensador das centrais termelétricas analisadas. ....	166
Figura 6.17 - Taxas de Impacto ambiental dos gases de exaustão rejeitados para o ambiente na caldeira das centrais termelétricas analisadas.....	167
Figura 6.18 - Taxas de Impacto ambiental do fluxo de eletricidade gerada pelas centrais termelétricas analisadas. ....	168
Figura 6.19 - Taxas de Impacto ambiental totais da geração de eletricidade pelas centrais termelétricas analisadas. ....	168
Figura 6.20 – Distribuição do impacto ambiental total dos sistemas. ....	172
Figura 6.21 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema ultrassupercrítico. ....	173
Figura 6.22 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema ultrassupercrítico.....	173
Figura 6.23 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema supercrítico. ....	174
Figura 6.24 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema supercrítico.....	175
Figura 6.25 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema subcrítico. ....	176
Figura 6.26 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema subcrítico.....	176
Figura 6.27 - Emissões de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) para as centrais subcrítica, supercrítica, e ultrassupercrítica.....	178
Figura 6.28 - Emissões Anuais Evitadas de CO <sub>2</sub> .....	179
Figura 6.29 - Emissões de material particulado (MP <sub>2,5</sub> , MP <sub>10</sub> , TSP), dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ), e óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ). ....	180

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Restrições nas emissões de CO <sub>2</sub> aplicadas para novas centrais a carvão para geração de eletricidade. ....	24
Tabela 2.1 - Minerais considerados constituintes principais na composição do carvão, e suas composições químicas. ....	31
Tabela 3.1 - Parâmetros operacionais e eficiência para ciclos subcríticos, supercríticos e ultra supercríticos em plantas a carvão pulverizado. ....	51
Tabela 3.2 - Melhoria potencial de eficiência para medidas de aumento de eficiência existentes em plantas de geração a carvão. ....	58
Tabela 3.3 - Materiais utilizados nos componentes de plantas de combustão de carvão pulverizado, com base nos parâmetros de vapor. ....	60
Tabela 3.4 - Descrição dos materiais empregados na caldeira, linhas de vapor e turbina de algumas plantas de geração a carvão supercríticas e ultrasupercríticas. ....	61
Tabela 4.1 - Plantas de geração a carvão em construção na China (Unidades > 300 MW). ....	76
Tabela 5.1 - Tabela comparativa dos Conceitos de Energia e Exergia. ....	96
Tabela 5.2 - Fatores de Normalização e pesos de ponderação da categorias de danos para a perspectiva Hierárquica (H, A). ....	105
Tabela 5.3 - Fatores de Dano dos Ecoindicadores para composição do impacto ambiental do carvão mineral. ....	106
Tabela 5.4 - Composição do carvão mineral betuminoso. ....	106
Tabela 5.5 – Peso dos componentes do sistema. ....	107
Tabela 5.6 – Composição e ecoindicador de componentes do sistema. ....	108
Tabela 5.7 – Processo de produção e processo de geração de calor para a fabricação de componentes. ....	109
Tabela 5.8 – Coeficientes termodinâmicos, e valor de exergia química padrão dos compostos presentes nos gases de exaustão. ....	115
Tabela 5.9 - Cálculo das Irreversibilidades e Eficiências Exergéticas dos Equipamentos. ....	118
Tabela 5.10 - Diferentes casos para trocadores de calor e suas respectivas equações auxiliares. ....	121
Tabela 6.1 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Subcrítico. ....	129
Tabela 6.2 - Estrutura lógica da unidade subcrítica elaborada a partir da relação de fluxos exergéticos de recursos e produtos para os equipamentos. ....	130

Tabela 6.3 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade subcrítica. ....	131
Tabela 6.4 - Resultados das variáveis exergéticas para os componentes do sistema subcrítico. ....	133
Tabela 6.5 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia subcrítica. ....	134
Tabela 6.6 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade subcrítica. ....	134
Tabela 6.7 - Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica subcrítica. ....	135
Tabela 6.8 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia subcrítica. ....	136
Tabela 6.9 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Supercrítico. ....	139
Tabela 6.10 - Estrutura lógica da unidade supercrítica elaborada a partir da relação de fluxos exergéticos de recursos e produtos para os equipamentos. ....	140
Tabela 6.11 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade supercrítica. ....	141
Tabela 6.12 - Resultados das variáveis exergéticas para os componentes do sistema supercrítico. ....	143
Tabela 6.13 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia supercrítica. ....	144
Tabela 6.14 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade supercrítica. ....	144
Tabela 6.15 - Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica supercrítica. ....	145
Tabela 6.16 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia supercrítica. ....	146
Tabela 6.17 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Ultrassupercrítico. ....	149
Tabela 6.18 - Estrutura lógica da unidade ultrassupercrítica elaborada a partir da relação de fluxos exergéticos de recursos e produtos para os equipamentos. ....	150
Tabela 6.19 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade ultrassupercrítica. ....	151
Tabela 6.20 - Resultados das variáveis exergéticas para os componentes do sistema ultrassupercrítico. ....	153
Tabela 6.21 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia ultrassupercrítica. ....	154
Tabela 6.22 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade ultrassupercrítica. ....	154
Tabela 6.23 - Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica ultrassupercrítica. ....	155
Tabela 6.24 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia ultrassupercrítica. ....	156
Tabela 6.25 - Comparação dos resultados encontrados na análise exergética e os presentes na literatura. ....	161
Tabela 6.26 - Taxa de impacto ambiental da eletricidade para sistemas de geração. ....	169
Tabela 6.27 - Parcelas das taxas de impacto ambiental originadas do impacto relacionado ao componente, para o conjunto de turbinas. ....	170
Tabela 6.28 - Emissões Anuais Evitadas de CO <sub>2</sub> . ....	179

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ACV	–	Análise de Ciclo de Vida
AUSC	–	Ultrassupercrítica Avançada
BFP	–	Bomba de Alimentação da Caldeira
CATF	–	Clean Air Task Force
CCC	–	Clean Coal Center
CCS	–	Carbon Capture Storage
CEP	–	Bomba de Extração de Condensado
CExC	–	Consumo Cumulativo de Exergia
CLC	–	Chemical Looping Combustion
COP21	–	21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
DALY	–	Disability Adjusted Life Years
EIA	–	Energy Information Administration
EU	–	União Européia
GEE	–	Gases de Efeito Estufa
GW	–	Gigawatts
GWP	–	Global Warming Potential
HELE	–	High Efficiency, Low Emissions
HHV	–	Higher Heating Value
HPH	–	Aquecedores de Alta Pressão
HPT	–	Turbina de Alta Pressão
IEA	–	International Energy Agency
IMIA	–	International Association of Engineering Insurers
IPCC	–	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT	–	Turbina de Pressão Intermediária

kWh	–	Quilowatts-hora
LHV	–	Lower Heating Value
LPH	–	Aquecedor de Baixa Pressão
LPT	–	Turbina de Baixa Pressão
MOD	–	Merit Order Dispatch (Despacho da ordem do mérito)
MP	–	Material Particulado
Mtep	–	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
MW	–	Megawatts
NETL	–	National Energy Technology Laboratory
OCDE	–	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PAF	–	Potentially Affected Fraction
PCI	–	Poder Calorífico Inferior
PCS	–	Poder Calorífico Superior
PDF	–	Potentially Disappeared Fraction
PLF	–	Plant Load Factor (Fator de Capacidade)
ppm	–	Partes por milhão
RH	–	Reaquecimento
SC	–	Supercrítica
SCR	–	Redução Catalítica Seletiva
SH	–	Superaquecedor
SPECO	–	Specific Exergy Costing
TSP	–	Partículas Totais em Suspensão
USC	–	Ultrasupercrítica

# Simbologia

## Símbolos Latinos

$\bar{A}$	–	Matriz de Incidência Expandida
$B$	–	Exergia
$\dot{B}$	–	Taxa de Exergia
$b$	–	Exergia específica
$B^*$	–	Custo Exergético
$B^{\text{TOT}}$	–	Exergia Total
$B^{\text{CH}}$	–	Exergia Química
$B^{\text{KN}}$	–	Exergia Cinética
$B^{\text{PH}}$	–	Exergia Física
$B^{\text{PT}}$	–	Exergia Potencial
$B_Q$	–	Exergia do Fluxo de Calor
$B_W$	–	Exergia do Fluxo de Trabalho
$c$	–	Custo
$\dot{E}$	–	Taxa de impacto ambiental
$e$	–	Impacto Ambiental Específico
$F$	–	Recursos
$f_b$	–	Fator Exergoambiental
$g$	–	Aceleração da gravidade
$H$	–	Entalpia
$h$	–	Entalpia Específica

$\dot{I}$	–	Taxa de Irreversibilidades
$k^*$	–	Custo exergético unitário
L	–	Perdas
$\dot{m}$	–	Fluxo mássico
m	–	Massa
N	–	Número de Fluxos
P	–	Pressão
$\dot{Q}$	–	Taxa de transferência de calor
$r_b$	–	Diferença Relativa
s	–	Entropia específica
S	–	Entropia
T	–	Temperatura
$\vec{v}$	–	Vetor Velocidade
X	–	Qualidade do vapor (Título)
w	–	Peso dos equipamentos
$\dot{W}$	–	Taxa de trabalho
$\dot{Y}$	–	Taxa de impacto ambiental do componente
z	–	Altura em relação ao referencial

## Letras Gregas

$\Delta$	–	Variação
$\varphi$	–	Fator de cálculo da exergia do combustível
$\alpha$	–	Matriz complementar
$\varepsilon$	–	Eficiência exergética
$\delta$	–	Percentual e destruição de exergia

## Subscritos

0	–	Estado de Referência
$\Delta T$	–	Variação de temperatura
$\Delta P$	–	Variação de Pressão
CH	–	Química
CO	–	Construção
comb	–	Combustível
Cond	–	Condensador
D	–	Destruição de Exergia
Dea	–	Desaerador
DI	–	Desativação/Descarte
e	–	Entrada
Eco	–	Economizador
Eva	–	Evaporador
ext	–	Externo
HE	–	Trocadores de Calor
k	–	componente
KN	–	Cinética
OM	–	Operação e manutenção
PF	–	Formação de Poluentes
PH	–	Física
PT	–	Potencial
Q	–	Fluxo de Calor
S	–	Saída
SH	–	Superaquecedor
ST	–	Turbina Vapor
TOT	–	Total
W	–	Fluxo de Trabalho

# Sumário

CAPÍTULO 1 .....	22
1. INTRODUÇÃO .....	22
1.1. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	22
1.2. OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO .....	27
1.3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	28
CAPÍTULO 2 .....	29
2. CARVÃO MINERAL: ASPECTOS GERAIS .....	29
2.1. CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO MINERAL .....	31
2.2. RESERVAS MUNDIAIS DE CARVÃO MINERAL .....	34
2.3. HISTÓRICO E PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO DO CARVÃO MINERAL .....	36
CAPÍTULO 3 .....	41
3. GERAÇÃO DE ENERGIA A CARVÃO: TECNOLOGIAS SUBCRÍTICA, SUPERCRÍTICA, E ULTRASSUPERCRÍTICA .....	41
3.1. HISTÓRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A CARVÃO .....	41
3.2. ASPECTOS GERAIS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO .....	43
3.3. CONDIÇÕES OPERACIONAIS .....	48
3.4. TECNOLOGIAS SUPERCRÍTICA E ULTRASUPERCRÍTICA .....	49
3.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS PARA APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS SUPERCRÍTICA E ULTRASSUPERCRÍTICA .....	58
CAPÍTULO 4 .....	68
4. PANORAMA DOS PARQUES TÉRMICOS A CARVÃO NOS PRINCIPAIS MERCADOS E DO USO DAS TECNOLOGIAS DE ALTA EFICIÊNCIA E BAIXAS EMISSÕES .....	68
CAPÍTULO 5 .....	95
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	95
5.1. EXERGIA ASSOCIADA A UM INDICADOR AMBIENTAL .....	95
5.2. MÉTODO DA ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL .....	101

5.2.1. ECOINDICADOR 99.....	102
5.2.2. ANÁLISE EXERGÉTICA.....	110
5.2.2.1 Ambiente de Referência .....	111
5.2.2.2 Componentes da Exergia .....	111
5.2.2.3 Cálculo da exergia dos Fluxos .....	112
5.2.2.4 Cálculo da Exergia Química do Combustível .....	113
5.2.2.5 Cálculo da Exergia dos Gases de Exaustão.....	114
5.2.2.6 Balanço Exergético do Volume de Controle.....	115
5.2.3. ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL .....	119
5.2.3.1 Método SPECO .....	119
5.2.3.1.1 Princípios P e F.....	120
CAPÍTULO 6 .....	126
6. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE COMPARATIVA DE PLANTAS SUBCRÍTICA, SUPERCRÍTICA E ULTRASSUPERCRÍTICA .....	126
6.1. UNIDADE TERMELÉTRICA SUBCRÍTICA .....	126
6.2. UNIDADE TERMELÉTRICA SUPERCRÍTICA.....	137
6.3. UNIDADE TERMELÉTRICA ULTRASSUPERCRÍTICA .....	147
6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	157
6.4.1. ANÁLISE EXERGÉTICA.....	157
6.4.2. ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL .....	162
6.4.3. EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS, GASES DE EFEITO ESTUFA E A FORMAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL .....	177
CAPÍTULO 7 .....	181
7. CONCLUSÕES.....	181
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	184
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	185
APÊNDICE A.....	198
APÊNDICE B.....	202
APÊNDICE C.....	207
APÊNDICE D.....	210

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O carvão mineral representa o mais importante combustível para geração global de eletricidade sendo responsável por 39,3% do total de geração, tal fato corresponde a um cenário de longa data uma vez que já na década de 1970 tal fonte era responsável por aproximadamente 38% da geração total de eletricidade (IEA, 2017). O cenário de grande importância do carvão mineral é mantido mesmo com algumas mudanças significativas na estrutura da matriz global de eletricidade, como o avanço considerável da utilização do gás natural, das fontes renováveis e de energia nuclear, e a brusca queda na utilização do óleo combustível, conforme pode ser verificado na Figura 1.1.

A manutenção de um cenário de relativa importância do carvão mineral como fonte energética para geração de eletricidade é provável, visto que, ele é o combustível fóssil mais abundante, com reservas comprovadas que totalizam cerca de 1 trilhão de toneladas, suficiente para atender por mais 150 anos o consumo atual (BGR, 2016; BRITISH PETROLEUM, 2017). Outro aspecto importante refere-se ao fato das reservas de carvão serem encontradas em mais de 75 países e ter baixo custo de produção, fato que justifica a importância do carvão na matriz energética global por muitas décadas (WORLD ENERGY COUNCIL, 2010). Estes fatores de mercado são de essencial importância já que existe uma preocupação prioritária no setor energético que consiste em minimizar o risco de interrupções

nos estoques de energia, sejam causadas por acidentes, intervenções políticas, terrorismo ou conflitos de mercado. Neste aspecto o carvão mineral apresenta um papel de extrema importância, visto que seu mercado global é grande e bem diversificado com muitos produtores e consumidores diferentes de todos os continentes (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

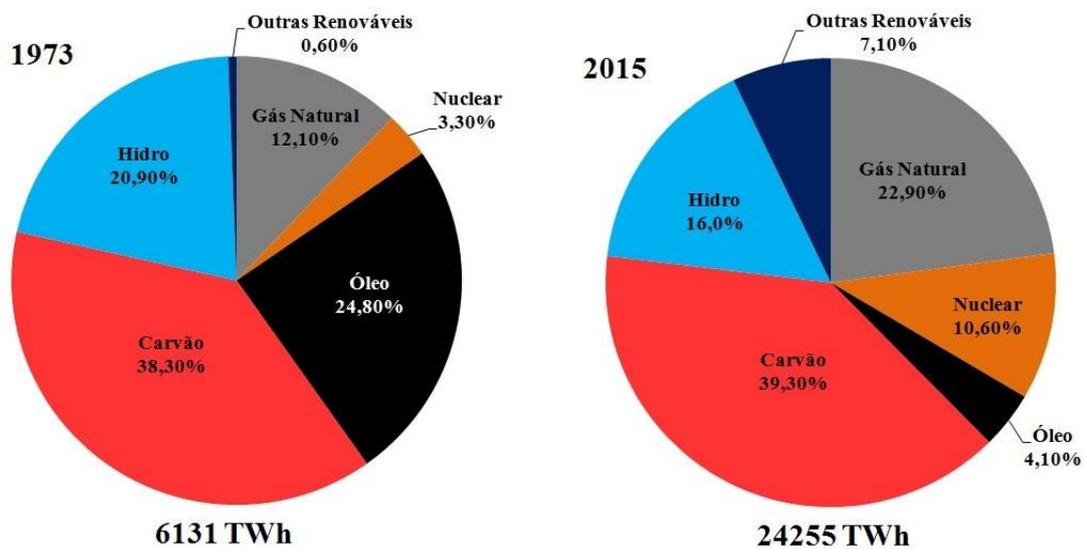


Figura 1.1 - Geração global de eletricidade mundial entre 1973 e 2015 por tipo de fonte.  
Fonte: Adaptado de IEA (2017).

Na contramão da dependência do uso do carvão para energia elétrica estão os inerentes problemas ambientais e de saúde pública decorrentes ao seu uso, tais como os impactos do processo de mineração e principalmente aqueles relacionados as emissões de poluentes provenientes da combustão, como material particulado (MP), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), além do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que é um importante gás de efeito estufa (GEE).

Prejuízos à terra, às águas superficiais, às águas subterrâneas são apenas alguns dos impactos em decorrência da mineração do carvão, que causam danos a plantas, animais e seres humanos pela destruição e remoção de habitat e contaminação ambiental. Doenças respiratórias, e cardíacas, mortes prematuras, entre outras consequências, estão entre os graves problemas de saúde pública causados pela poluição do ar no setor de energia elétrica (CATF, 2001; SCHNEIDER, 2004).

Regulamentações cada vez mais rigorosas, principalmente em relação às emissões de  $\text{CO}_2$ , tem aumentado cada vez mais a busca por melhorias nas centrais termelétricas que permitam o ganho de alguns pontos percentuais de eficiência. Diversos países estão tornando

mais rigorosos os seus padrões de emissão, bem como se comprometendo a reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub>, conforme pode ser visto na Tabela 1.1, seguindo os acordos estabelecidos nas conferências das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo de 2°C, com uma meta de 1,5°C (BURNARD; BHATTACHARYA, 2011; KIKUCHI, 2016; ROJAS, 2016; WIATROS-MOTYKA, 2016).

Tabela 1.1 - Restrições nas emissões de CO<sub>2</sub> aplicadas para novas centrais a carvão para geração de eletricidade.

<b>País</b>	<b>Padrões regulatórios de emissão de CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/kWh)</b>
Reino Unido	450
Estados Unidos	635
Canadá	420

Fonte: (KIKUCHI, 2016).

A eficiência média das unidades de geração de energia a carvão nos principais países que o utilizam varia significativamente, de menos de 30% para mais de 47% (base PCI), em decorrência de muitos fatores, incluindo, as condições do vapor no ciclo, condições climáticas locais, qualidade do carvão utilizado, práticas de operação e manutenção, e a acessibilidade para inserção de tecnologias avançadas (IEA, 2016).

Para atingir altas eficiências, as tecnologias de construção de centrais supercrítica (SC) e ultrassupercrítica (USC) tem sido desenvolvidas, permitindo a operação em altas pressões e temperaturas. Unidades SC atingem eficiências de até 42% (base PCI), enquanto unidades USC podem atingir eficiências próximas a 45%. O uso de condições supercríticas e ultrassupercríticas aumentam consideravelmente a eficiência do ciclo Rankine, sendo estimado um aumento de um ponto percentual na eficiência da planta a cada 20°C de aumento na temperatura principal do vapor (BEÉR, 2007; BURNARD et al., 2014; FAN et al., 2018). De uma forma geral, a atualização de centrais existentes e a construção de novas centrais com tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica vem de encontro com a questão das mudanças climáticas, de forma a promover significativa redução das emissões em curto prazo e ainda tornar as centrais com tais tecnologias mais apropriadas para a inserção dos promissores sistemas de captura e armazenamento de carbono – CCS.

No intuito de quantificar a redução de impacto ambiental proporcionada pela inserção das centrais com tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica, em detrimento das centrais subcríticas convencionais propõe-se neste trabalho a aplicação da análise exergoambiental para estes sistemas, conforme metodologia de análise exergoambiental para sistemas de conversão de energia apresentada por Meyer *et al.* (2009).

Diversos estudos aplicando a metodologia exergoambiental foram desenvolvidos até o momento, para variados sistemas de conversão de energia, mas especificamente para centrais termelétricas a carvão, a literatura no tema ainda mostra-se bem restrita. Meyer *et al.* (2009) apresentaram o método de análise exergoambiental a partir da avaliação de um sistema termoquímico de conversão de biomassa em eletricidade, que utiliza *wood chips* como biomassa. Blanco-Marigorta, Masi e Manfrida (2014) realizaram uma análise exergoambiental para uma planta de dessalinização por osmose reversa em Gran Canaria, identificando os componentes com maior potencial para redução do impacto ambiental total associado. Cavalcanti, De Souza e Lima (2018) desenvolveram as análises exergoambiental e exergoeconômica para uma planta de cogeração a gás natural, identificando o efeito da temperatura ambiente no impacto ambiental específico por unidade de exergia de eletricidade e de vapor. Keçebas (2016) apresentou uma análise para um sistema geotérmico de aquecimento urbano, e Yürüsoy e Keçebas (2017) desenvolveram análise exergoambiental avançada para este mesmo sistema. Restrepo e Bazzo (2016) apresentaram uma análise para uma planta *Co-firing*, comparando um cenário com operação apenas com carvão e outro com o *co-firing* de palha de arroz (90% carvão, 10% palha de arroz), utilizando o IPCC GWP 100 anos como indicador. Petrakopoulou *et al.* (2011a) realizaram análises exergoeconômica e exergoambiental para uma planta de ciclo combinado com tecnologia de looping químico (CLC) para captura de carbono, comparando uma planta dotada da opção tecnológica CLC, com uma planta de referência sem a tecnologia. Cavalcanti (2017) realizou análises exergoeconômica e exergoambiental de um sistema de ciclo combinado solar integrado, avaliando os efeitos da integração do sistema solar nos custos do sistema e nos impactos ambientais da geração de eletricidade. Casas-Ledón, Spaudo e Arteaga-Pérez (2017) analisaram um sistema de ciclo combinado integrado baseado em resíduos para produção de calor e eletricidade, demonstrando tal sistema como uma alternativa competitiva em relação aos aspectos ambientais. Khoshgoftar Manesh *et al.* (2014) avaliaram uma planta a vapor movida a gás, e Hong *et al.* (2018) desenvolveram uma análise exergoambiental avançada para uma planta de geração a carvão supercrítica. Bonforte *et al.* (2018) realizaram análises exergoeconômica e exergoambiental para uma central de ciclo combinado integrada a um sistema térmico solar de conversão de energia, comparando-o com um ciclo combinado convencional através da avaliação dos efeitos nos parâmetros exergoeconômicos e exergoambientais. Cavalcanti, Carvalho e Ochoa (2019) utilizaram parâmetros exergoeconômicos e exergoambientais para avaliar um motor diesel, utilizando diferentes misturas diesel-biodiesel, para tanto foi desenvolvida uma ACV do diesel e do biodiesel de

soja, além de uma comparação de desempenho utilizando o diesel e o biodiesel. Petrakopoulou *et al.* (2011b) avaliaram e compararam em seu estudo três diferentes centrais oxicomustível com sistema integrado de captura de CO<sub>2</sub> através de parâmetros de análises exergoambiental e exergoeconômica. Petrakopoulou *et al.* (2012) apresentaram em seu estudo a aplicação de um análise exergoambiental avançada de uma central de ciclo combinado, obtendo potencial de melhorias e interações de componentes do sistema.

Outros estudos relacionados trazem outras aplicações da metodologia de análise exergoambiental. Ding *et al.* (2018) investigaram o impacto exergoambiental do fluido de trabalho em um ciclo rankine orgânico, alocando o impacto ambiental do fluido em cada componente do sistema, R134a, R227ea, R152a e R245fa foram os fluidos selecionados para análise no estudo conduzido. Aghbashlo, Tabatabaei e Hosseinpour (2018) aplicaram a metodologia exergoambiental e exergoeconômica para avaliar e otimizar o desempenho de um reator ultrassônico piezoelétrico usado para sintetizar biodiesel a partir do óleo de cozinha usado. Ozbilen, Dincer e Rosen (2016) avaliaram utilizando análises exergoambiental e exergoeconômica um ciclo de Cu-Cl (Cobre-Cloro) desenvolvido para produção de hidrogênio. Boyano *et al.* (2012) investigaram os aspectos ambientais de um reformador de metano a vapor, visando a obtenção de melhorias na tecnologia através da utilização das formas convencional e avançada da metodologia exergoambiental.

## 1.2. OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

O objetivo geral do trabalho concentra-se no estudo do conceito de exergia, através da aplicação em uma análise termodinâmica e ambiental em unidades de geração de energia a carvão de alta eficiência.

Neste trabalho serão realizadas análises exergética e exergoambiental, para centrais subcrítica, supercrítica e ultrassupercrítica, visando obter:

- Eficiências exergéticas dos equipamentos e da central;
- Irreversibilidades de cada equipamento;
- Participação de cada equipamento na irreversibilidade total;
- Taxa de impacto ambiental para a eletricidade gerada;
- Taxa de impacto ambiental para os fluxos rejeitados no sistema;
- Taxas de impacto ambiental relacionadas aos componentes das centrais;
- Relação entre taxas de impacto ambiental entre os recursos e produtos de cada componente;
- Importância dos poluentes gerados na formação da taxa de impacto ambiental do sistema;

Possibilitando através destas análises verificar dentre os sistemas analisados, e também comparando com demais sistemas já estudados por pesquisadores, qual alternativa proporciona o uso mais eficiente dos recursos naturais, assim como aquele que impõe menor desequilíbrio sobre o meio ambiente pelo processo de geração de energia.

### **1.3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

Este trabalho está organizado em seis Capítulos, estruturados de forma a englobar todo o tema e permitir um entendimento total do estudo.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução do presente trabalho, trazendo aspectos fundamentais que justificam a realização do estudo nesta temática, além de esclarecer de forma direta os objetivos do estudo.

O Capítulo 2 traz informações essenciais sobre o combustível utilizado nas centrais térmicas que são o objeto de estudo, apresentado termos e dados que são importantes para compreensão do contexto de utilização do carvão mineral.

Os aspectos técnicos gerais do processo de geração de eletricidade por centrais a carvão são apresentados no Capítulo 3. Ainda neste capítulo são trazidas informações sobre as tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica, buscando estabelecer as diferenças em relação aos sistemas convencionais no que se refere as características operacionais e construtivas.

O Capítulo 4 traz uma grande revisão do panorama mundial de geração térmica a carvão com foco na utilização das tecnologias de alta eficiência e baixa emissão (HELE), apresentando como tem sido o desenvolvimento destas tecnologias nos principais centros de utilização do carvão na geração de eletricidade, além de perspectivas futuras.

No Capítulo 5 apresenta-se a Fundamentação Teórica das análises desenvolvidas, apresentando inicialmente a relação entre exergia e impacto ambiental. São descritas as equações empregadas para os cálculos de todos os parâmetros propostos, além da apresentação das etapas do método de análise exergoambiental.

Os estudos de caso propostos para aplicação da análise exergoambiental são apresentados no Capítulo 6, no qual são detalhadas as características de cada central termelétrica. São também apresentados neste capítulo os resultados obtidos para as análises dos sistemas em estudo, assim como as análises acerca destes resultados.

## **CAPÍTULO 2**

### **CARVÃO MINERAL: ASPECTOS GERAIS**

O carvão mineral é formado por ação da pressão e temperatura em depósitos de matéria orgânica de vegetais, em ambientes anaeróbicos que são resultado do soterramento e atividade orogênica. Nestas condições ocorre a solidificação dos restos vegetais no decorrer do tempo geológico, e o processo denominado carbonificação com a perda de oxigênio e hidrogênio e enriquecimento de carbono. Condições de pressão e temperatura mais intensas, e duração mais prolongada do processo, favorecem a uma maior carbonificação dos depósitos de material orgânico, e conseqüentemente resultará em carvão de maior qualidade (BORBA, 2001).

O carvão consiste em um agregado de materiais heterogêneos compostos de substâncias orgânicas e inorgânicas. A formação dos depósitos de carvão se deu em ambientes de pântanos de turfa. Tais ambientes caracterizam-se por grande quantidade de material orgânico derivados de restos de plantas que sofreram vários graus de decomposição e alteração física e química após serem aterrados (ZENG, 2009). Segundo Thomas (2013) o carvão resulta do acúmulo de detritos vegetais em um ambiente de deposição, tais acumulações são afetadas por diversas influências de forma a dar origem a carvões de diferentes categorias e graus de complexidade estrutural.

O primeiro estágio de formação do carvão mineral que é denominado como turfa, se forma com a decomposição de material vegetal em ambientes de pântano, e corresponde a um estágio bioquímico de transformação com ocorrência em profundidades de 2 a 5 m. A

composição da turfa tende a ser bem variada em função da tipologia do material vegetal, o clima da região, condições de pH da água e o grau de transformação atingido (CLAUDINO, 2003).

De acordo com Zeng (2009) qualquer região onde há condições favoráveis para o acúmulo de turfa, de forma que elas são subsequentemente enterradas e preservadas, consiste em uma região potencial para formação de carvão. Consistem em locais muito propícios a este tipo de formação, os pântanos de fundo de planícies aluviais, margens de lagos e lagoas, planícies costeiras com flutuação de maré baixa, e regiões glaciais com drenagem deficiente.

Após a formação da turfa, a pressão exercida na matéria orgânica pelos sedimentos que a recobrem leva a formação de uma matéria de coloração marrom escura, que consiste em vestígios do material vegetal, se consolidando como um segundo estágio na formação do carvão (BORBA, 2001). A Figura 2.1 apresenta um resumo esquemático do processo de formação do carvão mineral, desde milhões de anos atrás quando matéria morta caiu em decomposição nos pântanos, passando pelas mudanças na superfície e clima favorecendo a formação da turfa e posteriormente do carvão, que é retirado por mineração nos dias atuais.

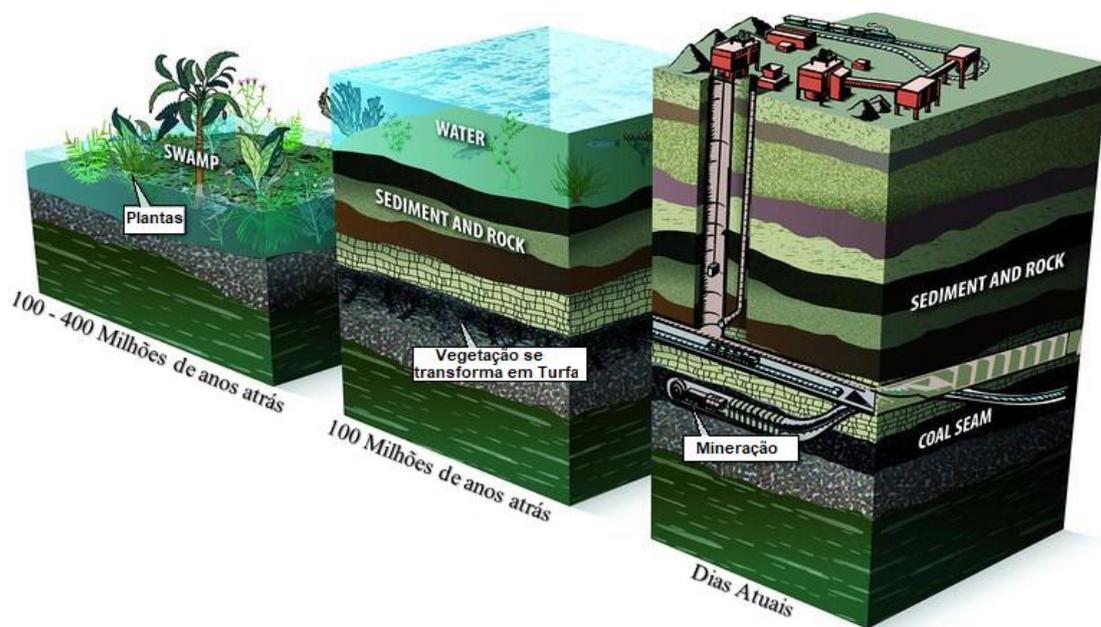


Figura 2.1 - Representação esquemática do processo evolutivo de origem das reservas de carvão mineral atualmente existentes.

Fonte: (PMF IAS, 2016).

Entende-se que a intensidade de acumulação de reservas de carvão se deu de forma diferente nos sucessivos períodos geológicos, em decorrência dos diferentes estágios de evolução da cobertura vegetal. Investigações recentes indicaram que as condições climáticas

são o principal fator que controla a distribuição paleogeográfica das reservas de carvão, visto que o clima era o agente controlador da distribuição geográfica da vegetação (ZENG, 2009).

## 2.1. CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO MINERAL

De acordo com Schweinfuth (2009) o carvão é composto por uma complexa mistura de componentes orgânicos e inorgânicos, podendo conter até 76 dos 90 elementos que ocorrem naturalmente na tabela periódica, entretanto a maioria destes estão presentes em quantidades mínimas, que são da ordem de partes por milhão (ppm). Alguns elementos têm o potencial de serem perigosos (por exemplo, cádmio e selênio), principalmente se estiverem concentrados em quantidades superiores a vestigiais, ocasionalmente também são encontrados oligoelementos em um leito de carvão, tais como prata, zinco, etc. Em geral apenas oito minerais são abundantes o suficiente para serem considerados constituintes principais, conforme pode ser verificado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Minerais considerados constituintes principais na composição do carvão, e suas composições químicas.

Mineral	Composição Química	Observações
Quartzo	$SiO_2$	-
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	-
Ilita	$KAl_4(AlSi_7O_{20})(OH)_4$	-
Montmorilonita	$(\frac{1}{2}Ca, Na)_{0,7}(Al, Mg, Fe)_4[(Si, Al)_4O_{10}]_2(OH)_4 \cdot nH_2O$	-
Clorita	$(Mg, Al, Fe)_{12}[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_{16}$	Pode conter Be, Cr, Ni e outros oligoelementos
Pirita	$FeS_2$	Pode conter As, Cd, Co, Hg, Ni, Sb e Se.
Calcita	$CaCO_3$	-
Siderita	$FeCO_3$	Pode conter Mn.

Fonte: (Adaptado de SCHWEINFUTH, 2009).

Os minerais presentes no carvão em geral encontram-se na forma de cristais únicos ou aglomerados de cristais, que estão misturados com matéria orgânica ou preenchendo espaços vazios no carvão. O tipo de mineral predominante em uma composição de carvão determina como o carvão reagirá quando queimado, alguns deles (montmorilonita, por exemplo) podem não se decompor durante a queima, mas se dissociar, e ao se resfriarem recombinar com outros elementos ou minerais para formar depósitos minerais nas superfícies das caldeiras, no processo denominado escorificação (SCHWEINFURTH, 2009).

Umidade e matéria mineral incombustível (cinzas) são componentes associados à composição do carvão e suas proporções alteram consideravelmente a qualidade do combustível, e de acordo com Miller (2005) os dados analíticos de composição podem ser expressos em várias bases diferentes, conforme pode ser verificado na Figura 2.2.

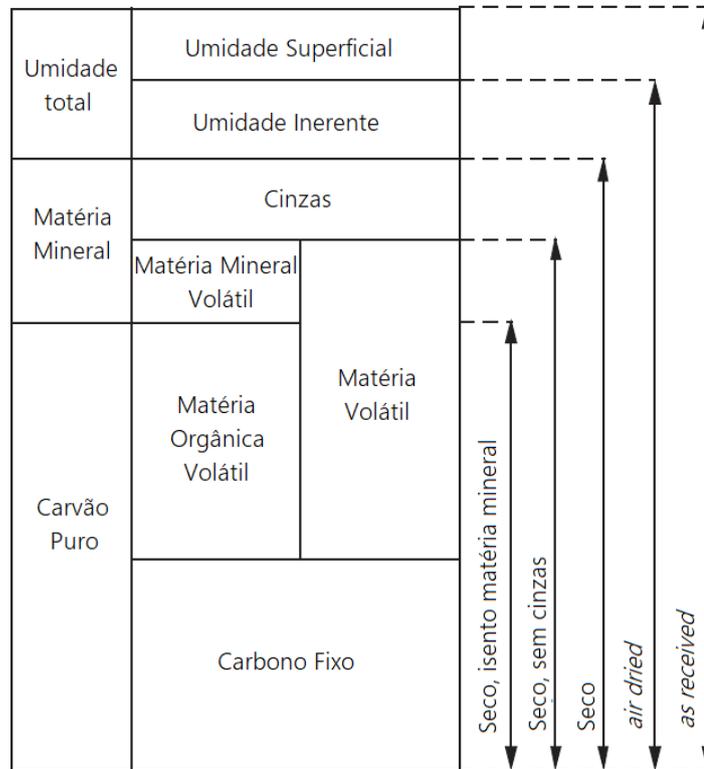


Figura 2.2 - Relação de diferentes bases analíticas para componentes do carvão.  
Fonte: (WARD, 1984).

Sendo as mais comumente usadas:

- *As-received*: os dados são expressos como porcentagens do carvão com umidade;
- Base Seca (db): os dados são expressos como porcentagens do carvão após a remoção da umidade;
- Base Seca, sem cinzas (dab): os dados são expressos como porcentagens do carvão sem contabilizar a umidade e as cinzas;
- Base Seca, e isento matéria mineral (dmmf): o carvão é considerado livre de umidade e matéria mineral, e os dados são uma medida da porção orgânica do carvão.

Segundo Schweinfuth (2009) um fator importante para determinar a qualidade do carvão é sua classificação pelo índice *Rank*, que é determinado pela porcentagem de carbono fixo, umidade (intersticial), matéria volátil, e poder calorífico após o conteúdo de matéria mineral e enxofre serem subtraídos do total. A classificação baseada no índice Rank compreende o lignito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, semi-antracito e antracito,

em ordem do menor para o maior *Rank*. A Figura 2.3 apresenta um diagrama para classificação de carvão pelo seu *Rank*, com base no “Poder Calorífico Bruto” em base úmida, livre de minerais, e na “Porcentagem de Carbono Fixo” em base seca, livre de minerais.

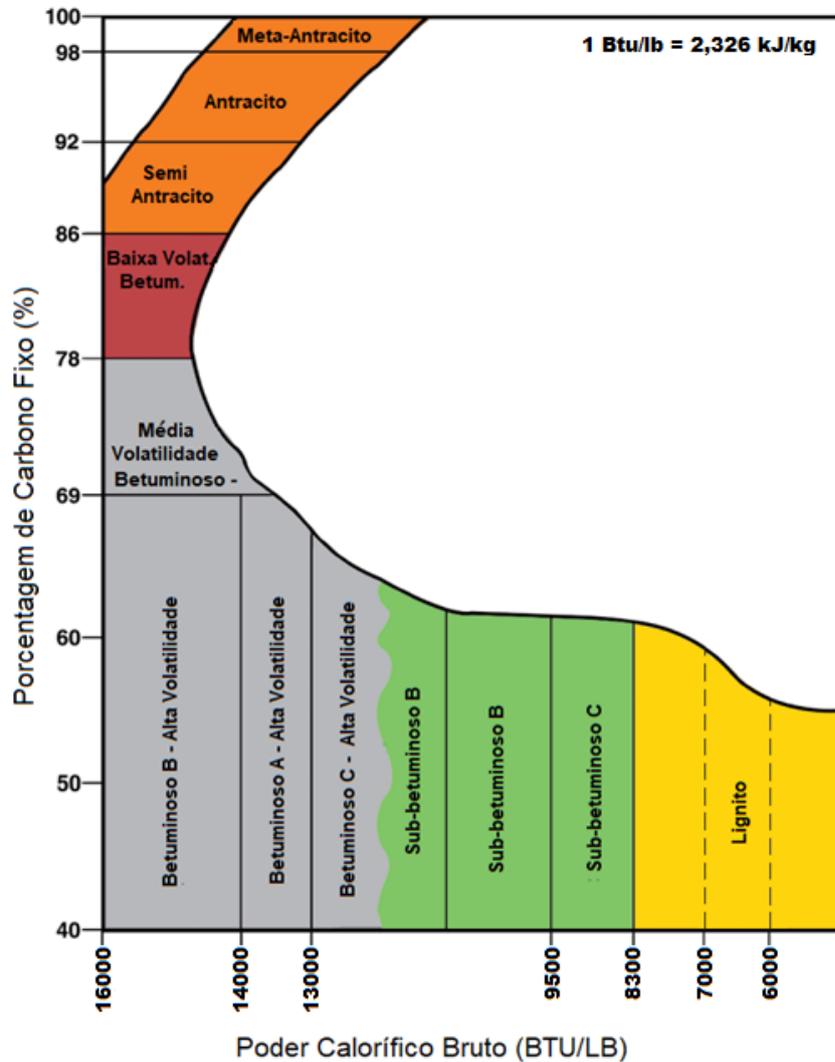


Figura 2.3 - Diagrama para classificação de carvões pelo Rank.  
Fonte: (SCHWEINFURTH, 2009).

O Antracito é a tipologia de carvão caracterizada como tendo um teor de carbono fixo superior a 86% e menos de 14% de material volátil, em uma base seca e livre de minerais. O carvão betuminoso corresponde a uma classe de carvões com teor de carbono fixo inferior a 86%, e mais de 14% de matéria volátil, em base seca, livre de minerais, além disso, possui poder calorífico superior a 10.500 Btu/lb (24.423 kJ/kg) em base úmida, livre de minerais. Esta classe pode ser dividida em grupos como carvão altamente volátil A, B e C, de média volatilidade e de baixa volatilidade. Já a classe de carvões sub-betuminosos compreende aqueles com poder calorífico entre 8.300 Btu/lb e 11.500 Btu/lb (entre 19.305,8 kJ/kg e

26.749 kJ/kg), em base úmida e livre de minerais, sendo subdividida nas classes A, B e C com base nas faixas de poder calorífico (WOOD et al., 1992).

O *Grade* corresponde a outro índice qualitativo do carvão, este mede o percentual em massa de matéria mineral incombustível (cinzas) presente no carvão. O *Grade* pode ser também interpretado como uma medida do grau de impurezas na matéria carbonífera. Tal índice é inversamente proporcional ao teor de cinzas presente, ou seja, um baixo *Grade* indica que possui alto percentual de cinzas e conseqüentemente sua qualidade empobrecida (BORBA, 2001; SILVA, 2012).

A composição mineral do carvão determina o tipo de cinza que será produto da queima do carvão, e a temperatura de fusão destas cinzas, aspectos de extrema importância para serem considerados em projetos de fornos e caldeiras. Para casos nos quais a temperatura de fusão é relativamente baixa, a cinza fundida é coletada no fundo do forno como cinza de fundo, e para os casos que a temperatura de fusão é alta, tem-se que parte da cinza que não se funde aparece como cinza volante, que é soprada juntamente aos gases de combustão. Uma alteração no carvão utilizado por uma termelétrica, por exemplo, que implique em significativa variabilidade na composição inicialmente prevista em projeto, levará a necessidade de reformulações e adaptações extensas e onerosas nos equipamentos (SCHWEINFURTH, 2009).

## **2.2. RESERVAS MUNDIAIS DE CARVÃO MINERAL**

Há que se fazer uma diferenciação entre recursos e reservas de carvão, os recursos correspondem a uma ocorrência de carvão, com qualidade e quantidade que existem perspectivas razoáveis para extração (THOMAS, 2013). Os recursos são avaliados com base em informações geológicas, mas especificamente com base no tipo e idade das camadas geológicas profundas (JANCOVICI, 2014).

De acordo com Joint Ore Reserves Committee (2012) e World Coal Institute (2005), a classificação para as reservas de carvão é a seguinte:

- Reserva Provável de Carvão: corresponde a parte economicamente minerável de um recurso medido ou indicado, incluindo materiais diversos misturados ao mineral, e previsões de perdas na mineração. Estas reservas são estimadas com um baixo grau de confiança, comparadas às reservas provadas.

- Reserva Provada de Carvão: parcela economicamente lavrável de um recurso de carvão medido, ou seja, aquelas consideradas tecnicamente recuperáveis com a atual tecnologia de mineração levando em conta os custos demandados para tal operação. Portanto, as reservas provadas tendem a variar com base no preço do carvão mineral, sendo que preços mais baixos do carvão no mercado induzem a redução das reservas provadas.

As limitações para exploração do carvão são basicamente econômicas, e quanto mais profundas, com rocha instável, com veios finos de carvão, mais trabalho será necessário, e o custo de mineração será crescente. Neste contexto, uma mina só se torna ativa se o carvão puder ser vendido, baseado no custo de mineração (JANCOVICI, 2014).

De acordo com British Petroleum (2017) as reservas mundiais provadas de carvão no ano de 2016 seriam suficientes para atender a 153 anos da produção global, com base na produção atual. Esta relação reservas/produção (R/P) é a maior dentre todos os combustíveis fósseis. A relação R/P específica de cada região apresentam variações significativas, para Europa e Eurásia, por exemplo, era de quase 300 anos, enquanto que para região Oriente Médio & África era de aproximadamente 50 anos.

Na Figura 2.4 (a) é possível observar a relação Reservas/Produção (R/P) por regiões para o ano de 2016, permitindo visualizar a região da Oriente Médio & África com a menor relação e a região da América do Norte com o maior valor para esta relação, e na Figura 2.4 (b) é possível observar a evolução histórica da R/P para as regiões, de 1996 a 2016, na qual pode se observar como períodos de intenso uso do recurso mineral carbonífero, e descobertas de novas reservas provadas, alteraram a relação R/P para algumas regiões drasticamente.

A relação reservas/produção (R/P) não é um parâmetro válido para avaliar a região na qual estão concentradas as maiores reservas de carvão mineral pelo mundo, uma vez que o fator produção tem impacto significativo, já que varia bastante de região para região. Tem-se verificado que o uso extensivo do carvão vem reduzindo as reservas ao longo dos anos, em um período de 20 anos (1996-2016) houve uma redução de aproximadamente 115.000 milhões de toneladas em reservas de carvão (BRITISH PETROLEUM, 2017). A região da Ásia e Pacífico detêm o maior percentual das reservas mundiais, seguida pela região da Europa-Eurásia, conforme pode ser verificado na Figura 2.5, neste ponto é interessante notar o fato de que a região da Ásia-Pacífico possui uma relação R/P relativamente baixa, entretanto detêm a maior reserva, resultado de um consumo acelerado dos recursos de carvão mineral.

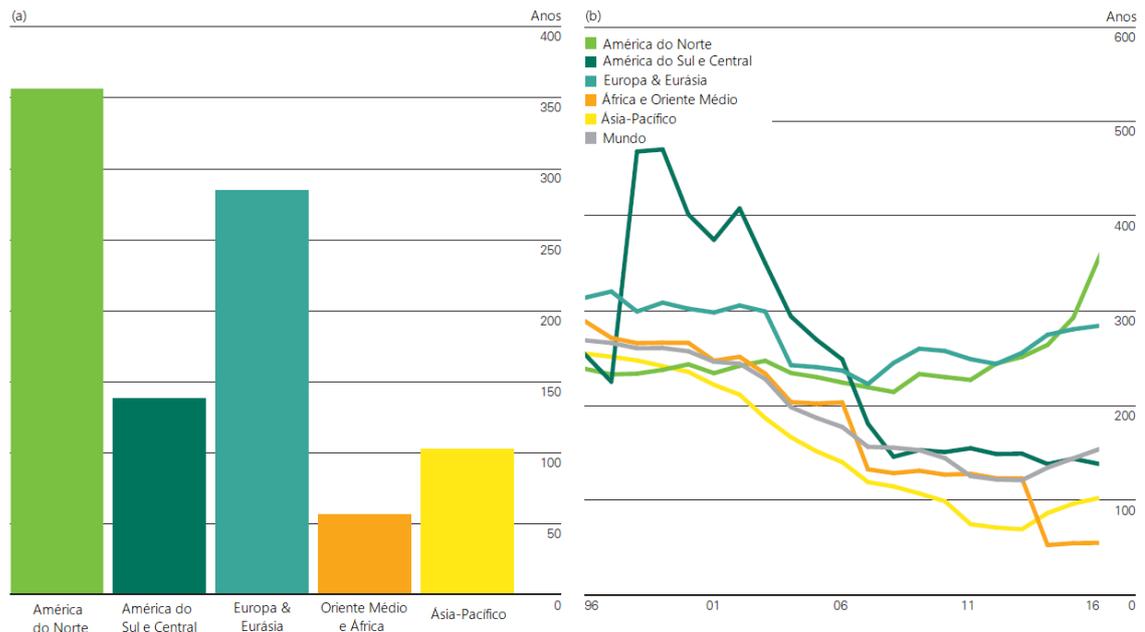


Figura 2.4 - (a) Relação reservas/produção (R/P) por região; (b) Histórico (1996-2016) da relação R/P por região.

Fonte: (BRITISH PETROLEUM, 2017).

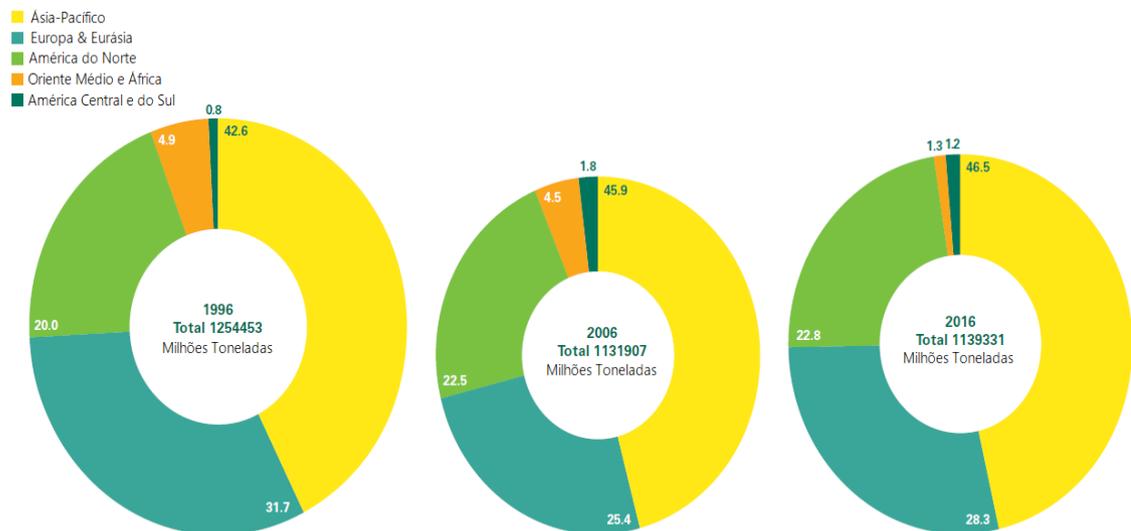


Figura 2.5 - Evolução histórica da distribuição das reservas provadas, para os anos de 1996, 2006 e 2016, por região.

Fonte: (BRITISH PETROLEUM, 2017).

## 2.3. HISTÓRICO E PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO DO CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é utilizado como combustível pela humanidade há muito tempo, com relatos de uso por diversas localidades do mundo. Na China se tem indícios da utilização do

carvão no século II a.c durante a dinastia Han, e já no século XII, sob a dinastia Song, os chineses o utilizavam para produzir ferro em escala industrial. No século IV a.c o carvão era empregado na Grécia por ferreiros, e na Grã-Bretanha foram encontradas vestígios de cinzas de carvão que remontam a sua utilização no século IV. No período da Revolução Industrial tal uso teve crescimento exponencial, devido principalmente ao surgimento da máquina a vapor e a produção de ferro, além da escassez de recursos florestais para utilização da lenha. Uma série de outras tecnologias surgiram nos séculos XVIII e XIX e impulsionaram a utilização do carvão mineral, tais como, o barco a vapor inventado por Fulton nos EUA em 1805, e a locomotiva a vapor de Stephenson em 1814. Já em 1882 em Nova York entrou em operação a primeira usina de geração de energia a carvão, a *Pearl Street Station* desenvolvida por Edison (Figura 2.6), e que fornecia eletricidade para lâmpadas domésticas. Em meados do século XVIII a Grã-Bretanha produzia 60% de todo o carvão mundial, com 3000 minas de carvão em funcionamento, entretanto no século XX os Estados Unidos ultrapassaram esta produção e por volta de 1920 consumiam cerca de 50% da produção mundial de carvão (DEANE, 1979; ENERGY, 2010).

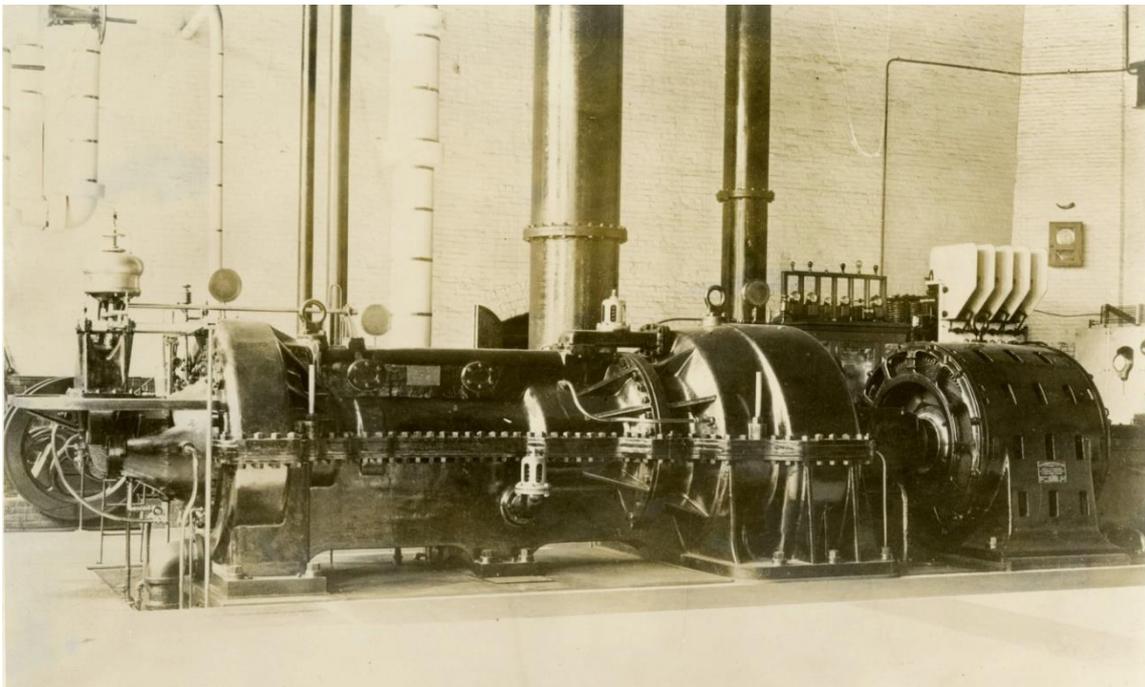


Figura 2.6 - Turbina a vapor da usina de geração de energia Pearl Street, apelidada de “Mary Ann”.  
Fonte: (SCARMINACH, 2017).

Com a transição para uma economia baseada na utilização dos combustíveis fósseis, marcada pelo advento da Revolução Industrial, os estoques de energia que estavam acumulados na crosta terrestre passaram a estar disponíveis para atender as necessidades de uma humanidade em amplo desenvolvimento econômico, populacional, e tecnológico. A

transição de utilização da biomassa orgânica (madeira) para o carvão mineral foi impulsionada pelo aumento substancial no preço da madeira, com início de uma regulamentação na extração de recursos florestais na Grã-Bretanha, enquanto melhorias tecnológicas conseguiram manter uma oferta constante de carvão a preços baixos (BITHAS; KALIMERIS, 2016).

Desde o final do século XIX onde se iniciou a utilização do carvão para geração de eletricidade, tal processo passou por diversos estágios de desenvolvimento tecnológico, que incluem tecnologias de combustão, novos materiais, projetos de sistema, controle de poluição, entre outros, que impulsionaram a utilização do carvão mineral (MILLER, 2005).

O comércio internacional de carvão teve seu ponto de partida por volta do século XIX, sendo dominado por Reino Unido e África do Sul, mas a formatação do mercado como temos hoje foi resultado das duas crises do petróleo na década de 1970. Antes da década de 1960 o comércio internacional do carvão era baseado em rotas por terra, entre países vizinhos, e só mais tarde com o comércio marítimo com rotas do EUA para Japão e Europa Ocidental. A importação de carvão metalúrgico de menor custo, e a primeira crise do petróleo em 1973 que estabeleceu um mercado internacional do carvão vapor, foram fatos que impulsionaram o comércio marítimo do combustível no fim da década de 1960 e início de 1970 (ENERGY, 2010).

A demanda global por carvão aumentou gradualmente durante a década de 1980, nos países membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE essa tendência persistiu até o final da década de 1980, sofrendo um declínio no início da década de 1990, enquanto nos países não membros da OCDE essa demanda crescente persistiu até a crise financeira asiática em 1997. Posteriormente os países em desenvolvimento, foram responsáveis por um crescimento sem precedentes na demanda por carvão no início dos anos 2000, levando a um aumento de mais de 40% na demanda mundial entre 2000 e 2008, alimentando principalmente o crescimento econômico de China e Índia (ENERGY, 2010).

Embora atualmente o uso do carvão pode não se mostrar tão visível como era no início do século XX, continua como a mais predominante fonte de combustível, tendo aumentado significativamente de 1970 até os dias atuais.

O início do século XXI representou um período de crescimento sem precedentes na produção e uso do carvão mineral, principalmente para geração de eletricidade. De acordo

com British Petroleum (2017) a região da Ásia-Pacífico, que engloba países como China, Índia, Indonésia, Malásia, Vietnã, Austrália, Nova Zelândia, dentre outros, foi a principal responsável por este *boom* no mercado do carvão, saindo de um consumo de aproximadamente 2400 Mtep (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo) em 2001, para um pico de quase 4000 Mtep em 2013-2014, sendo Índia e China as maiores responsáveis por estes resultados. A China registrou um crescimento de 3,7% ao ano entre 2005-2015, e a Índia 6,5% ao ano, outros países tiveram taxas superiores, entretanto, seu consumo ainda é muito baixo em comparação a estes dois. Esta elevada taxa de crescimento registrada na produção e consumo de carvão sustentou a expansão econômica destes países, e a tendência é que o cenário se mantenha, principalmente para a Índia. Na Figura 2.7 é apresentada a produção e consumo de carvão por região para o período entre 1991 e 2016.

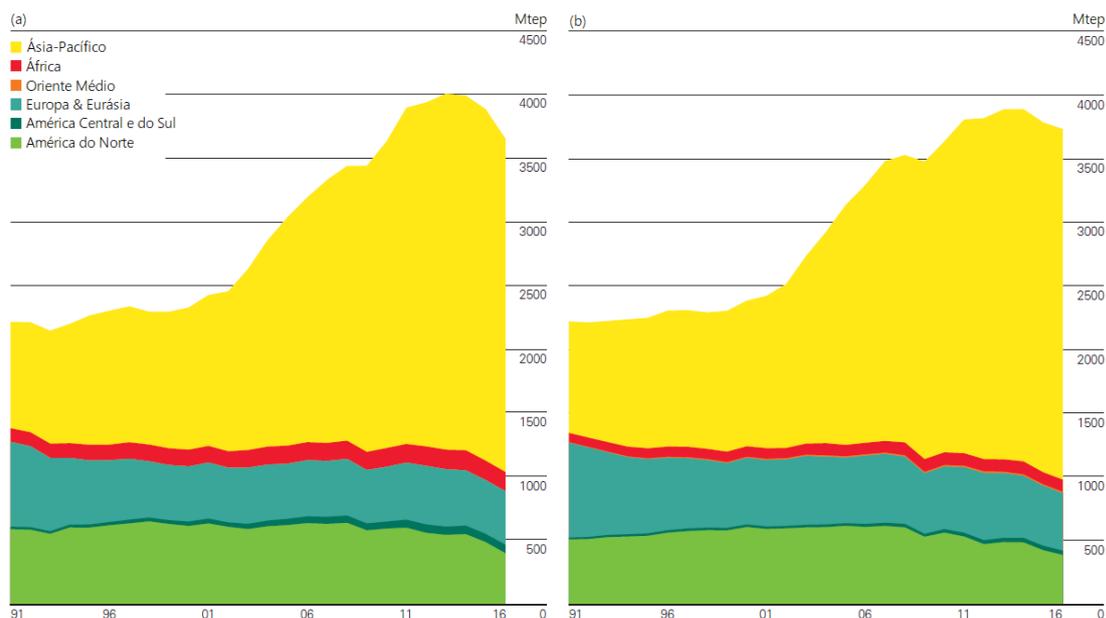


Figura 2.7 - (a) Produção de carvão mineral por região 1991-2016; (b) Consumo de carvão mineral por região 1991-2016.

Fonte: (BRITISH PETROLEUM, 2017).

Atualmente o mercado de carvão tem sofrido grande impacto devido a políticas de substituição da fonte por outras de menor impacto ambiental, e isto tende a alterar significativamente a exploração do recurso, estabelecendo um novo padrão de consumo. Tem-se como exemplo, no dia 21 de Abril de 2017, uma sexta-feira, ocorreu na Grã-Bretanha o primeiro período contínuo de 24 horas sem geração de eletricidade por carvão em sua história desde a ocorrência da Revolução Industrial, conforme pode ser verificado na Figura 2.8. Tal fato foi resultado da política de redução do uso do carvão e aumento do uso do gás natural e de energias renováveis. Os administradores do sistema elétrico inglês colocaram o ocorrido como um sinal do que planejam tornar cada vez mais comum, eliminando o uso do carvão

completamente com plano para fechamento da última usina a carvão em 2025, e representantes de agências de proteção ambiental indicaram tal dia como um divisor de águas na transição energética (BROWN, 2017).



Figura 2.8 - Resultado de geração a carvão da Grã-Bretanha no período de 15 a 21 de Abril de 2017, indicando o período sem geração a carvão no dia 21 de Abril.  
Fonte: (NATIONAL GRID UK, 2017).

Entretanto um cenário completamente contrário pode ser observado para outras regiões, onde se verifica com base nos planejamentos estratégicos de expansão energética o carvão com uma importância prioritária no que se refere ao atendimento da demanda crescente por energia elétrica. De acordo com as projeções da EIA (2017) o consumo mundial de carvão tende a continuar o mesmo entre 2015 e 2040, sendo a diminuição no consumo por alguns países/regiões compensada pelo aumento em outras. Na Figura 2.9 é apresentada uma projeção do consumo mundial de carvão até o ano de 2040, com perspectivas de que a China se mantenha como maior consumidor, seguido pela Índia que tende a ultrapassar os Estados Unidos antes mesmo de 2020.

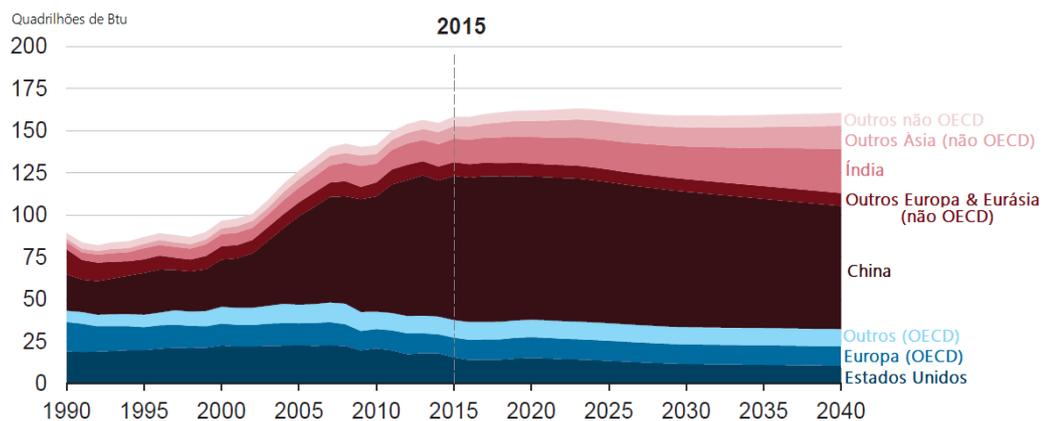


Figura 2.9 - Projeção de consumo mundial de carvão mineral por região, para o período 2015-2040.  
Fonte: (EIA, 2017).

## **CAPÍTULO 3**

### **GERAÇÃO DE ENERGIA A CARVÃO: TECNOLOGIAS SUBCRÍTICA, SUPERCRÍTICA, E ULTRASSUPERCRÍTICA**

#### **3.1. HISTÓRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A CARVÃO**

Os primeiros geradores de vapor a carvão forneciam vapor saturado de baixa pressão ou ligeiramente superaquecido para máquinas a vapor que movimentavam dínamos de corrente contínua. Em 1884, Charles Parsons construiu o primeiro turbo-gerador com uma eficiência térmica de apenas 1,6%, entretanto após apenas dois anos apresentou a primeira turbina de condensação, melhorando a performance da turbina a vapor, que levou a construção de uma turbina de 5 MW com eficiência térmica de 21%, e uma eficiência líquida de cerca de 15% (BOLTER, 1994; TERMUEHLEN, 2001; TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

A partir de 1910 foram introduzidas turbinas com extrações de vapor para aquecimento de água de alimentação, e geradores de vapor com pré-aquecedores de ar, o que proporcionou melhoria importante na eficiência em usinas de energia a carvão. Outro fato importante deste período está relacionado a combustão do carvão, que foi melhorada pela

introdução de queimadores de carvão pulverizado, que possibilitou dentre outras coisas a construção de caldeiras de maior porte. Na década de 1930 centrais a vapor se difundiram como forma comum de geração de eletricidade, e suas condições de vapor aumentaram até o limite para os projetos de gerador de vapor do tipo tambor da época (TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

As décadas de 1950 e 1960 trouxeram uma tendência de construção de usinas a carvão mais eficientes, com a construção do primeiro gerador de vapor supercrítico, e turbinas de vapor de reaquecimento. No início da década de 1960 a primeira turbina a vapor de reaquecimento entrou em operação (HAAS et al., 1982; TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

De 1980 a 1990 a geração de energia elétrica a carvão pulverizado passou por um período de maior desenvolvimento de sua tecnologia para atingir maior eficiência e menores emissões. De uma forma geral desde que as primeiras usinas a carvão entraram em operação a eficiência de todos os equipamentos da usina passaram por grandes melhorias, resultado de inúmeras melhorias no ciclo Rankine das usinas, assim como no desempenho dos equipamentos. Além da melhoria no ciclo Rankine de 34% para 48%, a eficiência da turbina a vapor foi a que teve melhoria mais significativa, saindo de 60% no início do século XX e atingindo 92% até os anos 2000, devido principalmente a melhoria nas pás da turbina (OEYNHAUSEN et al., 1996; TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

Um panorama do desenvolvimento histórico das usinas de energia a carvão pode ser observado na Figura 3.1.

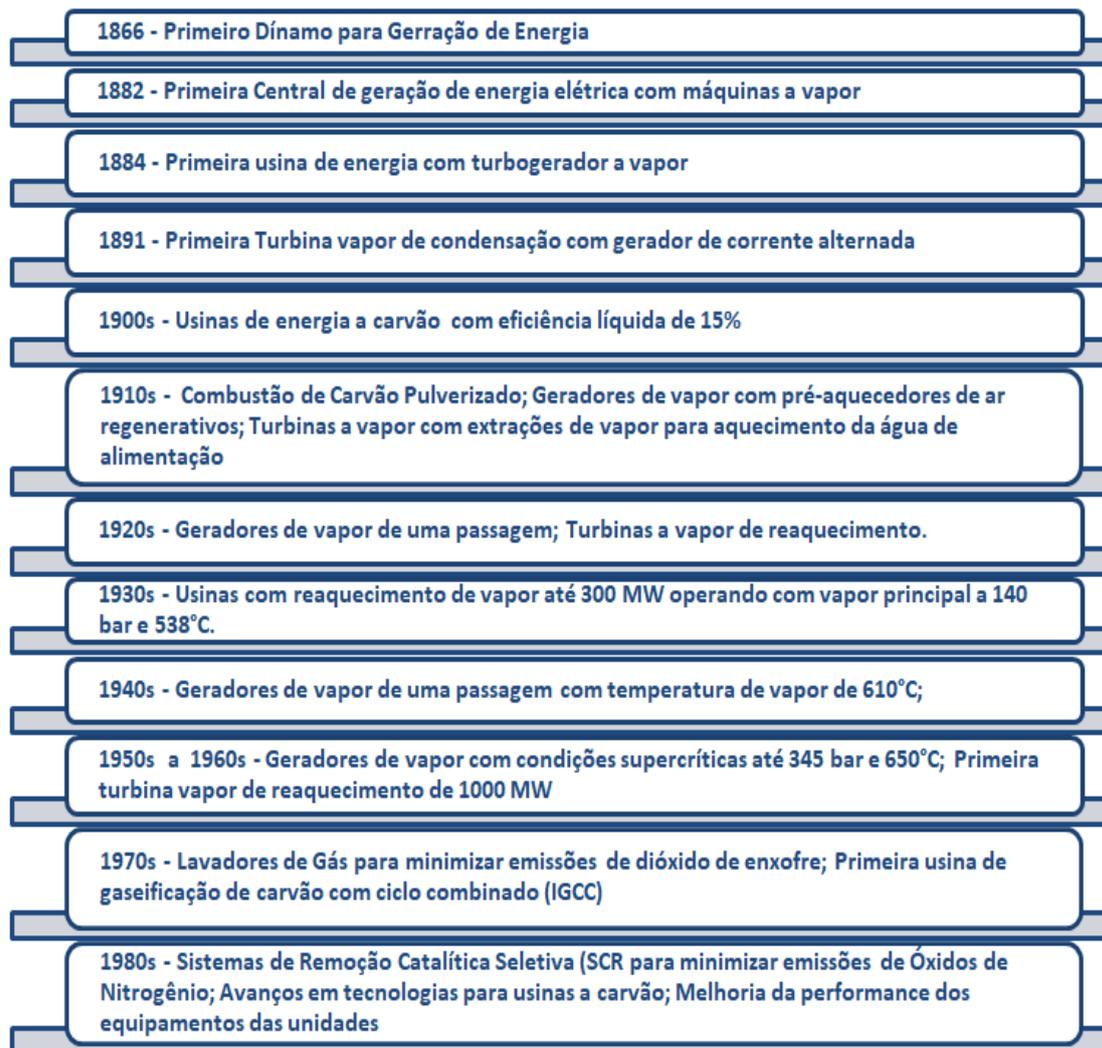


Figura 3.1 - Desenvolvimento histórico das plantas de geração a carvão.  
Fonte: (TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

### **3.2. ASPECTOS GERAIS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO**

Uma moderna usina de energia a carvão é composta por diversos subsistemas, os principais são, o recebimento e preparação do carvão; combustão e geração de vapor; turbinas de geração; rejeição de calor; controle de emissões; tratamento de água, cinzas e subprodutos, conforme pode ser visualizado na Figura 3.2 (MILLER, 2011).

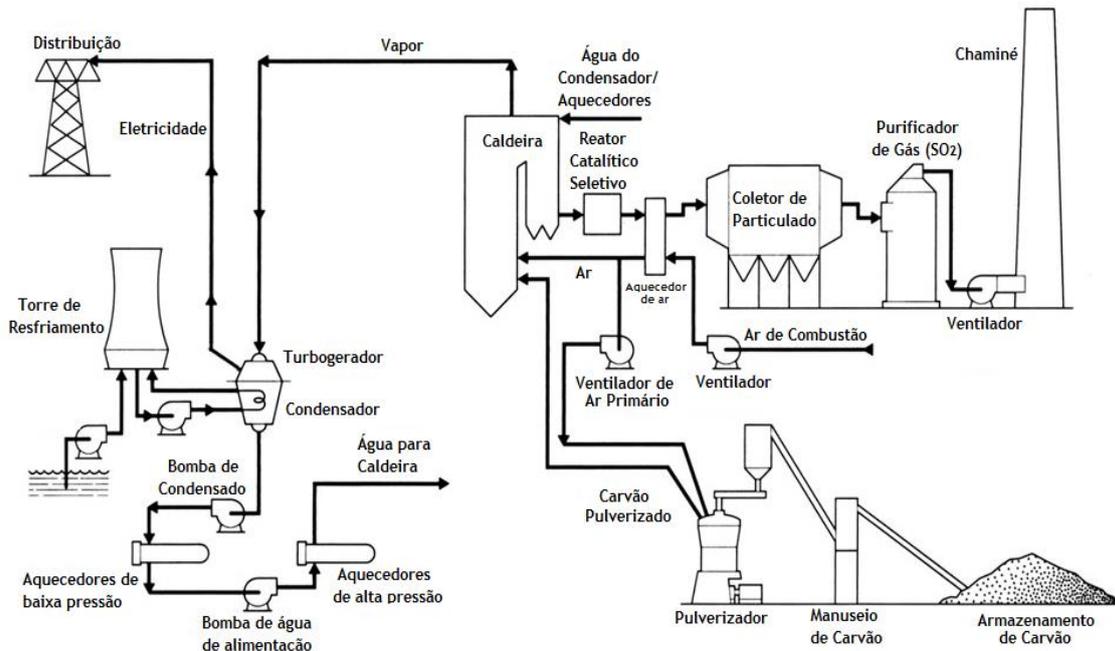


Figura 3.2 - Esquema de uma planta de geração de energia elétrica a carvão.  
Fonte: Modificado de Kitto e Stultz (2005).

Em uma central a carvão ocorrem vários processos de conversão de energia para ao final possibilitar o fornecimento de energia elétrica. Cada tipo de conversão de energia ocorre em um dos componentes principais da unidade. Na caldeira ocorre a conversão da energia química armazenada no combustível em energia térmica, via processo de combustão e transferência de calor para o fluido de trabalho. Nas turbinas a energia térmica (contida no vapor em alta temperatura e pressão) é convertida em energia mecânica através da expansão do fluido de trabalho. E por fim, a energia mecânica é convertida em eletricidade no gerador por meio de indução eletromagnética. Um resumo esquemático destes processos de conversão de energia na central pode ser verificado na Figura 3.3 (PESCIA, 2017).

É importante compreender que ocorrem perdas de energia durante cada um dos processos de conversão, além disso, de acordo com a Segunda Lei da termodinâmica energia térmica não pode ser totalmente convertida em energia mecânica, sendo que uma parcela não conversível deve ser liberada ao ambiente através de um sistema de resfriamento, configurando perdas inerentes a este tipo de sistema de geração de energia (PESCIA, 2017).

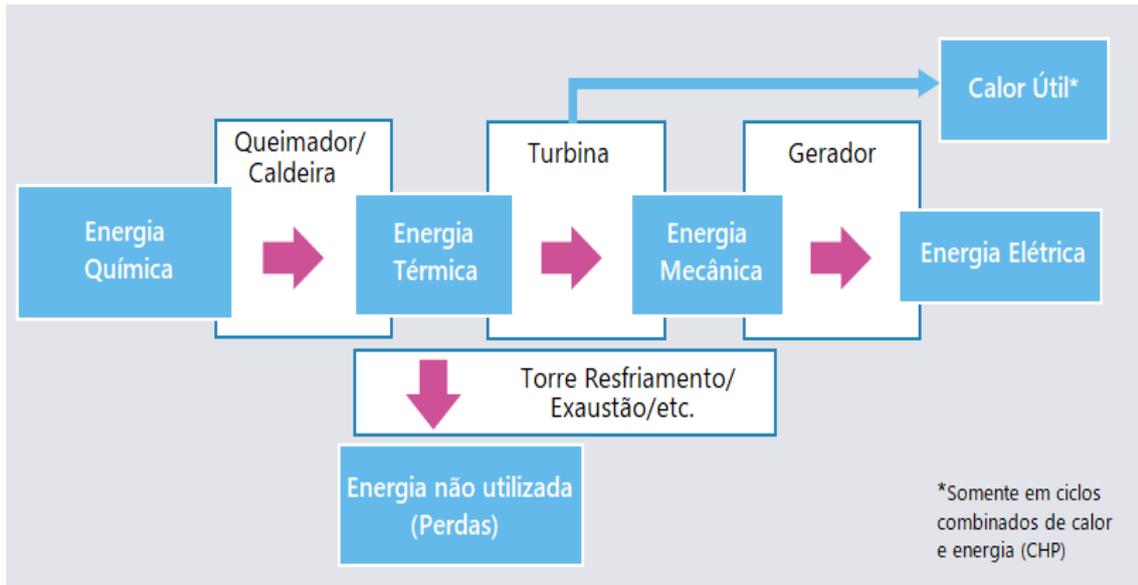


Figura 3.3 - Processo de Conversão de Energia para usinas térmicas.

Fonte: (PESCIA, 2017).

O princípio de funcionamento de centrais a vapor, como é o caso das centrais a carvão, é baseado no ciclo Rankine, que consiste em um ciclo idealizado de um motor térmico que converte calor em trabalho mecânico. No ciclo um fluido de trabalho passa continuamente por diferentes mudanças de estado, mas não deixa o ciclo.

Os parâmetros típicos de operação de unidades de geração a carvão são de vapor subcrítico, com 163 bar / 538°C / 538°C, ou seja, com único reaquecimento, atingindo eficiência abaixo de 40% (base PCI) (BEÉR, 2007).

Importantes conceitos termodinâmicos são aplicados para o ciclo Rankine. Da Primeira Lei da Termodinâmica tem-se que o trabalho líquido desenvolvido por um sistema submetido a um ciclo de potência deve ser igual à energia líquida adicionada por transferência de calor para o sistema, e da Segunda Lei da Termodinâmica exige-se que a eficiência térmica de um ciclo de potência seja menor que 100% (MORAN et al., 2014).

Um ciclo Rankine ideal é idealizado assumindo uma série de condições, tais como a ausência de irreversibilidades e de perda de calor. Nesta situação não há queda de pressão na caldeira e no condensador, assim como os processos na turbina e na bomba são isentrópicos. Desta forma um ciclo Rankine ideal passa por quatro principais processos internamente reversíveis, como pode ser verificado na Figura 3.4 (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009; ÇENGEL; BOLES, 2006; MORAN et al., 2014).

Processo 1-2: expansão isentrópica do fluido através da turbina;

Processo 2-3: Rejeição de calor no condensador a pressão constante;

Processo 3-4: Compressão isentrópica na bomba;

Processo 4-1: Transferência de calor para o fluido de trabalho na caldeira a pressão constante.

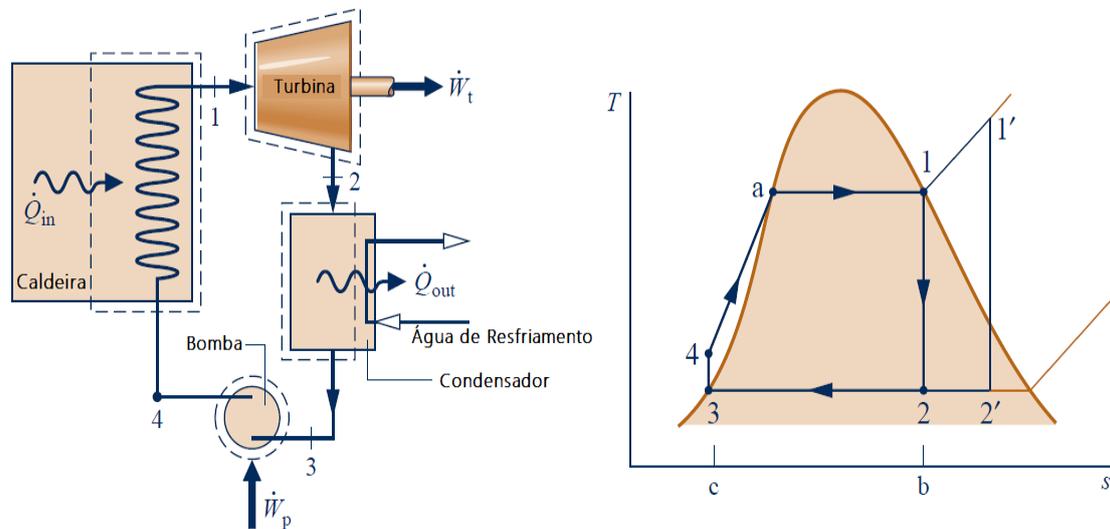


Figura 3.4 - (a) Representação esquemática dos componentes principais do ciclo Rankine; (b) Diagrama Temperatura-Entropia do ciclo Rankine ideal.

Fonte: (MORAN et al., 2014).

O ciclo Rankine ideal inclui também a possibilidade de superaquecimento do vapor, como pode ser verificado na Figura 3.4 (b), indicado no ciclo  $1' - 2' - 3 - 4 - 1'$ .

A área sob a curva de um processo representado em um diagrama Temperatura-Entropia (T-s) fornece a transferência de calor para os processos internamente reversíveis, sendo que a área abaixo do processo 4 - 1 (ou 4 - 1') representa o calor transferido para a água na caldeira, e a área sob a curva 2 - 3 (ou 2' - 3) representa o calor rejeitado no condensador. E a diferença entre estes dois fornece o trabalho líquido produzido durante a operação do ciclo (ÇENGEL; BOLES, 2006).

A eficiência de um ciclo Rankine pode ser aumentada pela redução da pressão no condensador, ou através do aumento da pressão durante a adição de calor, pelo superaquecimento do vapor, e pelo reaquecimento do vapor. O superaquecimento do vapor é extremamente importante visto que evita excesso de umidade nos estágios de baixa pressão da turbina, que se exceder cerca de 10% não só reduz significativamente a eficiência como provoca a erosão das pás da turbina. O reaquecimento do vapor também é fundamental para evitar o aumento da umidade do vapor nos estágios de baixa pressão da turbina, principalmente quando se aumenta a pressão durante o processo de adição de calor, por

exemplo, como ocorre em ciclos supercríticos. Na Figura 3.5 é apresentado o esquema simplificado e o Diagrama T-s para um ciclo Rankine ideal com único reaquecimento (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009; MORAN et al., 2014).

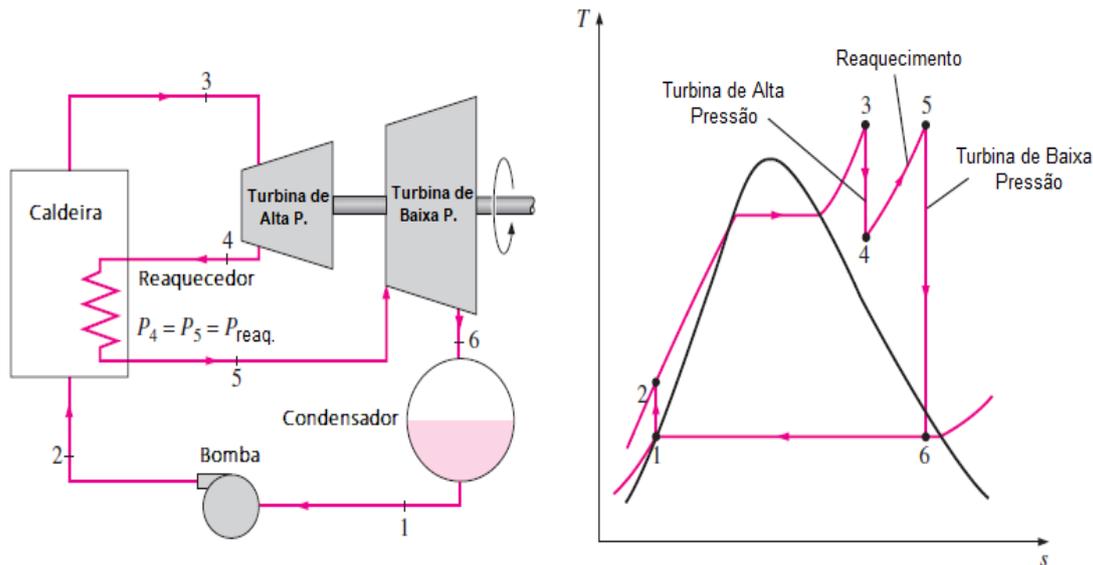


Figura 3.5 - (a) Representação esquemática dos componentes principais do ciclo Rankine ideal com reaquecimento; (b) Diagrama Temperatura-Entropia do ciclo Rankine ideal com reaquecimento.  
Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Outra variação importante do ciclo Rankine ideal consiste no ciclo regenerativo, que se baseia na utilização de aquecedores de água de alimentação. Parte do vapor que entra na turbina é extraído após a expansão, entrando então no aquecedor de água de alimentação, onde calor é transferido do vapor para a água de alimentação, misturando as duas correntes de fluido (aquecedores abertos) ou sem misturá-las (aquecedores fechados). A proporção de vapor extraído é a suficiente para levar o líquido que sai do aquecedor ao estado saturado. O aspecto principal que proporciona melhoria na eficiência do ciclo é que a temperatura média a que o calor é fornecido é aumentada. O uso do ciclo regenerativo não só aumenta a eficiência do ciclo, mas também é um meio prático de promover a desaeração da água de alimentação evitando corrosão de componentes da caldeira, auxilia também no controle da grande vazão volumétrica de vapor nos estágios finais da turbina, sendo assim a regeneração tem sido utilizada em todas as modernas plantas a vapor há muito tempo (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009; ÇENGEL; BOLES, 2006).

Em aquecedores fechados o vapor condensado após a troca de calor com a água de alimentação é bombeado para a linha de alimentação, ou encaminhado para outro aquecedor ou para o condensador através de um dispositivo denominado purgador (no inglês *Trap*). Este dispositivo permite o estrangulamento do líquido para uma região de pressão mais baixa,

mantendo a entalpia constante durante este processo. Um aquecedor fechado de água de alimentação pode ser observado na Figura 3.6.

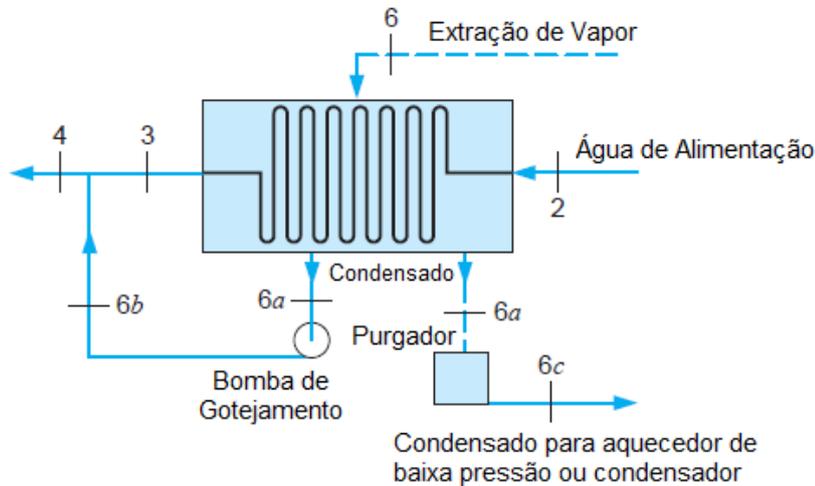


Figura 3.6 - Representação esquemática de um aquecedor fechado de água de alimentação.  
Fonte: (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

### 3.3. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

No que se refere à operação de usinas de energia, a potência líquida de saída é utilizada para denotar a carga da planta, sendo a carga nominal também chamada de capacidade nominal, a maior saída de potência líquida de uma planta em operação em suas condições de projeto. A carga parcial descreve uma planta cuja condição de operação gera uma potência líquida de saída inferior ao valor nominal da mesma. A carga parcial pode variar até uma carga mínima, que corresponde a menor potência de saída que pode ser entregue pela planta de forma a manter sua operação estável (PESCIA, 2017).

As usinas a carvão podem ser despachadas de diferentes formas para fornecer energia ao sistema, sendo então divididas em centrais térmicas de base, centrais de pico, e centrais de carga intermediária. As centrais de base operam continuamente fornecendo uma carga que não apresenta variação diária ou semanal, geralmente são representadas por usinas de grande potência instalada, tendo como característica uma alta inércia térmica. As centrais de pico entram em operação para atender a demanda de carga máxima diária, são essenciais para garantir a segurança do sistema nos períodos de pico de carga, são representadas por unidades que podem ser iniciadas rapidamente na ocorrência de uma alta demanda. Já as centrais de carga intermediária estão disponíveis ao sistema para elevar a geração de eletricidade de

forma eficiente. Entretanto, se comportam de forma eficiente quando operadas por um maior período de horas. Estas unidades podem acompanhar as variações de carga a custo menor que as centrais de pico, e com mais flexibilidade que as unidades de base (GIANFRANCESCO, 2017).

As variações de carga, e os periódicos desligamentos e retomada na atividade das unidades, são extremamente prejudiciais à vida útil das instalações assim como para a eficiência da planta, o que torna recomendável uma efetiva análise preliminar e avaliação de cenários ao propor a construção de uma usina termelétrica para operar integrada a um sistema interligado (OLIVEIRA, 2009).

### **3.4. TECNOLOGIAS SUPERCRÍTICA E ULTRASUPERCRÍTICA**

A maioria das centrais termelétricas a carvão operam em condições de vapor subcríticas, apesar de as primeiras unidades supercríticas terem entrado em operação ainda na década de 60, e mais recentemente na década de 90 as instalações ultrassupercríticas já estavam sendo operadas com sucesso (NALBANDIAN, 2009).

Novos projetos de unidades de geração a carvão buscam cada vez mais otimizar o uso da energia térmica proveniente da combustão do carvão, e desta forma promover o aumento da eficiência das unidades, maiores pressões e temperaturas máximas no ciclo térmico são fatores principais que contribuem neste sentido. Com base nas condições de vapor (pressão e temperatura) a geração de energia a carvão pode ser dividida em subcríticas (pressão do vapor principal abaixo da pressão crítica de 22 MPa), supercríticas (pressão superior a pressão crítica de 22 MPa), e ultrassupercrítica (uso de pressão superior a 25 MPa com temperaturas de vapor superiores a 600°C), a Figura 3.7 permite visualizar o Diagrama T-s para um ciclo supercrítico, e ultra supercrítico, com  $r_1$  e  $r_2$  indicando os dois reaquecimentos do vapor, respectivamente, e  $\bar{T}_i$  indicando a temperatura média na qual o processo ocorre (KIMURA et al., 2011).

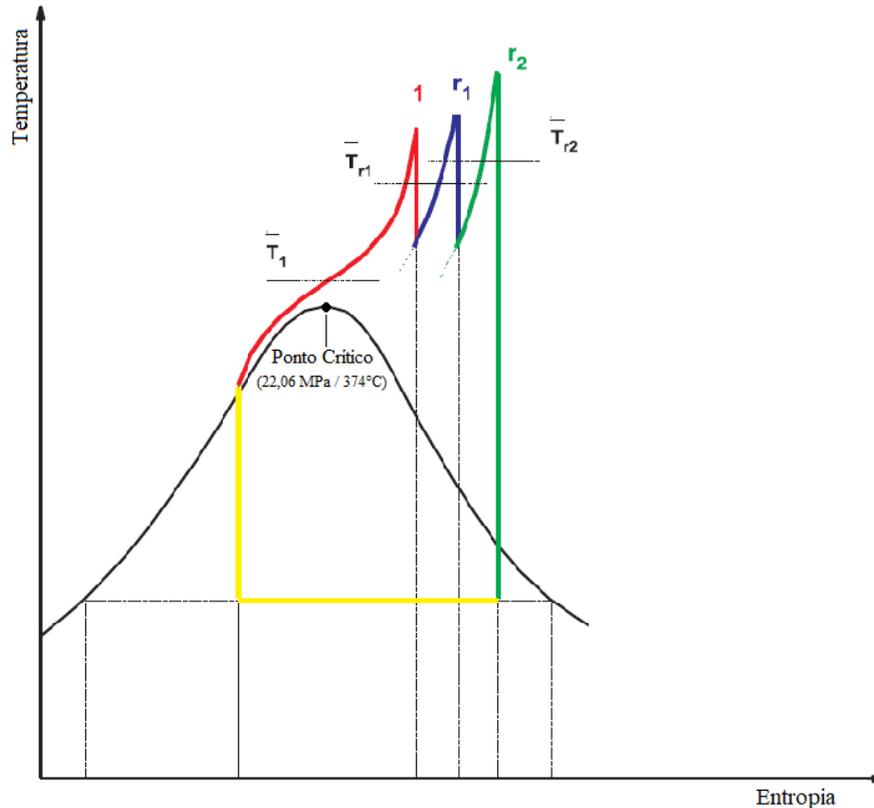


Figura 3.7 - Diagrama T-s de um ciclo Rankine Supercrítico / Ultra supercrítico, com duplo reaquecimento de vapor (r1 e r2).  
Fonte: (FAN et al., 2018).

O termo “supercrítica (SC)”, que deriva do conceito termodinâmico de ponto crítico, que para a água ocorre aproximadamente na pressão de 22 MPa e temperatura de 374°C, de forma que condições de vapor acima deste ponto são denominadas supercríticas, e neste estado não há distinção entre fase líquida e gasosa, e não possui uma temperatura de saturação ou uma faixa de entalpia de calor latente. Já o termo “ultrassupercrítica (USC)”, muito utilizado, se refere a condições de vapor mais avançadas que as supercríticas em geral. Em geral a condição USC é estabelecida para pressões igual ou superior a 25 MPa e temperaturas acima de 600°C (BEÉR, 2007; FAN et al., 2018).

Na Tabela 3.1 é possível observar os parâmetros operacionais (temperatura e pressão) e as eficiências para plantas de geração a carvão pulverizado, nas condições subcríticas, supercríticas e ultrassupercríticas.

É importante salientar que a eficiência expressa em HHV (*Higher Heating Value*), que corresponde ao Poder Calorífico Superior (PCS), é menor que a eficiência expressa em LHV (*Lower Heating Value*), correspondente ao Poder Calorífico Inferior (PCI), a diferença na eficiência chega a ser de 2 – 4 %.

Tabela 3.1 - Parâmetros operacionais e eficiência para ciclos subcríticos, supercríticos e ultra supercríticos em plantas a carvão pulverizado.

<b>Tecnologia</b>	<b>Pressão de Vapor principal [MPa]</b>	<b>Temperatura de Vapor principal [°C]</b>	<b>Temperatura de Reaquecimento de Vapor [°C]</b>	<b>Eficiência [%] Base HHV (Carvão Betuminoso)</b>
<b>Subcrítica</b>	< 22,1	Até 565°C	Até 565	33 - 39
<b>Supercrítica</b>	22,1 – 25,0	540 - 580	540 - 580	38 - 42
<b>Ultrassupercrítica</b>	> 25,0	> 580	> 580	> 42

Fonte: (NALBANDIAN, 2009).

Em um Diagrama P-v de um ciclo Rankine a área sob a curva fornece o trabalho líquido de saída fornecida pela unidade. Altas pressões de operação e rejeição de calor a temperaturas mais baixas proporcionam aumento na potência líquida de saída (GUPTA, 2008).

O uso de condições supercríticas e ultrassupercríticas aumentam a eficiência do ciclo Rankine pelo fato de que esta eficiência é diretamente proporcional à temperatura e à pressão do vapor durante o processo de adição de calor ao ciclo (FAN et al., 2018). É estimado um aumento de um ponto percentual na eficiência da planta a cada 20°C de aumento na temperatura principal do vapor (BEÉR, 2007).

A primeira unidade supercrítica, chamada Eddystone 1 (Figura 3.8) construída nos Estados Unidos em 1959, foi originalmente projetada para funcionar a 34,5 MPa e 650/650/650 °C, em um ciclo de reaquecimento duplo, entretanto a unidade apresentou diversos problemas resultantes de limitações dos materiais, além de problemas típicos de desenvolvimento de projetos inéditos. Esta unidade opera atualmente a 24,3 MPa e 565/565°C. Os problemas iniciais enfrentados, o alto custo de desenvolvimento, e o preço relativamente baixo do carvão resultaram em uma falta de interesse na tecnologia SC por um longo período, optando por unidades subcríticas cuja tecnologia encontrava-se bem estabelecida (IEA, 2011).

Os problemas inicialmente encontrados na operação de unidades SC e USC foram amplamente eliminados, entretanto, apesar de evidências que demonstrassem que estes projetos fossem comercialmente comprovados e competitivos, muitos países mantiveram a preferência pelo uso da tecnologia subcrítica, especialmente quando o preço do carvão não era tão alto (IEA, 2011).

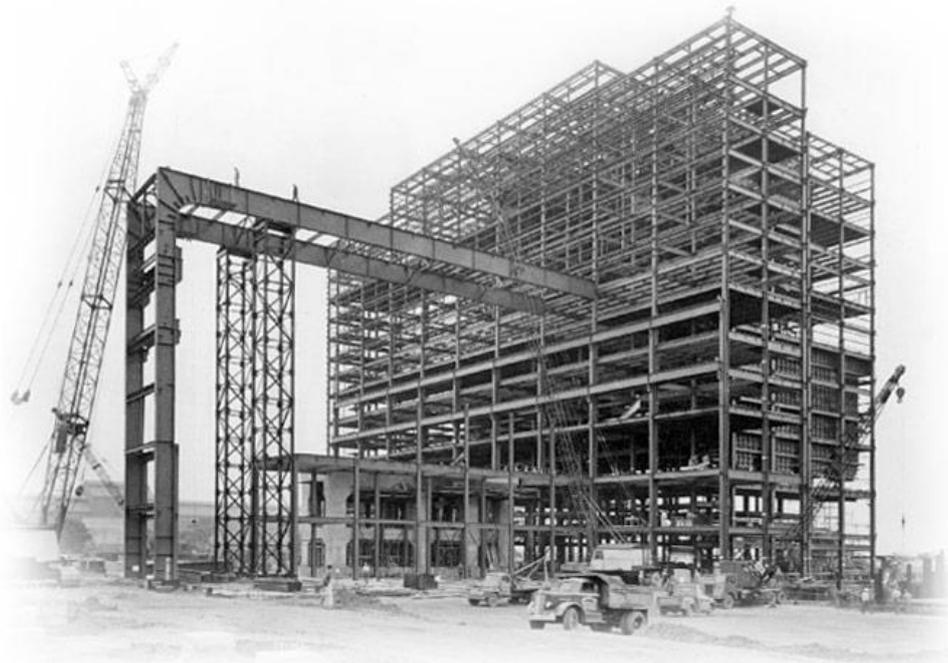


Figura 3.8 - Estrutura de aço estrutural do gerador de vapor da planta de Eddystone 1.  
Fonte: (ASME, 2003).

As caldeiras projetadas para operação em pressões supercríticas e ultracriticadas possuem características distintas daquelas de pressão subcrítica. Em pressões subcríticas em geral utilizam-se caldeiras aquatubulares com vaso de pressão, neste tipo os tubos devem ser projetados para comportar um fluxo bifásico de vapor e água, além das características de ebulição específicas desta condição de vapor, podem também serem utilizadas as caldeiras aquatubulares. Enquanto que em pressões supercríticas tem-se o fluido em uma única fase, que sofre um aumento gradativo de temperatura durante a passagem ao longo dos tubos, exigindo considerações especiais para evitar desequilíbrios excessivos na temperatura do metal da tubulação (KITTO; STULTZ, 2005).

Em grandes centrais de geração de eletricidade são utilizados principalmente três tipos de geradores de vapor, as características que os distinguem estão nos sistemas de evaporação, como pode ser visualizado na Figura 3.9. Unidades de energia a carvão com tecnologia avançada que operam em condições de vapor supercríticas e ultracriticadas têm a necessidade de utilizar geradores de vapor monotubulares (uma passagem de vapor), o projeto deste tipo de gerador permite o aumento da flexibilidade operacional, e prolonga a vida útil dos equipamentos altamente pressurizados (TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

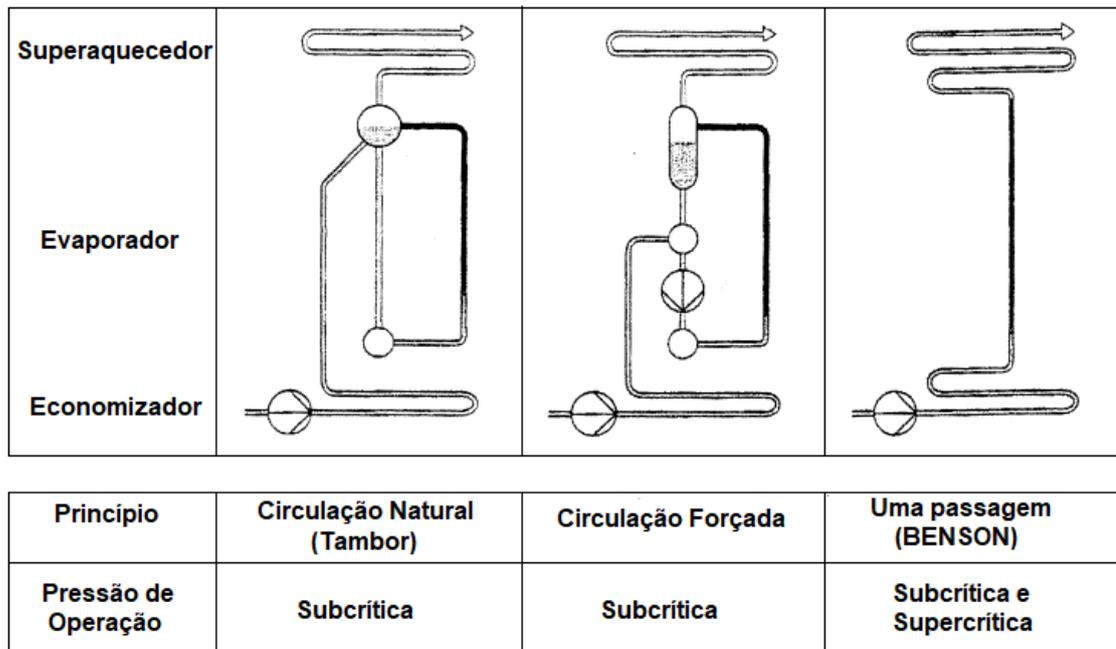


Figura 3.9 - Conceitos de projeto de geradores de vapor do tipo de tambor e de uma passagem.  
 Fonte: (TERMUEHLEN; EMSPERGER, 2003).

Os geradores de vapor supercrítico, também conhecidos como caldeiras tipo Benson (em homenagem ao seu criador, Mark Benson), têm como característica a geração de vapor supercrítico, com pressões superiores a 22,1 MPa, circulação forçada e um tempo de arranque muito inferior. Água é bombeada para o interior da unidade como líquido sub-resfriado sendo convertido em vapor superaquecido à medida que absorve calor, não havendo recirculação de água dentro da unidade, o que torna dispensável o tambor convencional para separar água do vapor. Este tipo de caldeira é projetado para manter um fluxo mínimo dentro dos circuitos da fornalha no intuito de evitar o superaquecimento das tubulações durante todas as condições de operação (KITTO; STULTZ, 2005; PORTOCARRERO, 2015).

Um aspecto importante observado em relação à adição de calor ao fluido, no gerador de vapor, se refere ao fato de que à medida que a pressão e a temperatura aumentam, atingindo condições supercríticas e ultrassupercríticas, a absorção total de energia diminui progressivamente devido ao aumento da eficiência do ciclo. Ou seja com o aumento da pressão de operação a quantidade de calor necessária para produzir vapor saturado diminui, entretanto a quantidade de calor demandada no superaquecedor e no reaquecedor aumenta, na Figura 3.10 são apresentadas estas características de absorção de energia para produzir vapor saturado, no superaquecimento e reaquecimento, para uma faixa de pressões de operação (KITTO; STULTZ, 2005).

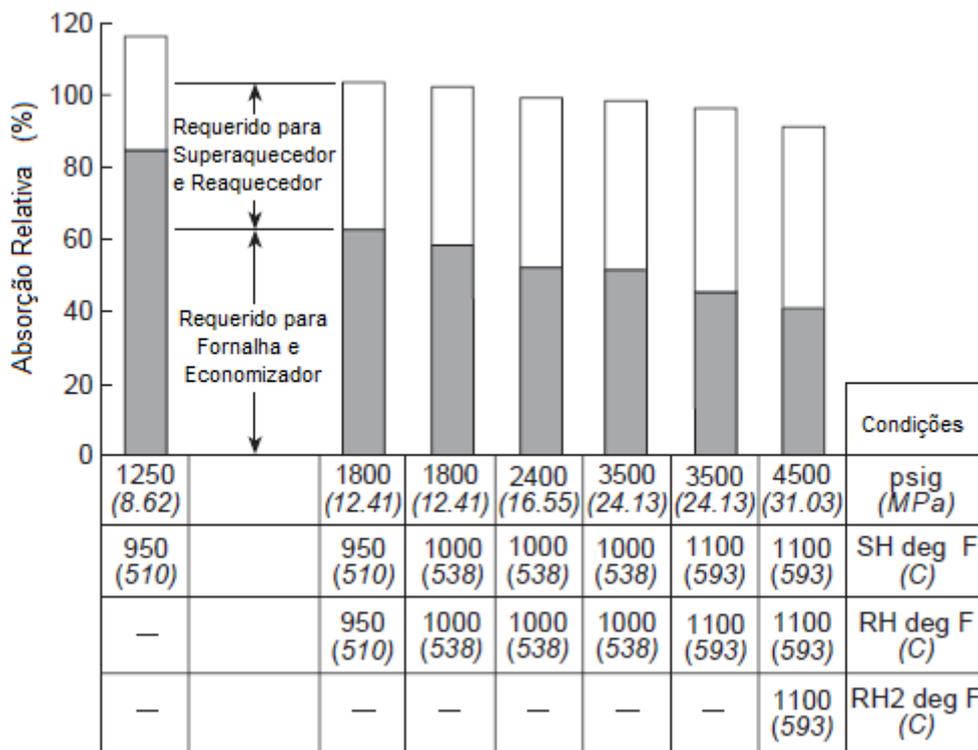


Figura 3.10 - Absorção de calor relativa para condições operacionais do ciclo de potência normalizadas para absorção por kWh no ciclo de 16,55 MPa.

Fonte: (KITTO; STULTZ, 2005).

No que se refere às turbinas a vapor, o desenvolvimento descreve um avanço evolutivo no sentido de obter maior eficiência energética, as melhorias na eficiência foram realizadas principalmente por meio de dois tipos de avanços. O primeiro relaciona-se com melhorias na eficiência mecânica através da redução de perdas aerodinâmicas e de vazamentos à medida que o vapor expande pela turbina, o segundo avanço consiste na melhoria da eficiência termodinâmica, através do aumento da temperatura e pressão na qual calor é adicionado ao ciclo. Projetos de turbinas a vapor de alta temperatura evoluíram baseados no desenvolvimento de materiais melhorados e através do uso mais efetivo de arranjos de vapor de resfriamento (RUEGGER; RETZLAFF, 1996).

A melhoria das condições de vapor, através do aumento da temperatura e pressão principal, é uma ferramenta prática capaz de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> das unidades de geração a carvão à curto prazo, e também corresponde a uma importante solução a longo prazo na redução das emissões de CO<sub>2</sub> através da incorporação de sistemas de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), visto que é essencial que tal tecnologia seja implantada em plantas altamente eficientes tendo em vista que o processo CCS é intensivo no uso de energia e custos (BURNARD et al., 2014; FAN et al., 2018).

A eficiência de uma usina de energia supercrítica ou ultrassupercrítica de carvão pulverizado pode ser aumentada ainda mais, atingindo até 45% ou mais (base PCI). Algumas medidas que tem efeito importante no aumento da eficiência da central supercrítica a carvão pulverizado são a razão ar/combustível, temperatura dos gases de exaustão, condições de vapor, reaquecimento e pressão no condensador. Na Figura 3.11 são apresentadas as melhorias em diversos parâmetros do ciclo Rankine Supercrítico que os podem elevar a eficiência a mais de 45% (base PCI).

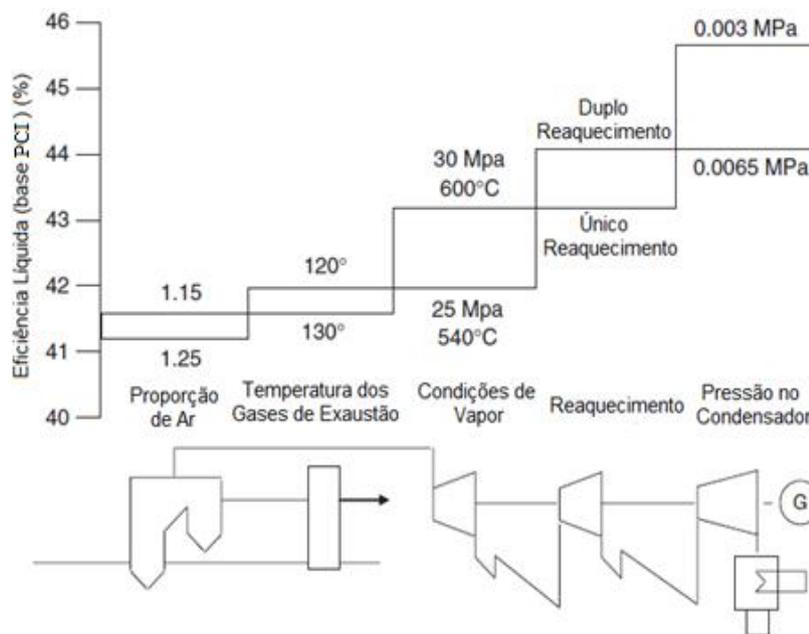


Figura 3.11 - Efeito de várias medidas para aumento da eficiências de uma planta de geração a carvão supercrítica de carvão pulverizado.

Fonte: (GUPTA, 2008).

A razão ar/combustível, que representa o fluxo de massa de ar de combustão como um múltiplo da massa estequiométrica de ar para uma combustão completa, à medida que se torna maior tende a aumentar o fluxo de gás na saída da caldeira, aumentando a perda de calor por gás residual. Técnicas de combustão melhoradas, como moagem do carvão, design do queimador, permitem reduzir o excesso de ar sem prejuízo à eficiência da combustão (BEÉR, 2007).

A temperatura de saída dos gases de exaustão tem seu limite admissível determinada pelo ponto de orvalho do gás. O excesso de ar provoca maior oxidação de  $\text{SO}_2$  em  $\text{SO}_3$ , que promove a formação de ácido sulfúrico nos produtos da combustão, a presença de vapor de ácido sulfúrico aumenta o ponto de orvalho admissível, aumentando a temperatura aceitável do gás de saída (BEÉR, 2007).

Assim como já discutido, a eficiência do ciclo Rankine é proporcional à pressão e à temperatura de adição de calor ao ciclo e inversamente proporcional à temperatura do ambiente de resfriamento. Neste sentido projetos de usinas no norte da Europa com utilização de água de resfriamento a baixas temperaturas utilizam baixas pressões no condensador (30 mbar), podem produzir ganho de eficiência superior a 2%.

O reaquecimento de vapor não só aumenta a eficiência do ciclo de Rankine, já que eleva a temperatura média durante o processo de adição de calor, mas também evita presença elevada de umidade indesejável no vapor nos últimos estágios de baixa pressão da turbina vapor (FAN et al., 2018).

O diagrama Entalpia-Entropia (h-s) da Figura 3.12 permite visualizar o resultado do reaquecimento do vapor no que se refere à redução do teor de umidade deste nos estágios de baixa pressão da turbina, uma condição de único reaquecimento leva a um Título de 0,85 na saída da turbina de baixa pressão, enquanto um duplo reaquecimento leva este valor a 0,92.

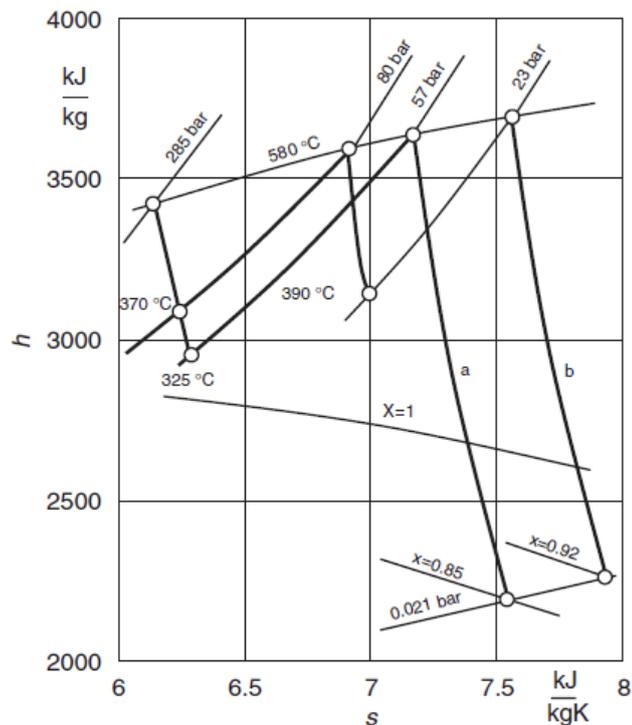


Figura 3.12 - Diagrama Entalpia-Entropia (h-s) do processo de expansão na turbina vapor para um ciclo supercrítico nas condições de: (a) único reaquecimento e (b) duplo reaquecimento.

Fonte: (BEÉR, 2007).

É comum a temperatura do reaquecimento do vapor ser superior a do superaquecimento principal, isto porque o vapor chega ao reaquecedor com menor pressão quando comparado à condição no superaquecedor, desta forma a espessura da parede do tubo

do reaquecedor pode ser reduzida, possibilitando atingir uma temperatura maior no reaquecimento (BEÉR, 2007).

O uso da tecnologia ultrassupercrítica (USC) já consolidado por anos de experiência de sua utilização, com parâmetros de 30 MPa/600°C/600°C, que resulta em eficiências superiores a 45%, proporciona uma redução de cerca de 15% nas emissões de CO<sub>2</sub> (BEÉR, 2007; BLUM; HALD, 2002).

O efeito ambiental, representado pela redução das emissões de dióxido de carbono, que a melhoria da eficiência da central proporciona, pode ser verificado na Figura 3.13.

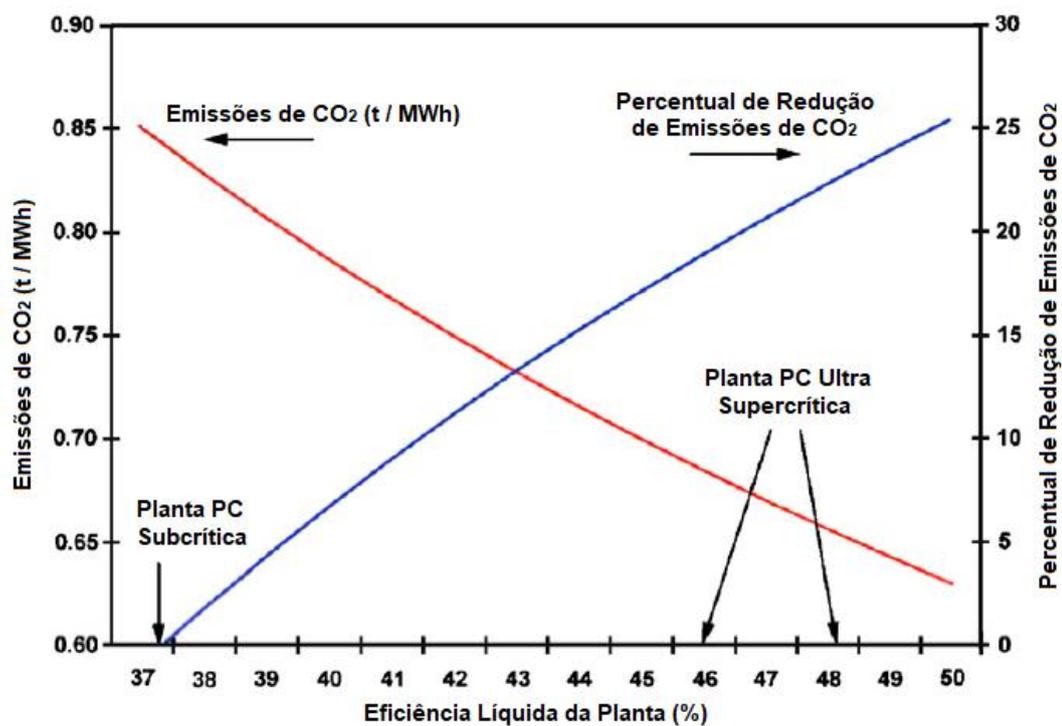


Figura 3.13 - Emissões de CO<sub>2</sub> Vs. Eficiência da Planta (base HHV).

Fonte: (BOORAS; HOLT, 2004).

A Tabela 3.2 apresenta métodos de melhoria da eficiência para unidades de geração a carvão, assim como, o potencial de melhoria de eficiência, por meio da prática de “*Retrofit*” da unidade, os quais foram identificados pelo Laboratório Nacional de Tecnologia de Energia (NETL) dos Estados Unidos através de revisão de artigos técnicos. É improvável que seria possível proceder com todas as melhorias listadas em uma mesma central, pois é necessário considerar as limitações e condições específicas de cada localidade.

Tabela 3.2 - Melhoria potencial de eficiência para medidas de aumento de eficiência existentes em plantas de geração a carvão.

<b>Melhorias na planta de geração</b>	<b>Potencial aumento de eficiência (%)</b>
Pré-aquecedores de ar (Otimizar)	0,2 até 1,5
Sistema remoção cinzas (Substituir)	0,1
Caldeira (Aumento superfície de aquecimento)	2,1
Sistema Combustão (Otimizar)	0,2 até 0,84
Condensador (Otimizar)	0,7 até 2,4
Sistema resfriamento (Melhorar)	0,2 até 1,0
Aquecedores de Água de Alimentação (Otimizar)	0,2 até 2,0
Recuperação de umidade dos gases de combustão	0,3 até 0,7
Recuperação de calor dos gases de combustão	0,3 até 1,5
Secagem do Carvão (Instalação)	0,1 até 1,7
Redução de incrustações de escória no forno	0,4
Otimização do soprador de fuligem	0,1 até 0,7
Vazamentos de vapor (Redução)	1,1
Turbina Vapor (Renovar)	0,8 até 2,6

Fonte: (NETL, 2008)

### **3.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS PARA APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS SUPERCRÍTICA E ULTRASSUPERCRÍTICA**

Os parâmetros de vapor são limitados por materiais que possam operar em condições de alta temperatura e pressão por todo um período de vida útil da planta, sem falhas.

A geração de energia em plantas a carvão na década de 1920 possuía limitações de pressão e temperatura do vapor de 4 MPa e 370°C, em razão do uso de aço carbono, posteriormente o uso de aço Mo possibilitou que a pressão de operação fosse elevada para 10 MPa e a temperatura para 480°C. Já na década de 1950 o desenvolvimento do aço CrMo permitiu que plantas operassem com pressão de 17 MPa e temperatura de 566°C. No período posterior de 1950 a 1965, as pressões e temperaturas de operação aumentaram de forma constante, no intuito de promover um aumento da geração de eletricidade para suprir a crescente demanda (MASUYAMA, 2001).

De acordo com Nicol (2013) as primeiras unidades de geração com combustão de carvão pulverizado que operava em condições subcríticas de vapor, tinha nos aços de baixa liga CMn e Mo ferrítico nos seus materiais construtivos. A próxima geração, já com

parâmetros supercríticos (SC), passou a fazer uso de aços CrMo de baixa liga e aços martensíticos de cromo 9-12%. Com os parâmetros de operação ultrassupercríticos seguiu-se com a utilização de aços martensíticos de 9-12% de cromo e aços austeníticos (como HR3C e Sanicro 25).

Segundo IMIA (2016) na década de 1980 chegou ao mercado a primeira geração de materiais avançados para caldeiras, chamado "*Grade 91*", que consiste em um aço ferrítico com alto teor de cromo (9%). Este aço apresentava maior resistência a altas temperaturas, permitindo que nos projetos as paredes dos componentes fossem mais finas. Entretanto quando os primeiros materiais *Grade 91* foram utilizados encontrou-se problemas relacionados à soldagem e ao tratamento térmico.

Já na década de 1990 uma nova liga de aço denominada *Grade 24* foi desenvolvida, para atender aos requisitos necessários para tubulações das paredes de água. O material consiste em aço da liga de cromo-molibdênio com baixo teor de carbono, com micro adições de titânio, vanádio, boro, e nitrogênio (Vallourec & Mannesmann Tubes, 2000 apud IMIA, 2016). Inúmeros vazamentos na maioria dos geradores de vapor contendo o *Grade 24* sugeriram que suas propriedades de soldabilidade, resistência a corrosão, resistência a fluência, não atendiam às necessidades dos projetos com altas temperaturas e pressões (IMIA, 2016).

De acordo com Franke e Kral (2003) nos primeiros geradores de vapor com temperaturas de vapor muito altas, foram empregados materiais austeníticos, no entanto seu comportamento termoelástico inadequado (baixa condutividade térmica e alta dilatação térmica) os tornaram impróprios para caldeiras de usinas de energia que passam por elevado número de mudanças de carga, e tempos de inicialização mínimos. Posteriormente o desenvolvimento de aços cromo, como P91, P92 e E911, permitiram temperaturas de vapor de até 620°C, sem uso de materiais austeníticos em componentes de paredes espessas.

O desenvolvimento de usinas de energia USC necessitou de materiais de alto desempenho, que resistem a temperaturas e pressões muito altas. A substituição de materiais ferríticos e martensíticos por ligas mais resistentes à fluência tornou-se necessária, já que temperaturas acima de 600°C são limitantes para ligas martensíticas devido a seu desempenho em relação a resistência à deformação (MASUYAMA, 2001; STEIN-BRZOZOWSKA et al., 2013).

Os aços em geral são classificados como ferríticos que incluem aços carbono (C-Mn, etc.), aços de baixa liga (0,5% Mo, 2,25% Cr – 1% Mo), aços de liga intermediária (5-10% Cr) e aços de alta liga (12% Cr Aços Martensíticos e 12-18% Cr Aços Ferríticos). Os aços austeníticos incluem aços 18% Cr – 8% Ni e 25% Cr - 20% Ni, 21% Cr – 32% Ni e Cr – Mn (MASUYAMA, 2001).

A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos materiais utilizados nos componentes submetidos a altas temperaturas em unidades de geração a carvão, de acordo com as condições de vapor de operação.

Tabela 3.3 - Materiais utilizados nos componentes de plantas de combustão de carvão pulverizado, com base nos parâmetros de vapor.

	<b>Temperatura e Pressão do Superaquecedor</b>	<b>Material em componentes de alta temperatura</b>	<b>Eficiência % (base LHV)</b>
Subcrítica	< 540°C e < 22,1 MPa	Aços de baixa liga CMn e Mo ferrítico	< 35
Supercrítica	540-580°C e 22,1-25 MPa	Aços CrMo de baixa liga e aços martensíticos de cromo 9-12%	35-40
Ultra Supercrítica	580-620°C e 22-25 MPa	Aços martensíticos de 9-12% de cromo melhorados e aços austeníticos	40-45
Ultrassupercrítica Avançada	700-725°C e 25-35 MPa	Aços avançados de 10-12% Cr e ligas de níquel	45-52

Fonte: Modificada de IEA (2012).

Na Tabela 3.4 é apresentada uma lista de centrais a carvão supercríticas e ultrassupercríticas em funcionamento, indicando os materiais utilizados para o superaquecedor da caldeira, tubulações de linha de vapor e rotor de turbina.

Materiais nas plantas de geração a carvão são submetidos a tensões mecânicas e térmicas, sendo os estresses mecânicos causados pela pressão e cargas físicas e as térmicas por gradientes de temperatura, ocasionando dois tipos de mecanismo de dano fluência e fadiga (NICOL, 2013). Sendo a fluência um fenômeno que se baseia em um aumento progressivo da deformação instantânea de um elemento estrutural que está sujeito a uma tensão constante (CARVALHO, 2015). E a fadiga como um processo de redução da capacidade de carga dos componentes devido a uma lenta ruptura do material, em função do avanço infinitesimal de uma trinca no decorrer de eventos cíclicos (ROSA, 2002). Uma

combinação complexa nos componentes entre ataque químico, estresse térmico e mecânico levará o material à falha.

Tabela 3.4 - Descrição dos materiais empregados na caldeira, linhas de vapor e turbina de algumas plantas de geração a carvão supercríticas e ultrasupercríticas.

Planta de Energia	Capacidade (MW)	Parâmetros do Vapor		Materiais Caldeira / Linha de Vapor	Materiais da Turbina
		Pressão (MPa)	SH/RH/RH Temperatura (°C)		
Matsuura2	1000	25,0	598/596	18Cr9NiCuNbN / P91	10.3Cr1.5MoVNbN
Haramachi2	1000	25,4	604/604	18Cr9NiCuNbN / P91	10.3Cr1.2Mo0.3WVNbN
Nordjylland3	400	28,4	580/580/580	TP347HFG / P91	10Cr1MoVNbN (501F)
Nanaoota2	700	25,0	593/593	TP347H/ P91	10Cr1MoWVNbN
Misumi1	1000	25,4	604/602	18Cr9NiCuNbN / P91	10.2Cr0.5Mo1.8WVNbN
Lippendorf	934	26,4	554/583	18Cr12NiMo / P91	10Cr1MoWVNbN (501E)
Boxberg	915	26,4	555/578	18Cr12NiMo / P91	10Cr1MoWVNbN (501E)
Tsuruga2	700	25,0	597/597	18Cr9NiCuNbN / P122	10Cr1MoWVNbN
Tachibanawan	1050	25,9	605/613	18Cr9NiCuNbN / P122 / P92	10.2Cr0.5Mo1.8WVNbN
Niederaussen	975	26,0	565/600	TP347HFG / P91	10Cr1MoWVNbN (501E)

Fonte: Modificada de Masuyama (2001).

A tensão admissível é uma boa representação das características de resistência a altas temperaturas dos aços resistentes ao calor, sendo em geral determinada pela resistência à deformação por fluência, em condições reais de operação. É importante avaliar a confiabilidade dos componentes de alta temperatura, analisando a relação de mudanças na resistência à ruptura por fluência por longos períodos de tempo (MASUYAMA, 2001).

Testes de ruptura por fluência são muito empregados em laboratórios de testes para determinação de uma estimativa de tempo para que ocorra o rompimento de um material sob uma carga de tensão fixa e temperatura constante. Estes testes quando tem duração de 10.000 horas, equivalente a 14 meses, são denominados de curto prazo, e testes de longo prazo chegam 100.000 horas, 11 anos e meio. Os resultados dos testes, plotados em uma curva, podem ser extrapolados para previsão de estresse para falhas para períodos mais longos. Nestes testes, materiais de plantas de geração a carvão devem resistir a 100 MPa por 100.000 horas na temperatura exigida, o que leva ao uso de ligas de níquel quando a temperatura exigida é da ordem de 700°C ou maior (NICOL, 2013; ROMANOSKY, 2012). Resultados para um teste de longo prazo de ruptura por fluência, para diferentes materiais, podem ser verificados na Figura 3.14.

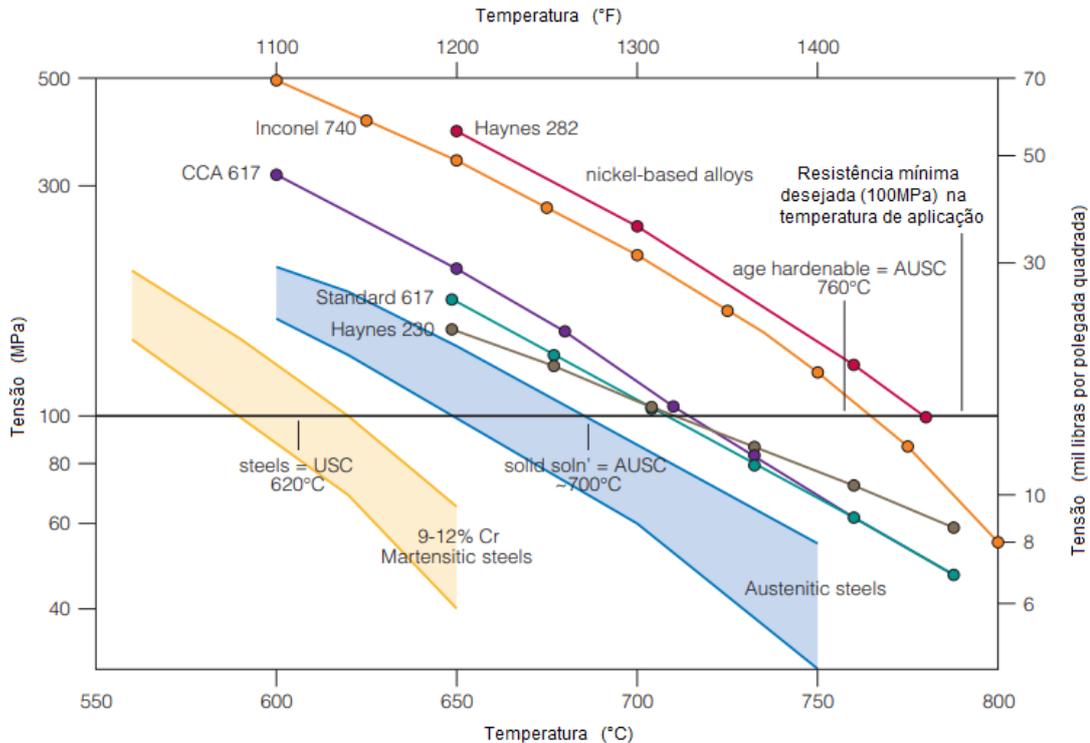


Figura 3.14 - Resultado de um teste de fluência de 100.000 horas.  
Fonte: (ROMANOSKY, 2012).

Em geral materiais cujo custo é maior possuem propriedades que lhes conferem maior resistência a altas temperaturas. Embora aços recentemente desenvolvidos atendam a uma ampla faixa de temperaturas de operação, sabe-se que a medida que a temperatura admitida aumenta o custo do material para atender a tal condição também aumenta. A Figura 3.15 permite visualizar esta relação entre a temperatura permitida e o custo do material, o exemplo apresenta resultados para uma tensão admissível fixa de 49 MPa, e os custos são referentes a materiais para tubos de caldeira (MASUYAMA, 2001).

Os materiais empregados nos componentes de uma planta de geração a carvão são também gradualmente degradados pelo ataque químico, na forma de corrosão pelo fogo, e oxidação pelo vapor, levando a uma redução da resistência do material. Além disso, esses materiais são expostos a tensões mecânicas devido a cargas físicas e/ou gradientes térmicos, que ocasionam a deformação do material. A combinação do ataque químico com o estresse mecânico resulta na falha do material (NICOL, 2013).

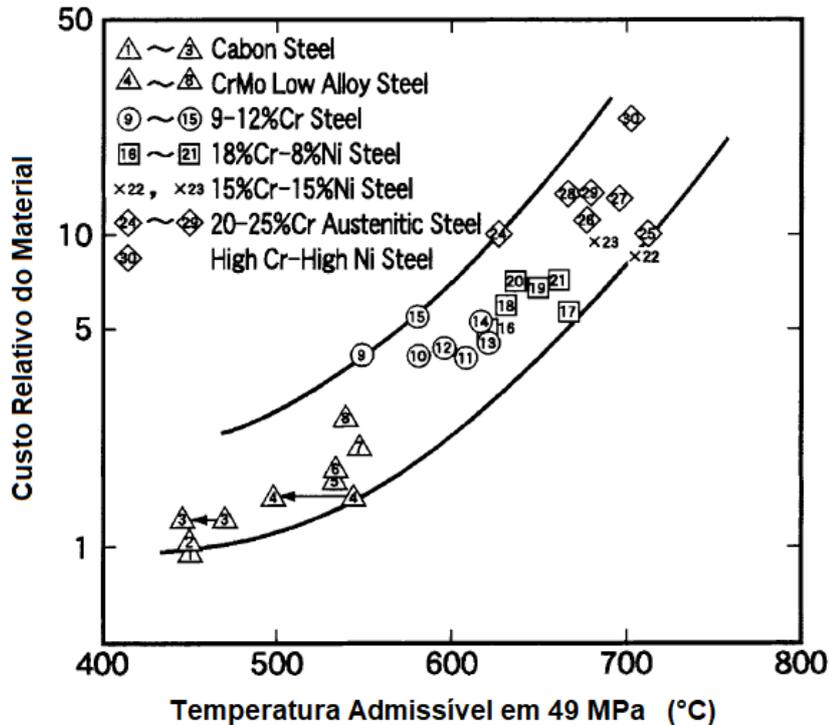


Figura 3.15 - Relação entre a temperatura admissível do metal a 49 MPa de tensão e o custo relativo do material.  
Fonte: (MASUYAMA, 2001).

A oxidação do material pelo vapor, que ocorre principalmente em locais com alta temperatura como tubulações do gerador de vapor, válvulas e na turbina vapor, se desenvolve em três etapas. Inicialmente há grande aumento na incrustação de óxido levando a sobreaquecimento dos materiais, posteriormente devido a esfoliação da camada de óxido a área da seção transversal é reduzida, e finalmente a camada de óxido fragmenta e corrói todo o ciclo do vapor (VISWANATHAN; PURGERT; RAWLS, 2008).

O processo de oxidação do aço pelo vapor ocorre devido ao fato de que a pressão parcial do oxigênio gerado pela dissociação do vapor ( $2H_2O = 2H_2 + O_2$ ) é maior que a pressão do oxigênio produzido pela dissociação de óxidos de ferro e dos óxidos da maioria dos elementos das ligas (VISWANATHAN; SARVER; TANZOSH, 2006).

As incrustações de óxidos se formam em um mecanismo no qual as moléculas de oxigênio, oriundas da dissociação do vapor, se adsorvem na superfície de um óxido presente no aço. Na sequência as moléculas de oxigênio se dissociam, ocorre à ionização dos átomos de oxigênio aos íons de oxigênio, e a adsorção química dos íons de oxigênio. O metal fornece os elétrons necessários ao processo, e os íons de oxigênio adsorvidos são incorporados formando uma nova camada de magnetita com grande concentração de defeitos (Effertz e Meisel, 1971 apud Viswanathan, e Sarver, e Tanzosh, 2006).

De acordo com Fukuda (2011) ao tratar-se de aplicações de alta temperatura a oxidação da tubulação em contato com o vapor consiste em uma questão importante, visto que o aumento significativo pode ocasionar o impedimento da transferência de calor, resultando em sérios aumentos de temperaturas no exterior do tubo, entupimento e bloqueio de tubulação, e até mesmo danos às pás da turbina pela esfoliação por óxido.

À medida que as temperaturas tornam-se mais altas os filmes de óxidos se formam com mais velocidade e tornam-se mais espessos, causando preocupações no sentido de provocar aumento de tensão nas paredes e levar a rupturas por fluência; aumento da temperatura da tubulação devido ao isolamento interno ocasionado pelo filme de óxidos, que leva ao aumento da corrosão e fluência no lado de contato com o gás de combustão; e também o fato de que filmes mais espessos de óxidos se fragmentam com maior facilidade quando a planta é resfriada, e na reinicialização estes fragmentos causar obstruções, ou até mesmo entrar na turbina causando erosão dos componentes (VISWANATHAN; SARVER; TANZOSH, 2006).

A corrosão denominada no inglês “*Fireside Corrosion*” que atinge os materiais da caldeira de centrais a carvão, é também conhecida como corrosão por cinzas de carvão, é entendida como a formação de trissulfatos de ferro alcalino fundido em superfícies dos tubos de superaquecedores e reaquecedores (VISWANATHAN; PURGERT; RAWLS, 2008).

Segundo Viswanathan, Purget e Rawls (2008) estudos indicaram que a resistência a corrosão por cinzas de carvão depende principalmente do teor de cromo das ligas; materiais com 22% ou mais de cromo em sua composição apresentam no geral uma resistência satisfatória à corrosão.

A taxa de corrosão da tubulação do superaquecedor e reaquecedor é afetada pelo teor de  $\text{SO}_2$  (teor de enxofre no carvão) acima de 0,15% em torno dos  $650^\circ\text{C}$ , tal fato indica que para caldeiras operando com temperaturas de ordem de  $700^\circ\text{C}$  usando carvão com alto teor de enxofre a corrosão será um grande problema (FUKUDA, 2011). Um mapa da corrosão típico para o equivalente do aço austenítico 18Cr8Ni (Ka-SUS304J1HTB), evidenciando como o carvão com baixo teor de enxofre utilizado nas unidades japonesas é fundamental para evitar a corrosão da tubulação, pode ser visualizado na Figura 3.16.

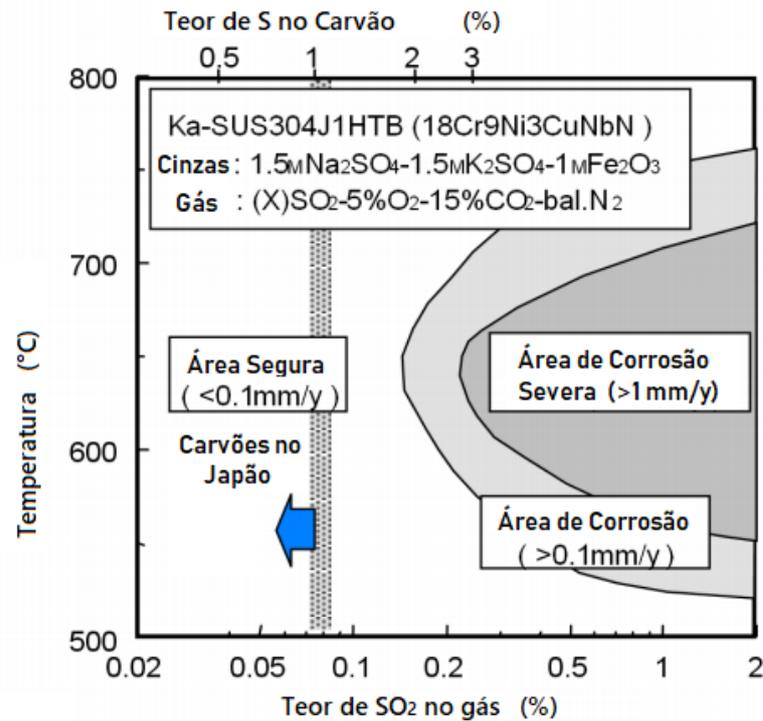


Figura 3.16 - Mapa de corrosão das tubulações do SH/RH para o material Ka-SUS304J1HTB.  
Fonte: (FUKUDA; SHIMIZU, 2006).

Para plantas que queimam carvão com alto teor de enxofre, ligas à base de níquel de alta resistência podem não fornecer resistência suficiente à corrosão, nestes casos é necessário proteger a tubulação com materiais mais resistentes à corrosão, como aplicação de materiais de revestimento de solda (VISWANATHAN; PURGERT; RAWLS, 2008).

Segundo Viswanathan, Purget e Rawls (2008) as paredes de água localizadas na fornalha da caldeira também sofrem com a exposição as chamas, entretanto os depósitos, as condições operacionais e os mecanismos de corrosão são diferentes daqueles que ocorrem nas seções do superaquecedor e reaquadecor. Para as paredes de água entende-se que o processo ativo de corrosão seja a sulfidação resultante de um gás subestequiométrico com  $H_2S$  e depósitos contendo carbono, sulfeto de ferro e cloretos alcalinos, e temperaturas mais elevadas como as encontradas em unidades USC aumentam significativamente as taxas de corrosão em relação a plantas subcríticas.

Com relação a turbina a vapor, os dois principais problemas enfrentados pela metalurgia da turbina vapor são a corrosão e a erosão, estas condições se tornam ainda mais complicadas em altas temperaturas. Turbinas subcríticas continuam a operar com sucesso na região de  $540^{\circ}C$ , a partir do uso de ligas de alto níquel-cromo. O uso de temperaturas mais altas com turbinas supercríticas e ultrassupercríticas, na faixa de  $600 - 620^{\circ}C$  e 29 MPa,

requer metalurgia avançada para as pás rotativas, eixos do rotor, e componentes estacionários (IMIA, 2016).

De acordo com Masuyama (2001) para turbinas de pressão ultrassupercrítica operando em temperaturas acima de 593°C é necessária a utilização de aços mais resistentes por conta da pressão extra centrífuga no rotor, nas pás e em outras partes rotativas, além da pressão interna mais alta no revestimento e outras partes estacionárias. Para os rotores da turbina de baixa pressão as temperaturas de reaquecimento do vapor de mais de 593°C podem causar fragilidade nos aços do tipo 3.5NiCrMoV, que são muito utilizados para esta aplicação; avanços na fabricação de novos tipos de aço já possibilitam utilização de materiais com alta resistência e tenacidade para os rotores de baixa pressão.

Com as unidades ultrassupercríticas bem estabelecidas, estão em andamento atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para atingir temperaturas superiores a 700°C, obtendo uma eficiência tão alta quanto 50%, formalizando o conceito da tecnologia ultrassupercrítica avançada (A-USC). O principal limitante para a plena expansão destas tecnologias atualmente é a necessidade por superligas avançadas, que tem alto custo e ainda apresentam problemas técnicos com materiais de fabricação (ALSTOM, 2014; SANTOIANI, 2015).

Aços de alta temperatura, mais resistentes, que incluem ligas à base de Níquel (Ni) e Ferro-Níquel (Fe-Ni), consiste na principal tecnologia para permitir a operação sob altas tensões a temperaturas cada vez mais altas (FUKUDA, 2011).

Entretanto, problemas são encontrados para operar em temperaturas da ordem de 700°C, uma vez que os aços austeníticos sofrem com significativa deformação em altas temperaturas devido ao alto coeficiente de expansão linear, e as ligas de Ni sofrem severas mudanças na estrutura interna do material durante a fabricação de peças grandes, devido a sensibilidade da micro estrutura à temperatura. Além disso os custos consistem em um problema a ser resolvido, uma vez que ligas de Ni e aços austeníticos são mais caros que aços de alto teor de Cr.

Para que as usinas AUSC atinjam temperaturas da ordem de 700°C é necessário o desenvolvimento de materiais resistentes ao calor, resistentes a corrosão pelas chamas, e à oxidação nas regiões de contato com o vapor (FUKUDA, 2011). Na Figura 3.17 são apresentados os melhores materiais para serem utilizados nos componentes das caldeiras, com base nas pressões e temperaturas de vapor.

	Comercial		USC Avançada		
	24.5MPa 566/566°C	24.5MPa 600/600°C	25MPa 650/650°C	25MPa 700/700°C	35MPa 700/720/720°C
Tubulação Principal de Vapor	2.25 Cr1Mo,9Cr1Mo / 9-12CrW		9-12CrWCo	Ni-based, Ni-Fe-based	
Tubos do superaquecedor e do reauecedor	2.25 Cr1Mo Austenitic	New Austenitic		Ni-based, Ni-Fe-based	
Parede d'água	0.5Cr0.5Mo,1Cr0.5Mo			2.25Cr1Mo,9Cr1 Mo	

Figura 3.17 - Materiais utilizados na caldeira para determinadas condições de vapor.  
Fonte: (FUKUDA, 2011).

Ao tratar-se da tecnologia ultrasupercrítica avançada (AUSC) há que se notar que ao tratar-se de uma temperatura máxima (TMAX) de 700°C, os materiais de alguns componentes, como o superaquecedor, atingirão 740°C, com temperaturas do gás de combustão próximas a 770°C. O custo elevado das ligas de níquel induz buscas para minimizar seu uso sempre que possível, ou seja, utilizando-o apenas em componentes sujeitos maiores temperaturas na caldeira e turbina vapor (NICOL, 2013).

## **CAPÍTULO 4**

### **PANORAMA DOS PARQUES TÉRMICOS A CARVÃO NOS PRINCIPAIS MERCADOS E DO USO DAS TECNOLOGIAS DE ALTA EFICIÊNCIA E BAIXAS EMISSÕES**

O carvão desempenha um papel muito importante na matriz energética mundial, porém a eficiência média das unidades de geração de energia a carvão nos principais países que o utilizam varia significativamente, de menos de 30% para mais de 47% (base PCI). Tal fato decorre de muitos fatores, incluindo, a idade das plantas em operação, as condições do vapor no ciclo, condições climáticas locais, qualidade do carvão utilizado, práticas de operação e manutenção, e a acessibilidade para inserção de tecnologias avançadas (IEA, 2016).

Um fato relevante na compreensão do cenário de expansão das tecnologias visando tornar a queima do carvão mais eficiente e limpa é que ele é o combustível fóssil mais abundante, com reservas comprovadas que totalizam cerca de 1 trilhão de toneladas, suficiente para atender por mais 150 anos o consumo atual (ANDRULEIT et al., 2013). Outro aspecto importante refere-se ao fato das reservas de carvão serem encontradas em mais de 75 países e ter baixo custo de produção, fato que justifica a importância do carvão na matriz energética global por muitas décadas (WORLD ENERGY COUNCIL, 2010). Estes fatores de mercado são de essencial importância já que existe uma preocupação prioritária no setor energético que consiste em minimizar o risco de interrupções nos estoques de energia, sejam

causadas por acidentes, intervenções políticas, terrorismo ou conflitos de mercado. Neste aspecto o carvão mineral apresenta um papel de extrema importância, visto que seu mercado global é grande e bem diversificado com muitos produtores e consumidores diferentes de todos os continentes (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

Os diferentes países e regiões possuem diferentes situações econômicas, e necessidades em relação à geração e consumo de energia, bem como diferentes barreiras para a implementação de tecnologias, e desta forma verifica-se que há uma ampla diferença no parque térmico a carvão de diferentes países (WIATROS-MOTYKA, 2016).

Os países em desenvolvimento estão satisfazendo suas demandas crescentes por energia através do uso de carvão barato e desta maneira sustentam seu crescimento econômico. Diversos países da África e Ásia vêm investindo de forma significativa em infraestrutura de geração de eletricidade a carvão, entretanto têm buscado prover a infraestrutura com tecnologia de carvão limpo (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

Outro aspecto relevante refere-se ao fato de que o acesso à eletricidade não se encontra universalizado em diversas regiões do mundo. Na Índia, por exemplo, cerca de 240 milhões de pessoas não tem acesso a energia elétrica, neste sentido é um desafio para as próximas décadas promover o aumento de capacidade instalada de geração de eletricidade, mas garantindo que seja acessível em termos de custos. Neste cenário o carvão e o gás natural estarão em foco na concorrência pela geração de carga de base principalmente em toda a Ásia (BARUYA, 2016). Desta forma, para atender a demanda de eletricidade, em curto prazo será necessário elevar drasticamente a eficiência média do parque global a carvão, principalmente no sentido de reduzir a geração de plantas de baixa eficiência e aumentar a geração por plantas que empregam tecnologias de Alta Eficiência e Baixas Emissões (*High Efficiency Low Emissions – HELE*) (IEA, 2012).

Regulamentações cada vez mais rigorosas, principalmente em relação às emissões de CO<sub>2</sub>, tem aumentado cada vez mais a busca por melhorias nas plantas que permitam o ganho de alguns pontos percentuais de eficiência (BURNARD; BHATTACHARYA, 2011). As condições de vapor do ciclo consistem em um fator que exerce o principal impacto na performance da planta, e isto se traduz em diferenças nos níveis de CO<sub>2</sub> e outros poluentes que são emitidos por kWh de eletricidade gerada. Desta forma, como os países estão tornando mais rigorosos os seus padrões de emissão, bem como se comprometendo a reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub> seguindo os acordos estabelecidos nas conferências das Nações Unidas

sobre mudanças climáticas, a busca por estabelecer um parque térmico a carvão de alta eficiência está em pleno desenvolvimento (WIATROS-MOTYKA, 2016).

O Acordo de Paris propôs e formalizou metas ambiciosas, além das expectativas na época, com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo de 2°C, com uma meta de 1,5°C. Estabeleceu também medidas para garantir que os países possam se adaptar às mudanças climáticas, promovendo resiliência climática. A proposta é que o pico de emissões globais de gases de efeito estufa seja atingido o mais breve possível, e ainda reconhece a maior dificuldade dos países em desenvolvimento em alcançar este objetivo. Para atingir a meta de manter o aquecimento global abaixo de 2°C é fundamental investimentos volumosos na implantação de infraestrutura de tecnologias de baixa emissão (ROJAS, 2016).

Para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> por meio do incremento de eficiência, pode-se caminhar por diferentes caminhos como: a atualização de unidades existentes para melhoria de sua eficiência térmica (*Retrofit*); garantir que novas unidades maiores possuam maiores eficiências térmicas; promover o fechamento de unidades antigas e menos eficientes. Ao considerar medidas para melhoria da eficiência energética é preciso considerar as diferentes possibilidades existentes entre o que pode ser feito quando se projeta uma nova planta de geração a carvão e para o caso de uma planta existente que será alvo de melhorias e atualização tecnológica (BURNARD et al., 2014).

A atualização de plantas existentes e a construção de novas usinas de alta eficiência e de baixas emissões (HELE) abordam preocupações com mudanças climáticas de duas maneiras importantes. Em curto prazo proceder com a atualização de plantas existentes de baixa eficiência adequando-as com tecnologias HELE e adicionar a nova capacidade prevista em plantas de alta eficiência, permitem reduzir quase 20% das emissões de CO<sub>2</sub>, e a longo prazo as plantas de alta eficiência e baixas emissões são as opções mais apropriadas para uma futura adaptação da tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture Storage – CCS*). O impacto que a utilização das tecnologias HELE exerce sobre o fator de emissão de CO<sub>2</sub>, e adicionalmente um cenário com a presença da tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono é possível ser observado na Figura 4.1 (BARNES, 2014).

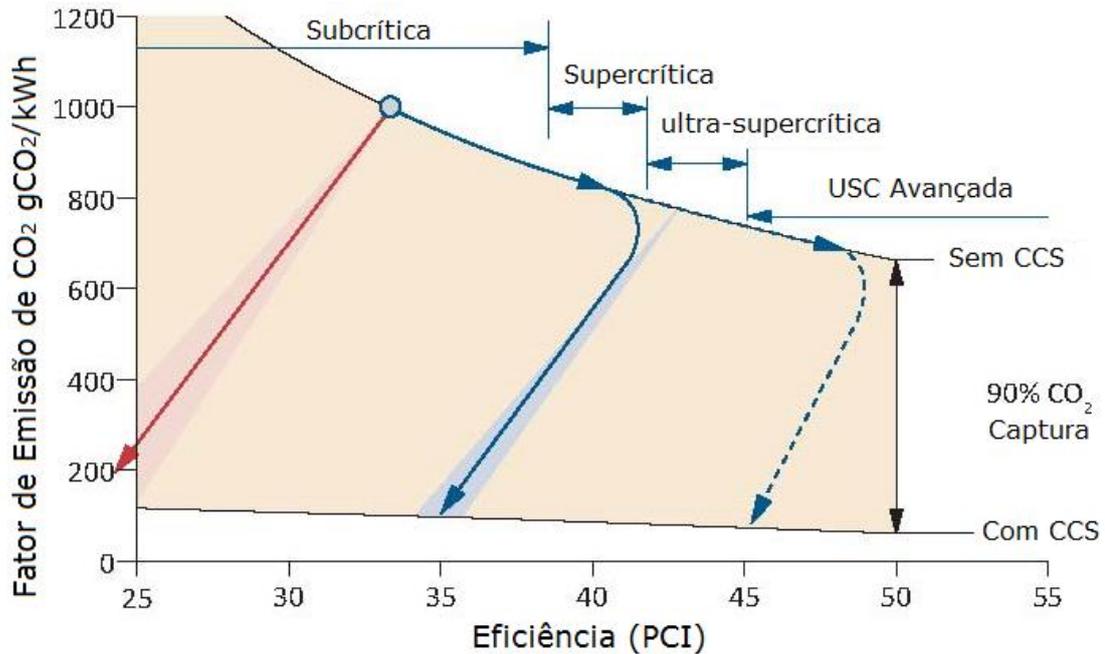


Figura 4.1 - Redução das emissões de CO<sub>2</sub> na geração de energia a carvão com base na utilização de tecnologias de convencionais e de alta eficiência.

Fonte: (BARNES, 2014).

De acordo com a IEA (2012) atualmente encontra-se em operação um grande número de plantas de baixa eficiência, sendo que mais da metade de toda a capacidade instalada tem mais de 25 anos de operação e possuem tamanho relativamente pequeno (menos de 300 MW). Vários países estabeleceram como uma das prioridades a melhoria de eficiência de seus parques térmicos a carvão. O Japão e a Coreia do Sul que passaram a instalar centrais com tecnologia supercrítica antes de 2000 hoje possuem parques a carvão de alto desempenho, com eficiências médias superiores a 40% (base PCI). Outros países como China e Índia tem caminhado no sentido de promover um incremento de eficiência para seu parque térmico a carvão através do aumento da participação de unidades supercríticas (SC) e ultrassupercríticas (USC). A parcela de unidades supercríticas e ultrassupercríticas na capacidade instalada a carvão nos principais países do mundo que possuem ampla utilização do carvão para geração de eletricidade pode ser visualizada na Figura 4.2.

China e Índia como as principais economias emergentes e que possuem matriz energética extremamente dependente do carvão mineral serão palco dos principais investimentos no setor, buscando uma transição para uma matriz de baixo carbono sem a necessidade de abandonar o uso do carvão como recurso energético, além destes os Estados Unidos exerce papel importante na dinâmica do mercado das novas tecnologias, pois possui um dos maiores parques globais a carvão e tem mostrado opção pelo gás natural, mas

oportunidades de mercado podem leva-lo a optar pela retomada na ampliação de sua capacidade instalada a carvão.

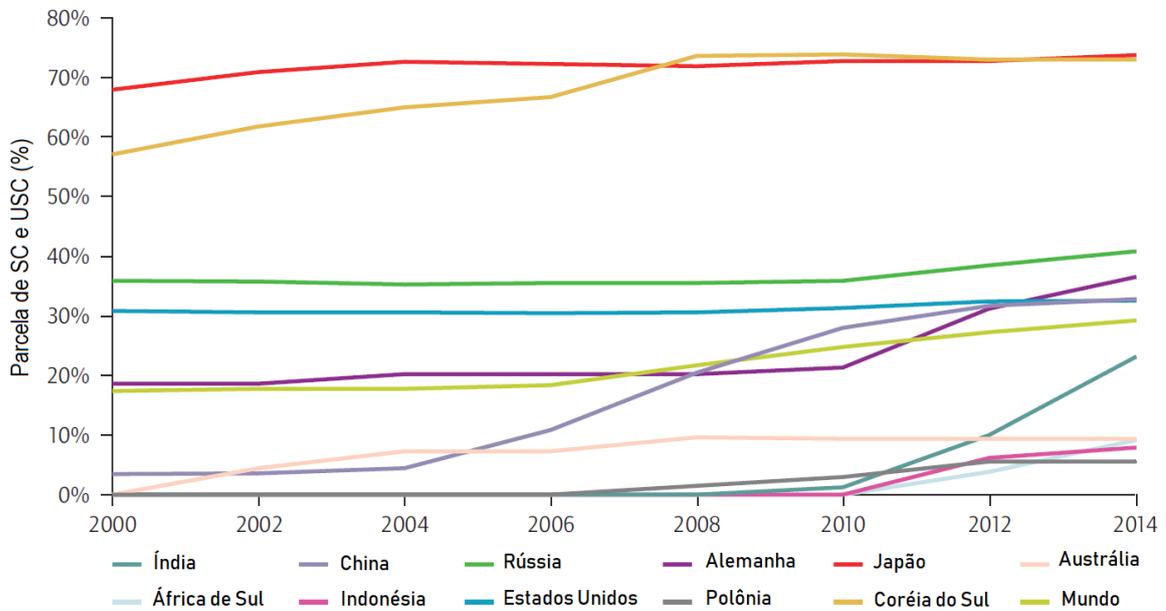


Figura 4.2 - Parcela de unidades supercríticas e ultracríticas na capacidade instalada dos principais países no cenário da utilização do carvão mineral para geração de eletricidade.

Fonte: (IEA, 2012).

Na China as reservas de combustíveis fósseis são principalmente de carvão, as reservas estimadas no ano de 2013 eram de 236 bilhões de toneladas. Como resultado tem-se que o carvão é o combustível predominante na geração de energia na China, sendo ela o maior produtor, consumidor e importador de carvão no mundo. Como resultado do alto consumo de carvão, a China é também o principal emissor de CO<sub>2</sub>, sendo o carvão responsável por mais de 60% das emissões totais do país. Desta forma a China se estabelece como um dos principais atores no esforço internacional para combate às mudanças climáticas (ZHU, 2016).

A China no ano de 2016 apresentava uma capacidade instalada total de plantas de carvão em torno de 900 GW, o que representa quase metade da capacidade global instalada, caracterizando a China como detentora do maior parque térmico a carvão do mundo. Além disso, de 150 a 200 GW de novas plantas a carvão estavam relatados como em construção (IEA, 2016).

Em torno de 87% de todo o parque térmico a carvão da China foi construído a partir do ano 2000, sendo que desde 2010 mais plantas ultracríticas tem sido construídas em relação a supercríticas ou subcríticas. Para o ano de 2016 51% das unidades eram subcríticas, 29% supercríticas e 20% ultracríticas (WIATROS-MOTYKA, 2016). A capacidade

instalada de usinas a carvão na China por tipo de tecnologia empregada e por idade das plantas pode ser vista na Figura 4.3.

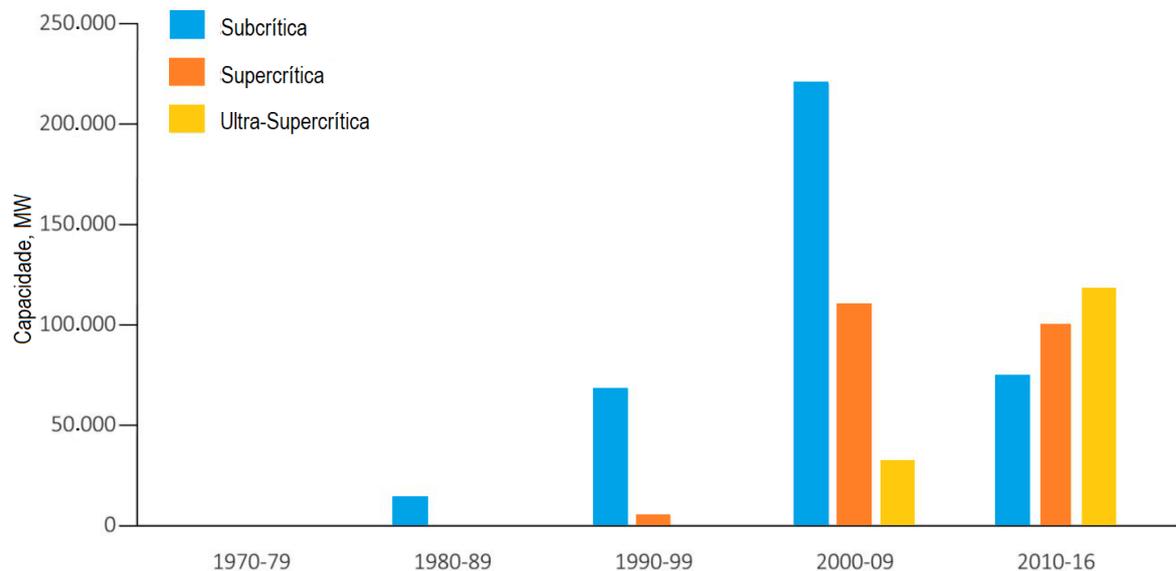


Figura 4.3 - Perfil do parque térmico a carvão da China, por tecnologia e por idade das unidades.  
Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

Durante as décadas de 1980 e 1990 houve na China a construção de muitas pequenas usinas térmicas convencionais, sendo a maior parte delas muito ineficientes e desprovidas de quaisquer dispositivos de controle de poluentes. Ao identificar as pequenas unidades térmicas de geração de energia como as mais ineficientes e poluentes no setor de energia a China passou a tomar medidas para fechar estas unidades no final dos anos 1990 (ZHU, 2016).

A China vem fazendo grandes esforços para promover o desenvolvimento sustentável, ecológico e de baixo carbono através do aprimoramento de políticas e ações, a nível nacional e regional, que estão relacionadas ao desenvolvimento energético, conservação de energia, melhoria de eficiência, controle de emissões e inserção de tecnologias. Atualmente o “Plano de Ação para Atualização e Reconstrução de Usinas de Energia a Carvão para Conservação de Energia e Redução de Emissões (2014-2020)” exige o fechamento das seguintes unidades: convencionais de 100 MWe ou menores; unidades de 200 MWe ou menores que tenham atingido vida útil projetada; e unidades que não estão adequadas aos padrões de emissão. Com estas ações a capacidade total a ser encerrada até 2020 chega a 10 GWe (ZHU, 2016).

Adicionalmente a estas ações de fechamento de unidades convencionais de baixa capacidade instalada, o governo tem estimulado o aumento do número de unidades de 600 MW ou maiores. No ano de 2014 haviam 561 unidades nesta faixa de tamanho, das quais 71 eram plantas ultrassupercríticas de 1000 MW. Este cenário de alterações no parque térmico

chinês resulta de políticas governamentais de controle de poluição e de eficiência energética (LI; YU, 2016).

A estrutura da geração de carvão na China, mostrando como as grandes unidades, maiores que 300 MW, passaram a prevalecer em relação às unidades menores, conforme era o desejo do governo chinês, pode ser verificada na Figura 4.4.

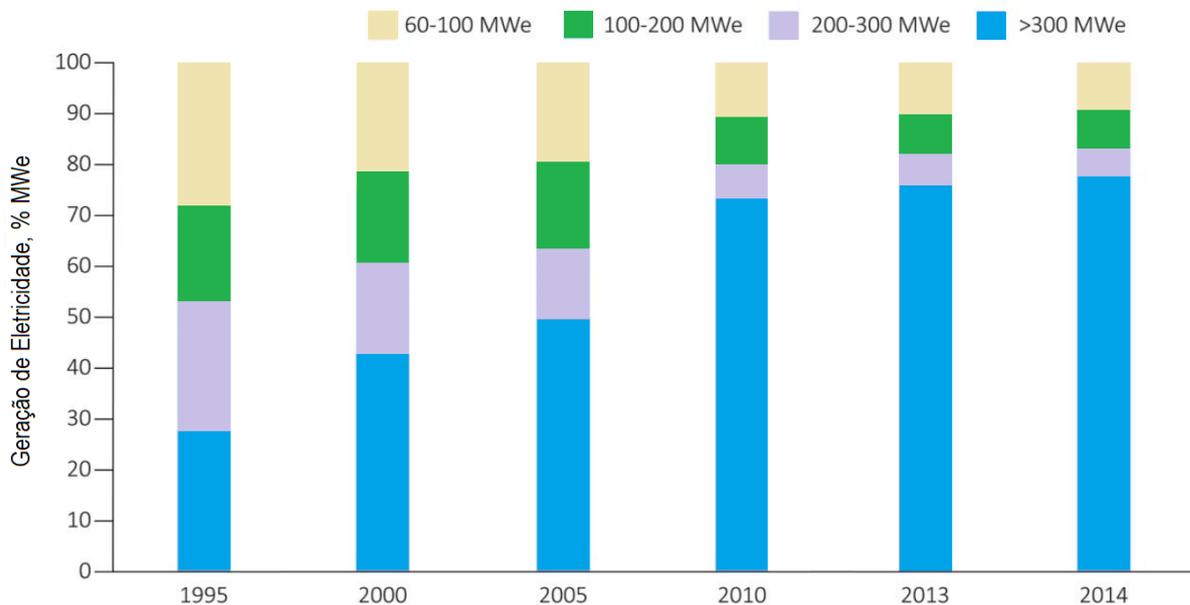


Figura 4.4 - Mudanças na estrutura da geração a carvão na China, em relação ao tamanho das unidades de geração.

Fonte: (CEC, 2015).

Nos dias atuais as maiores unidades chinesas possuem capacidade de 1000 MW, entretanto é importante que se observe a necessidade de integrar unidades de diferentes tamanhos ao seu parque, no intuito de auxiliar na estabilidade da rede. A suspensão inesperada de uma unidade de grande porte pode ocasionar um efeito significativo no sistema, dependendo do porte da rede em que está conectada (BURNARD et al., 2014).

A média nacional da taxa de consumo de carvão em 2015 era de 315 g/kWh, conforme pode ser verificado na Figura 4.5, valor este que atende a meta estabelecida com uma margem de 55 g/kWh, tal fato é resultado do aumento significativo da eficiência média das plantas térmicas a carvão chinesas, que passaram de 26,1% em 1978 para 36,9% em 2010 e 38,6% em 2014 (WANG, 2015).

Desta forma, devido a uma continua melhoria na estrutura do parque térmico a carvão, a implantação de tecnologias HELE, e o desenvolvimento e aplicação de energia renovável, a intensidade de carbono da geração de energia diminui na China ao longo dos anos. Estima-se um total de 6 bilhões de toneladas de emissões evitadas entre 2006 e 2014. Em 2014 a

emissão resultante da geração de uma unidade de eletricidade foi 19% inferior à de 2005 (CEC, 2015).

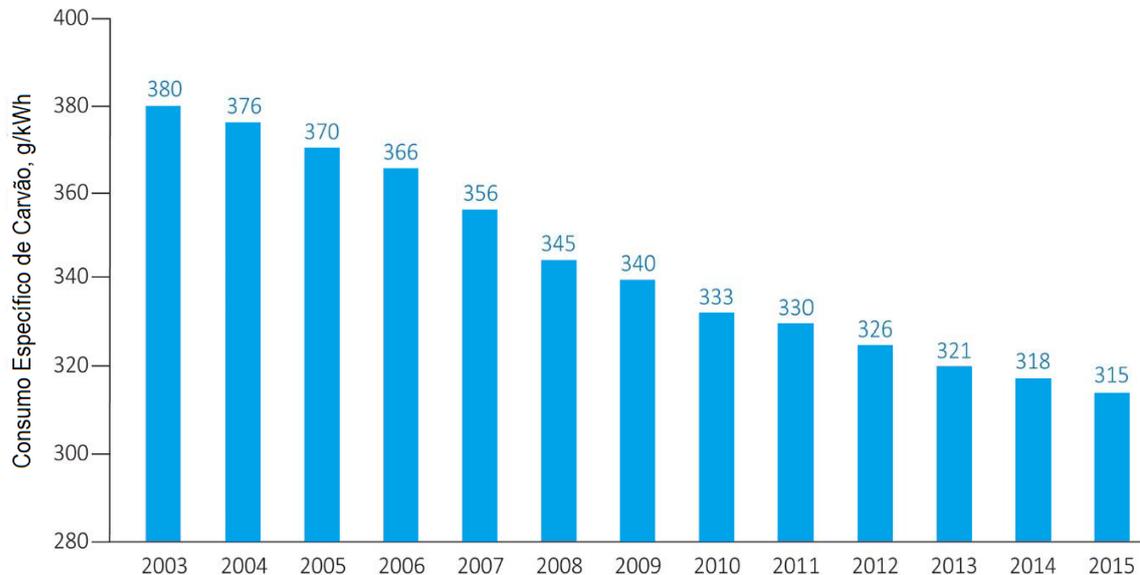


Figura 4.5 - Média nacional de consumo de carvão na geração de eletricidade.

Fonte: (CEC, 2015).

Neste cenário a China tem se mostrado muito ativa nas ações de melhoria da eficiência e do desempenho ambiental de suas plantas de geração a carvão, promovendo a construção de unidades de alta eficiência e atualização de unidades existentes (BURNARD et al., 2014). Localizam-se na China algumas das mais limpas e eficientes plantas a carvão do mundo, como por exemplo, duas unidades USC da planta de Anqing com capacidade de 1000 MW. Ambas as unidades são equipadas de uma série de tecnologias que possibilitam que a planta atinja uma eficiência global superior a 45% (LHV) bem como taxas de consumo de combustível em torno de 273 g/kWh. Tecnologias adicionais utilizadas que possibilitam este ganho de eficiência e redução de consumo de combustível são: nove estágios de extração de vapor, recuperação de calor dos gases de exaustão, e melhorias no projeto da torre de resfriamento (ZHU, 2016).

Uma das maiores empresas de fornecimento de energia da China, a empresa Shenhua, realizou uma ampla renovação de suas usinas a carvão existentes no intuito de promover uma adequação tecnológica que permitiu reduzir as emissões atendendo a padrões bem restritivos. Além disso, unidades recém-construídas já são baseadas no modelo de alta eficiência e baixa emissão. A unidade supercrítica de Guohua Zhoushan é outro exemplo de unidade de geração a carvão que opera com emissões muito inferiores aos limites estabelecidos pelo Ministério de Proteção Ambiental da China, e que de acordo com a empresa proprietária os custos de

investimento são apenas 6% superiores ao investimento para instalação de unidades convencionais (WEN, 2015).

Desta forma, a China já estabeleceu como prioritário promover o incremento de eficiência de seu parque a carvão, entendendo como solução mais viável e eficaz para suprir o crescimento da demanda de energia na China, possibilitando ainda minimizar o custo ambiental da geração de energia (CHINA ENERGY FUND COMMITTEE - CEFC, 2014). Sendo assim, o que se tem observado é uma ampla prevalência de unidades de grande porte e de alta eficiência dentre as unidades previstas e em construção.

Na Tabela 4.1 são apresentados dados de março de 2016 que indicam que havia 184 unidades em construção, que totalizam uma capacidade de 112180 MW, sendo 67% ultrassupercríticas e 26% supercríticas.

Tabela 4.1 - Plantas de geração a carvão em construção na China (Unidades > 300 MW).

<b>Tecnologia</b>	<b>Número de Unidades</b>	<b>Capacidade (MW)</b>	<b>Faixa de Tamanho da Unidade (MW)</b>	<b>Plantas em Construção (%)</b>
Subcrítica	21	7410	300-600	7
Supercrítica	68	28640	350-660	26
Ultrassupercrítica	93	75530	600-1100	67
Total	184	112180	-	100

Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

Outro expoente no que se refere à intensiva busca pela melhoria da eficiência e redução de emissões de seu parque térmico a carvão é a Índia, o país possui um dos maiores parques térmico a carvão, e tem verificado um aumento de capacidade considerável nos últimos anos, de 2011 a 2015 houve um incremento de capacidade de 100 GW para 165 GW. Observa-se um crescimento contínuo da demanda de energia no país e, portanto, embora inúmeros projetos renováveis estejam sendo instalados, será necessária uma ampliação significativa na geração de energia a partir do carvão. Neste cenário, a estratégia nacional para um crescimento de baixo carbono envolve a renovação e modernização de unidades antigas e fechamento das pequenas, antigas e menos eficientes (HENDERSON, 2015).

Neste sentido a Índia representa o quarto maior emissor de GEE do mundo, atrás apenas de China, Estados Unidos e União Europeia, e, portanto tem sido um dos focos principais da comunidade internacional no sentido de limitar as emissões de gases de efeito estufa. A geração de energia contribui com a maior parcela das emissões, e sendo assim, esforços no setor de energia são cruciais para mitigação das emissões na Índia. Entretanto

existe um conflito entre os esforços para mitigar as emissões do setor de energia, e o desafio de fornecimento universal de energia no país, uma vez que cerca de 30% dos indianos não tem acesso à eletricidade, e boa parte daqueles que tem acesso usufrui por apenas algumas horas ao dia (SHIDORE, 2015).

O governo acena com políticas voltadas a atender a crescente necessidade de eletricidade, e neste cenário o foco é desenvolvimento de usinas de energia a carvão de grande porte, e de acordo com o chefe do Conselho de Energia, Meio Ambiente, e Água da Índia, mesmo que ações para reduzir o uso do carvão sejam promovidas ele continuará como o centro da matriz de energia futura da Índia (CRABTREE, 2015; MCHUGH, 2016).

O parque térmico a carvão da Índia possui uma eficiência térmica inferior à média dos países que compõe a OCDE, sendo de 26-28%, calculada com base no PCI do combustível (HENDERSON, 2015). A eficiência média do parque de geração fóssil indiano dividido de acordo com o combustível utilizado, em comparação com outros países pode ser verificada na Figura 4.6 permitindo observar claramente como o parque térmico a carvão indiano se encontra muito aquém dos demais no quesito eficiência.

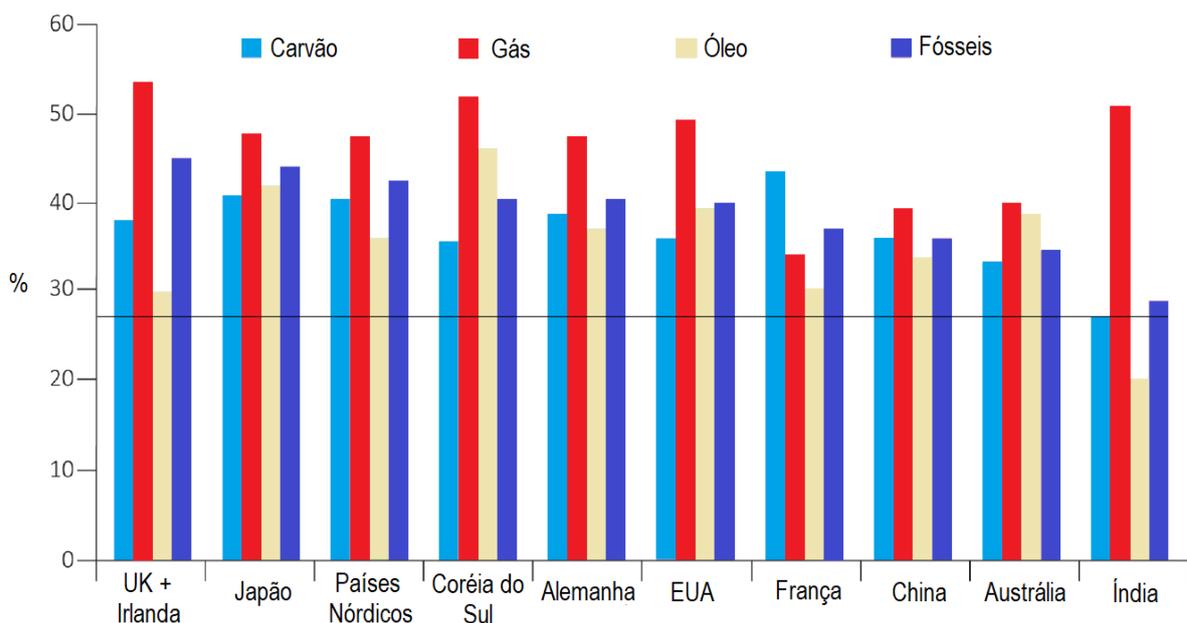


Figura 4.6 - Comparativo de eficiência média para os parques de geração fóssil de alguns países.  
Fonte: (HUSSY et al., 2014).

Diversos fatores explicam a baixa eficiência média do parque a carvão da Índia dentre eles:

- Boa parte do carvão indiano é betuminoso, com elevado teor de cinzas que dificilmente é possível ser reduzido para valores abaixo de 30%. As características do carvão indiano induzem a necessidade de maior consumo de energia para moagem do

combustível antes da combustão, devido a grande presença de cinza silicácea, tal fato explica o alto consumo de energia auxiliar nas usinas indianas quando comparadas com unidades de outros países (HENDERSON, 2015).

- Uma análise do parque térmico a carvão da Índia permite verificar que a maior parte das plantas existentes é subcrítica, sendo as plantas supercríticas introduzidas recentemente (BARNES, 2014).
- Outro aspecto importante é que as plantas de geração de energia na Índia operam no chamado “despacho de ordem de mérito” (*MOD – Merit Order Dispatch*), significando que as plantas que produzem energia a um menor custo tem prioridade no fornecimento à matriz. Desta forma, plantas mais antigas e menos eficientes que queimam carvão mais barato, desprovidas de equipamentos de controle de poluição e, portanto, conseguem gerar energia de maneira muito menos onerosa, consequentemente tendem a se manter fornecendo energia na base da matriz (BHUSHAN et al., 2015).
- Baixa utilização, indicada pelo Fator de Capacidade dessas plantas (Plant Load Factor – PLF). A operação em carga parcial e ação de ligar e desligar a unidade reduzem a eficiência, além de aumentar a necessidade de manutenção. Na Índia uma série de fatores acarretam a operação em carga parcial e a necessidade de ligar e desligar a unidade frequentemente, tais como, conexões de rede de distribuição inadequadas e falha no fornecimento de carvão (HENDERSON, 2015).
- Regulamentação de poluição para o setor e energia a carvão extremamente leniente, quando comparada às normas de países como China, EUA e da União Européia (KANCHAN; KUMARANKANDATH, 2015).

A estimativa é que se até 2030 metade das unidades indianas estiverem operando baseadas em tecnologias HELE um total de 400 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> podem ser evitadas (SHIDORE, 2015). O perfil do parque térmico a carvão indiano, detalhado por tecnologia empregada e período de comissionamento é apresentado na Figura 4.7.

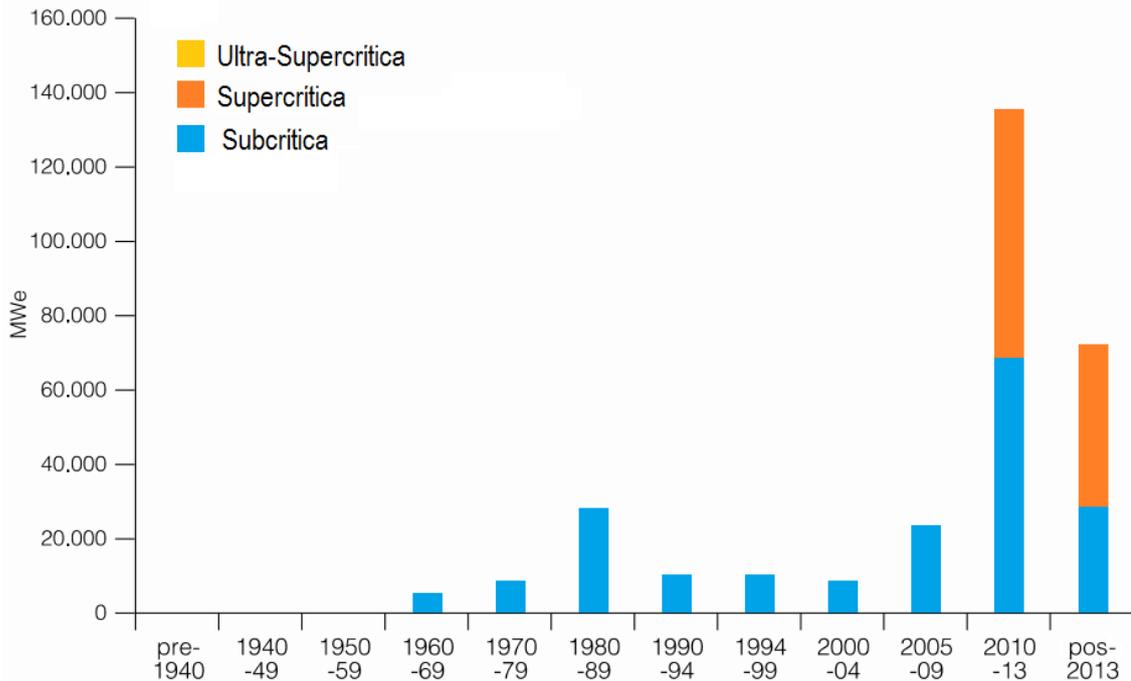


Figura 4.7 - Perfil do parque térmico a carvão indiano, quanto à tecnologia utilizada e ano de comissionamento das unidades.

Fonte: (BARNES, 2014).

A execução dos programas de modernização do parque, pela inserção de supercríticas, deve aumentar gradualmente a eficiência do parque a carvão, entretanto a melhoria das condições das plantas subcríticas existentes continua sendo fundamental. Unidades antigas e de pequena capacidade instalada não tem sistemas reaquecimento de vapor, e mesmo as que apresentam tal condição possuem parâmetros de vapor bastante modestos, limitando a eficiência alcançável (HENDERSON, 2015).

Das plantas em construção estima-se em torno de 48 GW em supercríticas e ultrasupercríticas (CEA, 2015). A implantação de sistemas supercríticos na Índia é lenta devido a desafios relacionados à queima de carvão indiano, com alto teor de cinza e baixo poder calorífico (India Energy, 2015).

Apesar da crescente inserção de unidades de alta eficiência, foram identificados que fatores de mercado contribuem para que novas plantas, com condições tecnológicas de alta eficiência, não atinjam seu potencial máximo de rendimento, uma vez que operam boa parte do tempo em carga inferior à base, acarretando maiores custos operacionais e uma maior quantidade de emissões (SLOSS, 2015).

Ainda existem poucas plantas SC instaladas na Índia, entretanto encontram-se subutilizadas, e o modelo indiano de despacho de energia (*MOD – Merit Order Dispatch*) é o principal responsável por isso. Plantas como *Coastal Gujarat Power Limited* e *Adani Power*,

ambas localizadas em Mundra, são equipadas com tecnologia supercrítica mas operam em apenas 70% do fator de carga da planta (*PLF – Plant Load Factor*). Nos últimos anos tem-se verificado um declínio do PLF do setor, dados de julho de 2015 apontavam para apenas 59% (KANCHAN; KUMARANKANDATH, 2015).

Verifica-se um grande número de plantas que operam em carga parcial de 60%-70%, e desta forma a aplicação de uma política que possibilite melhoria na utilização da capacidade das plantas pode possibilitar que parte dos requisitos adicionais de energia sejam atendidos sem a necessidade de construção de novas plantas (CENTRE FOR SCIENCE AND ENVIRONMENT, 2015).

A perda de geração devido a interrupções forçadas nas unidades de geração térmica chegou a 11,46% no período de 2011-2012, superando o período de 2009-2010 em que essa perda foi de 10,32%, sendo o problema com abastecimento de carvão a principal causa deste aumento da perda de geração. Com o passar dos anos é inevitável que a degradação ocorra em diversos equipamentos da unidade, e isto implica em perda de eficiência (CHANDA; MUKHOPADHYAY, 2016).

Na Índia em torno de 50% das plantas a carvão têm desvio de eficiência de mais de 10% em relação ao projeto. Os principais motivos que explicam esse desvio incluem idade, operação e manutenção (O & M) inadequada e irregular. Mesmo plantas novas apresentam alto desvio de eficiência, que podem chegar a mais de 20% (KANCHAN; KUMARANKANDATH, 2015).

O ideal é que se coordene para que os investimentos no setor de carvão na Índia sejam realizados de forma a priorizar plantas mais limpas e eficientes, sendo encorajados a investir em carvão limpo em vez de se recusarem a investir em novos projetos a carvão independente do sistema a ser utilizado. O movimento de paralisar a concessão de novos financiamentos para carvão tende a levar países como a Índia, que tem intenção de construir novas plantas a carvão, a investir na construção de projetos mais baratos que por sua vez englobam sistemas menos eficientes, levando o setor a um retrocesso (SLOSS, 2015).

Recentemente o Banco Mundial cessou qualquer tipo de financiamento para projetos relacionados ao carvão na Índia, com objetivo de reduzir a construção de novas unidades a carvão e induzindo a promoção de uma matriz de baixo carbono. Entretanto o resultado desta política de financiamento pode ter efeito contrário, levando à construção de mais plantas subcríticas, que por sua vez tem construção mais barata e são menos eficientes. No sentido

contrário ao Banco Mundial, o Japão se propôs a investir US\$ 1 bilhão em plantas a carvão em alguns locais da Ásia, que inclui a Índia, o objetivo japonês é que através do financiamento, mais unidades de alta eficiência sejam construídas, sendo esta a medida mais efetiva para lidar com a questão da mudança climática (ALJAZEERA, 2015).

O Estados Unidos também corresponde a um importante agente no cenário da geração térmica a carvão, de acordo com EIA (2016a) no ano de 2015 a geração de eletricidade atingiu 4 trilhões de kWh nos Estados Unidos, dos quais 67% vieram de combustíveis fósseis, com uma participação de 33% de carvão.

Apesar de que estima-se uma retirada de capacidade de geração a carvão entre 24-28% entre os anos de 2015 e 2030, correspondendo a pouco mais de 70 GW. E apesar de não haver previsão de adição de capacidade instalada, é possível que em longo prazo algumas das plantas mais antigas sejam substituídas por novas e mais eficientes (EIA, 2016b).

Desde 2008 a geração de energia com base no carvão tem diminuído nos EUA, devido à combinação de fatores que incluem regulações ambientais, baixo custo do gás natural, e incentivos estaduais para maior uso de energias renováveis. Inúmeros proprietários de usinas de energia a carvão anunciaram que pretendem fechar uma parcela da atual capacidade em decorrência de uma série de regulamentações ambientais adotadas recentemente. Uma regulamentação adicional, que inclui normas para limitar emissões de GEE estão ainda pendentes, e sua aprovação pode limitar ainda mais a geração a carvão nos EUA (CARTER, 2014).

É esperada uma redução ainda maior no consumo de carvão pelo setor de energia dos EUA, no entanto a previsão é que no futuro o carvão ainda tenha participação significativa em sua matriz energética, com cerca de 21% em 2030 e 18% em 2040. Entretanto muitas incertezas podem influenciar no futuro do carvão nos EUA, como o ritmo de transição para uma economia de baixo carbono, assim como o potencial do gás de xisto e petróleo (BRITISH PETROLEUM, 2016).

O parque térmico a carvão dos EUA é dominado por antigas unidades subcríticas e por unidades supercríticas que foram as pioneiras na instalação da tecnologia, neste cenário a média de eficiência do parque a carvão é de 37,4% (base PCI). De acordo com a base de dados da agência Platts do ano de 2016, existem 402 unidades com capacidade de 300 MW ou maior. As unidades subcríticas representam em torno de 64% de todo o parque, destas 90% foi construído antes de 1990. Há ainda 117 unidades supercríticas com uma capacidade total

de 90272 MW e somente uma unidade ultrassupercrítica de 665 MW (WIATROS-MOTYKA, 2016). A Figura 4.8 permite verificar a capacidade instalada de usinas a carvão nos EUA por tipo de tecnologia empregada e por idade das plantas.

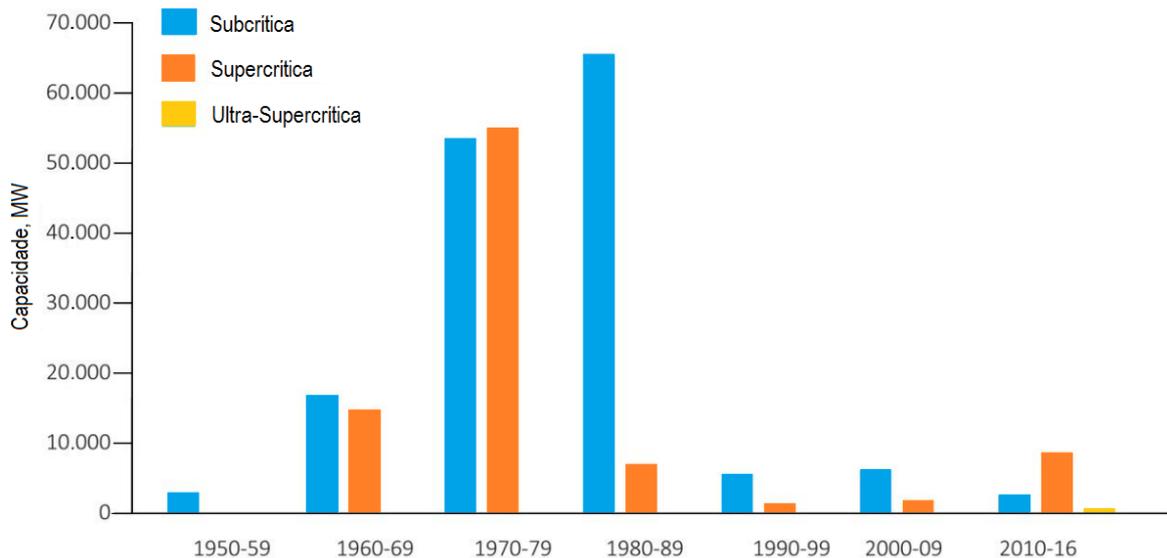


Figura 4.8 - Perfil do parque térmico a carvão dos EUA, por tecnologia e por idade das unidades.  
Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

Atualmente não há plantas de geração de energia a carvão sendo construídas ou com planejamento de construção nos EUA e é improvável que qualquer capacidade de carvão seja adicionada em um futuro próximo. O notável desinteresse dos EUA para com a ampliação da utilização do carvão mineral é devido a muitos fatores como o baixo preço do gás natural, e a créditos para geração de energias renováveis como solar e eólica (WIATROS-MOTYKA, 2016).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (US Department of Energy's – DOE) juntamente a Agência de Desenvolvimento do Carvão de Ohio investe em um programa de materiais para a geração ultrassupercrítica avançada. O programa que teve início em 2000 objetiva identificar, avaliar e quantificar os materiais necessários para a construção de componentes como caldeiras e turbinas para que usinas de energia a carvão sejam capazes de operar com vapor em condições muito maiores que as das plantas ultrassupercríticas. A pesquisa foca em ligas à base de níquel que suportem a operação em temperaturas muito altas, em torno de 760°C, e que ainda sejam resistentes à corrosão para a ampla faixa de composições de carvão americano, como aqueles com alto teor de enxofre.

A central termelétrica *John W. Turk Jr* de 600 MW localizada no Arkansas, Figura 4.9, foi a primeira ultrassupercrítica a ser colocada em operação nos Estados Unidos, e persiste até os dias atuais como a usina de energia a carvão mais eficiente do país, atingindo

uma eficiência de cerca de 42% (base PCI) (SANTOIANNI, 2015; WILLIAMS, 2014). A planta opera a uma pressão de vapor de 26,2 MPa e temperatura de 600°C, e único reaquecimento (PELTIER, 2013).



Figura 4.9 - Planta a carvão John W. Turk Jr de 600 MWe localizada no Arkansas.  
Fonte: (SOUTHWESTERN ELETRIC POWER COMPANY, 2013).

O preço do gás natural no mercado americano, somado as restrições de emissões de carbono, direciona a uma realidade onde a construção de novas plantas a carvão nos EUA se tornará cada vez mais raras, ou até mesmo inexistentes, mesmo com a alta eficiência e excelente desempenho ambiental que plantas de alta eficiência e baixas emissões (HELE) como a John W. Turk Jr fornecem (EPA, 2013; SANTOIANNI, 2015).

A região da comunidade da União Europeia também tem significativa importância na dinâmica da geração de eletricidade por carvão mineral, uma vez que a geração a carvão representa um quarto de toda a geração da comunidade europeia, entretanto a representatividade do carvão na matriz elétrica de cada um dos diversos países membros da União Europeia apresenta grande variação, desde menos de 1% na Suécia, até acima de 80% na Polônia. A eficiência média do parque de geração a carvão é de 38% (base PCI) (EC, 2016).

Boa parte do parque a carvão na União Europeia é composto por unidades que estão em operação a mais de 30 anos, como pode ser verificado na Figura 4.10, representando 62% na UE11 e 38% na UE15. Em contrapartida a Europa também é o local onde estão localizadas

algumas das mais avançadas plantas de geração a carvão, como a planta de Maasvlake na Holanda com 47% de eficiência, a planta de RDK8 na Alemanha com recorde de 47,5% de eficiência atingida, ou a de Nordjylland na Dinamarca (KELLER, 2016; SANTOIANNI, 2015).

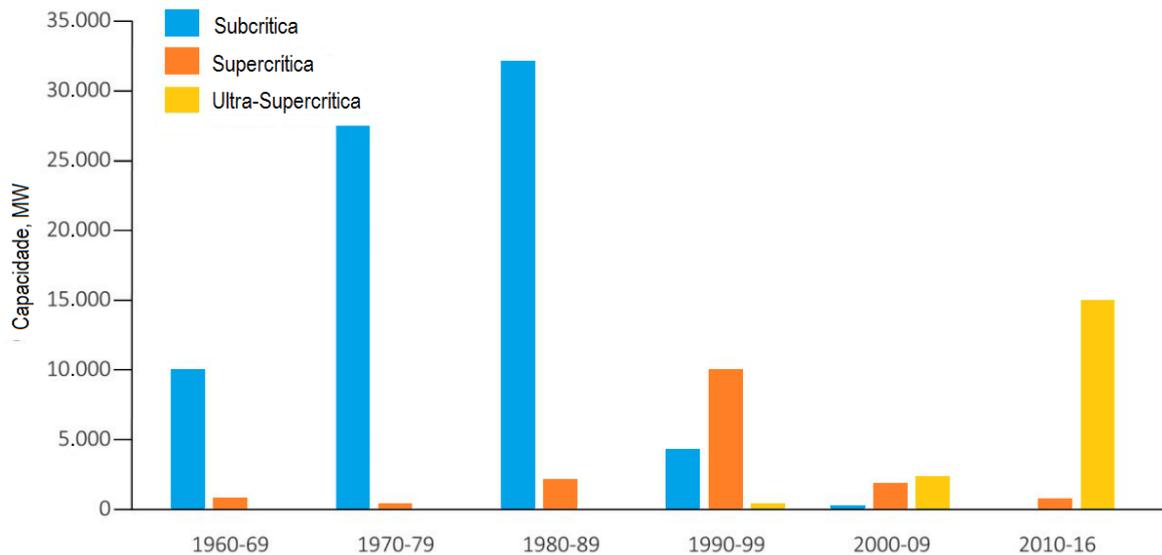


Figura 4.10 - Perfil do parque térmico a carvão da União Europeia, por tecnologia e por idade das unidades. Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

No ano de 2016 foram registradas 218 unidades com 300 MW ou mais, que totalizam uma capacidade instalada de 109.747 MW, representando 65% da capacidade instalada total da União Europeia. A maior parte do parque a carvão é composto por unidades subcríticas, representando 68%. Completam o parque a carvão mais 30 unidades supercríticas e 22 ultrassupercríticas, que representam respectivamente 15% e 17% do total instalado, conforme pode ser verificado na Figura 4.11 (WIATROS-MOTYKA, 2016).

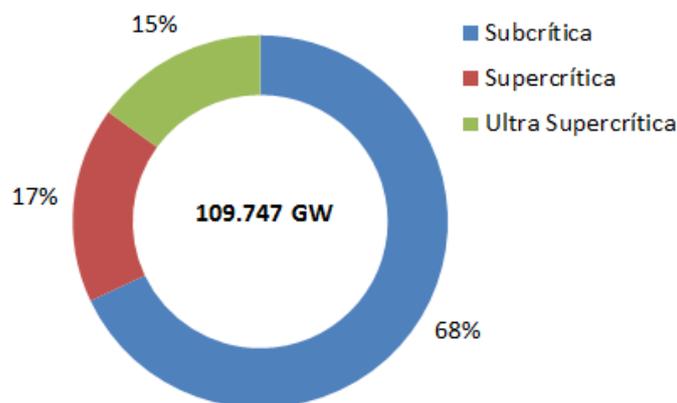


Figura 4.11 - Estrutura do parque térmico a carvão da União Europeia. Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

Além das inúmeras plantas de alta eficiência, supercríticas e ultrassupercríticas, existentes na região da União Europeia atualmente, outras que estão em diferentes estágios de

construção, ou com construção planejada. Uma capacidade combinada de 7645 MW de plantas ultrassupercrítica estão em construção, sendo a Polônia a maior responsável por esse aporte com cinco unidades, uma na Grécia e outra na Alemanha. Entretanto há diversas incertezas com relação à adição da capacidade instalada planejada, visto que não há definição quanto à tecnologia que será utilizada, e nem com relação à data para que os projetos sejam executados (WIATROS-MOTYKA, 2016).

A planta de Maasvlakte localizada na Holanda e que entrou em operação em 2016, Figura 4.12, é um dos exemplos de modernização do parque a carvão europeu, consistindo em uma unidade ultrassupercrítica com capacidade de 1100 MW e eficiência de 47% (base PCI), cuja característica lhe permite operar com queima de até 30% de biomassa. A planta opera com condições de vapor de 600°C / 620°C / 28,5 MPa, e pela localização na costa utiliza água do mar para refrigeração. O projeto holandês de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) utilizará Maasvlakte como sua unidade piloto, com perspectivas de que no futuro os níveis de emissão de CO<sub>2</sub> da planta atinja o patamar de usinas a gás (BLANKENSPoor, 2015; ENERGY HUB WEST, 2016).



Figura 4.12 - Planta a carvão Maasvlakte de 1100 MWe localizada na Holanda.

Fonte: (SIEBE SWART, 2013).

Outro exemplo no que se refere ao estado da arte em plantas de geração a carvão é a planta de Lünen localizada na Alemanha, Figura 4.13, que foi construída para permitir o fornecimento de energia de maneira segura e acessível à população, entrando em operação no ano de 2013. O desligamento de usinas nucleares na Alemanha e a grande quantidade de

centrais fósseis com mais de 25 anos de operação, levaram a necessidade de promover a construção da planta. Lünen tem uma potência instalada de 750 MW, operando em ciclo ultrassupercrítico, com vapor principal a pressão de 28 MPa e temperatura de 600°C, atingindo uma eficiência média de 46% (base PCI). A operação da planta de geração de eletricidade é complementada com o fornecimento de vapor para fins de aquecimento urbano (CZIESLA; BEWERUNGE; SENZEL, 2009).

Uma característica importante da central de Lünen refere-se a sua capacidade em manter equilibrada sua geração com fontes intermitentes como solar e eólica, devido a sua grande capacidade de rampa, permitindo rápido atendimento a demanda quando necessário (LARSON, 2014; SANTOIANNI, 2015).

Vários projetos de pesquisa estão em desenvolvimento na comunidade europeia para desenvolver plantas ultrassupercríticas avançadas (A-USC), com testes para uma usina em que o vapor atinja 700°C, tal como o projeto COMTES 700, que é financiado por um fundo de Pesquisa para Carvão e Aço, com investimentos de mais de 15 milhões de Euros (DI GINOFRANCESCO et al., 2013; NICOL, 2013). Outro projeto de pesquisa e desenvolvimento (P & D) europeu para unidades de alta eficiência é o NIBALO 725, que trabalha com ligas à base de níquel para operação de unidades com temperaturas de 725°C, teve início em 2016 com duração prevista de quatro anos (WIATROS-MOTYKA, 2016).



Figura 4.13 - Planta a carvão Lünen de 750 MWe localizada na Alemanha.  
Fonte: (STEAG, 2018).

Em uma análise da expansão da geração a carvão nos países membros do G7, entre os anos de 2010 e 2015, verifica-se que a Alemanha em comportamento semelhante ao dos EUA cancelou a construção de boa parte das plantas propostas, além de ter retirado de operação uma capacidade significativa, o mesmo pode ser observado para o Reino Unido. Dos países membros do G7 apenas o Japão manteve o planejamento de construção de novas centrais térmicas a carvão, com quase 30 GW de capacidade instalada adicional (ENDCOAL, 2016; SCHULZ; SCHWARTZKOPFF, 2015). Uma visualização mais clara destes dados é possível através da Figura 4.14.

Esta retração na expansão do parque a carvão de alta eficiência, como no exemplo da Alemanha, é devida a diversas barreiras que impedem o desenvolvimento mais acelerado das tecnologias de carvão limpo dentro da comunidade europeia, tais como o elevado subsídio destinado as energias renováveis tornando-as prioritárias na adição de capacidade instalada, metas ambiciosas de redução de gases de efeito estufa, além da falta de uma tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono disponível comercialmente em larga escala (WIATROS-MOTYKA, 2016).

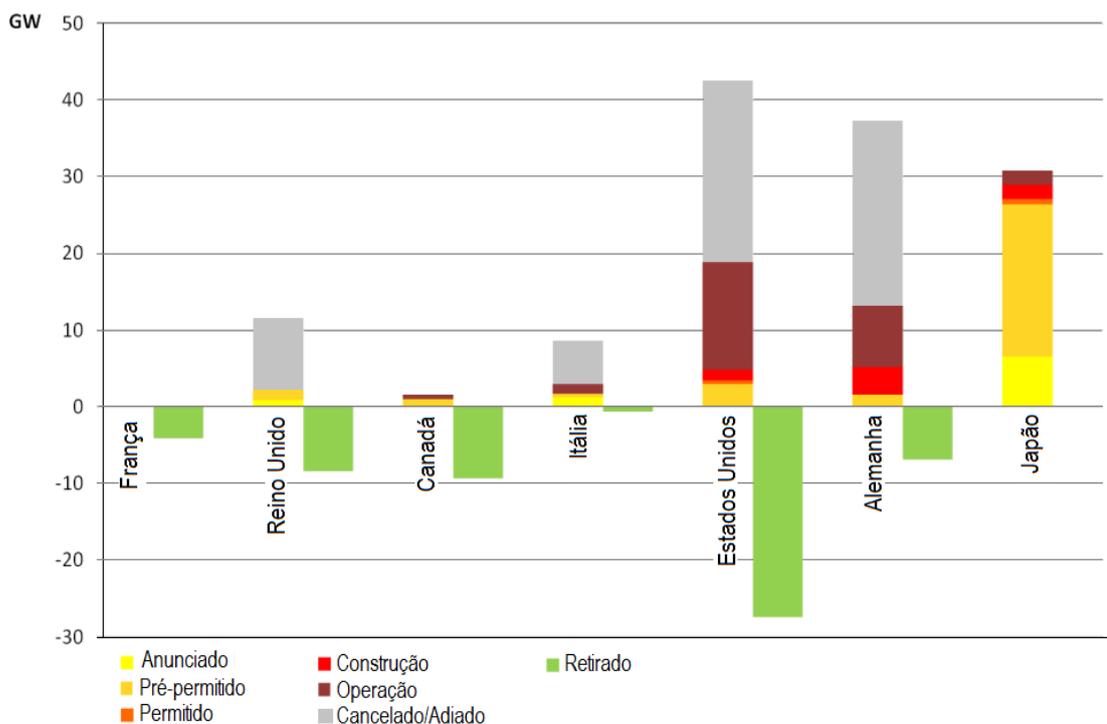


Figura 4.14 - Dinâmica da geração a carvão nos países do G7 no período de 2010-2015.

Fonte: (SCHULZ; SCHWARTZKOPFF, 2015).

Outro aspecto importante é que à medida que a participação das energias renováveis torna-se mais relevante na matriz europeia as unidades a carvão devem operar de forma mais flexível atendendo as necessidades de demanda em função da geração das renováveis, tal fato

tem levado a uma redução nos fatores de capacidade das plantas a carvão, no período de 2013 e 2014, por exemplo, houve uma redução de 5% no fator de capacidade do parque a carvão da União Europeia (EURELECTRIC, 2015).

O resultado da política energética da União Europeia com relação à adição de novas plantas a carvão, com grande limitação a entrada de nova capacidade instalada por esta fonte, exigência de aplicação de tecnologias e alta eficiência nos projetos permitidos, e obrigatoriedade futura de sistemas de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), leva a situação onde as emissões de CO<sub>2</sub> da União Europeia, serão oriundas de plantas a carvão existentes, com as unidades com construção anunciada, permitidas, e em construção representando muito pouco em relação às emissões totais. Em sentido contrário as políticas europeias, a China tem vivido um intenso acréscimo em seu parque térmico a carvão, de forma que o pico de emissões de CO<sub>2</sub> ainda será atingido por volta de 2030, com grande representatividade das emissões de unidades em construção e anunciadas para construção. As emissões de CO<sub>2</sub> oriundas de usinas a carvão previstas para diferentes áreas de acordo com o *status* atual dos projetos de unidades a carvão estão apresentadas na Figura 4.15.

Ao tratar-se de tecnologias para geração a carvão de alta eficiência e baixas emissões (HELE) o Japão desponta como uma liderança mundial, o país colocou em operação sua primeira planta ultrassupercrítica em 1993, e atualmente as tecnologias HELE estão em uso na maioria das usinas a carvão japonesas, o que lhes confere o parque com maior eficiência média no mundo (LOCKWOOD, 2016; MAKINO, 2016). As centrais a carvão representam cerca de 30% da matriz elétrica do Japão, e a indisponibilidade nacional de carvão faz com que todo carvão seja importado, principalmente da Austrália e Indonésia (TAKASHI; SHINTARO, 2015).

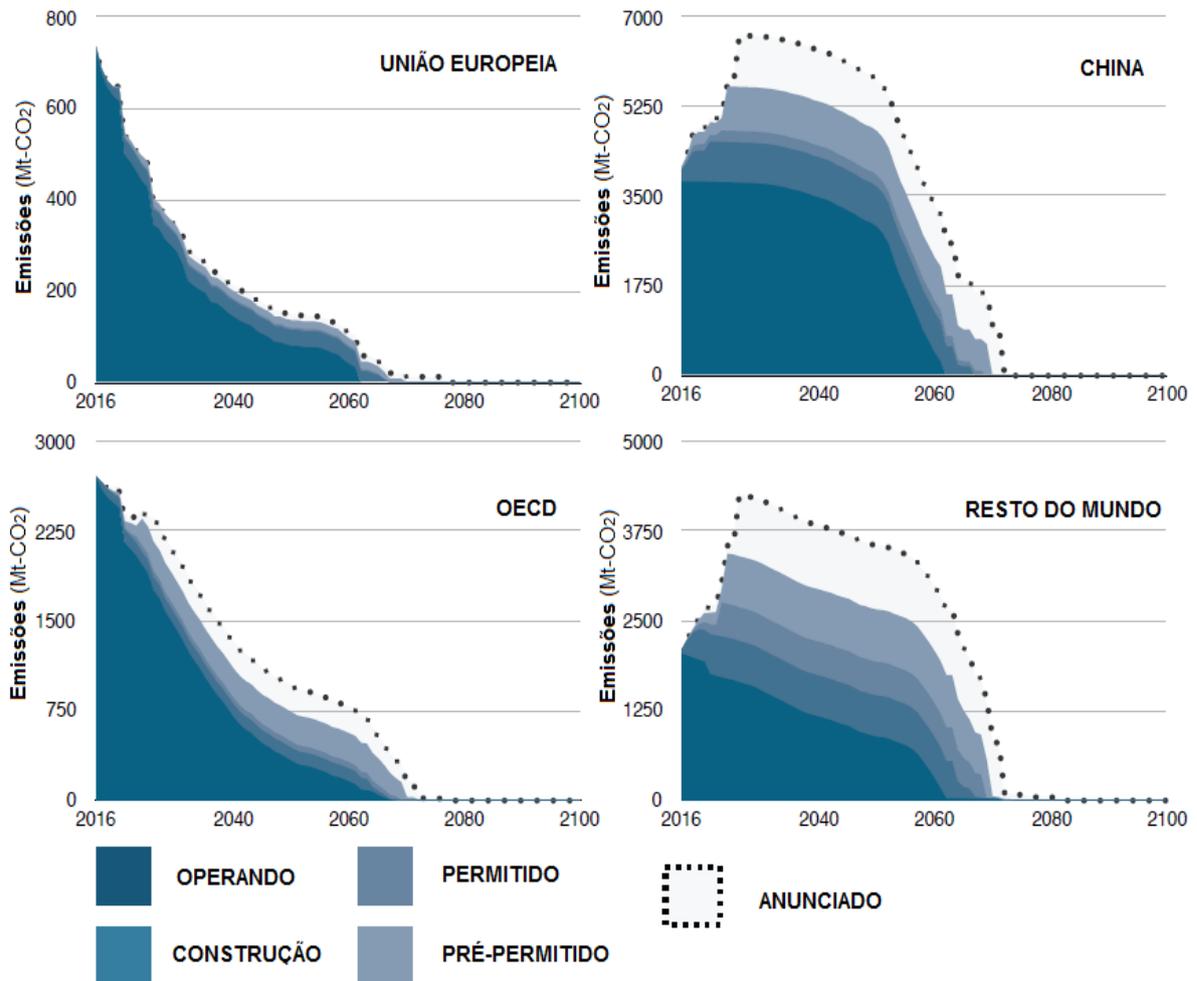


Figura 4.15 - Emissões regionais de CO<sub>2</sub> previstas para unidades a carvão em operação, e em diferentes estágios de planejamento, indicando a parcela de contribuição de cada grupo.

Fonte: (CLIMATE ANALYTICS, 2016).

Após o acidente de Fukushima em 2011, em que todas as usinas nucleares cessaram operações, as plantas de geração a carvão aumentaram sua disponibilidade para compensar a perda de usinas nucleares, operando com carga total por longos períodos, visto que desempenham um papel de fornecedor competitivo e estável em termos de custos (TAKASHI; SHINTARO, 2015). O *status* das usinas nucleares do Japão no período posterior ao acidente de Fukushima, pode ser verificado na Figura 4.16. Além disso, tem-se verificado grandes alterações na matriz elétrica japonesa, com tendências de substituição da energia nuclear por fontes de combustíveis fósseis, como pode ser verificado na Figura 4.17. Esta mudança repentina nos planos da política energética do Japão ocasionou elevados índices de emissões de CO<sub>2</sub>, e aumento no preço da eletricidade no país (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2017; YAMAZAKI, 2015).

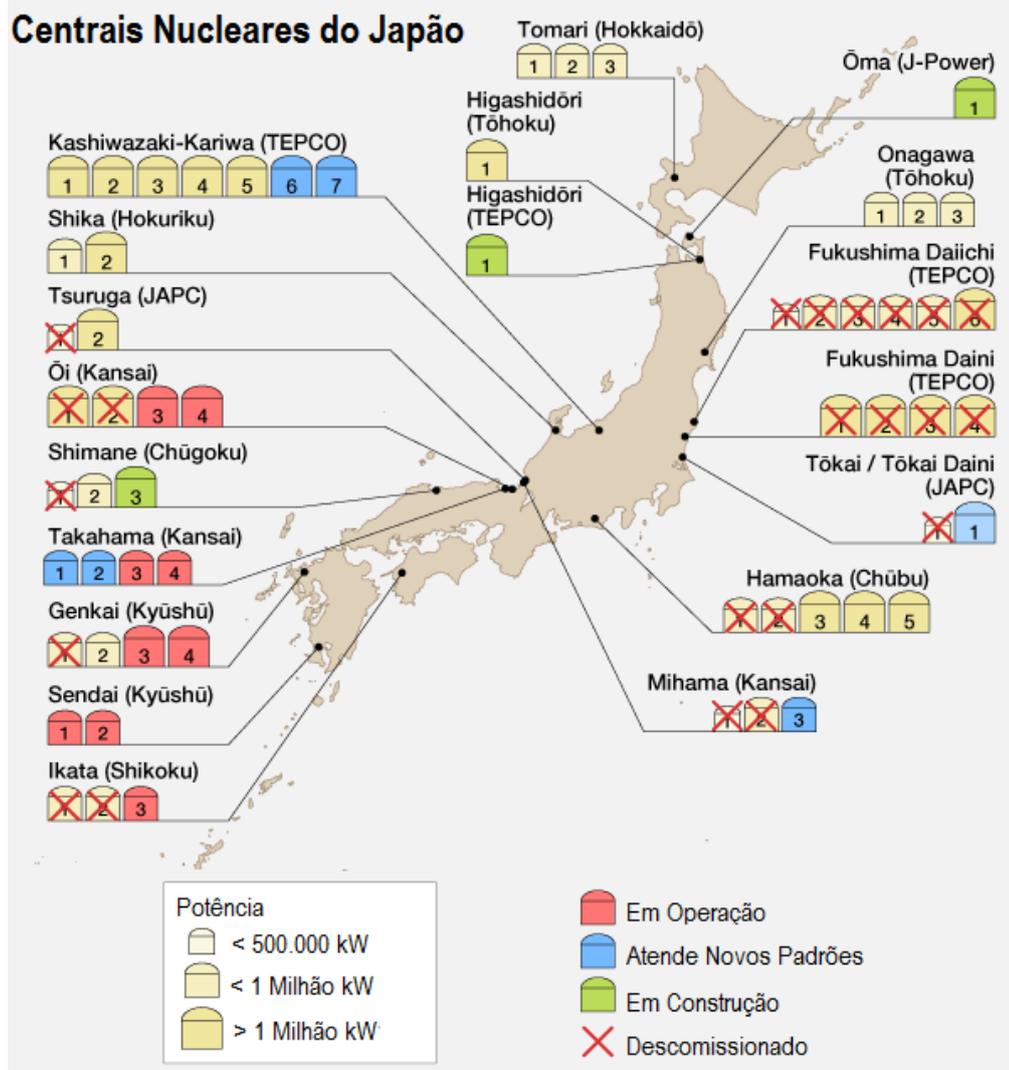


Figura 4.16 - Status das usinas nucleares de geração de eletricidade no Japão.  
Fonte: (NIPPON, 2018).

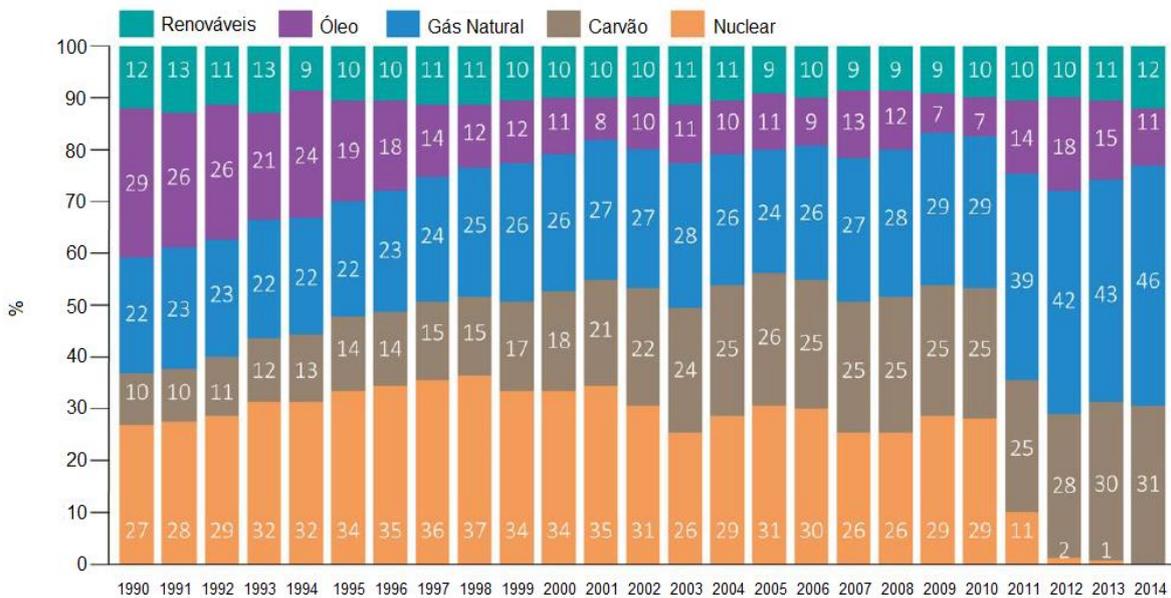


Figura 4.17 - Transição na matriz de energia elétrica japonesa ao longo dos anos.  
Fonte: (YAMAZAKI, 2015).

O Plano Estratégico de Energia avaliado e aprovado pelo Conselho de Ministros em 2014 colocou o carvão como combustível fundamental para ser utilizado na base da geração de eletricidade. A avaliação considerou que a utilização desta fonte apesar de proporcionar maior intensidade nas emissões de CO<sub>2</sub> apresenta vantagens relevantes, tais como, reservas localizadas em locais com pouco risco geopolítico, e a questão econômica já que possibilita uma geração com o menor custo quando comparada a outras fontes. Para reduzir a carga ambiental da inserção de novas plantas a carvão o plano do governo previu também o uso de tecnologias de geração de eletricidade a carvão de alta eficiência, que incluísse a substituição de plantas antigas (FENSOM, 2015; GUAY, 2013).

Os altos custos de importação de carvão aceleraram no Japão o processo de desenvolvimento de usinas de energia a carvão de alta eficiência, que possibilitam a utilização mais eficiente do combustível e de quebra ainda melhoram o desempenho ambiental. Unidades supercríticas (SC) e ultrasupercríticas (USC) representam mais de 70% dos 43 GW de usinas a carvão instaladas, o que proporciona ao parque japonês uma eficiência média de 42%, com um fator de capacidade médio de 80%. O cenário atual prevê ainda a substituição de unidades envelhecidas de baixa eficiência, por outras com tecnologia USC de alta eficiência e baixas emissões (TAKASHI; SHINTARO, 2015).

O parque a carvão compreende 49 unidades de 300 MW ou maiores, que totalizam 34,6 GW que representam 79% do total de potência instalada a carvão no Japão. Destes 34,6 GW de capacidade instalada 95% são representados por unidades USC e SC, confirmando um amplo domínio de unidades de alta eficiência como pode ser verificado na Figura 4.18.

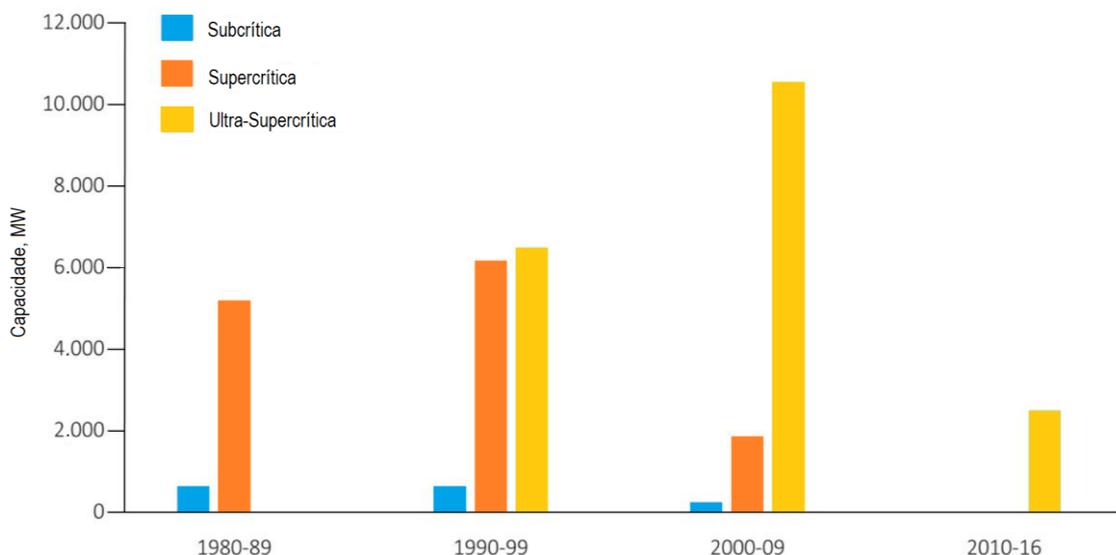


Figura 4.18 - Perfil do parque térmico a carvão do Japão, por tecnologia e por idade das unidades.  
Fonte: (WIATROS-MOTYKA, 2016).

No acordo firmado na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 - COP21, o Japão se comprometeu em reduzir 26% das suas emissões de CO<sub>2</sub>, com base nas emissões de 2013, e para atingir pretende expandir ainda mais o uso das tecnologias, supercrítica e ultrassupercrítica, substituindo as subcríticas existentes. A implementação destas tecnologias HELE suprem a necessidade de geração segura de eletricidade, com preço acessível, e mantém o foco na redução das emissões de CO<sub>2</sub> (WIATROS-MOTYKA, 2016).

A meta do Japão é atingir um fator de emissão de 0,37 kg-CO<sub>2</sub>/kWh em sua matriz de geração de energia elétrica para o ano de 2030, como pode ser visualizado na Figura 4.19, no intuito de alcançar os objetivos propostos em relação à mitigação das mudanças climáticas. A ideia é fortalecer fontes de energia que emitem menos CO<sub>2</sub>, e promover melhoria de eficiência de geração das térmicas através de tecnologias avançadas como unidades ultrassupercríticas e ultrassupercríticas avançadas (AGENCY FOR NATURAL RESOURCES AND ENERGY, 2015).

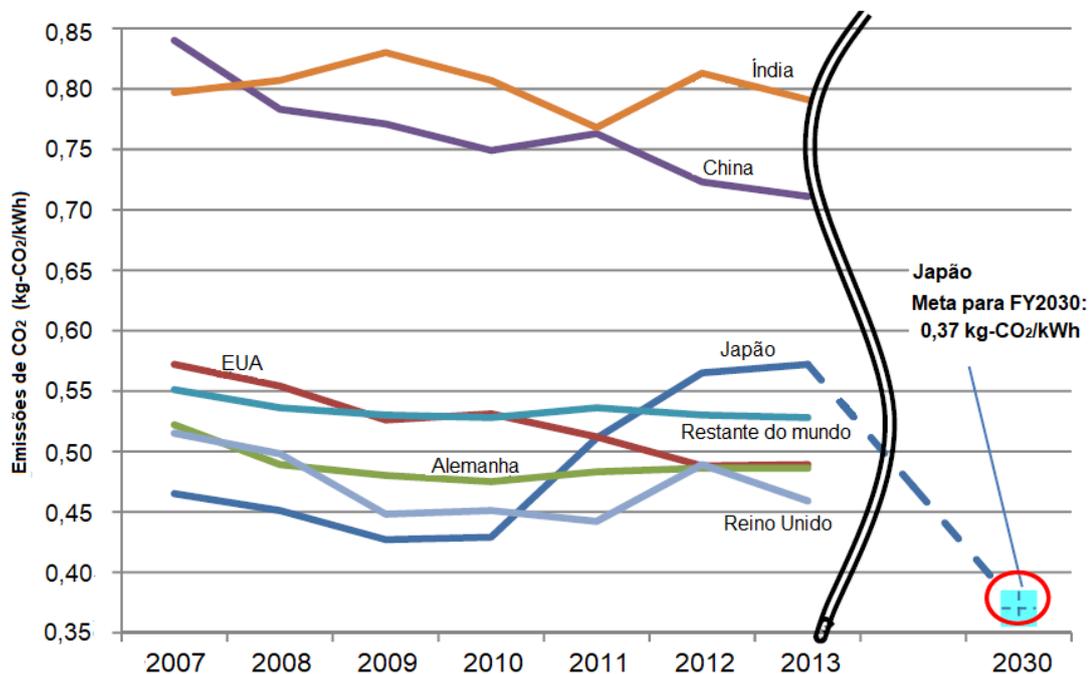


Figura 4.19 - Fatores de emissão atingidos pelos países para suas respectivas matrizes de energia elétrica, e a meta do Japão para FT2030.

Fonte: (AGENCY FOR NATURAL RESOURCES AND ENERGY, 2015).

Neste cenário de construção e modernização do parque a carvão tem-se como exemplo a central térmica de Isogo, Figura 4.20, que originalmente era composta de duas unidades subcríticas de 265 MW, instaladas na década de 1960. Atualmente a central consiste de duas unidades ultrassupercríticas de 600 MW cada uma delas, operando com vapor a uma pressão

de 25 MPa e temperaturas de 600°C/610°C e 600°C/620°C nas unidades 1 e 2 respectivamente (J-POWER, 2010; SANTOIANNI, 2015).

As duas novas unidades que substituem as antigas subcríticas promovem redução considerável de emissões mesmo com geração de energia bem superior. Os valores verificados indicam uma redução de 50% nas emissões de SO<sub>x</sub>, 80% redução de NO<sub>x</sub>, 70% menos de partículas, além de emissões de CO<sub>2</sub> 17% menores. Tal ganho no desempenho ambiental da central foi proporcionado pela efetiva melhoria de eficiência através da implantação da tecnologia ultrassupercrítica, além de todo aparato tecnológico de controle de poluição de alta tecnologia que foi instalado (ELETIC POWER DEVELOPMENT, 2009).



Figura 4.20 - Planta a carvão Isogo de 1200 MW localizada no Japão.  
Fonte: (ELETIC POWER DEVELOPMENT, 2009).

Há planejamento para construção de 45 novas unidades a carvão no Japão, totalizando uma capacidade de aproximadamente 21 GW, para entrar em operação após 2020. Deste total mais de 20 usinas a carvão, que totalizam 15 GW de capacidade instalada, terão capacidade de 300 MW ou mais, sendo 75% delas ultrassupercríticas (REUTERS, 2016; TAKASHI; SHINTARO, 2015).

O governo japonês está empenhado em implementar tecnologias ainda mais avançadas para o uso limpo do carvão, e para tanto tem investido em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área. Atingir os parâmetros necessários para implementar a tecnologia A-USC é um dos objetivos principais para os próximos anos para o setor de energia japonês, assim como

implementar a tecnologia de Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado, proporcionando altas eficiências e fatores de emissão de CO<sub>2</sub> muito baixos (UKEGUCHI et al., 2015).

Além de promover internamente um alto financiamento público anual para desenvolvimento de geração limpa a partir de combustíveis fósseis, o Japão se mantém como forte financiador no desenvolvimento de usinas a carvão em países emergentes e em desenvolvimento, como o caso da Ucrânia, que possui um parque a carvão envelhecido, possibilitando assim reduzir a dependência do país ao gás natural (DODSON, 2014).

# **CAPÍTULO 5**

## **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **5.1. EXERGIA ASSOCIADA A UM INDICADOR AMBIENTAL**

Exergia de um sistema é definida como o máximo trabalho que poderia ser realizado pelo sistema em um ambiente de referência especificado por sua temperatura, pressão e composição química. A exergia é uma propriedade extensiva que pode ser destruída e não é conservada, ao contrário da energia, que não pode ser criada nem destruída, como define a Primeira Lei.

De acordo com Dincer e Çengel (2001) o método baseado na exergia supera as limitações da análise energética, baseada na Primeira Lei. Tal fato se deve a base do conceito de exergia estar apoiada na Primeira e Segunda Lei da termodinâmica, possibilitando que a análise exergética indique a localização da degradação de energia num processo, além de calcular a real magnitude das perdas de exergia. Na Tabela 5.1 é apresentada uma comparação geral dos conceitos de energia e de exergia.

Tabela 5.1 - Tabela comparativa dos Conceitos de Energia e Exergia.

<b>Energia</b>	<b>Exergia</b>
Dependente somente de parâmetros dos fluxos de energia e matéria, e independente de parâmetros ambientais.	Dependente dos parâmetros ambientais, dos parâmetros de fluxos de matéria e dos parâmetros de fluxos de energia.
“Nada desaparece”	“Tudo dispersa”
Baseada na Primeira Lei da Termodinâmica.	Baseada na Primeira Lei e na Segunda Lei da Termodinâmica.
Energia é sempre conservada, isto é, em balanço; energia nunca pode ser produzida ou consumida.	Exergia sempre é conservada em processos reversíveis e consumida em processos irreversíveis (processos reais), isto é, exergia nunca está em balanço com processos reais.
$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$	$I = T_0 \cdot \Delta S^{total}$
Energia tem valor diferente de zero.	Exergia é zero quando se encontra em estado de equilíbrio com o meio de referência.
Energia é uma medida de quantidade	Exergia é uma medida de quantidade e qualidade.

Fonte: (Adaptado de Rojas, 2007).

Muitos pesquisadores sugeriram o emprego do conceito de exergia para quantificar e calcular os impactos sobre o meio ambiente provenientes da utilização de recursos energéticos (ROJAS, 2007).

De acordo com Wall (2006) o conteúdo de exergia num fluxo poluidor pode ser entendido como o potencial desse fluxo em provocar dano, isto porque ele ativa reações incontroláveis no meio ambiente, que causam processos físicos prejudiciais, tal como o aquecimento global, e reações químicas como a degradação da camada de ozônio. Ou seja, quanto mais exergia um fluxo resíduo possui, mais este fluxo encontra-se distante de atingir o equilíbrio com o meio ambiente, e maior seu potencial de causar danos ao ambiente.

Segundo Rosen e Dincer (1997) a exergia associada aos resíduos de processos, emitidos para o meio ambiente, pode ser identificado como um potencial de dano ambiental, visto que tais resíduos tem potencial para causar mudanças pelo fato de não estarem em equilíbrio estável com o meio ambiente.

A avaliação da exergia no meio ambiente pode render um paradoxo, uma vez que o entendimento que a exergia no ambiente na forma de recursos é valiosa, entretanto na forma de emissões tem valor negativo, devido a seu potencial de causar danos ambientais. A confusão entre estas duas afirmações pode ser resolvida a partir do conceito de exergia

aprisionada, Figura 5.1. Grande parte dos recursos encontrados no ambiente estão aprisionados, enquanto emissões tem conteúdo de exergia livre pois estão disponíveis no ambiente para causar impacto de maneira descontrolada (Rosen, 2002a; Rosen e Dincer, 1997; Rosen, Dincer, e Kanoglu, 2008).

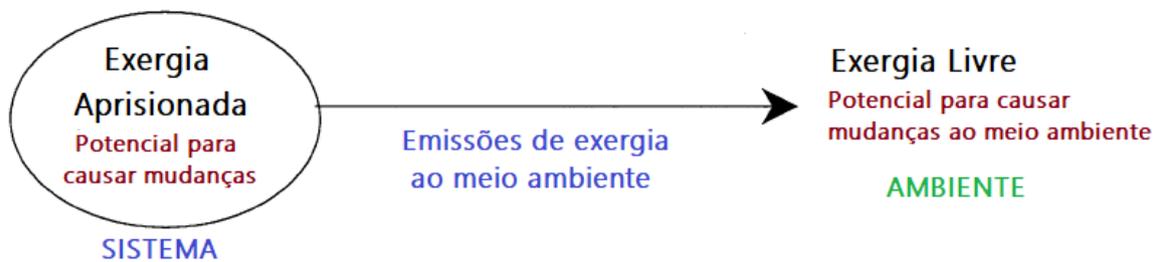


Figura 5.1 - Comparação de exergia aprisionada e exergia livre.  
Fonte: (Rosen e Dincer, 1997).

O impacto ambiental associado a um processo está diretamente ligado à destruição da ordem (criação de caos), degradação de recursos ou emissões de exergia com resíduos. A destruição da ordem está associada à entropia de um sistema, alta entropia designa estado mais caótico, enquanto a exergia é uma medida de ordem do sistema. A exergia destruída durante um processo é, portanto uma medida da destruição da ordem do sistema. Outra abordagem identifica a degradação dos recursos encontrados na natureza como uma forma de dano ambiental. Um recurso tem seu valor aumentado através do consumo equivalente de exergia de outro lugar (por exemplo, queima de carvão para produzir calor para o processo de produção de minério), e ao preservar a exergia por meio do aumento de eficiência o dano ambiental é reduzido. A exergia associada aos resíduos de processo emitidos para o meio ambiente pode ser vista como um potencial de dano ambiental. Resíduos típicos do processo têm exergia, um potencial para causar mudanças, como consequência de não estarem em equilíbrio estável com o meio ambiente (Rosen e Dincer, 1997).

O aumento na eficiência exérgica de um processo provoca gradativa redução no impacto associado com a destruição da ordem, degradação de recursos, e emissões de resíduos com exergia, como descrito na Figura 5.2. Por outro lado, como discutido por Gladysz e Ziebik (2016) devem ser considerados os impactos anteriores ao processo principal de conversão de energia. De forma que, mesmo que todo CO<sub>2</sub> fosse capturado ao invés de ser emitido para atmosfera em determinado sistema, há ainda fontes de emissão nos processos anteriores como extração, processamento e transporte dos combustíveis e materiais, portanto, mesmo centrais com sistema CCS não podem ser consideradas como “zero emissões”. Nesta

abordagem a degradação de recursos, emissões e destruição da ordem não tendem a zero à medida que a eficiência exergética do processo caminha para valores próximos a 100%. O uso de biocombustíveis por exemplo, não contribui diretamente para emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, de forma que a aplicação de sistemas CCS conduz a redução das emissões de todo ciclo de vida do processo.

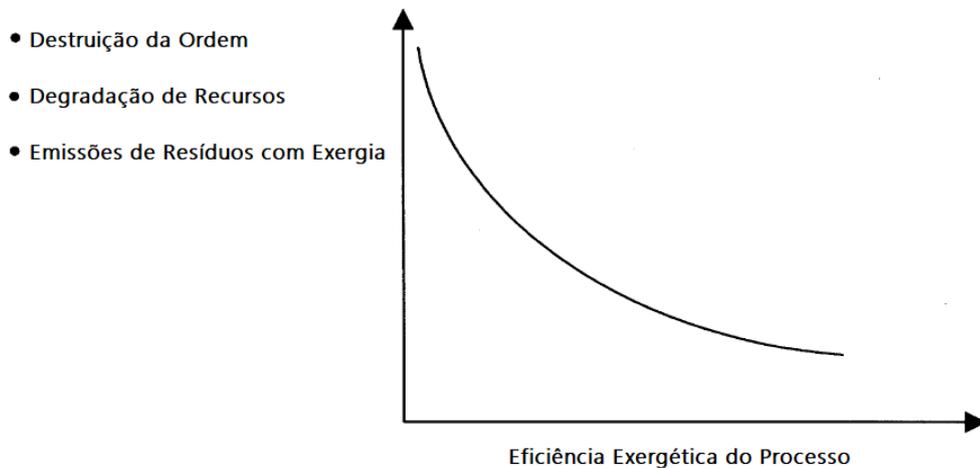


Figura 5.2 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a destruição de ordem/criação de caos, degradação de recursos, e emissões de resíduos com exergia.

Fonte: (ROSEN, 2002a).

A relação entre exergia, sustentabilidade e impacto ambiental, pode ser expandida como pode ser visto na Figura 5.3. Para esta abordagem de Rosen, Dincer e Kanoglu (2008) temos a sustentabilidade aumentando e o impacto ambiental diminuindo à medida que a eficiência exergética do processo aumenta. Com a eficiência exergética se aproximando de 100% o impacto aproxima-se de zero, já que a exergia é convertida de uma forma para outra sem perda, e a sustentabilidade tende a 100% pois o processo se aproxima da reversibilidade. No outro extremo com a eficiência exergética próxima a 0% a sustentabilidade é zero, pois recursos contendo exergia são usados mas nada é alcançado, e o impacto tende ao infinito pois uma quantidade intensiva de recursos deve ser usada e uma quantidade correspondentemente crescente de resíduos contendo exergia é emitida (ROSEN; DINCER; KANOGLU, 2008).

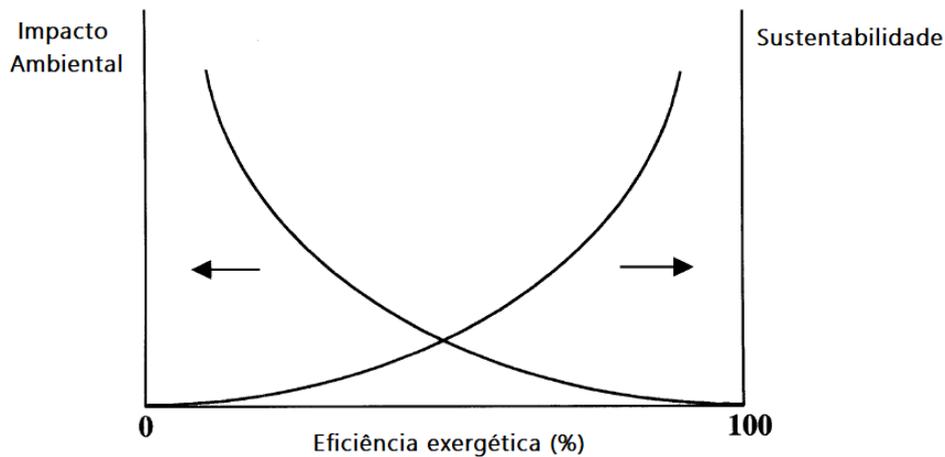


Figura 5.3 - Ilustração qualitativa da relação entre o impacto ambiental e a sustentabilidade de um processo e sua eficiência exergética.

Fonte: (ROSEN; DINCER; KANOGLU, 2008).

Diversas pesquisas sugerem que a melhor maneira de vincular a segunda lei ao impacto ambiental é através da exergia, porque é uma medida da alteração do estado de um sistema em relação ao estado de referência dado ao meio ambiente da vizinhança.

Rosen (2002b) descreveu seu ponto de vista acerca da exergia como uma ferramenta básica para auxiliar na melhoria da eficiência de processos, dispositivos e sistemas que utilizam energia e outros recursos. A descrição de seu ponto de vista foi desenvolvida através da explicação dos aspectos que relacionam políticas governamentais em uma ampla variedade de áreas com a exergia. Segundo o autor apesar dos benefícios potenciais do uso dos métodos de exergia, as avaliações de exergia eram até então frequentemente ignoradas, uma vez que foi encontrada uma relação inversa entre o nível de financiamento fornecido e as perdas de exergia. A avaliação detecta ainda que o governo poderia utilizar a exergoeconomia como forma de melhorar a performance econômica, ou ainda para determinar níveis de subsídios financeiros ou níveis de penalidades, taxas para encorajar a indústria a tornar-se mais eficiente ou usar uma base de recursos energéticos sem carbono. A correlação entre a exergia de emissões poluentes com o trabalho teórico requerido para reverter o prejuízo ambiental é entendida para o autor como uma possibilidade para que o método de exergia seja utilizado para determinar taxas e penalidades financeiras a serem aplicadas a poluidores.

Rosen (2002a) estudou o uso dos princípios de termodinâmica via exergia para avaliar sistemas e tecnologias de energia, assim como impacto ambiental. O estudo objetivou esclarecer os benefícios na abordagem de impactos ambientais utilizando princípios termodinâmicos em geral, e em particular os conceitos associados com a exergia. O aumento

de eficiência é descrito como a principal forma de reduzir o prejuízo do impacto ambiental, já que promove uma redução da entrada de exergia necessária. Outro ponto fundamental é com relação ao impacto da exergia dos resíduos emitidos pela central, como gases de exaustão, resíduos sólidos da caldeira, além do calor residual para atmosfera ou corpo hídrico, identificando grande potencial para redução de emissões relacionadas ao uso do carvão mineral através do aumento da eficiência exergetica.

Rosen (2002c) expõe seu ponto de vista através da explanação acerca de uma questão por ele levantada: “Como a exergia relaciona-se com o impacto ambiental?” e neste contexto apresenta diversas ligações que conectam a exergia e o ambiente. De acordo com o que foi apresentado, uma importante ligação entre exergia e impacto ambiental está relacionada ao conceito de destruição de exergia devido as irreversibilidades do sistema que indica uma destruição da ordem do sistema, sendo a destruição de exergia uma medida do mínimo trabalho que é requerido para reinstaurar a um ambiente sua condição original após este ter sido degradado. O autor constata que não se sabe qual tipo de exergia é mais prejudicial ao ambiente, porém espera-se que a exergia química seja potencialmente mais significativa. Sendo assim conclui-se que o uso da exergia permitiria prever impactos ambientais de emissões assim como conhecer os perigos associados, mas que para isso era preciso um maior número de pesquisas relacionando exergia e impacto ambiental.

Rosen, Dincer e Kanoglu (2008) descreveram o uso da exergia como ferramenta para melhoria de eficiência, as implicações ambientais da exergia envolvendo emissões de poluentes e gases estufa, e ainda o estabelecimento de uma relação entre exergia e economia. Através de uma avaliação simples de energia e exergia demonstrou-se claramente como a análise de energia pode ser enganosa apresentando margens para melhoria onde não há, indicando sistemas com alta eficiência quando na verdade não são, ou ainda não possibilitando detectar o melhor dispositivo do sistema para investir esforços em melhoria. Apresentam também o conceito do Índice de Sustentabilidade do recurso combustível, sendo este uma relação entre exergia de entrada no sistema e a destruição de exergia, entretanto quando trata-se de recursos renováveis uma baixa eficiência de exergia da central não indica uma baixa sustentabilidade ou alto impacto ambiental uma vez que não promove desequilíbrio pela emissão de resíduos ou consumo de não renováveis.

## 5.2. MÉTODO DA ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL

De acordo com Kashani (2014) uma análise exergoambiental consiste em um método baseado no conceito de exergia, que permite identificar e calcular a localização, magnitude, causas e o impacto ambiental da ineficiência termodinâmica num sistema de conversão de energia.

A análise exergoambiental identifica:

- (a) a importância relativa de cada componente em relação ao impacto ambiental total;
- (b) as possibilidades para promover redução de impacto ambiental associadas ao sistema global.

De acordo com Meyer *et al.* (2009) a metodologia de análise exergoambiental consiste de três principais etapas, Figura 5.4.

1ª Etapa: Análise exérgica do sistema de conversão de energia;

2ª Etapa: Uma análise de ciclo de vida (ACV) de cada componente relevante do sistema, e de todos os fluxos de entrada do sistema como um todo.

3ª Etapa: Atribuição dos impactos ambientais determinado pelo ACV aos fluxos exérgicos do sistema, cálculo das variáveis exergoambientais, e avaliação dos resultados.

A partir destas etapas, e principalmente da avaliação do sistema, os componentes mais importantes com maior impacto ambiental podem ser identificados.

Para a etapa da análise de ciclo de vida (ACV) variados índices descrevem os impactos ambientais associados aos componentes do sistema, como Ecoindicador 95, Ecoindicador 99, Consumo Cumulativo de Exergia (CExC), e o fator ECO 2006, e estes Ecoindicadores permitem uma avaliação quantitativa do impacto ambiental, sendo o Ecoindicador 99 aquele que apresenta maior precisão para as análises (Hong *et al.*, 2018).

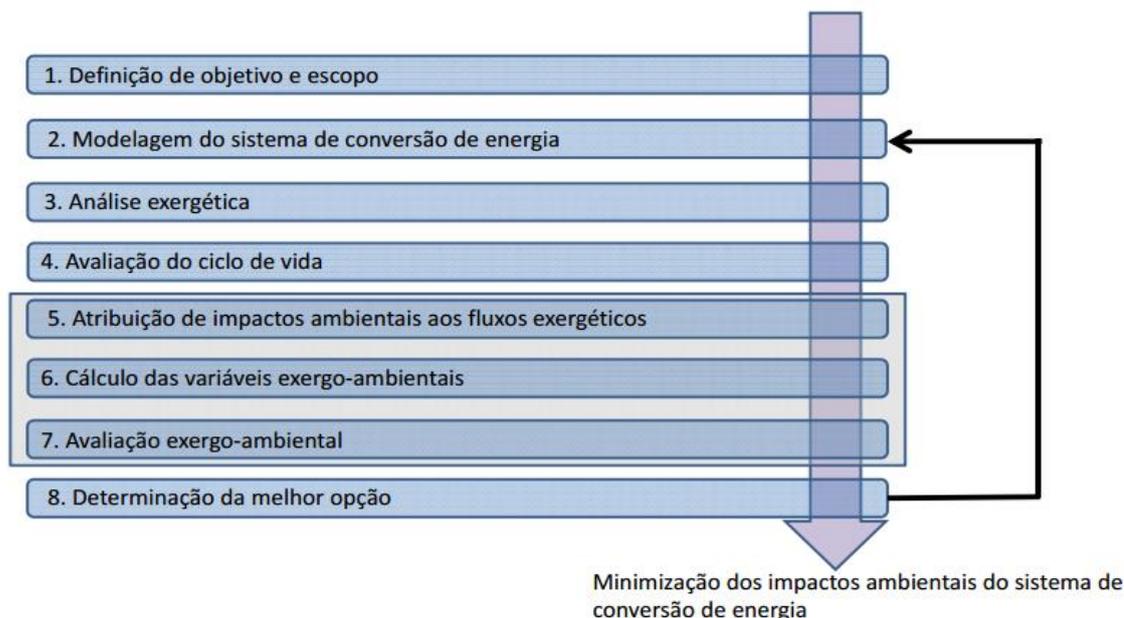


Figura 5.4 - Estrutura do método Exergoambiental.  
 Fonte: (Adaptado de Meyer et al., 2009).

### 5.2.1. ECOINDICADOR 99

Os ecoindicadores padrão são valores numéricos que expressam a carga ambiental total de um produto ou processo, que possibilitam a um projetista ou pesquisador analisar as cargas ambientais de diferentes alternativas de projeto que podem então ser comparadas. O cálculo destes indicadores padrão segue uma metodologia bem complexa, que pode ser consultada no relatório de metodologia “*The Eco-indicator 99 Methodology Report*”, entretanto um inventário dos fluxos primários tais como, consumo de recursos naturais, eletricidade, e emissões já encontra-se disponibilizado em relatórios internacionais.

Segundo Kashani (2014) o desenvolvimento do Ecoindicador 99 teve como objetivo especialmente a sua utilização como um método de apoio para tomada de decisão, baseada na avaliação dos impactos ambientais.

De acordo com Goedkoop, Effing e Collignon (2000) a metodologia para obtenção da pontuação do Ecoindicador consiste em três etapas, que são:

1. Inventário: levantamento de todas as emissões relevantes, extrações de recursos e uso da terra nos processos que formam o ciclo de vida de um produto, conforme Figura 5.5.
2. Cálculo dos danos que esses fluxos ocasionam à saúde humana, à qualidade dos ecossistemas e aos recursos.

3. Ponderação das três categorias de dano.

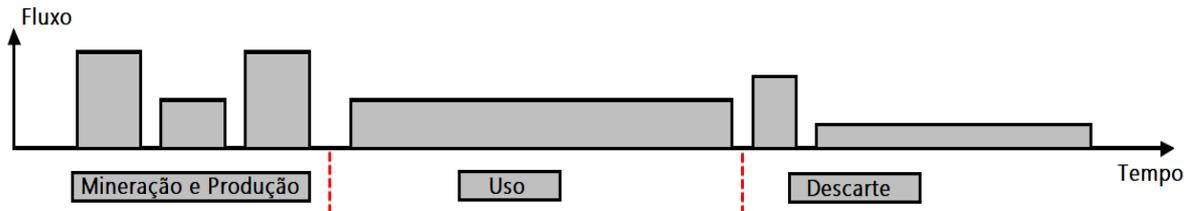


Figura 5.5 - Representação geral dos fluxos de um ciclo de vida.

Segundo Goedkoop e Spriensma (2000) a metodologia para obtenção destes indicadores foi desenvolvida de cima para baixo, ou seja, o passo de ponderação foi o ponto de partida, e a partir daí foram desenvolvidos modelos de danos para as categorias de impactos mais importantes. Os aspectos ambientais e a estrutura da metodologia para obtenção dos indicadores são mostrados na Figura 5.6.

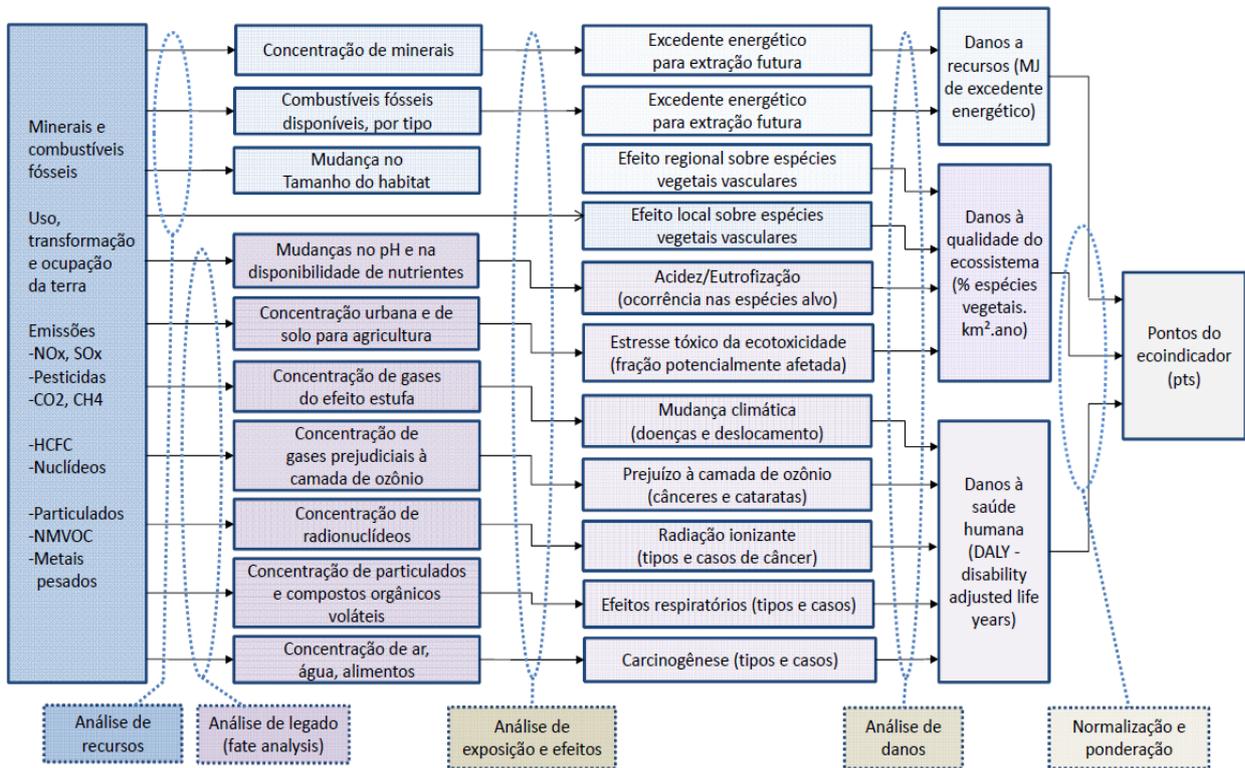


Figura 5.6 - Estrutura geral da metodologia do método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) do Ecoindicador 99. Fonte: (KASHANI, 2014).

As análises de recursos, de uso da terra ou de dados de inventário do encerramento (*fate analysis*) para cada um dos componentes do sistema são associadas a compartimentos (água, solo ou ar), que seriam os locais que podem ser afetados por dado aspecto ambiental considerado. A análise subsequente concentra-se na avaliação da exposição e efeitos, realizando uma categorização dos aspectos ambientais em impactos ambientais dele decorrentes. Os danos ambientais são então modelados em uma análise de danos em três

categorias: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais. E em outra etapa estas categorias de dano são ponderadas e o resultado expresso em uma escala de pontuação (Pontos – Pts) do Ecoindicador, de forma que quanto maior o dano maior será a pontuação atribuída a seu Ecoindicador (KASHANI, 2014; MEYER et al., 2009).

A unidade do Ecoindicador é point (Pt) ou milipoint (mPt), que indica uma carga ambiental anual, e seu valor absoluto não é relevante uma vez que seu propósito é comparar diferenças de valores. A escala de 1Pt representa um milésimo da carga ambiental anual de um habitante europeu médio, valor este que é calculado pela divisão da carga ambiental total na Europa pelo número de habitantes e multiplicando-o pelo fator de escala 1000 ((GOEDKOOPT; EFFING; COLLIGNON, 2000).

As três categorias de dano têm unidades diferentes *Disability Adjusted Life Years – DALY*, que representa a perda de anos de vida ou anos de incapacitação em consequência dos impactos ambientais, já o *Potentially Disappeared Fraction – PDF*, e *Potentially Affected Fraction – PAF* representam os danos na qualidade do ecossistema com uma medida de espécies afetadas e desaparecidas, já o *Surplus Energy – MJ* representa a quantidade de energia empregada para extração de recurso. E para que se possam utilizar fatores de ponderação unidimensionais, as categorias devem também tornar-se adimensionais, e na etapa de normalização dos fatores de dano esta tarefa é realizada, fornecendo, portanto fatores de dano adimensionais para posterior ponderação.

Perspectivas fundamentalmente diferentes a respeito da seriedade dos efeitos ambientais levaram os desenvolvedores da metodologia do Ecoindicador 99 a criarem versões diferentes para cada perspectiva, baseadas em três principais modelos e normalização de danos ambientais: Hierárquico com peso médio (H, A); Igualitário com peso igualitário (E, E); e Individualista com peso individualista (I, I) (GOEDKOOPT; EFFING; COLLIGNON, 2000; GOEDKOOPT; SPRIENSMA, 2000).

A perspectiva hierárquica com o conjunto de ponderação média (H, A) é adotada como a versão padrão da metodologia, portanto, neste trabalho são utilizados fatores de dano dos Ecoindicadores baseados nesta perspectiva por representar uma abordagem mais moderada, seus fatores de normalização e pesos podem ser verificados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Fatores de Normalização e pesos de ponderação da categorias de danos para a perspectiva Hierárquica (H, A).

<b>Categorias de Danos</b>	<b>Normalização</b>	<b>Pesos</b>
Saúde Humana	$1,54 \cdot 10^{-02}$	400
Qualidade do Ecossistema	$5,13 \cdot 10^{-03}$	400
Recursos	$8,41 \cdot 10^{-03}$	200

Fonte: (GOEDKOOOP; EFFING; COLLIGNON, 2000).

Para avaliar quantitativamente os impactos ambientais da geração de eletricidade por termelétricas a carvão com base na metodologia Exergoambiental, é essencial que se definam as entradas de recursos e as saídas do sistema, para que então possa ser levantado o ecoindicador referente a cada um deles. Será tratado como recurso na análise que sucede a eletricidade auxiliar utilizada pela usina para a operação de alguns componentes, além do combustível que representa o recurso principal. Já as emissões de gases de combustão, e água de resfriamento serão tratadas como a principal saída do sistema, conforme apresentado na Figura 5.7.

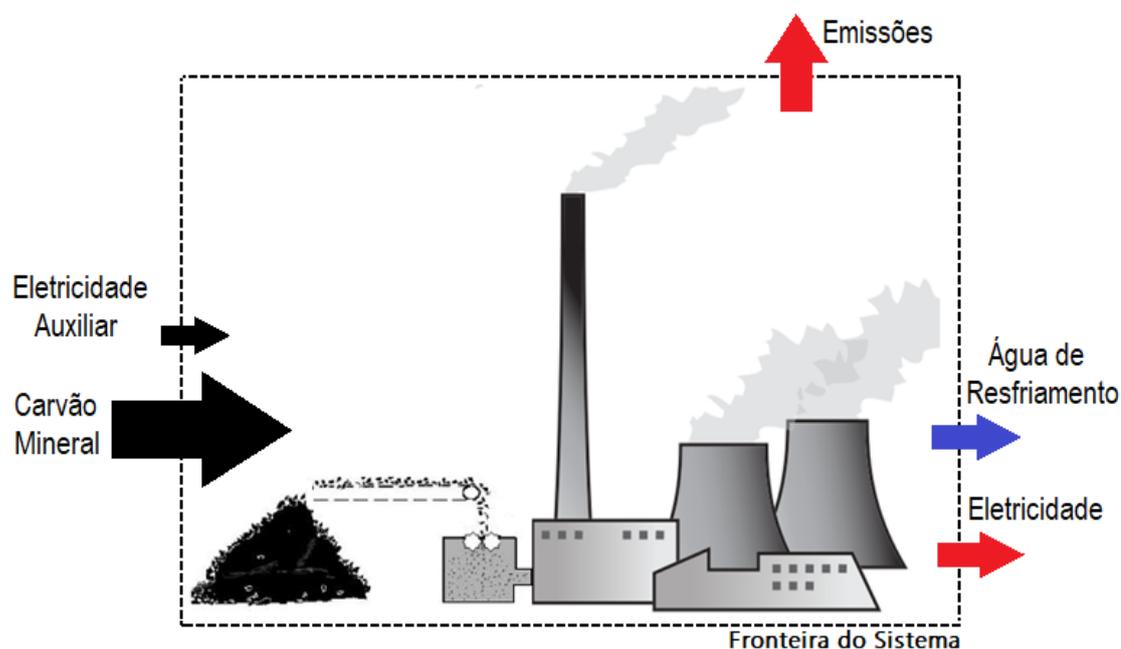


Figura 5.7 - Esquema conceitual do sistema de estudo, identificando recursos (eletricidade auxiliar, carvão) e produtos (emissões, eletricidade) a serem considerados na análise.

Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

O impacto ambiental originado pelo uso do combustível será obtido pela soma do fator de dano do ecoindicador relacionado aos danos causados à fonte devido à extração do carvão mineral, e dos fatores de dano dos ecoindicadores dos poluentes formados no processo de combustão, conforme Tabela 5.3.

O ecoindicador de danos causados aos recursos pelo uso do combustível é avaliado para expressar a redução da qualidade deste recurso disponível, uso da terra para mineração, e quantidade de energia para extrair o recurso (GOEDKOOP; EFFING; COLLIGNON, 2000).

Foi estabelecida a utilização de uma composição de carvão mineral padrão para as análises desenvolvidas, para tanto foi selecionada uma composição cujo poder calorífico inferior fosse razoavelmente próximo ao valor do conteúdo energético do carvão mineral padrão fixado na referência de obtenção dos ecoindicadores. Portanto, foi selecionada uma composição de carvão betuminoso de origem chinesa de um campo de mineração localizada na cidade de Changzhi na província de Shanxi (113°1'58,8" Longitude e 36°24' Latitude), cuja composição química elementar está apresentada na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 - Fatores de Dano dos Ecoindicadores para composição do impacto ambiental do carvão mineral.

Substância/Recurso	Fator de Dano	Fator de Dano Normalizado	Fator de Dano Ponderado
<b>Danos à saúde humana pela respiração de inorgânicos Pts/kg de emissão</b>			
<b>Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	5,46E-05	3,55E-03	1,42E+00
<b>Material Particulado (PM<sub>10</sub>)</b>	3,75E-04	2,44E-02	9,74E+00
<b>Material Particulado (PM<sub>2,5</sub>)</b>	7,00E-04	4,55E-02	1,82E+01
<b>TSP**</b>	1,10E-04	7,14E-03	2,86E+00
<b>Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)</b>	8,87E-05	5,76E-03	2,30E+00
<b>Danos à saúde humana causados por Mudanças Climáticas Pts/kg de emissão</b>			
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	2,10E-07	1,36E-05	5,45E-03
<b>Danos ao ecossistema por acidificação e potencial eutrofização Pts/kg de emissão</b>			
<b>Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	1,041	2,03E-04	8,12E-02
<b>Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)</b>	5,713	1,11E-03	4,45E-01
<b>Danos aos recursos pela extração de combustível fóssil Pts/kg de combustível</b>			
<b>Carvão Mineral*</b>	0,252	3,00E-05	5,99E-03

\*Conteúdo energético: Carvão Mineral 29,3 MJ/kg

\*\*Partículas maiores que 10 µm.

Fonte: (GOEDKOOP; SPRIENSMA, 2000).

Tabela 5.4 - Composição do carvão mineral betuminoso.

Componente	%Massa
Carbono (C)	74,45
Hidrogênio (H)	3,60
Enxofre (S)	0,31
Oxigênio (O)	2,91
Nitrogênio (N)	1,34
Umidade (H <sub>2</sub> O)	0,62
Cinzas	16,77
Poder Calorífico Inferior (PCI)	29316,1 kJ/kg

Fonte: (USGS, 2015).

A estimativa do impacto ambiental relacionado ao componente é composta pelos impactos de construção, operação e manutenção, e de descarte dos equipamentos após a vida útil. Para análise do ciclo de vida dos equipamentos é necessário inicialmente estimar seu peso, sua composição e o processo de manufatura. Devido à falta de dados algumas aproximações e considerações a respeito da estimativa do impacto ambiental dos equipamentos devem ser realizadas. A Tabela 5.5 apresenta equações para estimativas de peso dos componentes do sistema, onde os pesos são obtidos em toneladas a partir da entrada dos dados de  $\dot{Q}$  ou  $\dot{W}$  em MW ou kW, e  $\dot{m}$  em kg/s. A Tabela 5.6, e Tabela 5.7 a seguir, materiais de composição dos componentes, e processo de produção na fabricação dos componentes, respectivamente.

Tabela 5.5– Peso dos componentes do sistema.

Componente	Função	Peso
Unidades: t, MW		
<b>HRSG</b> <b>Caldeira de recuperação de calor</b> <b>composta por:</b> <b>- Superaquecedor</b> <b>- Evaporador</b> <b>- Economizador</b>	$w_{SH} = 8,424. \dot{Q}^{0,87}$	(5.1)
	$w_{Eva} = 13,91. \dot{Q}^{0,68}$	(5.2)
	$w_{Eco} = 2,340. \dot{Q}^{1,15} \quad P < 25 \text{ bar}$	(5.3)
	$w_{Eco} = 2,989. \dot{Q}^{0,97} \quad P > 25 \text{ bar}$	(5.4)
Unidades: t, kW		
<b>Bomba de Condensado</b>	$w = 0,0061. W^{0,95} \quad P = 3,5 \text{ bar}$	(5.5)
Unidades: t, MW		
<b>Turbina Vapor</b>	$w_{ST} = 4,90. \dot{W}^{0,73}$	(5.6)
Unidades: t, kW		
<b>Bomba e Motor</b>	$w = 0,175. \ln(W) - 1,06 \quad P = 135 \text{ bar}$	(5.7)
	$w = 0,0631. \ln(W) - 0,197 \quad P = 25 \text{ bar}$	(5.8)
	$w = 0,125. \ln(W) - 0,0415 \quad P = 4,3 \text{ bar}$	(5.9)
Unidades: t, MW		
<b>Trocador de Calor sem mudança de fase</b>	$w_{HE} = 2,14. \dot{Q}^{0,7}$	(5.10)
Unidades: t, MW		
<b>Condensador</b>	$w_{Cond} = 0,073. \dot{Q}^{0,99}$	(5.11)
Unidades: t, kg/s		
<b>Desaerador</b>	$w_{Dea} = 2,49. \dot{m}_w^{0,7}$	(5.12)

Fonte: (CAVALCANTI, 2016).

Aproximações foram feitas com o devido cuidado como uma forma de minimizar a ausência de dados, tais como: a caldeira ser avaliada como o conjunto do Evaporador, Superaquecedor e Economizador na estimativa de seu peso, o condensador e os aquecedores avaliados com mesma composição que o Evaporador, Economizador e Desaerado; os processos de produção do Economizador, Evaporador, Superaquecedor, Condensador, Desaerador, e Aquecedores de água de alimentação foram associados a trocadores de calor. O peso dos aquecedores de alta e baixa pressão foi estabelecido como 27,5 toneladas (60400 libras) de acordo com os dados de Progress Energy (2007). O peso das bombas de alimentação da caldeira (alta pressão) foram estimados com base em um valor de referência obtido de (Shenyang Blower Works Group 2018).

Tabela 5.6 – Composição e ecoindicador de componentes do sistema.

Componente	Material	Porcentagem do material	Ecoindicador 99 mPts/kg	Pontos específicos mPts/kg
<b>Compressor de ar</b>	Aço	33%	86	131
	Aço de baixa liga	45%	110	
	Ferro fundido	22%	240	
<b>Câmara de Combustão</b>	Aço	33%	86	638
	Aço de alta liga	67%	910	
<b>Turbina a gás e a vapor</b>	Aço	25%	86	704
	Aço de alta liga	75%	910	
<b>Superaquecedor</b>	Aço	25%	86	704
	Aço de baixa liga	75%	910	
<b>Evaporador Economizador Desaerador</b>	Aço	100%	86	86
<b>Bomba</b>	Aço	35%	86	186
	Ferro Fundido	65%	240	
<b>Motor/Gerador Elétrico</b>	Aço	20%	86	410
	Ferro Fundido	60%	240	
	Cobre	15%	1400	
	Alumínio – Material Primário	5%	780	

Fonte: (Adaptado CABRERA, 2010; Cavalcanti, 2016).

Tabela 5.7 – Processo de produção e processo de geração de calor para a fabricação de componentes.

Componente	Processo	Descrição	Ecoindicador 99 mPts por kg, m <sup>3</sup> , MJ	Pontos específicos mPts/kg	
Turbina	Casco 33% do peso	Moldagem: calor de combustão de gás em fornalha	Eficiência de fornalha 60%, calor de fusão 0,47 MJ/kg	5,3 mPts/MJ	0,82
		Soldagem	Porcentagem em peso da solda acrescido 0,5%	4000 mPts/kg solda	20
	Eixo 22% do peso	Fresagem, torneamento ou furação	Porcentagem de material removido em peso 5%	0,8 mPts/m <sup>3</sup> de material removido	1,13
	Palhetas 45% do peso	Moldagem: calor de combustão de gás em fornalha	Eficiência de fornalha 60%, calor de fusão 0,47 MJ/kg	5,3 mPts/MJ	1,12
		40,5% fresagem, torneamento ou furação	Porcentagem em peso da solda acrescido 5%	0,8 mPts/m <sup>3</sup> de material removido	2,07
		4,5% corte/estampagem-aço	1 mm espessura x perímetro	0,00006 mPts/mm <sup>2</sup> de 109uperf.. Cortada	0,02
	<b>Total</b>				25,2
	Trocador de Calor	Furação	Porcentagem de material removido em peso 0,05%	0,8 mPts/m <sup>3</sup> de material removido	0,051
		Soldagem	Porcentagem em peso da solda acrescido 0,3%	4000 mPts/kg solda	12
	<b>Total</b>				12,1
Motor/Gerador	Aço 20%, corte	1 mm espessura x perímetro	0,00006 mPts/mm <sup>2</sup> de 109uperf.. Cortada	8,5E-05	
	Ferro fundido 60%, moldagem: calor de combustão de gás em fornalha	Eficiência de fornalha 60%, calor de fusão 0,47 MJ/kg	5,3 mPts/MJ	2,49	
	Cobre 15%	Extrusão	72 mPts/kg	10,8	
	Alumínio 5%, moldagem: calor de combustão de gás em fornalha	Eficiência 60%. Calor de fusão 0,60 MJ/kg	5,3 mPts/MJ	3,18	
	Soldagem	Porcentagem de peso da solda acrescida 0,01%	4000 mPts/kg solda	0,4	
<b>Total</b>				16,9	

Fonte: (CAVALCANTI, 2016).

Com relação ao descarte e processamento dos resíduos, originados dos equipamentos depois de finalizada a vida útil da planta de geração de energia, os produtos possuem em geral diferentes maneiras de serem dispostos, a reciclagem será tratada como destino final para os materiais de composição dos equipamentos. Segundo Cavalcanti (2016) processos de reciclagem resultam em produtos úteis avaliados como ganhos ambientais, além de minimizar a produção de novos materiais, ao mesmo tempo em que também causam uma determinada carga ambiental. Para metais ferrosos, como no caso dos resíduos dos componentes abordados no estudo, o impacto ambiental do processo é de 24 mPts/kg e evita a produção de -94 mPts/kg, resultando em -70 mPts/kg.

O impacto ambiental (mPts) de cada componente, dado pelo somatório das fases de construção, operação e manutenção, e de descarte, é convertido na taxa de impacto ambiental (mPts/s) considerando o tempo de vida útil do equipamento, que neste caso será de 25 anos de operação com fator de capacidade (FC) de 0,8 (7008 h/ano).

### **5.2.2. ANÁLISE EXERGÉTICA**

A ideia de que algo pode ser destruído é muito útil no projeto e análise de sistemas térmicos, entretanto não se aplica à energia (conceito de primeira lei), mas aplica-se à exergia, que é um conceito de segunda lei. O método de análise exergética é adequado para promover um uso mais eficaz dos recursos energéticos, identificando a causa, a magnitude e a localização das perdas. Do ponto de vista energético, a transferência de energia ao ambiente é apontada como única fonte de causa de ineficiências do sistema, já uma abordagem exergética revela que devem ser consideradas as irreversibilidades inerentes a cada componente do sistema (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996).

Ao contrário da energia, uma parte da exergia fornecida a um sistema é destruída de forma irreversível em todos os processos reais, além disso, tem-se a denominada perda exergética associada a um fluxo de material ou energia rejeitado no ambiente (por exemplo, gases de combustão, água de resfriamento, e perdas de calor). A análise exergética permite quantificar tanto a destruição de exergia quanto as perdas exergéticas. A destruição de exergia é resultado das irreversibilidades de um sistema, e o mau funcionamento e um desempenho abaixo do projeto de um componente tendem a aumentar a destruição de exergia. Em um sistema otimizado a quantidade total de perda e destruição de exergia é justificada por considerações envolvendo custos, materiais, impacto ambiental, entre outros fatores (TSATSARONIS, 1993).

### 5.2.2.1 Ambiente de Referência

O ambiente de referência é um corpo extenso em estado de perfeito equilíbrio termodinâmico, de forma que não possui gradientes ou diferenças de pressão, temperatura, potencial químico, energia cinética ou potencial. Sendo assim, qualquer sistema fora do ambiente de referência que tenha um ou mais parâmetros diferindo do parâmetro ambiental correspondente, tem potencial de realizar trabalho. Sendo o ambiente de referência, portanto, um meio de referência para avaliar o potencial de trabalho de sistemas (KOTAS, 1985).

O ambiente considerado é composto de substâncias comuns às que existem em abundância na atmosfera, oceanos e na crosta terrestre, em suas formas estáveis como existem naturalmente, sem a possibilidade de desenvolver trabalho a partir de interações, físicas ou químicas, entre partes do ambiente. O ambiente de referência é modelado como um sistema compressível, extenso e uniforme em temperatura ( $T_0$ ) e pressão ( $P_0$ ) (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996).

Rosen e Dincer (2004) estabelecem que o ambiente de referência seja normalmente utilizado como  $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$ , e  $273,15 \text{ K} \leq T_0 \leq 323,15 \text{ K}$ , e a composição química é considerada semelhante à da região acessível da crosta terrestre.

Se a pressão, temperatura, velocidade, elevação, ou a composição de um sistema são diferentes do ambiente de referência estabelecido, há a possibilidade de desenvolver trabalho. E à medida que o sistema caminha para o estado do ambiente, a capacidade de realização de trabalho diminui e torna-se nula quando sistema e o ambiente, em repouso um em relação ao outro, estão em equilíbrio, atingindo o chamado estado morto. Neste estado morto, as condições de equilíbrio mecânico, térmico e químico entre sistema e ambiente são satisfeitas (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996).

### 5.2.2.2 Componentes da Exergia

De acordo com Tsatsaronis (1993) excluindo os efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e interfaciais, a Exergia Total ( $b^{TOT}$ ) de uma corrente de matéria, pode ser dividida em quatro componentes, conforme Figura 5.8: Exergia Cinética ( $b^{KN}$ ), Exergia Potencial ( $b^{PT}$ ), Exergia Física ( $b^{PH}$ ) e Exergia Química ( $b^{CH}$ ), conforme apresentado pela Equação (5.13).

$$b^{TOT} = b^{KN} + b^{PT} + b^{PH} + b^{CH} \quad (5.13)$$

<i>Exergia Total</i> $B^{TOT}$	<i>Exergia Térmica</i>	<i>Exergia Cinética</i> $B^{KN}$	
		<i>Exergia Potencial</i> $B^{PT}$	
		<i>Exergia Física</i> $B^{PH}$	$B^{\Delta T}$
		<i>Exergia Química</i> $B^{CH}$	
		$B^{\Delta P}$	

Figura 5.8 – Parcelas da exergia total.  
Fonte: (Adaptado de Cavalcanti, 2016).

A Exergia Física ( $b^{PH}$ ) é dependente das propriedades termodinâmicas do sistema, como pressão e temperatura, sendo expressa pela Equação (5.14).

$$b^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.14)$$

Sendo:

$h$  – Entalpia referente às condições do fluxo (kJ/kg);

$h_0$  – Entalpia referente às condições do ambiente de referência (kJ/kg);

$s$  – Entropia referente às condições do fluxo (kJ/kg.K);

$s_0$  – Entropia referente às condições do ambiente de referência (kJ/kg.K);

$T_0$  – Temperatura do ambiente de referência (K).

A Exergia Química ( $b^{CH}$ ) se refere a processos que envolvam reações químicas, neste caso considerando a composição química constante dos fluxos, a exergia química será cancelada nas equações de balanço de exergia envolvendo vapor, entretanto será considerada para o combustível e para os gases de exaustão do processo de combustão.

Exergia cinética ( $b^{KN}$ ) e potencial ( $b^{PT}$ ) são iguais à energia cinética e potencial, sendo expressas pela Equação (5.15) e Equação (5.16), respectivamente.

$$b^{KN} = \frac{1}{2} m \vec{v}^2 \quad (5.15)$$

$$b^{PT} = mgz \quad (5.16)$$

### 5.2.2.3 Cálculo da exergia dos Fluxos

O cálculo da exergia pode ser avaliada para diferentes tipos de fluxos de um sistema, em equações descritas por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), Kotas (1985) e Tsatsaronis (1993).

### - Exergia de um fluxo de calor

A exergia de um fluxo associado à transferência de calor para, ou, a partir do sistema durante o processo pode ser interpretado como a transferência exergética associada à transferência de energia pelo calor, de uma temperatura mais quente  $T$  a outra mais fria  $T_0$ , e pode ser expressa pela Equação (5.17).

$$\dot{B}_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (5.17)$$

### - Exergia de um fluxo de trabalho

A exergia de um fluxo associado ao trabalho líquido pode ser interpretado como a transferência exergética associada a transferência de energia pelo trabalho, expressa pela Equação (5.18).

$$\dot{B}_W = \dot{W} \quad (5.18)$$

### - Exergia dos fluxos de água e fluidos térmicos

O fluxo de exergia da água e demais fluidos térmicos, quando não participam de processos químicos, operando geralmente em circuito fechado, é determinado pelo componente da exergia física, e pode ser expressa pela Equação (5.19).

$$\dot{B}^{PH} = \dot{m} \cdot b^{PH} \quad (5.19)$$

#### 5.2.2.4 Cálculo da Exergia Química do Combustível

Como apresentado no Apêndice C em Kotas (1985), para substâncias orgânicas secas contidas em combustíveis fósseis sólidos consistindo de C, H, O e N com uma relação de massa de oxigênio para carbono menor que 0,667, o fator  $\varphi$  pode ser obtido em termos de razões de massa, expressa na Equação (5.20).

$$\varphi_{seco} = 1,0437 + 0,1882 \frac{H}{C} + 0,0610 \frac{O}{C} + 0,0404 \frac{N}{C} \quad (5.20)$$

Sendo C, H,O e N são as frações mássicas de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio contidas no combustível, respectivamente. A precisão da expressão é estimada como melhor que  $\pm 1\%$ .

Para os combustíveis fósseis secos com a relação de massa de  $2,67 > \frac{O}{C} > 0,667$ , incluindo madeira, o fator  $\varphi$  pode ser obtido pela Equação (5.21).

$$\varphi_{seco} = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{H}{C} - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \frac{H}{C}\right) + 0,0383 \frac{N}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \quad (5.21)$$

O conteúdo exergético do combustível obtém-se pela Equação (5.22), que não negligencia no cálculo as parcelas de umidade e enxofre presentes, sendo W e S as frações mássicas de umidade e enxofre, respectivamente.

$$b^{CH} = [PCI + 2442 \cdot W] \cdot \varphi_{seco} + 9417 \cdot S \quad (5.22)$$

### 5.2.2.5 Cálculo da Exergia dos Gases de Exaustão

De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) a exergia química de uma mistura de n gases pode ser calculada como apresentado pela Equação (5.23), tal equação é válida para misturas contendo outros gases além daqueles presentes no ambiente de referência, como por exemplo, gases de processos de combustão. A taxa de exergia do fluxo de gases pode ser obtida pela Equação (5.24). A fração molar dos gases ( $y_i$ ) é obtida a partir da Equação (5.25), sendo  $\dot{n}_i$  a vazão molar de um componente específico e  $\dot{n}_T$  a vazão molar total.

$$b_{Gases}^{CH} = \sum_i y_i \cdot b_{CH}^0 + R \cdot T_0 \cdot \sum_i y_i \cdot \ln(y_i) \quad (5.23)$$

$$\dot{B}_{Gases}^{CH} = \dot{n}_T \cdot b_{Gases}^{CH} \quad (5.24)$$

$$y_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_T} \quad (5.25)$$

Para obtenção da parcela de exergia física dos gases de exaustão, o cálculo da variação de entropia ( $\Delta s$ ) e variação de entalpia ( $\Delta h$ ) dos componentes da mistura de gases será realizado através expressão polinomial em função da temperatura que representa o calor específico ( $C_p$ ) de acordo com Sandler (2006), na qual os coeficientes termodinâmicos (a, b, c e d) são especificados conforme o componente químico considerado, e são dados na Tabela 5.8 As Equações (5.26) e (5.27) apresentam a representação da integração da expressão polinomial em função da temperatura (K) para obtenção da variação de entalpia e entropia, respectivamente.

$$\Delta h = \int_{T_0}^T C_p dT = h - h_0 = \int_{T_0}^T (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3) dT \quad (5.26)$$

$$\Delta s = \int_{T_0}^T \frac{C_p}{T} dT = s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{(a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3)}{T} dT \quad (5.27)$$

Tabela 5.8 – Coeficientes termodinâmicos, e valor de exergia química padrão dos compostos presentes nos gases de exaustão.

Composto	a	b.10 <sup>-2</sup>	c.10 <sup>-5</sup>	d.10 <sup>-9</sup>	b <sub>CH</sub> <sup>0</sup> (kJ/kmol)
N <sub>2</sub>	28,883	-0,157	0,808	-2,871	720
CO <sub>2</sub>	22,243	5,977	3,499	7,464	20140
H <sub>2</sub> O	32,218	0,192	1,055	-3,593	11790
O <sub>2</sub>	25,46	1,519	-0,715	1,311	3970
SO <sub>2</sub>	25,762	5,791	-3,809	8,607	303500

Fonte: SANDLER (2006), KOTAS (1985).

Para o cálculo da variação de entropia ( $\Delta s$ ) e variação de entalpia ( $\Delta h$ ) para o CO<sub>2</sub> será utilizado uma segunda expressão polinomial apresentada por Sandler (2006), a integração da expressão polinomial em função da temperatura para obtenção da variação de entalpia e entropia é dada pelas Equações (5.28) e (5.29), respectivamente.

$$h - h_0 = \int_{T_0}^T \left( 75,464 - 1,872 \cdot 10^{-4} \cdot T - \frac{661,42}{\sqrt{T}} \right) dT \quad (5.28)$$

$$s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{\left( 75,464 - 1,872 \cdot 10^{-4} \cdot T - \frac{661,42}{\sqrt{T}} \right)}{T} dT \quad (5.29)$$

A taxa de exergia total dos gases de exaustão é obtida conforme Equação (5.30).

$$\dot{B}_{Gases}^{Total} = \sum \dot{B}_{Gases}^{PH} + \dot{n}_T \cdot \sum b^{CH} \quad (5.30)$$

### 5.2.2.6 Balanço Exergético do Volume de Controle

Assim como a massa, energia e entropia, a exergia é uma propriedade extensiva, de modo que também pode ser transferida para dentro ou para fora de um volume de controle onde as correntes de matéria entram e saem. Uma balanço exergético indica que o aumento ou a diminuição total da exergia dentro do limite do sistema ( $\Delta B_{SISTEMA}^{TOTAL}$ ) mais a destruição exergética (Irreversibilidade I) é igual à diferença entre o total de exergia transferida para dentro e para fora através da fronteira do volume de controle, conforme Figura 5.9. A transferência de exergia através do limite inclui a transferência exergética associada à transferência de calor ( $\dot{B}_Q$ ), trabalho ( $\dot{B}_W$ ) e massa (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996; TSATSARONIS, 1993).

$$\sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e b_e - \sum_s \dot{m}_s b_s = \dot{B}_D \quad (5.31)$$

O termo  $\dot{m}$  representa a vazão mássica no volume de controle (kg/s), e os subscritos  $e$  e  $s$  denotam entradas e saídas, respectivamente.

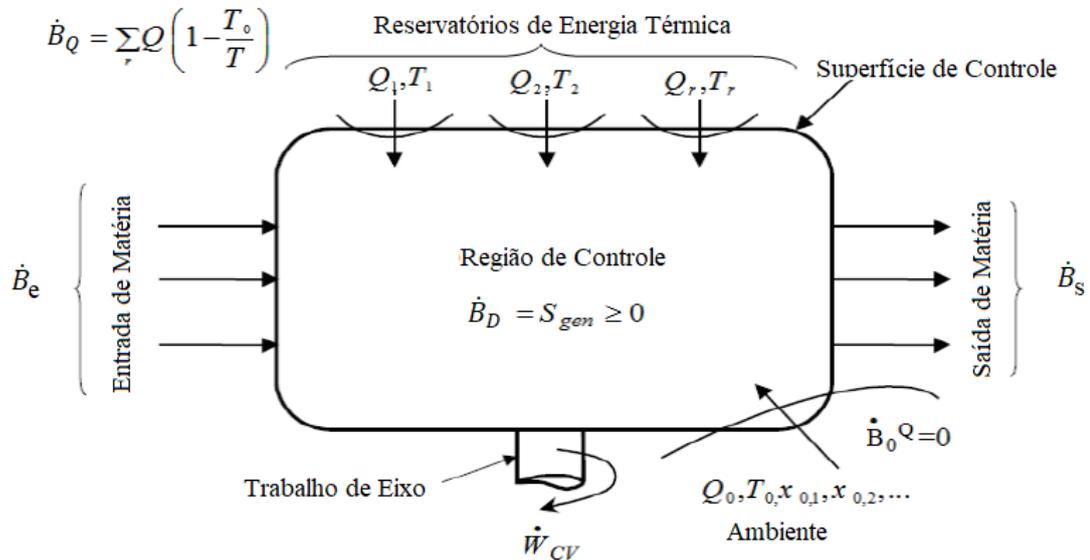


Figura 5.9 – Apresentação esquemática do balanço exerético para um volume de controle.  
Fonte: (Adaptado de Muhammed, 2015).

As irreversibilidades ( $I$ ) estão presentes nos processos reais e estão associadas a fatores como atrito, mistura de substâncias, turbulência, troca de calor com diferença finita de temperatura, reações químicas espontâneas, e outros, e podem ser determinadas de forma simplificada pela diferença entre as entradas (Recursos – F) e saídas (Produtos – P) e perdas (L) de exergia do volume de controle, conforme Equação (5.32). A Figura 5.10 traz uma representação gráfica do balanço exerético de um sistema genérico, evidenciando as irreversibilidades (destruição de exergia), e as perdas.

$$I = \sum F - \sum P - \sum L \quad (5.32)$$

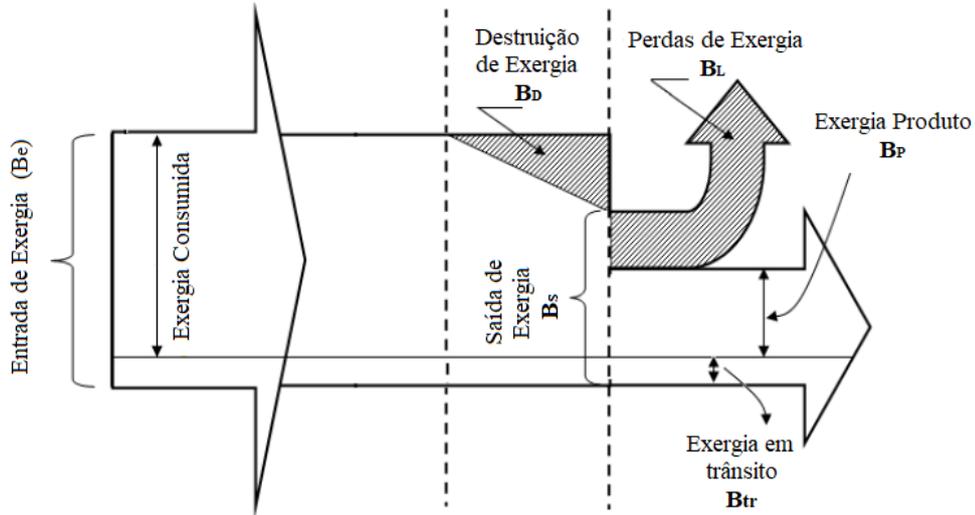


Figura 5.10 – Representação gráfica do balanço global de exergia.  
Fonte: (Adaptado de Muhammed, 2015).

As taxas de destruição de exergia ( $\dot{I}$ ) provêm medidas das ineficiências termodinâmicas, a Equação (5.33) apresenta o cálculo do percentual de destruição de exergia de cada componente do sistema, permitindo identificar onde estão localizadas as maiores irreversibilidades no sistema.

$$\delta_i = \frac{\dot{I}_i}{\sum \dot{I}_i} \quad (5.33)$$

De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) para definir a eficiência exergetica, conforme Equação (5.34), é necessário identificar tanto o produto quanto os recursos para o sistema que está sendo analisado, expressos em termos de exergia. O produto representa o resultado desejado produzido pelo sistema. Assim, a definição do produto deve ser consistente com o propósito de uso do sistema. O combustível representa os recursos gastos para gerar o produto e não está necessariamente restrito a ser um combustível real, como gás natural, petróleo ou carvão.

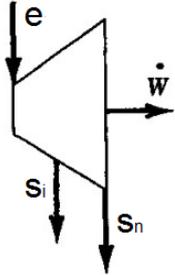
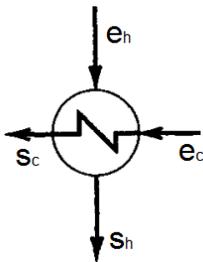
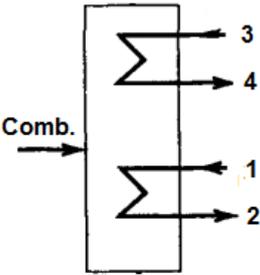
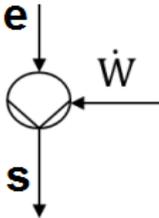
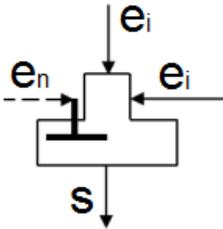
$$\varepsilon = \frac{\dot{B}_P}{\dot{B}_F} = 1 - \frac{\dot{I}_i + \dot{B}_L}{\dot{B}_F} \quad (5.34)$$

A eficiência exergetica total da instalação pode ser dada pela Equação (5.35), onde o subscrito  $T$  refere-se a condição total.

$$\varepsilon_T = \frac{\dot{B}_{P,TOTAL}}{\dot{B}_{F,TOTAL}} = 1 - \frac{\sum \dot{I}_i + \dot{B}_L}{\dot{B}_{F,TOTAL}} \quad (5.35)$$

O cálculo das irreversibilidades e eficiências exergeticas dos equipamentos pode ser verificado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Cálculo das Irreversibilidades e Eficiências Exergéticas dos Equipamentos.

Equipamento	Irreversibilidade	Eficiência Exergética
<p><b>Turbina</b></p> 	$\dot{i} = \dot{B}_e - \sum_{i=1}^n \dot{B}_{s,i} - \dot{B}_W$	$\varepsilon = \frac{\dot{B}_W}{\dot{B}_e - \sum_{i=1}^n \dot{B}_{s,i}}$
<p><b>Aquecedores</b></p> 	$\dot{i} = \dot{B}_{eh} + \dot{B}_{ec} - \dot{B}_{sh} - \dot{B}_{sc}$	$\varepsilon = \frac{\dot{B}_{sc} - \dot{B}_{ec}}{\dot{B}_{eh} - \dot{B}_{sh}}$
<p><b>Caldeira com reaquecimento</b></p> 	$\dot{i} = \dot{B}_{Comb.} - [(\dot{B}_2 - \dot{B}_1) + (\dot{B}_4 - \dot{B}_3)]$	$\varepsilon = \frac{(\dot{B}_2 - \dot{B}_1) + (\dot{B}_4 - \dot{B}_3)}{\dot{B}_{Comb.}}$
<p><b>Bomba</b></p> 	$\dot{i} = \dot{B}_W - (\dot{B}_s - \dot{B}_e)$	$\varepsilon = \frac{(\dot{B}_s - \dot{B}_e)}{\dot{B}_W}$
<p><b>Desaerador</b></p> 	$\dot{i} = \sum_{i=1}^n \dot{B}_{ei} - \dot{B}_s$	$\varepsilon = \frac{\dot{B}_s}{\sum_{i=1}^n \dot{B}_{ei}}$

Fonte: Próprio autor.

### 5.2.3. ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL

A atribuição dos resultados da análise ambiental aos fluxos de exergia é realizada de modo análogo para a atribuição de custos para fluxos exergéticos na Exergoeconomia. Existem diferentes métodos para a atribuição de custos para os fluxos exergéticos como o *Theory of the Exergetic Cost* de Lozano e Valero (1993) e o método *SPECO – Specific Exergy Costing* de Lazzaretto e Tsatsaronis (2006).

#### 5.2.3.1 Método SPECO

Neste estudo será utilizado o método SPECO, que é baseado na exergia específica, no custo do produto e do combustível por unidade de exergia, eficiência exergética, e equações auxiliares.

De acordo com Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) o método consiste em três passos:

##### 1) Identificação dos fluxos exergéticos

Inicialmente deve ser decidido se a análise dos componentes será conduzida utilizando exergia total ou formas separadas da exergia de uma corrente de matéria (exergia térmica, mecânica, e química), de forma que a análise de formas exergéticas separadas fornece maior precisão dos resultados. Após a decisão do escopo da análise com relação as formas de exergia, todos os fluxos de exergia associados com a entrada e saída de fluxos de matéria e energia são identificados e os valores de exergia são calculados.

##### 2) Definição de Recursos e Produtos

O Produto é definido como igual à soma de:

- Todos os valores exergéticos a serem considerados na saída, inclusa a exergia dos fluxos de energia gerada no componente;

- Todo acréscimo de exergia entre a entrada e a saída que estão de acordo com o propósito do componente.

O Recurso é definido como igual a;

- Todos os valores exergéticos a serem considerados na entrada, inclusa a exergia dos fluxos de energia fornecida ao componente, mais;

- Toda redução de exergia entre a entrada e saída, ou seja, as remoções exergéticas dos respectivos fluxos de matéria, menos;

- Todo o incremento de exergia que não estão de acordo com o propósito do componente.

Decisões devem ser tomadas observando o propósito do componente, de forma a definir as exergias do produto e do recurso.

### 3) Equações de custo

Em geral, existe um número de fluxos ( $m$ ) maior do que o número de componentes ( $n$ ), e quando define-se a matriz de incidência  $A$  [ $n \times m$ ] percebe-se que são necessárias as equações auxiliares. No método SPECO as equações auxiliares são obtidas a partir dos Princípios P (Produto) e F (Recurso).

Em geral, se há  $N_s$  fluxos saindo do componente sendo considerado, temos  $N_s$  fluxos desconhecidos e apenas uma equação, a equação de balanço de impacto ambiental do componente. Portanto, precisamos formular  $N_s - 1$  equações auxiliares para cada componente baseadas nos Princípios P e F.

#### 5.2.3.1.1 Princípios P e F

O Princípio F refere-se à remoção de exergia de uma corrente exergética dentro do componente, quando para este fluxo a diferença de exergia entre a entrada e saída é considerada na definição do recurso. Em linha geral, o princípio F afirma que o custo exergético específico associado a remoção de exergia de um fluxo do recurso deve ser igual ao custo exergético específico médio em que a exergia removida foi fornecida ao mesmo fluxo em componentes a montante. Dessa forma, o número de equações auxiliares obtidas pelo princípio F é sempre igual ao número  $N_{s,F}$  de saídas de fluxos exergéticos associados à definição do recurso para o componente.

Um exemplo de aplicação do princípio F aplicado a um trocador de calor que opera acima da temperatura ambiente, mostrado na Figura 5.11, é apresentado por Meyer *et. al* (2009): exergia do fluxo quente é transferida ao fluxo frio, de forma que a redução na exergia do fluxo quente é a exergia do recurso do componente, e de acordo com o princípio F, o impacto ambiental específico do fluxo quente permanece constante, conforme Equação (5.36):

$$e_4 = e_3 \quad (5.36)$$

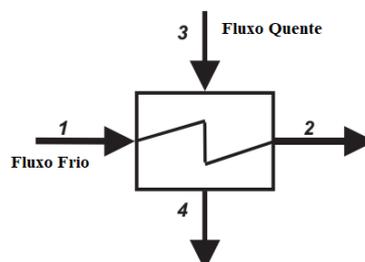
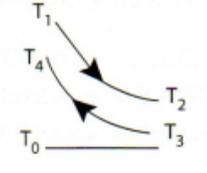
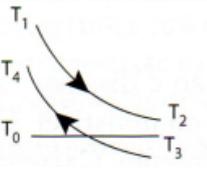
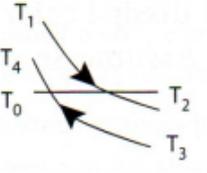
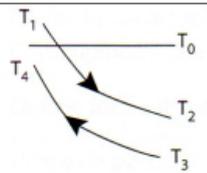
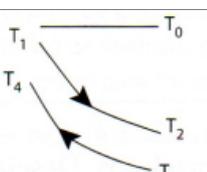


Figura 5.11 - Esquema de um trocador de calor.

Para trocadores de calor, o recurso e o produto dos trocadores de calor são variados porque a finalidade dos trocadores de calor muda juntamente com a temperatura das correntes exérgicas na entrada e na saída. Desta forma, para diferentes definições de recurso e produto, diferentes equações auxiliares são formuladas. A Tabela 5.10 apresenta diferentes casos para obtenção das equações auxiliares para trocadores de calor.

Tabela 5.10 - Diferentes casos para trocadores de calor e suas respectivas equações auxiliares.

	Todas as temperaturas $> T_0$	$c_1 = c_2$
	$T_2, T_4 > T_0$ $T_3 < T_0$	$c_1 = c_2$
	$T_4 > T_0$ $T_3, T_2 < T_0$	$c_2 = c_4$
	$T_1 > T_0$ $T_2, T_3, T_4 < T_0$	$c_3 = c_4$
	Todas as temperaturas $< T_0$	$c_3 = c_4$

Fonte: (CAVALCANTI, 2016; ZHAO, 2015).

O Princípio P refere-se ao suprimento de exergia para um fluxo exérgico dentro de um determinado componente. Tal princípio afirma que cada unidade de exergia é fornecida a qualquer fluxo associado ao produto ao mesmo custo médio, denotado por  $c_p$ . Cada fluxo de exergia deve estar associado, uma única vez, ou ao combustível ou ao produto.

Como cada fluxo ao qual a exergia é fornecida corresponde a um fluxo existente, o número de equações auxiliares provenientes do princípio P é sempre igual à  $N_{s,p} - 1$ , onde  $N_{s,p}$  é o número de fluxos de exergia incluídos na definição de produto.

### 5.2.3.2 Aplicação da metodologia Exergoambiental

De acordo com Meyer *et al.* (2009) e Petrakopoulou (2011) a metodologia descrita descreve as variáveis para a análise exergoambiental como descrito a seguir:

A taxa de impacto ambiental ( $\dot{E}_j$ ) corresponde ao impacto ambiental expresso em pontos do ecoindicador por unidade de tempo (*Pts/s* ou *mPts/s*). O impacto ambiental específico  $e_j$ , também chamado de custo ambiental específico, é a média do impacto ambiental associado com a produção do  $j$ -ésimo fluxo por unidade de exergia do mesmo fluxo (*Pts/GJ* ou *mPts/GJ*). A taxa de impacto ambiental ( $\dot{E}_j$ ) do fluxo material  $j$  é o produto de sua taxa de exergia  $\dot{B}_j$  e o impacto ambiental específico  $e_j$ , conforme Equação (5.37).

$$\dot{E}_j = \dot{B}_j \cdot e_j \quad (5.37)$$

As taxas de impacto ambiental associadas com a transferência de calor ( $\dot{Q}$ ) e potência ( $\dot{W}$ ) podem ser obtidas a partir da Equação (5.38) e (5.39), respectivamente.

$$\dot{E}_q = \dot{B}_q \cdot e_q \quad (5.38)$$

$$\dot{E}_w = \dot{B}_w \cdot e_w \quad (5.39)$$

O impacto ambiental específico para os fluxos podem ser obtidos considerando as relações funcionais entre os componentes do sistema, isto é realizado pela formulação dos balanços de impacto ambiental e equações auxiliares.

O termo relacionado à taxa de impacto ambiental do componente  $k$ , denotado por  $\dot{Y}_k$ , é obtido no ACV descrito anteriormente, sendo a soma do impacto ambiental de: (a) construção ( $\dot{Y}_k^{CO}$ ), (b) operação e manutenção ( $\dot{Y}_k^{OM}$ ), e (c) descarte ( $\dot{Y}_k^{DI}$ ), para o  $k$ -ésimo componente, dado pela Equação (5.40).

$$\dot{Y}_k = \dot{Y}_k^{CO} + \dot{Y}_k^{OM} + \dot{Y}_k^{DI} \quad (5.40)$$

O balanço de impacto ambiental para o  $k$ -ésimo componente indica que a soma dos impactos ambientais associados com todos os fluxos de entrada, do termo relacionado à produção de poluentes dentro do componente ( $\dot{E}_k^{PF}$ ), mais o termo relacionado ao impacto ambiental do componente, é igual a soma dos impactos ambientais associados com todos os fluxos de saída, a Equação (5.41) apresenta o balanço de impacto para o  $k$ -ésimo componente.

$$\sum_{j=1}^n \dot{E}_{j,k,e} + \dot{Y}_k + \dot{E}_k^{PF} = \sum_{j=1}^m \dot{E}_{j,k,s} \quad (5.41)$$

O termo relacionado à taxa formação de poluentes dentro do componente é responsabilizado ao componente específico, representando o impacto potencial que poderia ser causado pela geração de poluentes. A formação de poluentes é definida somente quando uma reação química acontece no local, nos demais casos o termo é igual à zero. É calculado pela Equação (5.42):

$$\dot{E}_k^{PF} = \sum_i e_i^{PF} (\dot{m}_{i,s} - \dot{m}_{i,e}) \quad (5.42)$$

Sendo,  $\dot{m}_s$  e  $\dot{m}_e$  os fluxos mássicos de poluentes saindo e entrando no componente  $k$ , respectivamente.

O sistema pode ser representado mediante uma matriz de incidência expandida  $\bar{A}$ , multiplicada pelo vetor coluna  $\dot{E}$  que representa as taxas de impacto ambiental a serem calculadas, e igual ao vetor coluna  $\bar{Y}$  que contém as atribuições ambientais externas para os fluxos, de forma que o balanço de impacto ambiental pode ser representado pela Equação (5.43).

$$\bar{A} x \dot{E} = \bar{Y} \quad (5.43)$$

Onde,

$$\bar{A} = \left( \frac{A}{\alpha} \right) \text{ e } \bar{Y} = \left( \frac{-\dot{Y}}{\dot{E}_{ext}} \right)$$

Sendo  $\alpha$  a matriz complementar cujo tamanho seria  $[(m - n) \times m]$ , obtida pelas equações auxiliares já abordadas. E o vetor  $\dot{E}_{ext}$  cujo tamanho seria  $[(m - n) \times 1]$ , sendo composto pelos fluxos externos entrando no sistema, tal como o combustível que alimenta a caldeira, cujas taxas de impacto ambiental são conhecidas.

Definindo a matriz e o vetor complementar, o sistema adquire forma quadrada, formado por  $m$  equações lineares e  $m$  incógnitas, possibilitando sua resolução.

Assim como na análise exergética, quando obtemos as taxas de exergia associadas com os produtos  $\dot{B}_{P,k}$  e dos recursos  $\dot{B}_{F,k}$ , na análise exergoambiental calcula-se as taxas de impacto ambiental associadas com os produtos  $\dot{E}_{P,k}$  e com os recursos  $\dot{E}_{F,k}$  do  $k$ -ésimo componente. A média de impacto ambiental específico de produto e recurso é obtida pela Equação (5.44) e Equação (5.45), respectivamente.

$$e_{P,k} = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{B}_{P,k}} \quad (5.44)$$

$$e_{F,k} = \frac{\dot{E}_{F,k}}{\dot{B}_{F,k}} \quad (5.45)$$

A taxa de impacto ambiental da destruição de exergia é calculada pela Equação (5.46):

$$\dot{E}_{D,k} = e_{F,k} \dot{B}_{D,k} \quad (5.46)$$

### 5.2.3.2.1 Componentes Dissipativos

Em sistemas de conversão de energia alguns componentes que os compõem podem não ter um propósito exergético, como por exemplo, unidades de tratamento de gases, resfriadores, ou válvulas. Estes componentes reduzem o conteúdo exergético de um fluxo sem fornecer de forma imediata um efeito útil, mas eles servem outros componentes produtivos ou o sistema todo diretamente. Nestes casos não é possível definir do ponto de vista termodinâmico um produto para estes componentes.

De acordo com Meyer *et al.* (2009) o impacto ambiental devido às ineficiência termodinâmicas dentro dos componentes dissipativos e o impacto ambiental relacionado ao componente deveriam ser carregados aos componentes produtivos, ou para o produto do sistema global se este está sendo servido diretamente pelo componente dissipativo.

O balanço de impacto ambiental para um componente dissipativo pode ser escrito como apresentado na Equação (5.47). Sendo  $\dot{E}_{aux}$  a taxa de impacto associado com o uso de fluidos auxiliares dentro do componente, e  $\dot{E}_{dif,dc}$  a taxa de impacto ambiental associada ao componente dissipativo e que deve ser atribuída a outros componentes ou ao produto do sistema.

$$\dot{E}_e + \dot{E}_{aux} + \dot{Y}_{dc} = \dot{E}_s + \dot{E}_{dif,dc} \quad (5.47)$$

### 5.2.3.2.2 Indicadores Exergoambientais

A diferença relativa  $r_{b,k}$  entre o impacto ambiental específico do produto  $e_{P,k}$  e do recurso  $e_{F,k}$  para o  $k$ -ésimo componente, é dado pela Equação (5.48).

$$r_{b,k} = \frac{e_{P,k} - e_{F,k}}{e_{F,k}} \quad (5.48)$$

Esta variável exergoambiental é um indicador do potencial para redução do impacto associado com o componente. Um valor relativamente alto de  $r_{b,k}$  indica, em geral que o impacto ambiental correspondente ao componente pode ser reduzido com um menor esforço que para aqueles componentes com um menor valor de  $r_{b,k}$ .

As fontes de formação de impacto ambiental no componente são comparadas com o auxílio do fator exergoambiental  $f_{b,k}$ , o qual expressa a contribuição relativa do impacto ambiental relacionado ao componente  $\dot{Y}_k$  para o impacto ambiental total associado com o  $k$ -ésimo componente, conforme Equação (5.49).

$$f_{b,k} = \frac{\dot{Y}_k + \dot{E}_k^{PF}}{\dot{Y}_k + \dot{E}_k^{PF} + \dot{E}_{D,k}} \quad (5.49)$$

O impacto ambiental associado ao componente ( $\dot{Y}_k$ ) é dominante para o casos onde o valor de  $f_{b,k}$  é maior que aproximadamente 0,7, enquanto a destruição de exergia é a fonte dominante de impacto ambiental quando o valor de  $f_{b,k}$  é menor que aproximadamente 0,3.

## **CAPÍTULO 6**

### **ESTUDO DE CASO: ANÁLISE COMPARATIVA DE PLANTAS SUBCRÍTICA, SUPERCRÍTICA E ULTRASSUPERCRÍTICA**

No intuito de aplicar a metodologia Exergoambiental apresentada no capítulo de Fundamentação Teórica, é apropriada a análise de instalações térmicas de geração de energia elétrica. É favorável para consolidar os conceitos da metodologia, estabelecer um comparativo entre diferentes unidades termelétricas, possibilitando mensurar em que escala as diferentes tecnologias direcionam a uma melhoria dos indicadores ambientais da geração de energia elétrica em unidades a carvão.

A análise é aplicada para três diferentes unidades termelétricas a carvão mineral dotadas de diferentes tecnologias em seu projeto, sendo elas subcrítica, supercrítica e ultrassupercrítica, respectivamente.

#### **6.1. UNIDADE TERMELÉTRICA SUBCRÍTICA**

A central termelétrica subcrítica selecionada para análise consiste em uma unidade de geração de 500 MW de potência, composta por um conjunto de turbinas de alta pressão, pressão intermediária e de baixa pressão. A unidade opera com um estágio de reaquecimento de vapor antes da entrada na turbina de pressão intermediária, a partir de uma linha de extração da turbina de alta pressão. Além do reaquecimento possui sistema regenerativo composto por 6 extrações de vapor na linha das turbinas.

O esquema da planta subcrítica é apresentado na Figura 6.1 e é possível verificar os principais componentes: Caldeira, Turbina de Alta Pressão (HPT), Turbina de Pressão Intermediária (IPT), Turbina de Baixa Pressão (LPT), Condensador, Bomba de Extração de Condensado (CEP), três aquecedores de Baixa Pressão (LPH), Desaerador, Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP), e dois Aquecedores de Alta Pressão (HPH).

Os parâmetros termodinâmicos principais de operação são 16,67 MPa / 537°C / 537°C, com fluxo mássico de 425,8 kg/s operando em plena carga. O condensador opera a uma pressão de 0,0103 MPa. Todos os demais fluxos podem ser consultados na Tabela 6.1. Os valores de entalpia e entropia de cada fluxo foram obtidos através do software *Computer-Aided Thermodynamic Table – CATT* (Versão 1.0, 1996, John Wiley e Sons, Inc). A exergia (b) foi obtida pela Equação (5.14), e o fluxo exergético ( $\dot{B}$ ) obtido pela Equação (5.19). O cálculo da exergia dos gases de exaustão da caldeira está apresentado no Apêndice C. Os cálculos de potência de eixo das turbinas, potência das bombas, e vazão de água de resfriamento estão detalhados no Apêndice A.

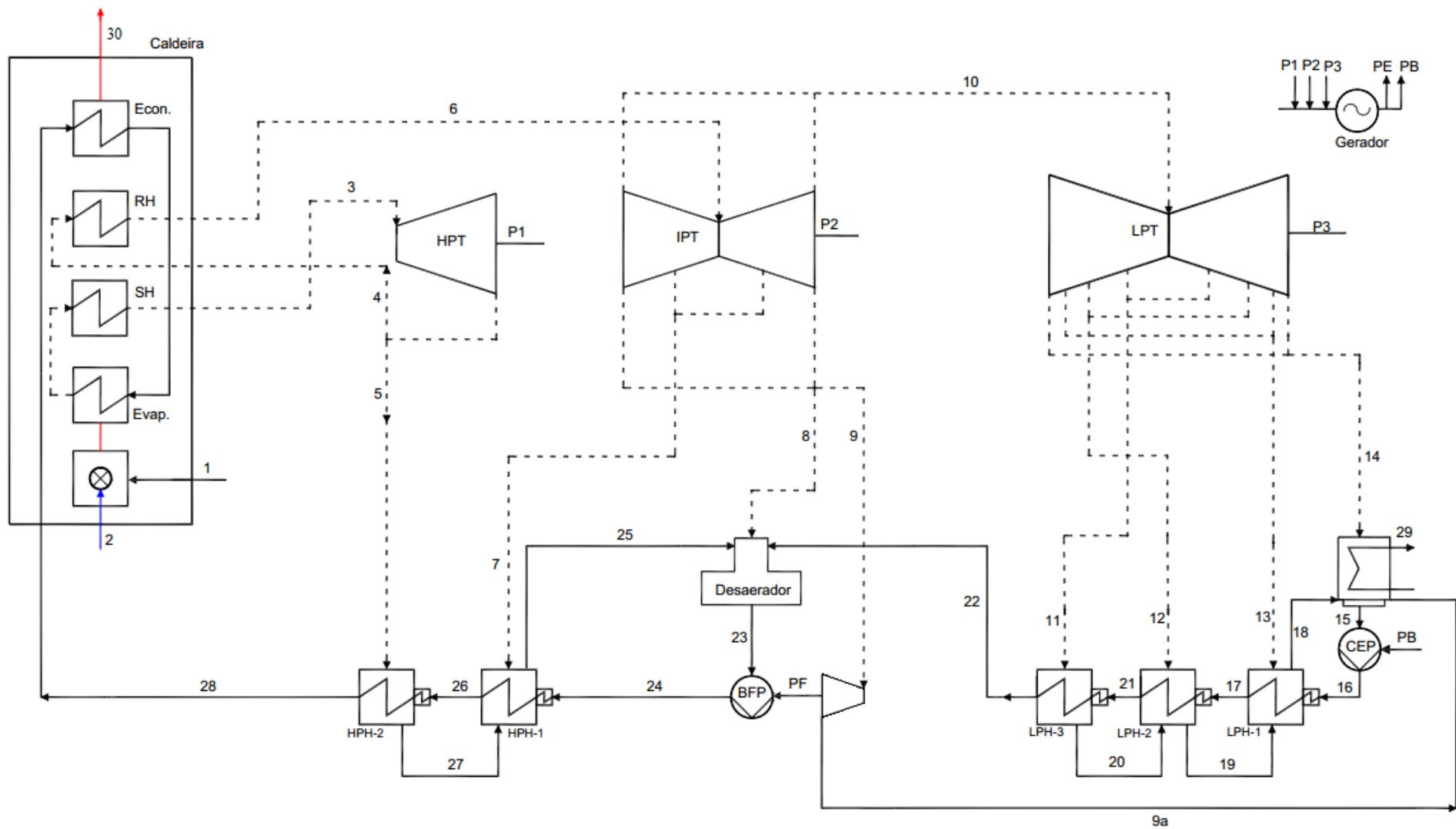


Figura 6.1 - Diagrama Esquemático da Usina Subcrítica 500 MW.

Tabela 6.1 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Subcrítico.

Fluxos	Vazão Mássica (kg/s)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Tipo de Fluxo	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)	$\dot{B}$ (kW)
1	45,63	0,103	25	Combustível	-	-	-	1415586,081
2	-	0,101	25	Ar	-	-	0,000	0,000
3	425,8	16,670	537	Vapor	3394	6,409	1487,777	633495,508
4	380,5	4,410	339,4	Vapor	3055	6,481	1127,310	428941,586
5	45,3	4,410	339,4	Vapor	3055	6,481	1127,310	51067,159
P1	-	-	-	Potência Eixo	-	-	-	144346,200
6	380,5	3,970	537	Vapor	3530	7,201	1387,642	527997,912
7	21	1,740	416,1	Vapor	3287	7,248	1130,629	23743,215
8	24	0,730	303,3	Vapor	3065	7,289	896,405	21513,723
9	18,6	0,730	303,3	Vapor	3065	7,289	896,405	16673,136
9a	18,6		x=0,833	Líquido/Vapor	2185,92	6,9	133,305	2479,482
10	316,9	0,730	303,3	Vapor	3065	7,289	896,405	284070,790
P2	-	-	-	Potência Eixo				172270,500
11	12,2	0,260	192,6	Vapor	2852	7,349	665,516	8119,297
12	23,3	0,130	132,1	Vapor	2738	7,401	536,012	12489,088
13	10,2	0,026	65,8	Vapor	2620	7,819	293,386	2992,534
14	271,2	0,010	x=0,93	Líquido/Vapor	2417	7,625	148,227	40199,093
P3	-	-	-	Potência Eixo	-	-	-	190494,300
PE	-	-	-	Eletricidade	-	-	-	500000,000
15	335,5	0,010	46,4	Líquido	194,3	0,6569	3,066	1028,562
PB	-	-	-	Eletricidade	-	-	-	335,500
16	335,5	0,730	46,5	Líquido	195,3	0,6579	3,768	1264,033
17	335,5	0,715	67,96	Líquido	284,96	0,9294	12,480	4187,001
18	45,7	0,026	65,8	Líquido	275,4	0,9033	10,702	489,063
19	35,5	0,130	107,1	Líquido	449,1	1,387	40,186	1426,619
20	12,2	0,260	128,7	Líquido	540,9	1,621	62,219	759,076
21	335,5	0,701	106,6	Líquido	447,16	1,38	40,333	13531,888
22	335,5	0,687	126,4	Líquido	531,2	1,596	59,973	20120,973
23	425,8	0,680	163,8	Líquido	692,1	1,981	106,085	45171,140
PF	-	-	-	Potência Eixo	-	-	-	10857,900
24	425,8	19,370	167,2	Líquido	717,6	1,992	128,306	54632,565
25	66,3	1,740	205,5	Líquido	877,2	2,382	171,627	11378,883
26	425,8	18,980	200,4	Líquido	861,854	2,308	178,344	75939,001
27	45,3	4,410	256,3	Líquido	1116	2,85	270,893	12271,453
28	425,8	18,770	246,1	Líquido	1068,14	2,725	260,302	110836,483
29	15395,8	0,103	35,00	Líquido	167,5	0,5724	1,459	22469,246
30	566,04	-	347,00	Gases	-	-	-	109227,325

Para realizar as análises a definição da estrutura lógica do sistema é necessária, obtida a partir dos conceitos de Recursos (F) e Produtos (P), e apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Estrutura lógica da unidade subcrítica elaborada a partir da relação de fluxos exergéticos de recursos e produtos para os equipamentos.

Dispositivo	Recursos	Produtos
Caldeira	$\dot{B}_1 + \dot{B}_2 - \dot{B}_{30}$	$(\dot{B}_3 - \dot{B}_{28}) + (\dot{B}_6 - \dot{B}_4)$
Turbina Alta Pressão	$\dot{B}_3 - \dot{B}_4 - \dot{B}_5$	$\dot{B}_{W,HPT}$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{B}_6 - \dot{B}_7 - \dot{B}_8 - \dot{B}_9 - \dot{B}_{10}$	$\dot{B}_{W,IPT}$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{B}_{10} - \dot{B}_{11} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14}$	$\dot{B}_{W,LPT}$
Gerador	$\dot{B}_{W,HPT} + \dot{B}_{W,IPT} + \dot{B}_{W,LPT}$	$\dot{B}_{PE} + \dot{B}_{W,CEP}$
Condensador	$\dot{B}_{14} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{9a} - \dot{B}_{15}$	-
Bomba Extração Condensado	$\dot{B}_{W,CEP}$	$\dot{B}_{16} - \dot{B}_{15}$
LPH - 1	$\dot{B}_{13} + \dot{B}_{19} - \dot{B}_{18}$	$\dot{B}_{17} - \dot{B}_{16}$
LPH - 2	$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{20} - \dot{B}_{19}$	$\dot{B}_{21} - \dot{B}_{17}$
LPH - 3	$\dot{B}_{11} - \dot{B}_{20}$	$\dot{B}_{22} - \dot{B}_{21}$
Desaerador	$\dot{B}_8 + \dot{B}_{22} + \dot{B}_{25}$	$\dot{B}_{23}$
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{B}_{W,BFP}$	$\dot{B}_{24} - \dot{B}_{23}$
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{B}_9 - \dot{B}_{9a}$	$\dot{B}_{W,BFP}$
HPH - 1	$\dot{B}_7 + \dot{B}_{27} - \dot{B}_{25}$	$\dot{B}_{26} - \dot{B}_{24}$
HPH - 2	$\dot{B}_5 - \dot{B}_{27}$	$\dot{B}_{28} - \dot{B}_{26}$

Com base na Equação (5.33) já apresentada, o balanço de impacto ambiental pode ser desenvolvido, obtendo, portanto uma equação linear para cada dispositivo do sistema estudado, definindo uma matriz de incidência A [15x36]. Além disso, foram obtidas as equações auxiliares a partir dos princípios P e F do Método SPECO, no intuito de obter uma matriz de incidência  $\bar{A}$  [36x36], representando um sistema linear solúvel. Os balanços de impacto ambiental e as equações auxiliares determinadas podem ser verificados na Tabela 6.3. A matriz de incidência para o sistema da unidade subcrítica pode ser verificado na Figura 6.2.

Tabela 6.3 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade subcrítica.

Dispositivo	Balanço de Impacto Ambiental	Equações Auxiliares
Caldeira	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{28} + \dot{E}^{PF} + \dot{Y}_{Cald.} = \dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_{30}$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_{28} = \frac{\dot{B}_3 - \dot{B}_{28}}{\dot{B}_6 - \dot{B}_4} (\dot{E}_6 - \dot{E}_4); \quad \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \frac{\dot{B}_1 + \dot{B}_2}{\dot{B}_{30}} \dot{E}_{30}$
Turbina Alta Pressão	$\dot{E}_3 + \dot{Y}_{HPT} = \dot{E}_4 + \dot{E}_5 + \dot{E}_{P,HPT}$	$\dot{E}_3 = \frac{\dot{B}_3}{\dot{B}_4} \dot{E}_4; \quad \dot{E}_3 = \frac{\dot{B}_3}{\dot{B}_5} \dot{E}_5;$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{E}_6 + \dot{Y}_{IPT} = \dot{E}_7 + \dot{E}_8 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{P,IPT}$	$\dot{E}_6 = \frac{\dot{B}_6}{\dot{B}_7} \dot{E}_7; \dot{E}_6 = \frac{\dot{B}_6}{\dot{B}_8} \dot{E}_8; \dot{E}_6 = \frac{\dot{B}_6}{\dot{B}_9} \dot{E}_9; \dot{E}_6 = \frac{\dot{B}_6}{\dot{B}_{10}} \dot{E}_{10}$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{E}_{10} + \dot{Y}_{LPT} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{P,LPT}$	$\dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{11}} \dot{E}_{11}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{12}} \dot{E}_{12}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{13}} \dot{E}_{13}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{14}} \dot{E}_{14}$
Gerador	$\dot{E}_{P1} + \dot{E}_{P2} + \dot{E}_{P3} + \dot{Y}_{Gen.} = \dot{E}_{PE} + \dot{E}_{PW,CEP}$	$\dot{E}_{PE} = \frac{\dot{B}_{PE}}{\dot{B}_{PW,CEP}} \dot{E}_{PW,CEP}$
Condensador	$\dot{E}_{14} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{9a} + \dot{Y}_{Cond.} = \dot{E}_{15} + \dot{E}_{29}$	$\dot{E}_{15} = \frac{\dot{B}_{15}}{\dot{B}_{14} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{9a}} (\dot{E}_{14} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{9a})$
Bomba Extração Condensado	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{PW,CEP} + \dot{Y}_{CEP} = \dot{E}_{16}$	-
LPH - 1	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{19} + \dot{Y}_{LPH1} = \dot{E}_{17} + \dot{E}_{18}$	$\dot{E}_{18} = \frac{\dot{B}_{18}}{\dot{B}_{13} + \dot{B}_{19}} (\dot{E}_{13} + \dot{E}_{19})$
LPH - 2	$\dot{E}_{17} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{20} + \dot{Y}_{LPH2} = \dot{E}_{21} + \dot{E}_{19}$	$\dot{E}_{19} = \frac{\dot{B}_{19}}{\dot{B}_{12} + \dot{B}_{20}} (\dot{E}_{12} + \dot{E}_{20})$
LPH - 3	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{11} + \dot{Y}_{LPH3} = \dot{E}_{20} + \dot{E}_{22}$	$\dot{E}_{20} = \frac{\dot{B}_{20}}{\dot{B}_{11}} \dot{E}_{11}$
Desaerador	$\dot{E}_8 + \dot{E}_{22} + \dot{E}_{25} + \dot{Y}_{Desae.} = \dot{E}_{23}$	-
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{E}_{23} + \dot{E}_{PW,BFP} + \dot{Y}_{BFP} = \dot{E}_{24}$	-
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{E}_9 + \dot{Y}_{PDT} = \dot{E}_{9a} + \dot{E}_{PW,BFP}$	$\dot{E}_9 = \frac{\dot{B}_9}{\dot{B}_{9a}} \dot{E}_{9a}$
HPH - 1	$\dot{E}_{24} + \dot{E}_7 + \dot{E}_{27} + \dot{Y}_{HPH1} = \dot{E}_{26} + \dot{E}_{25}$	$\dot{E}_{25} = \frac{\dot{B}_{25}}{\dot{B}_7 + \dot{B}_{27}} (\dot{E}_7 + \dot{E}_{27})$
HPH - 2	$\dot{E}_{26} + \dot{E}_5 + \dot{Y}_{HPH2} = \dot{E}_{27} + \dot{E}_{28}$	$\dot{E}_{27} = \frac{\dot{B}_{27}}{\dot{B}_5} \dot{E}_5$



Os resultados da análise exergética desenvolvida para a unidade subcrítica, com base na estrutura lógica apresentada na Tabela 6.2, são apresentados na Tabela 6.4. Os valores de recursos, produtos, irreversibilidades, eficiência exergética, e taxa de destruição de exergia, para cada um dos componentes podem ser verificados.

Tabela 6.4 - Resultados das variáveis exergéticas para os componentes do sistema subcrítico.

<b>Dispositivo</b>	<b>Recursos [kW]</b>	<b>Produtos [kW]</b>	<b><math>\dot{i}</math> [kW]</b>	<b><math>\varepsilon</math> [%]</b>	<b><math>\delta</math> [%]</b>
<b>Caldeira</b>	1306358,756	621715,351	684643,405	47,59%	86,05%
<b>Turbina de Alta Pressão - HPT</b>	153486,763	144346,200	9140,563	94,04%	1,15%
<b>Turbina Pressão Intermediária - IPT</b>	181997,047	172270,500	9726,547	94,66%	1,22%
<b>Turbina de Baixa Pressão - LPT</b>	220270,779	190494,300	29776,479	86,48%	3,74%
<b>Condensador *</b>	42139,076	10701,888	31437,188	-	3,95%
<b>Gerador</b>	507111,000	500335,500	6775,500	98,66%	0,85%
<b>Bomba de Extração de Condensado - CEP</b>	335,500	235,471	100,029	70,18%	0,01%
<b>LPH - 1</b>	3930,089	2922,968	1007,121	74,37%	0,13%
<b>LPH - 2</b>	11821,545	9344,886	2476,659	79,05%	0,31%
<b>LPH - 3</b>	7360,221	6589,086	771,135	89,52%	0,10%
<b>Desaerador</b>	53013,580	45171,140	7842,440	85,21%	0,99%
<b>Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP</b>	10857,900	9461,425	1396,475	87,14%	0,18%
<b>Turbina Acionamento da Bomba - PDT</b>	14193,653	10857,900	3335,753	76,50%	0,42%
<b>HPH - 1</b>	24635,785	21306,436	3329,349	86,49%	0,42%
<b>HPH - 2</b>	38795,706	34897,482	3898,224	89,95%	0,49%
<b>TOTAL</b>	-	-	795656,868	-	100,00%
<b>Planta</b>	1415586,081	507111,000	-	35,85%	-

\*Equipamento dissipativo.

O vetor  $\bar{Y}$  [36x1] contém as atribuições ambientais externas para os fluxos, que são obtidas conforme explicitado no item (5.2.1). Para os componentes do sistema foram obtidos seus respectivos pesos conforme Tabela 5.5, e posteriormente calculados os impactos ambientais relacionados à vida útil destes equipamentos com base nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7. A análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia subcrítica pode ser verificada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia subcrítica.

Equipamentos	Peso (t)	Material (mPts/kg)	Processo (mPts/kg)	Descarte (mPts/kg)	Total (mPts/kg)	Total (Pts)
Caldeira	3304,08	1514,08	36,30	-70,00	1480,38	4891300,01
Turbina de Alta Pressão - HPT	184,74	704,00	25,20	-70,00	659,20	121780,90
Turbina Pressão Intermediária - IPT	210,20	704,00	25,20	-70,00	659,20	138562,99
Turbina de Baixa Pressão - LPT	226,21	704,00	25,20	-70,00	659,20	149116,99
Condensador	44,04	86,00	12,10	-70,00	28,10	1237,44
Gerador	-	410,20	16,90	-70,00	357,10	357,10
Bomba de Extração de Condensado - CEP	1,53	186,10	16,90	-70,00	133,00	203,51
LPH - 1	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 2	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 3	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
Desaerador	172,44	86,00	12,10	-70,00	28,10	4845,62
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	28,50	186,10	16,90	-70,00	133,00	3790,50
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	27,94	704,00	25,20	-70,00	659,20	18420,77
HPH - 1	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
HPH - 2	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75

A atribuição externa de impacto ambiental para a entrada de combustível foi realizada com base nos fatores de dano dos ecoindicadores observados na Tabela 5.3, e nos respectivos valores de consumo de combustível e fatores de emissão de cada poluente considerado. Os cálculos do consumo específico de combustível, assim como dos fatores de emissão de cada poluente estão detalhados no Apêndice B. A atribuição externa de impacto ambiental para o combustível pode ser verificado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade subcrítica.

Substância/Recurso	Consumo Específico [kg/s]	Fator de Emissão [kg/s]	Ecoindicador 99 [mPts/s]
Carvão Mineral	45,63	-	273,340
CO <sub>2</sub>	-	124,578	679,512
SO <sub>2</sub>	-	0,286	451,332
MP <sub>2,5</sub>	-	0,016	296,770
MP <sub>10</sub>	-	0,335	3261,582
TSP*	-	0,343	980,137
NO <sub>x</sub>	-	0,274	751,572
Total			6694,248

\*Partículas Totais em Suspensão.

Com base no sistema matricial já exposto ( $\bar{A} \times \dot{E} = \bar{Y}$ ) é possível determinar as taxas de impacto ambiental, para tanto foi utilizado o software *MATLAB R2016a*, desenvolvendo um código para construção da matriz e inserção dos valores do vetor de atribuição externa, disponível para ser verificado no Apêndice D. Os resultados obtidos pela solução do sistema de equações lineares podem ser analisado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica subcrítica.

Fluxo	B* (kW)	k*	$\dot{E}$ (mPts/s)	e (mPts/GJ)
1	1415586,08	1,00	6694,25	4728,96
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1392744,18	2,20	6598,93	10416,69
4	943030,74	2,20	4468,15	10416,69
5	112271,45	2,20	531,95	10416,69
P1	337441,99	2,34	1599,02	11077,67
6	1151020,31	2,18	5453,61	10328,85
7	51759,54	2,18	245,24	10328,85
8	46899,30	2,18	222,21	10328,85
9	36346,96	2,18	172,21	10328,83
9a	5405,20	2,18	25,61	10328,77
10	619266,27	2,18	2934,13	10328,85
P2	396748,25	2,30	1880,04	10913,30
11	17699,84	2,18	83,86	10328,85
12	27225,86	2,18	129,00	10328,86
13	6523,64	2,18	30,91	10328,71
14	87632,88	2,18	415,21	10328,86
P3	480184,06	2,52	2275,38	11944,61
PE	1213560,00	2,43	5750,58	11501,16
15	2242,22	2,18	10,62	10328,98
PB	814,30	2,43	3,86	11502,24
16	3056,52	2,42	14,48	11457,77
17	11624,00	2,78	55,08	13154,28
18	1066,14	2,18	5,05	10327,91
19	3109,98	2,18	14,74	10328,62
20	1654,76	2,18	7,84	10328,35
21	37394,63	2,76	177,18	13093,66
22	53439,71	2,66	253,21	12584,13
23	125216,47	2,77	593,30	13134,40
PF	30941,76	2,85	146,63	13504,73
24	156158,23	2,86	739,94	13543,90
25	24877,47	2,19	117,87	10358,75
26	210019,13	2,77	995,14	13104,41
27	26978,83	2,20	127,83	10416,70
28	295311,75	2,66	1399,26	12624,55
29	91862,01	8,58	435,25	40670,39
30	109227,54	1,00	516,87	4732,09

A partir da análise exergoambiental realizada os valores dos impactos ambientais médios por unidade de exergia para produtos e de combustível, a taxa de impacto ambiental associada com a destruição de exergia dentro de cada componente, o impacto ambiental relacionado ao componente e o fator exergoambiental para o sistema com tecnologia subcrítica foram obtidos, e estão expostos na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia subcrítica.

Equipamentos	$e_F$ (mPts/GJ)	$e_P$ (mPts/GJ)	$\dot{E}_D$ (mPts/s)	$\dot{E}^{PF}$ (mPts/s)	$\dot{Y}$ (mPts/s)	$f_b$ (%)	$r_b$ (%)
Caldeira	4728,75	9948,49	3237,44	6420,907	7,7551	66,522%	110,39%
Turbina de Alta Pressão - HPT	10416,70	11077,67	95,21	-	0,1931	0,187%	6,34%
Turbina Pressão Intermediária - IPT	10328,85	10913,30	100,46	-	0,2197	0,201%	5,66%
Turbina de Baixa Pressão - LPT	10328,86	11944,61	307,56	-	0,2364	0,071%	15,64%
Gerador	11347,50	11501,16	76,88	-	0,0006	0,001%	1,35%
Bomba de Extração de Condensado - CEP	11502,24	16388,45	1,15	-	0,0003	0,026%	42,48%
LPH - 1	10328,77	13887,94	10,40	-	0,0012	0,011%	34,46%
LPH - 2	10328,85	13066,50	25,58	-	0,0012	0,004%	26,50%
LPH - 3	10328,90	11537,72	7,96	-	0,0012	0,014%	11,71%
Desaerador	11191,25	13134,40	87,77	-	0,0077	0,008%	17,36%
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	13504,73	15498,93	18,86	-	0,0088	0,043%	14,77%
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	10328,84	13504,73	34,45	-	0,0292	0,078%	30,75%
HPH - 1	10358,79	11977,51	34,49	-	0,0012	0,003%	15,63%
HPH - 2	10416,69	11580,35	40,61	-	0,0012	0,003%	11,17%
TOTAL	4728,96	13405,41	4078,83	6420,907	8,4542	61,200%	183,47%

## 6.2. UNIDADE TERMELÉTRICA SUPERCRÍTICA

A central termelétrica supercrítica selecionada para análise consiste em uma unidade de geração de 660 MW de potência, composta por um conjunto de turbinas de alta pressão, pressão intermediária e de baixa pressão. A unidade opera com um estágio de reaquecimento de vapor antes da entrada na turbina de pressão intermediária, a partir de uma linha de extração da turbina de alta pressão. Além do reaquecimento possui sistema regenerativo composto por 8 extrações de vapor na linha das turbinas.

O esquema da planta supercrítica é apresentado na Figura 6.3 e é possível verificar os principais componentes: Caldeira, Turbina de Alta Pressão (HPT), Turbina de Pressão Intermediária (IPT), Turbina de Baixa Pressão (LPT), Condensador, Bomba de Extração de Condensado (CEP), quatro aquecedores de Baixa Pressão (LPH), Desaerador, Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP), e três Aquecedores de Alta Pressão (HPH).

Os parâmetros termodinâmicos principais de operação são 24,85 MPa / 540°C / 565°C, com fluxo mássico de 562,2 kg/s operando em plena carga. O condensador opera a uma pressão de 0,0103 MPa. Todos os demais fluxos podem ser consultados na Tabela 6.9. Os valores de entalpia e entropia de cada fluxo foram obtidos através do software *Computer-Aided Thermodynamic Table – CATT* (Versão 1.0, 1996, John Wiley e Sons, Inc). A exergia (b) foi obtida pela Equação (5.14), e o fluxo exergético ( $\dot{B}$ ) obtido pela Equação (5.19). O cálculo da exergia dos gases de exaustão da caldeira está apresentado no Apêndice C. Os cálculos de potência de eixo das turbinas, potência das bombas, e vazão de água de resfriamento estão detalhados no Apêndice A.

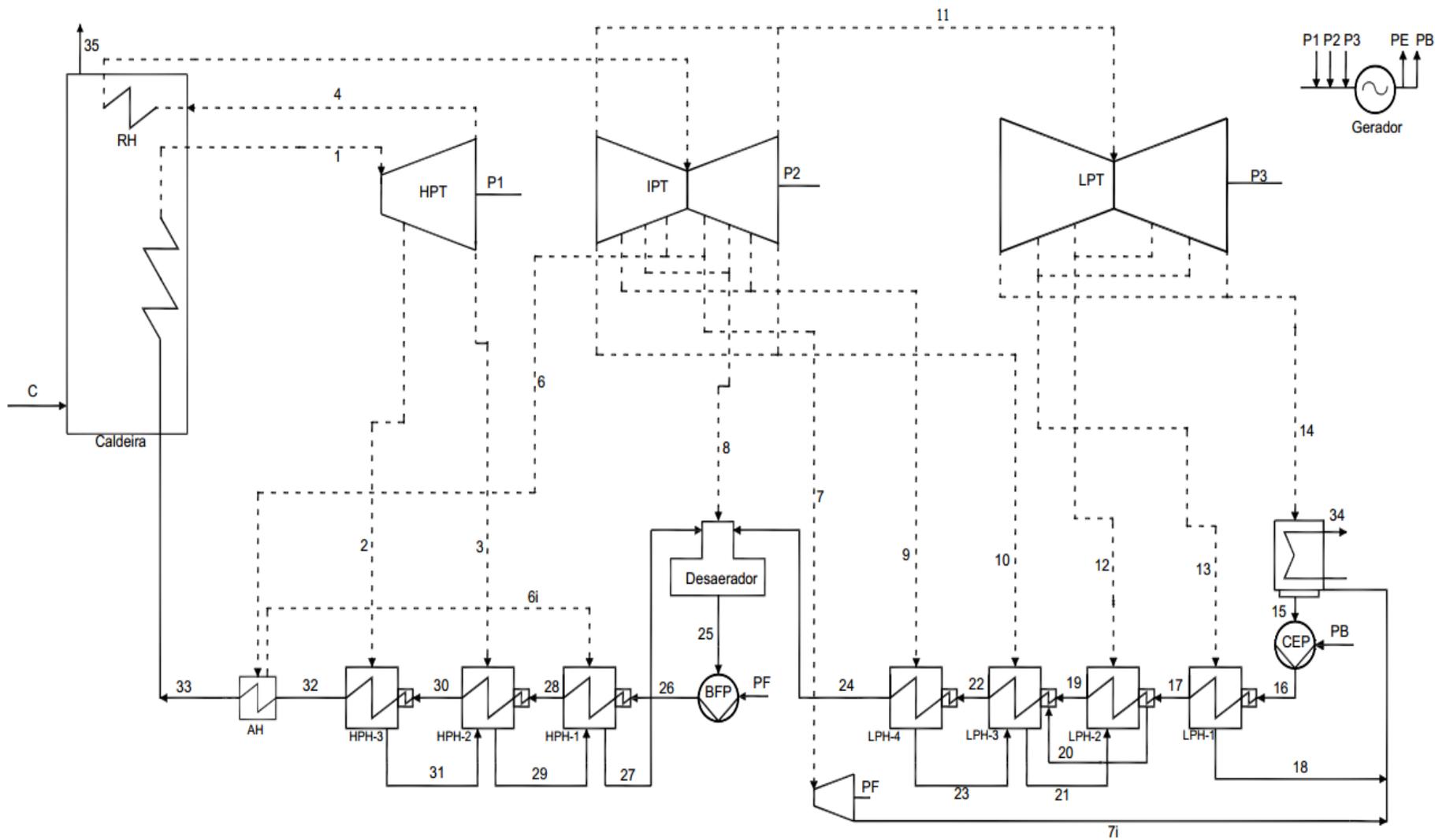


Figura 6.3 - Diagrama Esquemático da Usina Supercrítica 660 MW.

Tabela 6.9 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Supercrítico.

Fluxos	Vazão Mássica (kg/s)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Tipo de Fluxo	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)	$\dot{B}$ (kW)
<b>C</b>	56,79	-	-	Combustível	-	-	-	1765373,73
<b>1</b>	562,2	24,85	539,95	Vapor	3304	6,141	1478,547	831239,35
<b>2</b>	43,39	7,102	352,45	Vapor	3021	6,23	1169,025	50718,17
<b>3</b>	51,81	4,707	298,75	Vapor	2932	6,245	1075,555	55729,90
<b>P1</b>	-	-	-	P. Eixo	-	-	-	205277,14
<b>4</b>	467	4,707	298,75	Vapor	2932	6,245	1075,555	502284,37
<b>5</b>	467	4,236	565,05	Vapor	3592	7,247	1436,959	671060,04
<b>6</b>	21,96	2,24	470,35	Vapor	3399	7,29	1231,145	27035,95
<b>6i</b>	21,96	2,128	215,55	Vapor	2801	6,318	922,801	20264,72
<b>7</b>	27,22	1,971	468,85	Vapor	3399	7,348	1213,861	33041,31
<b>8</b>	12,9	1,208	381,85	Vapor	3222	7,316	1046,397	13498,53
<b>9</b>	22,39	0,6129	301,35	Vapor	3064	7,367	873,199	19550,93
<b>10</b>	31,63	0,3069	214,55	Vapor	2895	7,363	705,391	22311,53
<b>P2</b>	-	-	-	P. Eixo	-	-	-	292710,07
<b>11</b>	350,9	0,302	214,45	Vapor	2895	7,37	703,305	246789,86
<b>12</b>	13,1	0,06443	87,75	Vapor	2656	7,508	423,181	5543,68
<b>13</b>	9,6	0,02726	66,95	Vapor	2622	7,802	301,569	2895,07
<b>14</b>	328,2	0,0103	-	Líquido/Vapor	2394	7,541	151,347	49672,22
<b>P3</b>	-	-	-	P. Eixo	-	-	-	170179,90
<b>PE</b>	-	-	-	P.Elétrica	-	-	-	660000,00
<b>15</b>	365,02	0,0103	46,35	Líquido	194,2	0,6568	3,039	1109,30
<b>PB</b>	-	-	-	P.Elétrica	-	-	-	1861,60
<b>16</b>	365,02	3,112	46,95	Líquido	199,3	0,6627	6,381	2329,12
<b>17</b>	365,02	2,177	62,75	Líquido	264,4	0,8643	11,404	4162,69
<b>18</b>	9,6	0,02589	65,75	Líquido	275,2	0,9026	10,791	103,59
<b>19</b>	365,02	2,129	83,05	Líquido	349,3	1,11	23,085	8426,63
<b>20</b>	67,12	0,06119	86,45	Líquido	362	1,151	23,567	1581,84
<b>21</b>	54,02	0,2913	93,95	Líquido	393,7	1,238	29,341	1585,02
<b>22</b>	432,14	1,88	129,55	Líquido	545,5	1,628	64,921	28055,13
<b>23</b>	22,39	0,6129	139,55	Líquido	587,3	1,734	75,133	1682,24
<b>24</b>	432,14	1,632	159,75	Líquido	675	1,939	101,743	43967,39
<b>7i</b>	27,22	-	-	Líquido	2537,5	7,486	311,237	8471,88
<b>25</b>	562,2	1,112	-	Líquido	781,213	2,179	136,436	76704,54
<b>26</b>	562,2	30,57	190,05	Líquido	822,3	2,196	172,457	96955,55
<b>28</b>	562,2	30,57	213,55	Líquido	924,8	2,412	210,589	118393,36
<b>27</b>	117,16	2,128	215,55	Líquido	923,1	2,476	189,817	22239,01
<b>29</b>	95,2	4,472	257,05	Líquido	1120	2,857	273,179	26006,68
<b>30</b>	562,2	30,02	255,05	Líquido	1111	2,781	286,827	161254,36

<b>31</b>	43,385	6,747	283,35	Líquido	1254	3,098	335,361	14549,65
<b>32</b>	562,2	29,48	283,55	Líquido	1246	3,031	347,327	195267,46
<b>33</b>	562,2	29,48	286,35	Líquido	1260	3,055	354,175	199117,41
<b>PF</b>	-	-	-	P.Eixo	-	-	-	23099,11
<b>34</b>	18816,66	0,103	35,00	Líquido	146,7	0,5052	0,695	13079,75
<b>35</b>	706,38	-	347,00	Gases	-	-	-	136324,79

Para realizar as análises a definição da estrutura lógica do sistema é necessária, obtida a partir dos conceitos de Recursos (F) e Produtos (P), e apresentada na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Estrutura lógica da unidade supercrítica elaborada a partir da relação de fluxos exergéticos de recursos e produtos para os equipamentos.

<b>Dispositivo</b>	<b>Recursos</b>	<b>Produtos</b>
Caldeira	$\dot{B}_{comb} - \dot{B}_{35}$	$(\dot{B}_1 - \dot{B}_{33}) + (\dot{B}_5 - \dot{B}_4)$
Turbina Alta Pressão	$\dot{B}_1 - \dot{B}_2 - \dot{B}_3 - \dot{B}_4$	$\dot{B}_{W,HPT}$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{B}_5 - \dot{B}_6 - \dot{B}_7 - \dot{B}_8 - \dot{B}_9 - \dot{B}_{10} - \dot{B}_{11}$	$\dot{B}_{W,IPT}$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{B}_{11} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14}$	$\dot{B}_{W,LPT}$
Gerador	$\dot{B}_{W,HPT} + \dot{B}_{W,IPT} + \dot{B}_{W,LPT}$	$\dot{B}_{PE} + \dot{B}_{W,CEP}$
Condensador	$\dot{B}_{14} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{7i} - \dot{B}_{15}$	-
Bomba Extração Condensado	$\dot{B}_{W,CEP}$	$\dot{B}_{16} - \dot{B}_{15}$
LPH - 1	$\dot{B}_{13} - \dot{B}_{18}$	$\dot{B}_{17} - \dot{B}_{16}$
LPH - 2	$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{21} - \dot{B}_{20}$	$\dot{B}_{19} - \dot{B}_{17}$
LPH - 3	$\dot{B}_{10} + \dot{B}_{23} - \dot{B}_{21}$	$\dot{B}_{22} - \dot{B}_{19}$
LPH - 4	$\dot{B}_9 - \dot{B}_{23}$	$\dot{B}_{24} - \dot{B}_{22}$
Desaerador	$\dot{B}_8 + \dot{B}_{24} + \dot{B}_{27}$	$\dot{B}_{25}$
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{B}_{W,BFP}$	$\dot{B}_{26} - \dot{B}_{25}$
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{B}_7 - \dot{B}_{7i}$	$\dot{B}_{W,BFP}$
HPH - 1	$\dot{B}_{6i} + \dot{B}_{29} - \dot{B}_{27}$	$\dot{B}_{28} - \dot{B}_{26}$
HPH - 2	$\dot{B}_3 + \dot{B}_{31} - \dot{B}_{29}$	$\dot{B}_{30} - \dot{B}_{28}$
HPH - 3	$\dot{B}_2 - \dot{B}_{31}$	$\dot{B}_{32} - \dot{B}_{30}$
Aquecedor Auxiliar	$\dot{B}_6 - \dot{B}_{6i}$	$\dot{B}_{33} - \dot{B}_{32}$

Com base na Equação (5.33) já apresentada, o balanço de impacto ambiental pode ser desenvolvido, obtendo, portanto uma equação linear para cada dispositivo do sistema estudado, definindo uma matriz de incidência A [18x43]. Além disso, foram obtidas as equações auxiliares a partir dos princípios P e F do Método SPECO, no intuito de obter uma matriz de incidência  $\bar{A}$  [43x43], representando um sistema linear solúvel. Os balanços de impacto ambiental e as equações auxiliares determinadas podem ser verificados na Tabela 6.11. A matriz de incidência para o sistema da unidade supercrítica pode ser verificado na Figura 6.4.

Tabela 6.11 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade supercrítica.

Dispositivo	Balanço de Impacto Ambiental	Equações Auxiliares
Caldeira	$\dot{E}_C + \dot{E}_4 + \dot{E}_{33} + \dot{E}^{PF} + \dot{Y}_{Cald.} = \dot{E}_1 + \dot{E}_5 + \dot{E}_{35}$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_{33} = \frac{\dot{B}_1 - \dot{B}_{33}}{\dot{B}_5 - \dot{B}_4} (\dot{E}_5 - \dot{E}_4); \quad \dot{E}_C = \frac{\dot{B}_C}{\dot{B}_{35}} \dot{E}_{35}$
Turbina Alta Pressão	$\dot{E}_1 + \dot{Y}_{HPT} = \dot{E}_2 + \dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{P,HPT}$	$\dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_2} \dot{E}_2; \quad \dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_3} \dot{E}_3; \quad \dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_4} \dot{E}_4$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{E}_5 + \dot{Y}_{IPT} = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 + \dot{E}_8 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{P,IPT}$	$\dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_6} \dot{E}_6; \quad \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_7} \dot{E}_7; \quad \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_8} \dot{E}_8;$ $\dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_9} \dot{E}_9; \quad \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_{10}} \dot{E}_{10}; \quad \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_{11}} \dot{E}_{11};$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{E}_{11} + \dot{Y}_{LPT} = \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{P,LPT}$	$\dot{E}_{11} = \frac{\dot{B}_{11}}{\dot{B}_{12}} \dot{E}_{12}; \quad \dot{E}_{11} = \frac{\dot{B}_{11}}{\dot{B}_{13}} \dot{E}_{13}; \quad \dot{E}_{11} = \frac{\dot{B}_{11}}{\dot{B}_{14}} \dot{E}_{14}$
Gerador	$\dot{E}_{P,HPT} + \dot{E}_{P,IPT} + \dot{E}_{P,HPT} + \dot{Y}_{Gen.} = \dot{E}_{PE} + \dot{E}_{PW,CEP}$	$\dot{E}_{PE} = \frac{\dot{B}_{PE}}{\dot{B}_{PW,CEP}} \dot{E}_{PW,CEP}$
Condensador	$\dot{E}_{14} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{7i} + \dot{Y}_{Cond.} = \dot{E}_{15} + \dot{E}_{34}$	$\dot{E}_{15} = \frac{\dot{B}_{15}}{\dot{B}_{14} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{7i}} (\dot{E}_{14} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{7i})$
Bomba Extração Condensado	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{PW,CEP} + \dot{Y}_{CEP} = \dot{E}_{16}$	-
LPH - 1	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{13} + \dot{Y}_{LPH1} = \dot{E}_{17} + \dot{E}_{18}$	$\dot{E}_{13} = \frac{\dot{B}_{13}}{\dot{B}_{18}} \dot{E}_{18}$
LPH - 2	$\dot{E}_{17} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{21} + \dot{Y}_{LPH2} = \dot{E}_{19} + \dot{E}_{20}$	$\dot{E}_{20} = \frac{\dot{B}_{20}}{\dot{B}_{12} + \dot{B}_{21}} (\dot{E}_{12} + \dot{E}_{21})$
LPH - 3	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{23} + \dot{Y}_{LPH3} = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{21}$	$\dot{E}_{21} = \frac{\dot{B}_{21}}{\dot{B}_{10} + \dot{B}_{23}} (\dot{E}_{10} + \dot{E}_{23})$
LPH - 4	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_9 + \dot{Y}_{LPH4} = \dot{E}_{24} + \dot{E}_{23}$	$\dot{E}_9 = \frac{\dot{B}_9}{\dot{B}_{23}} \dot{E}_{23}$
Desaerador	$\dot{E}_8 + \dot{E}_{24} + \dot{E}_{27} + \dot{Y}_{Desae.} = \dot{E}_{25}$	-
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{E}_{25} + \dot{E}_{PW,BFP} + \dot{Y}_{BFP} = \dot{E}_{26}$	-
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{E}_7 + \dot{Y}_{PDT} = \dot{E}_{7i} + \dot{E}_{PW,BFP}$	$\dot{E}_7 = \frac{\dot{B}_7}{\dot{B}_{7i}} \dot{E}_{7i}$
HPH - 1	$\dot{E}_{26} + \dot{E}_{6i} + \dot{E}_{29} + \dot{Y}_{HPH1} = \dot{E}_{28} + \dot{E}_{27}$	$\dot{E}_{27} = \frac{\dot{B}_{27}}{\dot{B}_{6i} + \dot{B}_{29}} (\dot{E}_{6i} + \dot{E}_{29})$
HPH - 2	$\dot{E}_{28} + \dot{E}_3 + \dot{E}_{31} + \dot{Y}_{HPH2} = \dot{E}_{30} + \dot{E}_{29}$	$\dot{E}_{29} = \frac{\dot{B}_{29}}{\dot{B}_3 + \dot{B}_{31}} (\dot{E}_3 + \dot{E}_{31})$
HPH - 3	$\dot{E}_{30} + \dot{E}_2 + \dot{Y}_{HPH3} = \dot{E}_{32} + \dot{E}_{31}$	$\dot{E}_2 = \frac{\dot{B}_2}{\dot{B}_{31}} \dot{E}_{31}$
Aquecedor Auxiliar	$\dot{E}_{32} + \dot{E}_6 + \dot{Y}_{AH} = \dot{E}_{33} + \dot{E}_{6i}$	$\dot{E}_6 = \frac{\dot{B}_6}{\dot{B}_{6i}} \dot{E}_{6i}$



Os resultados da análise exérgica desenvolvida para a unidade supercrítica, com base na estrutura lógica apresentada na Tabela 6.10, são apresentados na Tabela 6.12. Os valores de recursos, produtos, irreversibilidades, eficiência exérgica, e taxa de destruição de exergia, para cada um dos componentes podem ser verificados.

Tabela 6.12 - Resultados das variáveis exérgicas para os componentes do sistema supercrítico.

Dispositivo	Recursos [kW]	Produtos [kW]	$\dot{i}$ [kW]	$\varepsilon$ [%]	$\delta$ [%]
<b>Caldeira</b>	1.629.048,94	800.897,61	828.151,33	49,16%	86,77%
<b>Turbina de Alta Pressão - HPT</b>	222.506,91	205.277,14	17.229,77	92,26%	1,81%
<b>Turbina Pressão Intermediária - IPT</b>	308.831,92	292.710,07	16.121,85	94,78%	1,69%
<b>Turbina de Baixa Pressão - LPT</b>	188.678,91	170.179,90	18.499,01	90,20%	1,94%
<b>Condensador*</b>	57.138,39	13.254,48	43.883,91	-	4,62%
<b>Gerador</b>	668167,105	661861,602	6.305,50	99,06%	0,66%
<b>Bomba de Extração de Condensado - CEP</b>	1.861,60	1.219,82	641,78	65,53%	0,07%
<b>LPH - 1</b>	2.791,48	1.833,57	957,91	65,68%	0,10%
<b>LPH - 2</b>	5.546,85	4.263,94	1.282,91	76,87%	0,13%
<b>LPH - 3</b>	22.408,74	19.628,50	2.780,24	87,59%	0,29%
<b>LPH - 4</b>	17.868,70	15.912,26	1.956,44	89,05%	0,20%
<b>Desaerador</b>	79.704,93	76.704,54	3.000,38	96,24%	0,31%
<b>Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP</b>	23.099,11	20.251,01	2.848,11	87,67%	0,30%
<b>Turbina Acionamento da Bomba - PDT</b>	24569,425	23099,11	1.470,31	94,02%	0,15%
<b>HPH - 1</b>	24.032,39	21.437,81	2.594,58	89,20%	0,27%
<b>HPH - 2</b>	44.272,88	42.861,00	1.411,87	96,81%	0,15%
<b>HPH - 3</b>	36.168,51	34.013,10	2.155,41	94,04%	0,23%
<b>Aquecedor Auxiliar - AH</b>	6771,234	3849,946	2.921,29	56,86%	0,31%
<b>TOTAL</b>			954.387,35		
<b>Planta</b>	1.765.373,73	668.167,11		37,85%	

\*Equipamento Dissipativo.

O vetor  $\bar{Y}$  [43x1] contém as atribuições ambientais externas para os fluxos, que são obtidas conforme explicitado no item (5.2.1). Para os componentes do sistema foram obtidos seus respectivos pesos conforme Tabela 5.5, e posteriormente calculados os impactos ambientais relacionados à vida útil destes equipamentos com base na Tabela 5.6 e Tabela 5.7. A análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia supercrítica pode ser verificada na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia supercrítica.

Equipamentos	Peso (t)	Material (mPts/kg)	Processo (mPts/kg)	Descarte (mPts/kg)	Total (mPts/kg)	Total (Pts)
Caldeira	3975,9	1514,1	36,3	-70,0	1480,4	5885873
Turbina de Alta Pressão - HPT	238,9	704,0	25,2	-70,0	659,2	157478,7
Turbina Pressão Intermediária - IPT	309,5	704,0	25,2	-70,0	659,2	204038,8
Turbina de Baixa Pressão - LPT	208,3	704,0	25,2	-70,0	659,2	137333,4
Condensador	54,4	86,0	12,1	-70,0	28,1	1529,315
Gerador	-	410,2	16,9	-70,0	357,1	357,1
Bomba de Extração de Condensado - CEP	7,8	186,1	16,9	-70,0	133,0	1036,511
LPH - 1	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
LPH - 2	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
LPH - 3	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
LPH - 4	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
Desaerador	209,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	5886,122
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	85,3	186,1	16,9	-70,0	133,0	11339,58
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	48,5	704,0	25,2	-70,0	659,2	31962,29
HPH - 1	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
HPH - 2	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
HPH - 3	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75
Aquecedor Auxiliar - AH	27,5	86,0	12,1	-70,0	28,1	772,75

A atribuição externa de impacto ambiental para a entrada de combustível foi realizada com base nos fatores de dano dos ecoindicadores observados na Tabela 5.3, e nos respectivos valores de consumo de combustível e fatores de emissão de cada poluente considerado. Os cálculos do consumo específico de combustível, assim como dos fatores de emissão de cada poluente estão detalhados no Apêndice B. A atribuição externa de impacto ambiental para o combustível pode ser verificado na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade supercrítica.

Substância/Recurso	Consumo Específico [kg/s]	Fator de Emissão [kg/s]	Ecoindicador 99 [mPts/s]
Carvão Mineral	56,79	-	340,157
CO <sub>2</sub>	-	155,031	845,616
SO <sub>2</sub>	-	0,355	561,659
MP <sub>2,5</sub>	-	0,020	369,315
MP <sub>10</sub>	-	0,417	4058,863
TSP	-	0,426	1219,729
NO <sub>x</sub>	-	0,341	935,291
Total			8330,631

Com base no sistema matricial já exposto ( $\bar{A} \times \dot{E} = \bar{Y}$ ) é possível determinar as taxas de impacto ambiental, para tanto foi utilizado o software *MATLAB R2016a*, desenvolvendo um código para construção da matriz e inserção dos valores do vetor de atribuição externa, disponível para ser verificado no Apêndice D. Os resultados obtidos pela solução do sistema de equações lineares podem ser analisado na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica supercrítica.

Fluxo	B* (kW)	k*	$\dot{E}$ (mPts/s)	e [mPt/GJ]
C	1765373,73	1,00	8330,63	4718,91
1	1759263,95	2,12	8312,94	10000,66
2	107341,57	2,12	507,22	10000,66
3	117948,71	2,12	557,34	10000,66
P1	470910,07	2,29	2225,41	10841,01
4	1063063,60	2,12	5023,23	10000,77
5	1406360,95	2,10	6645,37	9902,79
6	56660,13	2,10	267,73	9902,81
6i	42470,67	2,10	200,68	9903,07
7	69245,78	2,10	327,20	9902,82
8	28289,26	2,10	133,67	9902,78
9	40973,47	2,10	193,61	9902,80
10	46759,00	2,10	220,95	9902,82
P2	647236,75	2,21	3058,66	10449,45
11	517196,58	2,10	2443,87	9902,63
12	11617,85	2,10	54,90	9902,63
13	6067,18	2,10	28,67	9902,71
14	104097,21	2,10	491,88	9902,56
P3	395414,34	2,32	1868,64	10980,37
PE	1509304,00	2,29	7132,59	10806,96
15	2324,69	2,10	10,99	9902,68
PB	4257,16	2,29	20,12	10806,82
16	6581,85	2,83	31,11	13355,26
17	12431,94	2,99	58,75	14113,72
18	217,09	2,10	1,03	9904,45
19	24058,04	2,86	113,69	13491,51
20	3315,55	2,10	15,67	9904,26
21	3323,81	2,10	15,71	9909,01
22	74334,29	2,65	351,26	12520,17
23	3525,51	2,10	16,66	9902,89
24	111782,25	2,54	528,21	12013,61
7i	17755,33	2,10	83,90	9903,11
25	186932,48	2,44	883,32	11515,85
26	238422,92	2,46	1126,69	11620,69
28	289067,09	2,44	1366,00	11537,78
27	46860,97	2,11	221,43	9956,78
29	55034,46	2,12	260,05	9999,39

30	382774,41	2,37	1808,79	11216,98
31	30793,07	2,12	145,51	10000,58
32	459322,91	2,35	2170,50	11115,52
33	473512,36	2,38	2237,55	11237,33
PF	51490,45	2,23	243,35	10535,21
34	119744,94	9,15	565,82	43259,56
35	136324,79	1,00	643,30	4718,91

Os valores dos impactos ambientais médios por unidade de exergia para produtos e de combustível, a taxa de impacto ambiental associada com a destruição de exergia dentro de cada componente, o impacto ambiental relacionado ao componente e o fator exergoambiental para o sistema com tecnologia supercrítica, são apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia supercrítica.

Equipamentos	$e_F$ (mPts/GJ)	$e_P$ (mPts/GJ)	$\dot{E}_D$ (mPts/s)	$\dot{E}^{PF}$ (mPts/s)	$\dot{Y}$ (mPts/s)	$f_b$ (%)	$r_b$ (%)
Caldeira	4.718,90	9.611,13	3.907,97	7990,473	9,3320	67,243%	103,67%
Turbina de Alta Pressão - HPT	10.000,41	10.841,01	172,30	-	0,2497	0,134%	8,40%
Turbina Pressão Intermediária - IPT	9.902,91	10.449,45	159,65	-	0,3235	0,187%	5,52%
Turbina de Baixa Pressão - LPT	9.902,64	10.980,37	183,19	-	0,2177	0,110%	10,88%
Gerador	10.704,97	10.806,96	67,50	-	0,0006	0,001%	0,95%
Bomba de Extração de Condensado - CEP	10.806,82	16.495,00	6,94	-	0,0016	0,022%	52,64%
LPH - 1	9.902,64	15.077,16	9,49	-	0,0012	0,012%	52,25%
LPH - 2	9.903,99	12.884,08	12,71	-	0,0012	0,009%	30,09%
LPH - 3	9.902,38	12.103,17	27,53	-	0,0012	0,004%	22,23%
LPH - 4	9.902,79	11.120,48	19,37	-	0,0012	0,006%	12,30%
Desaerador	11.082,24	11.515,85	33,25	-	0,0093	0,026%	3,91%
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	10.535,21	12.017,77	30,01	-	0,0180	0,055%	14,07%
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	9.902,71	10.535,21	14,56	-	0,0507	0,320%	6,39%
HPH - 1	9.957,60	11.162,85	25,84	-	0,0012	0,004%	12,10%
HPH - 2	10.001,38	10.330,84	14,12	-	0,0012	0,008%	3,29%
HPH - 3	10.000,69	10.634,49	21,56	-	0,0012	0,005%	6,34%
Aquecedor Auxiliar - AH	9.902,04	17.415,57	28,93	-	0,0012	0,004%	75,88%
Planta	4718,91	12638,97	4734,90	7990,473	10,2129	62,887%	167,84%

### 6.3. UNIDADE TERMELÉTRICA ULTRASSUPERCRÍTICA

A central termelétrica ultrassupercrítica selecionada para análise consiste em uma unidade de geração de 800 MW de potência, composta por um conjunto de turbinas de alta pressão, pressão intermediária e de baixa pressão. A unidade opera com um estágio de reaquecimento de vapor antes da entrada na turbina de pressão intermediária, a partir de uma linha de extração da turbina de alta pressão. Além do reaquecimento possui sistema regenerativo composto por 9 extrações de vapor na linha das turbinas.

O esquema da planta supercrítica é apresentado na Figura 6.5 e é possível verificar os principais componentes: Caldeira, Turbina de Alta Pressão (HPT), Turbina de Pressão Intermediária (IPT), Turbina de Baixa Pressão (LPT), Condensador, Bomba de Extração de Condensado (CEP), cinco aquecedores de Baixa Pressão (LPH), Desaerador, Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP), e três Aquecedores de Alta Pressão (HPH).

Os parâmetros termodinâmicos principais de operação são 30,00 MPa / 600°C / 620°C, com fluxo mássico de 563,2 kg/s operando em plena carga. O condensador opera a uma pressão de 0,01 MPa. Todos os demais fluxos podem ser consultados na Tabela 6.17. Os valores de entalpia e entropia de cada fluxo foram obtidos através do software *Computer-Aided Thermodynamic Table – CATT* (Versão 1.0, 1996, John Wiley e Sons, Inc). A exergia (b) foi obtida pela Equação (5.14), e o fluxo exergético ( $\dot{B}$ ) obtido pela Equação (5.19). O cálculo da exergia dos gases de exaustão da caldeira está apresentado no Apêndice C. Os cálculos de potência de eixo das turbinas, potência das bombas, e vazão de água de resfriamento estão detalhados no Apêndice A.

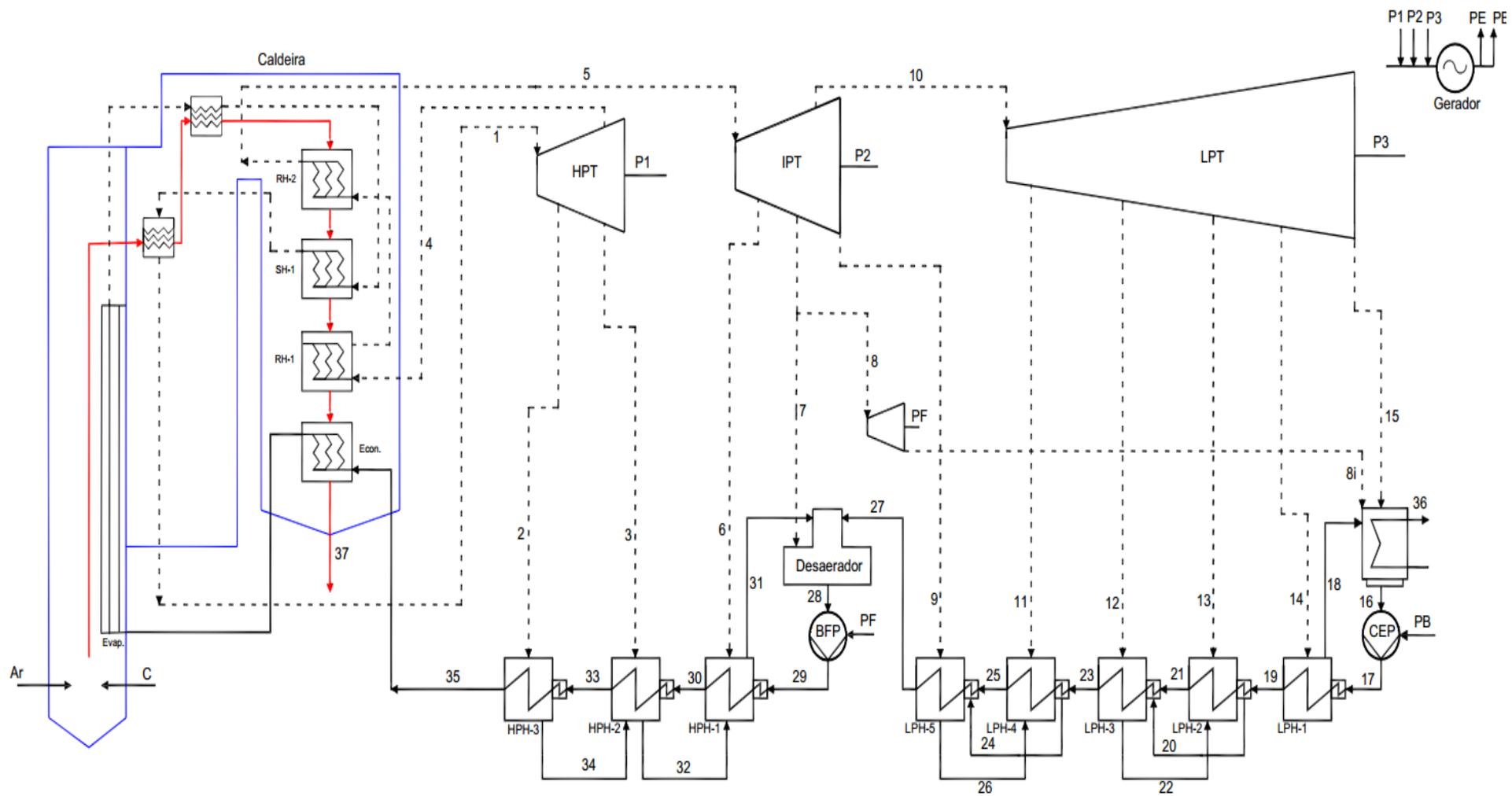


Figura 6.5 - Diagrama Esquemático da Usina Ultrasupercrítica 800 MW.

Tabela 6.17 - Dados Termodinâmicos do Ciclo Ultrassupercrítico.

Fluxos	Vazão Mássica (kg/s)	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Tipo de Fluxo	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)	$\dot{B}$ (kW)
C	61,99	25,0	-	Combustível	-	-	-	1926159,51
Ar		25,0	-	Ar	-	-	-	0,00
1	563,2	600	30	Vapor	3444	6,233	1591,131	896125,204
2	34,9	369,4	7,14	Vapor	3070	6,306	1195,377	41718,671
3	40,19	319,4	5,01	Vapor	2983	6,308	1107,781	44521,734
4	488,1	319,4	5,01	Vapor	2983	6,308	1107,781	540708,101
P1	-	-	-	P. de Eixo	-	-	-	256598,900
5	488,1	620	4,5	Vapor	3717	7,363	1527,391	745519,742
6	15,6	545,6	2,9	Vapor	3560	7,379	1365,623	21303,725
7	16,9	457,2	1,6	Vapor	3378	7,414	1173,193	19826,968
8	30,4	457,2	1,6	Vapor	3378	7,414	1173,193	35665,079
8i	30,4	x=0,972	0,0069	Vapor	2505	7,902	154,769	4704,990
9	26	374,4	0,88	Vapor	3212	7,444	998,253	25954,588
10	399,3	375	0,92	Vapor	3212	7,425	1003,915	400863,419
P2	-	-	-	P. de Eixo	-	-	-	233209,900
11	18,8	284,4	0,45	Vapor	3033	7,453	816,571	15351,542
12	19,8	193,3	0,19	Vapor	2857	7,502	625,969	12394,194
13	17,9	103,9	0,08	Vapor	2687	7,491	459,247	8220,528
14	14,4	60,8	x=1,0	Vapor	2610	7,908	257,981	3714,932
15	328,8	x=0,91	0,0069	Vapor	2354	7,586	144,365	47467,344
P3	-	-	-	P. de Eixo	-	-	-	313183,300
PE	-	-	-	P. Elétrica	-	-	-	800000,000
16	373,2	38,3	0,0069	Líquido	160,6	0,5501	1,236	461,126
PB	-	-	-	P.Elétrica	-	-	-	1716,720
17	373,2	38,9	2,6	Líquido	165,2	0,5567	3,869	1443,836
18	14,4	43,9	0,02	Líquido	183,8	0,6241	2,384	34,324
19	373,2	60	2,5	Líquido	253,2	0,8297	10,515	3924,123
20	37,7	89,6	0,07	Líquido	375,2	1,188	25,741	970,451
21	373,2	88	2,4	Líquido	370,3	1,168	26,801	10002,282
22	19,8	93,3	0,19	Líquido	390,9	1,23	28,925	572,723
23	410,9	116,1	2,3	Líquido	488,6	1,483	51,231	21050,982
24	44,7	121,7	0,43	Líquido	511,1	1,546	54,957	2456,596
25	410,9	144,4	2,19	Líquido	609,2	1,783	82,431	33871,062
26	26	147,8	0,88	Líquido	623	1,819	85,503	2223,088
27	455,6	176,7	2,09	Líquido	749,2	2,106	126,177	57486,423
28	563,2	200,6	1,573	Líquido	855,1	2,337	163,239	91936,430
PF	-	-	-	P. de Eixo	-	-	-	26526,720
29	563,2	207,8	36,1	Líquido	902,2	2,352	205,869	115945,646
30	563,2	227,8	35,8	Líquido	989,9	2,532	239,929	135128,238

31	90,7	213,3	2,81	Líquido	913,3	2,454	186,573	16922,207
32	75,1	233,3	4,85	Líquido	1004	2,645	220,355	16548,691
33	563,2	260,6	35,65	Líquido	1138	2,818	302,801	170537,748
34	34,9	266,1	7,14	Líquido	1164	2,934	294,233	10268,746
35	563,2	285,5	35,5	Líquido	1255	3,033	355,731	200347,924
36	18897,1	32,8	0,0103	Líquido	146,7	0,5052	0,695	13184,868
37	770,71	347,0	-	Gases	-	-	-	148721,655

Para realizar as análises a definição da estrutura lógica do sistema é necessária, obtida a partir dos conceitos de Recursos (F) e Produtos (P), e apresentada na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 - Estrutura lógica da unidade ultrasuper-crítica elaborada a partir da relação de fluxos exergeticos de recursos e produtos para os equipamentos.

Dispositivo	Recursos	Produtos
Caldeira	$\dot{B}_{comb} + \dot{B}_{ar} - \dot{B}_{37}$	$(\dot{B}_1 - \dot{B}_{35}) + (\dot{B}_5 - \dot{B}_4)$
Turbina Alta Pressão	$\dot{B}_1 - \dot{B}_2 - \dot{B}_3 - \dot{B}_4$	$\dot{B}_{W,HPT}$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{B}_5 - \dot{B}_6 - \dot{B}_7 - \dot{B}_8 - \dot{B}_9 - \dot{B}_{10}$	$\dot{B}_{W,IPT}$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{B}_{10} - \dot{B}_{11} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14} - \dot{B}_{15}$	$\dot{B}_{W,LPT}$
Gerador	$\dot{B}_{W,HPT} + \dot{B}_{W,IPT} + \dot{B}_{W,LPT}$	$\dot{B}_{PE} + \dot{B}_{W,CEP}$
Condensador	$\dot{B}_{15} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{8i} - \dot{B}_{16}$	-
Bomba Extração Condensado	$\dot{B}_{W,CEP}$	$\dot{B}_{17} - \dot{B}_{16}$
LPH - 1	$\dot{B}_{14} - \dot{B}_{18}$	$\dot{B}_{19} - \dot{B}_{17}$
LPH - 2	$\dot{B}_{13} + \dot{B}_{22} - \dot{B}_{20}$	$\dot{B}_{21} - \dot{B}_{19}$
LPH - 3	$\dot{B}_{12} - \dot{B}_{22}$	$\dot{B}_{23} - \dot{B}_{21} - \dot{B}_{20}$
LPH - 4	$\dot{B}_{11} + \dot{B}_{26} - \dot{B}_{24}$	$\dot{B}_{25} - \dot{B}_{23}$
LPH - 5	$\dot{B}_9 - \dot{B}_{26}$	$\dot{B}_{27} - \dot{B}_{25} - \dot{B}_{24}$
Desaerador	$\dot{B}_7 + \dot{B}_{27} + \dot{B}_{31}$	$\dot{B}_{28}$
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{B}_{W,BFP}$	$\dot{B}_{29} - \dot{B}_{28}$
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{B}_8 - \dot{B}_{8i}$	$\dot{B}_{W,BFP}$
HPH - 1	$\dot{B}_6 + \dot{B}_{32} - \dot{B}_{31}$	$\dot{B}_{30} - \dot{B}_{29}$
HPH - 2	$\dot{B}_2 + \dot{B}_{34} - \dot{B}_{32}$	$\dot{B}_{33} - \dot{B}_{30}$
HPH - 3	$\dot{B}_3 - \dot{B}_{34}$	$\dot{B}_{35} - \dot{B}_{33}$

Com base na Equação (5.33) já apresentada, o balanço de impacto ambiental pode ser desenvolvido, obtendo, portanto uma equação linear para cada dispositivo do sistema estudado, definindo uma matriz de incidência A [18x45]. Além disso, foram obtidas as equações auxiliares a partir dos princípios P e F do Método SPECO, no intuito de obter uma matriz de incidência A [45x45], representando um sistema linear solúvel. Os balanços de impacto ambiental e as equações auxiliares determinadas podem ser verificados na Tabela 6.19. A matriz de incidência para o sistema da unidade ultrasuper-crítica pode ser verificado na Figura 6.6.

Tabela 6.19 - Balanço de impacto ambiental e equações auxiliares para os componentes do sistema para unidade ultrasuper-crítica.

Dispositivo	Balanço de Impacto Ambiental	Equações Auxiliares
Caldeira	$\dot{E}_C + \dot{E}_{Ar} + \dot{E}_{35} + \dot{E}_4 + \dot{E}^{PF} + \dot{Y}_{Cald.} = \dot{E}_1 + \dot{E}_5 + \dot{E}_{37}$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_{35} = \frac{\dot{B}_1 - \dot{B}_{35}}{\dot{B}_5 - \dot{B}_4} (\dot{E}_5 - \dot{E}_4); \dot{E}_C + \dot{E}_{Ar} = \frac{\dot{B}_C + \dot{B}_{Ar}}{\dot{B}_{37}} \dot{E}_{37}$
Turbina Alta Pressão	$\dot{E}_1 + \dot{Y}_{HPT} = \dot{E}_2 + \dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{P,HPT}$	$\dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_2} \dot{E}_2; \dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_3} \dot{E}_3; \dot{E}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\dot{B}_4} \dot{E}_4$
Turbina Pressão Intermediária	$\dot{E}_5 + \dot{Y}_{IPT} = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 + \dot{E}_8 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{P,IPT}$	$\dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_6} \dot{E}_6; \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_7} \dot{E}_7; \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_8} \dot{E}_8; \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_9} \dot{E}_9; \dot{E}_5 = \frac{\dot{B}_5}{\dot{B}_{10}} \dot{E}_{10}$
Turbina Baixa Pressão	$\dot{E}_{10} + \dot{Y}_{LPT} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{P,LPT}$	$\dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{11}} \dot{E}_{11}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{12}} \dot{E}_{12}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{13}} \dot{E}_{13}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{14}} \dot{E}_{14}; \dot{E}_{10} = \frac{\dot{B}_{10}}{\dot{B}_{15}} \dot{E}_{15}$
Gerador	$\dot{E}_{P1} + \dot{E}_{P2} + \dot{E}_{P3} + \dot{Y}_{Gen.} = \dot{E}_{PE} + \dot{E}_{PW,CEP}$	$\dot{E}_{PE} = \frac{\dot{B}_{PE}}{\dot{B}_{PW,CEP}} \dot{E}_{PW,CEP}$
Condensador	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{8i} + \dot{Y}_{Cond.} = \dot{E}_{16} + \dot{E}_{36}$	$\dot{E}_{16} = \frac{\dot{B}_{16}}{\dot{B}_{15} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{8i}} (\dot{E}_{15} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{8i})$
Bomba Extração Condensado	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{PW,CEP} + \dot{Y}_{CEP} = \dot{E}_{17}$	-
LPH - 1	$\dot{E}_{17} + \dot{E}_{14} + \dot{Y}_{LPH1} = \dot{E}_{18} + \dot{E}_{19}$	$\dot{E}_{18} = \frac{\dot{B}_{18}}{\dot{B}_{14}} \dot{E}_{14}$
LPH - 2	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{22} + \dot{Y}_{LPH2} = \dot{E}_{21} + \dot{E}_{20}$	$\dot{E}_{20} = \frac{\dot{B}_{20}}{\dot{B}_{13} + \dot{B}_{22}} (\dot{E}_{13} + \dot{E}_{22})$
LPH - 3	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{20} + \dot{Y}_{LPH3} = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{23}$	$\dot{E}_{22} = \frac{\dot{B}_{22}}{\dot{B}_{12}} \dot{E}_{12}$
LPH - 4	$\dot{E}_{23} + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{26} + \dot{Y}_{LPH4} = \dot{E}_{24} + \dot{E}_{25}$	$\dot{E}_{24} = \frac{\dot{B}_{24}}{\dot{B}_{11} + \dot{B}_{26}} (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{26})$
LPH - 5	$\dot{E}_{25} + \dot{E}_9 + \dot{E}_{24} + \dot{Y}_{LPH5} = \dot{E}_{26} + \dot{E}_{27}$	$\dot{E}_{26} = \frac{\dot{B}_{26}}{\dot{B}_9} \dot{E}_9$
Desaerador	$\dot{E}_7 + \dot{E}_{27} + \dot{E}_{31} + \dot{Y}_{Desae.} = \dot{E}_{28}$	-
Bomba Alimentação Caldeira	$\dot{E}_{28} + \dot{E}_{PW,BFP} + \dot{Y}_{BFP} = \dot{E}_{29}$	-
Turbina Acionamento da Bomba	$\dot{E}_8 + \dot{Y}_{PDT} = \dot{E}_{8i} + \dot{E}_{PW,BFP}$	$\dot{E}_8 = \frac{\dot{B}_8}{\dot{B}_{8i}} \dot{E}_{8i}$
HPH - 1	$\dot{E}_{29} + \dot{E}_6 + \dot{E}_{32} + \dot{Y}_{HPH1} = \dot{E}_{30} + \dot{E}_{31}$	$\dot{E}_{31} = \frac{\dot{B}_{31}}{\dot{B}_6 + \dot{B}_{32}} (\dot{E}_6 + \dot{E}_{32})$
HPH - 2	$\dot{E}_{30} + \dot{E}_3 + \dot{E}_{34} + \dot{Y}_{HPH2} = \dot{E}_{32} + \dot{E}_{33}$	$\dot{E}_{32} = \frac{\dot{B}_{32}}{\dot{B}_3 + \dot{B}_{34}} (\dot{E}_3 + \dot{E}_{34})$
HPH - 3	$\dot{E}_{33} + \dot{E}_2 + \dot{Y}_{HPH3} = \dot{E}_{34} + \dot{E}_{35}$	$\dot{E}_{34} = \frac{\dot{B}_{34}}{\dot{B}_2} \dot{E}_2$



Os resultados da análise exérgica desenvolvida para a unidade ultrassupercrítica, com base na estrutura lógica apresentada na Tabela 6.18, são apresentados na Tabela 6.20. Os valores de recursos, produtos, irreversibilidades, eficiência exérgica, e taxa de destruição de exergia, para cada um dos componentes podem ser verificados.

Tabela 6.20 - Resultados das variáveis exérgicas para os componentes do sistema ultrassupercrítico.

Dispositivo	Recursos [kW]	Produtos [kW]	$i$ [kW]	$\varepsilon$ [%]	$\delta$ [%]
<b>Caldeira</b>	1777437,85	900588,92	876848,93	50,67%	90,77%
<b>Turbina de Alta Pressão - HPT</b>	269176,70	256598,90	12577,80	95,33%	1,30%
<b>Turbina Pressão Intermediária - IPT</b>	241905,96	233209,90	8696,06	96,41%	0,90%
<b>Turbina de Baixa Pressão - LPT</b>	328980,41	310227,70	18752,71	94,30%	1,94%
<b>Condensador*</b>	51745,53	13135,66	38609,87	-	2,41%
<b>Gerador</b>	800036,50	800000,00	36,50	99,63%	0,00%
<b>Bomba de Extração de Condensado - CEP</b>	1716,72	982,71	734,01	57,24%	0,08%
<b>LPH - 1</b>	3680,61	2480,29	1200,32	67,39%	0,12%
<b>LPH - 2</b>	7822,80	6078,16	1744,64	77,70%	0,18%
<b>LPH - 3</b>	11821,47	10078,25	1743,22	85,25%	0,18%
<b>LPH - 4</b>	15118,03	12820,08	2297,95	84,80%	0,24%
<b>LPH - 5</b>	23731,50	21158,77	2572,73	89,16%	0,27%
<b>Desaerador</b>	94235,60	91936,43	2299,17	97,56%	0,24%
<b>Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP</b>	26526,72	24009,22	2517,50	90,51%	0,26%
<b>Turbina Acionamento da Bomba - PDT</b>	30960,09	26526,72	4433,37	85,68%	0,46%
<b>HPH - 1</b>	20930,21	19182,59	1747,62	91,65%	0,18%
<b>HPH - 2</b>	35438,73	35409,51	29,22	99,92%	0,00%
<b>HPH - 3</b>	34252,99	29810,18	4442,81	87,03%	0,46%
<b>TOTAL</b>			1110607,41		
<b>Planta</b>	1926159,507	800036,50		41,54%	

\*Equipamento Dissipativo.

O vetor  $\bar{Y}$  [45x1] contém as atribuições ambientais externas para os fluxos, que são obtidas conforme explicitado no item (5.2.1). Para os componentes do sistema foram obtidos seus respectivos pesos conforme Tabela 5.5, e posteriormente calculados os impactos ambientais relacionados à vida útil destes equipamentos com base na Tabela 5.6 e Tabela 5.7. A análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia ultrassupercrítica pode ser verificada na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 - Análise de ciclo de vida do sistema com tecnologia ultrassupercrítica.

Dispositivo	Peso (t)	Material (mPts/kg)	Processo (mPts/kg)	Descarte (mPts/kg)	Total (mPts/kg)	Total (Pts)
Caldeira	4283,30	1514,08	36,30	-70,00	1480,38	6340915,17
Turbina de Alta Pressão - HPT	281,16	704,00	25,20	-70,00	659,20	185340,05
Turbina Pressão Intermediária - IPT	262,21	704,00	25,20	-70,00	659,20	172849,68
Turbina de Baixa Pressão - LPT	325,18	704,00	25,20	-70,00	659,20	214361,24
Condensador	53,94	86,00	12,10	-70,00	28,10	1515,74
Gerador	-	410,20	16,90	-70,00	357,10	357,10
Bomba de Extração de Condensado - CEP	7,22	186,10	16,90	-70,00	133,00	959,72
LPH - 1	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 2	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 3	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 4	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
LPH - 5	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
Desaerador	209,73	86,00	12,10	-70,00	28,10	5893,45
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	57,00	186,10	16,90	-70,00	133,00	7581,00
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	53,64	704,00	25,20	-70,00	659,20	35359,19
HPH - 1	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
HPH - 2	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75
HPH - 3	27,50	86,00	12,10	-70,00	28,10	772,75

A atribuição externa de impacto ambiental para a entrada de combustível foi realizada com base nos fatores de dano dos ecoindicadores observados na Tabela 5.3, e nos respectivos valores de consumo de combustível e fatores de emissão de cada poluente considerado. Os cálculos do consumo específico de combustível, assim como dos fatores de emissão de cada poluente estão detalhados no Apêndice B. A atribuição externa de impacto ambiental para o combustível pode ser verificado na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 - Impacto ambiental do Carvão Mineral para a unidade ultrassupercrítica.

Substância/Recurso	Consumo Específico [kg/s]	Fator de Emissão [kg/s]	Ecoindicador 99 [mPts/s]
Carvão Mineral	61,99	-	371,376
CO <sub>2</sub>	-	169,259	923,225
SO <sub>2</sub>	-	0,388	613,207
MP <sub>2,5</sub>	-	0,022	403,210
MP <sub>10</sub>	-	0,455	4431,378
TSP	-	0,466	1331,673
NO <sub>x</sub>	-	0,372	1021,130
Total			9095,200

Com base no sistema matricial já exposto ( $\bar{A} \times \dot{E} = \bar{Y}$ ) é possível determinar as taxas de impacto ambiental, para tanto foi utilizado o software *MATLAB R2016a*, desenvolvendo um código para construção da matriz e inserção dos valores do vetor de atribuição externa, disponível para ser verificado no Apêndice D. Os resultados obtidos pela solução do sistema de equações lineares podem ser analisado na Tabela 6.23.

Tabela 6.23 – Custos Exergéticos e Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da unidade de geração termelétrica ultrassupercrítica.

<b>Fluxo</b>	<b>B*</b> <b>(kW)</b>	<b>k*</b>	<b><math>\dot{E}</math></b> <b>(mPts/s)</b>	<b>e</b> <b>(mPts/GJ)</b>
<b>C</b>	1926159,51	1,00	9095,20	4721,94
<b>Ar</b>	0,00	1,00	0,00	0,00
<b>1</b>	1833143,17	2,05	8666,48	9671,06
<b>2</b>	85341,09	2,05	403,46	9671,07
<b>3</b>	91075,13	2,05	430,57	9671,05
<b>4</b>	1106090,18	2,05	5229,22	9671,06
<b>P1</b>	550636,78	2,15	2603,52	10146,25
<b>5</b>	1510314,41	2,03	7140,23	9577,51
<b>6</b>	43158,24	2,03	204,04	9577,53
<b>7</b>	40166,55	2,03	189,89	9577,51
<b>8</b>	72252,26	2,03	341,58	9577,52
<b>8i</b>	9531,62	2,03	45,06	9577,49
<b>9</b>	52580,22	2,03	248,58	9577,50
<b>10</b>	812090,87	2,03	3839,27	9577,51
<b>P2</b>	480534,66	2,06	2272,07	9742,59
<b>11</b>	31099,99	2,03	147,03	9577,54
<b>12</b>	25108,83	2,03	118,71	9577,55
<b>13</b>	16653,59	2,03	78,73	9577,49
<b>14</b>	7525,91	2,03	35,58	9577,56
<b>15</b>	65236,19	2,03	308,41	9577,50
<b>P3</b>	666466,36	2,15	3151,15	10157,55
<b>PE</b>	1694002,63	2,12	8009,55	10011,94
<b>16</b>	934,20	2,03	4,42	9578,73
<b>PB</b>	3635,16	2,12	17,19	10012,12
<b>17</b>	4569,36	3,16	21,61	14964,30
<b>18</b>	69,53	2,03	0,33	9585,17
<b>19</b>	12025,73	3,06	56,86	14489,35
<b>20</b>	1965,99	2,03	9,29	9576,99
<b>21</b>	27873,59	2,79	131,78	13175,19
<b>22</b>	1160,25	2,03	5,49	9577,06
<b>23</b>	53788,16	2,56	254,30	12080,10
<b>24</b>	4976,71	2,03	23,53	9577,48
<b>25</b>	84415,09	2,49	399,09	11782,71
<b>26</b>	4503,65	2,03	21,29	9577,67
<b>27</b>	137468,36	2,39	649,91	11305,47
<b>28</b>	212063,21	2,31	1002,58	10905,12

<b>PF</b>	62720,63	2,36	296,58	11180,31
<b>29</b>	274783,84	2,37	1299,18	11205,03
<b>30</b>	317366,35	2,35	1500,49	11104,21
<b>31</b>	34428,30	2,03	162,77	9618,43
<b>32</b>	33852,57	2,05	160,04	9671,04
<b>33</b>	395595,02	2,32	1870,33	10967,26
<b>34</b>	21006,11	2,05	99,31	9671,09
<b>35</b>	459930,00	2,30	2174,49	10853,55
<b>36</b>	73903,15	5,61	349,39	26499,32
<b>37</b>	148722,11	1,00	702,26	4721,95

Baseado na análise exergoambiental desenvolvida os valores dos impactos ambientais médios por unidade de exergia para produtos e de combustível, a taxa de impacto ambiental associada com a destruição de exergia dentro de cada componente, o impacto ambiental relacionado ao componente e o fator exergoambiental para o sistema com tecnologia ultrassupercrítica foram calculados, sendo apresentados na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 - Variáveis exergoambientais do sistema de tecnologia ultrassupercrítica.

<b>Equipamentos</b>	$e_F$ (mPts/GJ)	$e_P$ (mPts/GJ)	$\dot{E}_D$ (mPts/s)	$\dot{E}^{PF}$ (mPts/s)	$\dot{Y}$ (mPts/s)	$f_b$ (%)	$r_b$ (%)
Caldeira	4.721,98	9.330,56	4.140,38	8723,823	10,053	67,886%	97,60%
Turbina de Alta Pressão - HPT	9.671,06	10.146,25	121,64		0,2939	0,222%	4,91%
Turbina Pressão Intermediária - IPT	9.577,52	9.742,59	83,29		0,2741	0,303%	3,74%
Turbina de Baixa Pressão - LPT	9.577,51	10.157,55	179,60		0,3399	5,803%	0,18%
Gerador	10.032,97	10.033,43	0,37		0,0006	0,002%	0,37%
Bomba de Extração de Condensado - CEP	10.012,12	17.491,42	7,35		0,0015	0,019%	74,70%
LPH - 1	9.577,49	14.212,87	11,50		0,0012	0,010%	48,40%
LPH - 2	9.577,52	12.326,76	16,71		0,0012	0,007%	28,71%
LPH - 3	9.577,57	11.234,29	16,70		0,0012	0,007%	17,30%
LPH - 4	9.577,57	11.294,39	22,01		0,0012	0,005%	17,93%
LPH - 5	9.577,48	10.742,12	24,64		0,0012	0,005%	12,16%
Desaerador	10.638,96	10.905,12	24,46		0,0093	0,035%	2,50%
Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP	11.180,31	12.353,46	28,15		0,0205	0,067%	10,49%
Turbina Acionamento da Bomba - PDT	9.577,52	11.180,31	42,46		0,0561	0,122%	16,73%
HPH - 1	9.618,39	10.494,78	16,81		0,0012	0,007%	9,11%
HPH - 2	9.671,09	10.444,62	0,28		0,0012	0,399%	8,00%
HPH - 3	9.671,04	10.203,06	42,97		0,0012	0,003%	5,50%
Planta	4.721,94	11.326,50	4.779,30	8723,823	11,061	64,684%	139,87%

## 6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.4.1. ANÁLISE EXERGÉTICA

A realização da análise exergética possibilitou quantificar as irreversibilidades presentes nas centrais térmicas a carvão analisadas, contabilizando um total de 795,6 MW para subcrítica, 954,4 MW para supercrítica, e 965,95 MW para a ultrassupercrítica. Para os três sistemas estudados a caldeira se mostra como a principal fonte de irreversibilidades do sistema sendo responsável por 684,6 MW (86,1%), 828,2 MW (86,8%) e 876,8 MW (90,8%) da destruição de exergia nos sistemas subcrítico, supercrítico e ultrassupercrítico, respectivamente. Os demais subsistemas das centrais termelétricas, sendo eles, o conjunto de turbinas, de preaquecedores de água de alimentação, o condensador, e as bombas, apresentaram baixa importância para a destruição de exergia em todos os casos estudados, conforme pode ser verificado na Figura 6.7.

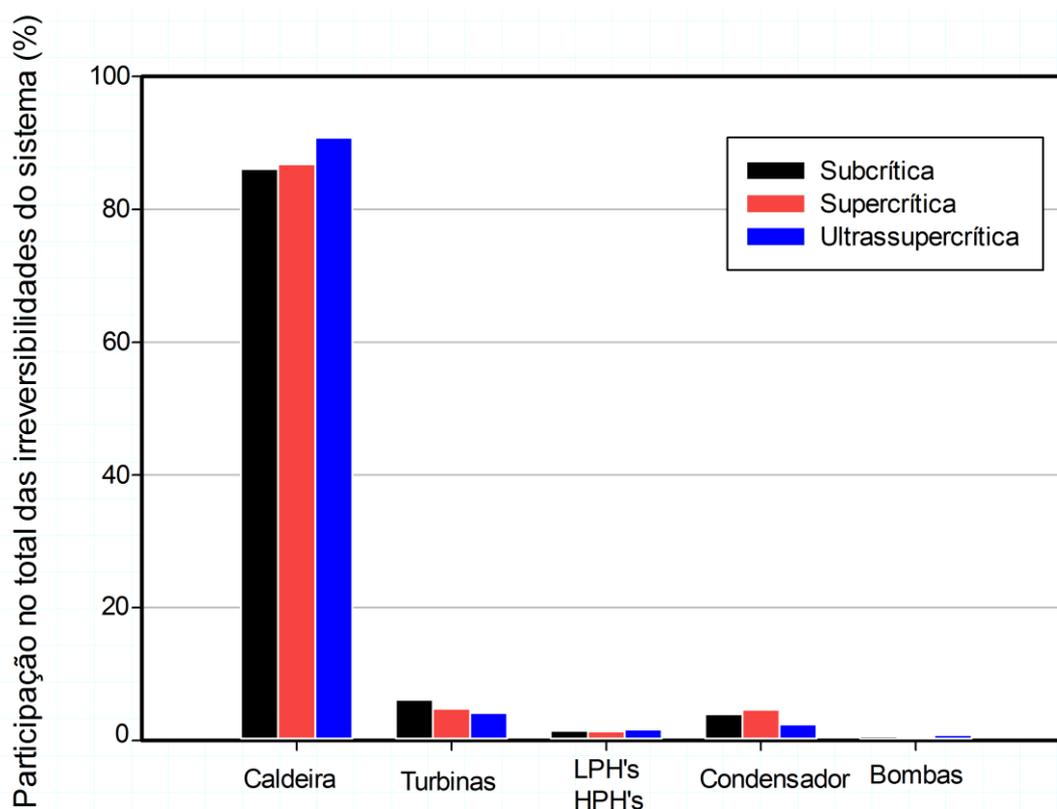


Figura 6.7 - Participação de cada subsistema na destruição de exergia total do sistema.  
Fonte: Próprio autor.

Para a caldeira observa-se um aumento da importância de suas irreversibilidades em relação ao total do sistema à medida que partimos para a tecnologia ultrassupercrítica, tal comportamento não significa que as caldeiras supercríticas e ultrassupercríticas proporcionem maior destruição de exergia, pelo contrário, tais tipos de caldeiras possuem aspectos

construtivos que propiciam melhores condições de trocas de calor entre o fluxo de gases de combustão e o fluido, melhorando sua eficiência exergética e reduzindo as irreversibilidades. O que justifica o relativo aumento da importância das irreversibilidades da caldeira é a redução considerável da destruição de exergia que o uso de condições super e ultrassupercríticas proporcionam no subsistema das turbinas, sendo as porcentagens de participação das turbinas na destruição de exergia de 6,1% para a condição subcrítica, 5,4% para supercrítica, e apenas 4,1% na ultrassupercrítica. Esta relativa redução das irreversibilidades nas turbinas é resultado do aumento da eficiência exergética das mesmas, principalmente para a turbina de baixa pressão, conforme pode ser verificado na Figura 6.9, este ganho de eficiência tem como principal responsável à condição de vapor que alimenta as turbinas, com alta pressão e temperatura. A Figura 6.8 apresenta as condições do vapor que deixa a caldeira e alimenta a turbina de alta pressão, do fluxo que deixa o estágio de reaquecimento e chega à turbina de pressão intermediária, assim como os estágios de expansão nas turbinas, comparando para as três centrais analisadas.

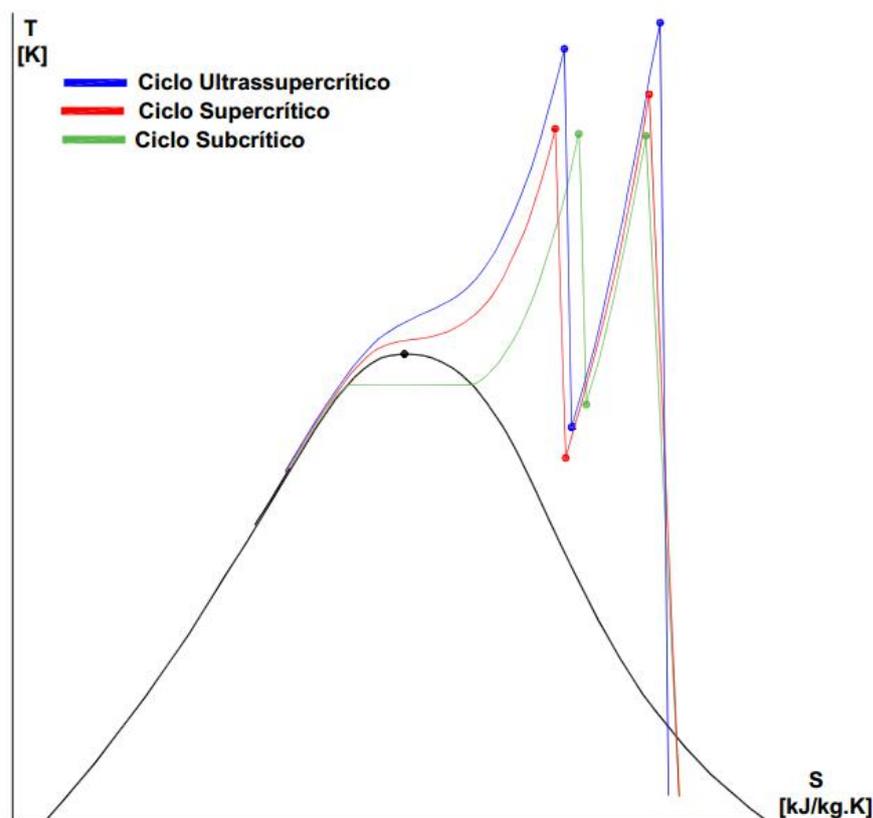


Figura 6.8 - Diagrama T-S dos estágios de superaquecimento, reaquecimento e expansão nas turbinas para os ciclos estudados.

Fonte: Próprio autor.

A eficiência exergética média do subsistema das turbinas é 91,7% no subcrítico, 92,4% para o supercrítico, e 95,3% para o caso ultrassupercrítico, evidenciando o significativo ganho

de eficiência das turbinas em detrimento das condições de vapor com maior temperatura e pressão. A eficiência exergética para a caldeira, turbinas, bombas e para o gerador pode ser verificada na Figura 6.9.

Para o subsistema dos preaquecedores de água de alimentação observa-se de modo geral um aumento da eficiência exergética dos equipamentos no sentido do fluxo dentro da linha de aquecedores de baixa pressão, com comportamento semelhante nos três sistemas analisados. Entretanto, a eficiência exergética de cada preaquecedor de baixa pressão individualmente apresentou uma redução para as tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica com relação a subcrítica. Como pode ser visto na Figura 6.10, por exemplo, o LPH-3 que para a condição subcrítica obteve uma eficiência de 89,5%, 87,6% no supercrítico, e 85,2% no ultrassupercrítico, uma queda de mais de 4 pontos percentuais.

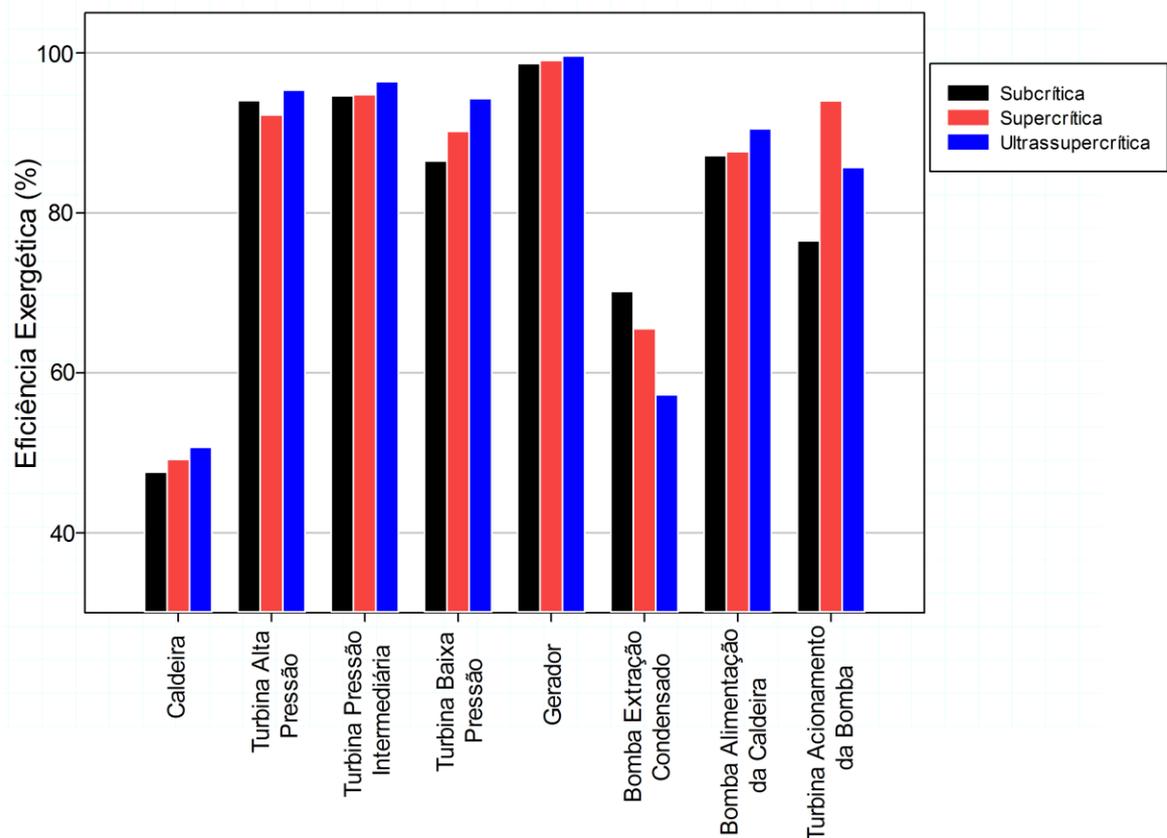


Figura 6.9 - Eficiência exergética da caldeira, turbinas, bombas e gerador para os sistemas subcrítico, supercrítico e ultrassupercrítico.

Fonte: Próprio autor.

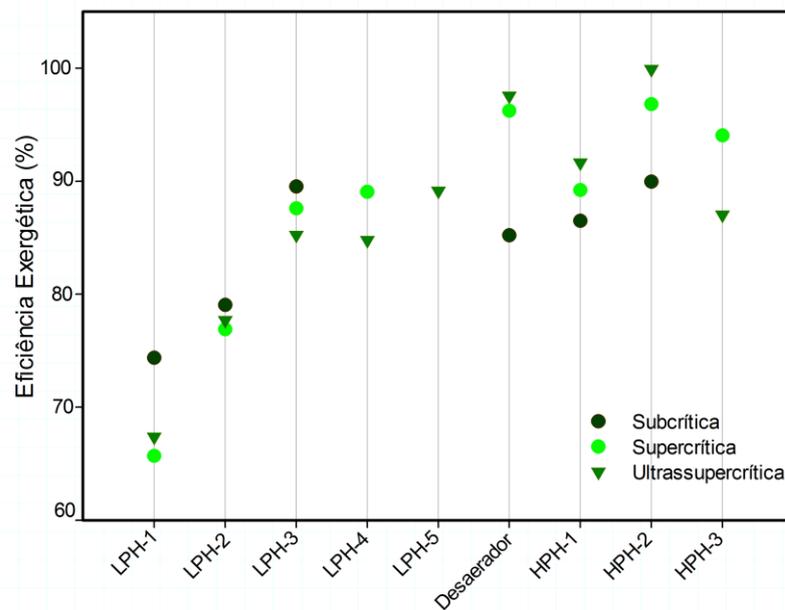


Figura 6.10 - Eficiência Exergética dos preaquecedores de água de alimentação de baixa e alta pressão.  
Fonte: Próprio autor.

Verificou-se um ganho de aproximadamente 6% na eficiência exergética total da central de geração a carvão quando aplicada a tecnologia ultrasupercrítica, quando comparada a tecnologia convencional subcrítica. Conforme pode ser verificado na Figura 6.11, a eficiência da unidade subcrítica é de 35,82%, da supercrítica é de 37,85%, e da ultrasupercrítica 41,54%.

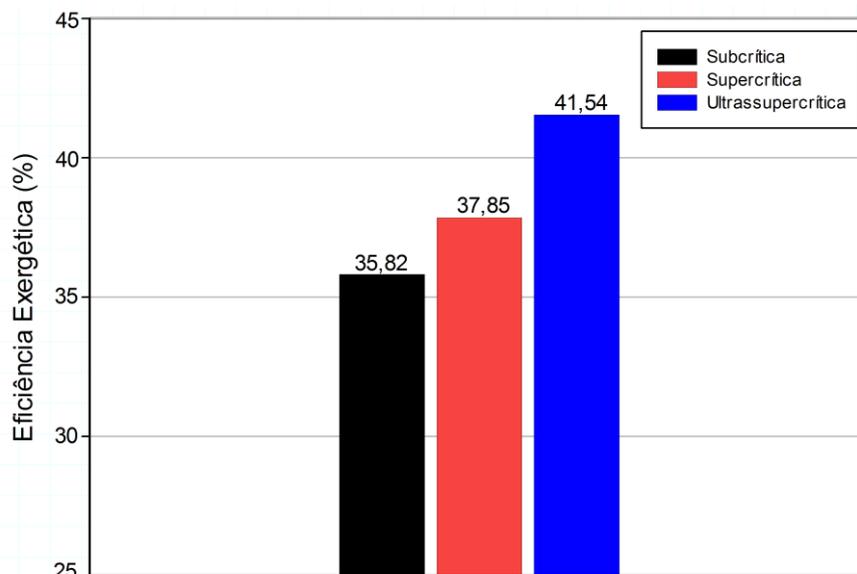


Figura 6.11 - Eficiência exergética total das centrais analisadas.  
Fonte: Próprio autor.

Os valores da distribuição percentual das irreversibilidades e da eficiência exergética para os componentes dos sistemas que foram encontrados são similares aos apresentados em outros estudos realizados por Yang *et al.* (2013), Wang *et al.* (2012) e Silva, D. C. (2004), como pode ser observado na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Comparação dos resultados encontrados na análise exergetica e os presentes na literatura.

Equipamentos	Yang <i>et al.</i> (2013) Ultrasupercrítica		Presente Trabalho Ultrasupercrítica		Wang <i>et al.</i> (2012) Supercrítica		Presente Trabalho Supercrítica		Silva, D. C. (2004) Subcrítica		Presente Trabalho Subcrítica	
	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]	$\epsilon$ [%]	$\delta$ [%]
<b>Caldeira</b>	44,0	-	50,67	90,77	52,70	-	49,16	86,77	42,26	86,94	47,59	86,05
<b>Turbina de Alta Pressão - HPT</b>	93,75	0,86	95,33	1,30	93,7	0,95	92,26	1,81	93,56	0,97	94,04	1,15
<b>Turbina Pressão Intermediária - IPT</b>	96,40	0,43	96,41	0,90	96,4	0,45	94,78	1,69	93,20	2,94	94,66	1,22
<b>Turbina de Baixa Pressão - LPT</b>	89,00	1,92	94,30	1,94	88,98	1,98	90,20	1,94			86,48	3,74
<b>Condensador</b>	-	1,52	-	2,41	-	1,27	-	4,62	-	2,25	-	3,95
<b>Gerador</b>	98,60	0,60	99,98	0,00	98,60	0,65	99,06	0,66	93,85	3,35	98,66	0,85
<b>Bomba de Extração de Condensado - CEP</b>	80,70	0,01	57,24	0,08	80,50	0,01	65,53	0,07	63,48	0,08	70,18	0,01
<b>Aquecedores Baixa Pressão - LPH (Média)</b>	79,28	0,42	80,86	0,99	78,65	0,46	79,80	0,73	71,20	1,23	80,98	0,53
<b>Desaerador</b>	86,10	0,21	97,56	0,24	86,7	0,20	96,24	0,31	94,65	0,32	85,21	0,99
<b>Bomba de Alimentação da Caldeira - BFP</b>	89,60	0,13	90,51	0,26	89,4	0,15	87,67	0,15	63,23	0,49	87,14	0,18
<b>Turbina Acionamento da Bomba - PDT</b>	80,90	0,30	85,68	0,46	80,90	0,33	94,02	0,15	75,60	0,43	76,50	0,42
<b>Aquecedores Alta Pressão - HPH (Média)</b>	93,80	0,38	92,87	0,64	92,93	0,61	93,35	0,95	85,43	0,98	88,22	0,91
<b>Total da Planta</b>	41,4	-	41,54	-	40,30	-	37,85	-	33,52	-	35,82	-

Fonte: Próprio autor.

### 6.4.2. ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL

Na Tabela 6.7, Tabela 6.15 e Tabela 6.23, podem ser verificadas as taxas de impacto ambiental ( $\dot{E}_i$ ) e o impacto ambiental específico ( $e_i$ ) obtidos para cada um dos fluxos exergéticos, para as centrais subcrítica, supercrítica e ultrassupercrítica, respectivamente. Como pode ser observado para todos os casos analisados o impacto ambiental do ar atmosférico que entra no sistema para combustão é nulo, uma vez que este tem origem no ambiente e desta forma não há nenhuma atribuição externa de impacto a este fluxo.

Em componentes nos quais há fornecimento de trabalho, calor ou combustível, estes fluxos de recursos rejeitam uma taxa de impacto ambiental e os fluxos de produtos recebem uma taxa de impacto ambiental, isto pode ser verificado claramente analisando os fluxos da caldeira, que recebe uma taxa de impacto ambiental do combustível e da formação de poluentes. Na central subcrítica o fluxo 28 entra na caldeira com uma taxa de impacto ambiental de 1399,26 mPts/s, e após passar pelos estágios do economizador, evaporador e superaquecedor, deixa a caldeira como fluxo 3 com uma taxa de impacto ambiental de 6598,93 mPts/s, esta diferença na taxa representa um impacto ambiental específico de 9948,49 mPts/GJ. Para a central supercrítica tem-se a entrada do fluxo 33 com uma taxa de impacto ambiental de 2337,55 mPts/s, e o fluxo 1 que deixa a caldeira com taxa de 8312,94 mPts/s, representando um impacto ambiental específico de 9611,13 mPts/GJ. E por fim para o caso ultrassupercrítico o fluxo 35 entra na caldeira com uma taxa de impacto ambiental de 2174,49 mPts/s, passa pelos estágios da caldeira, e sai como fluxo 1 com uma taxa de impacto ambiental com valor de 8666,48 mPts/s, que indicando que esta diferença na taxa representa um impacto ambiental específico de 9330,56 mPts/GJ. Os resultados obtidos indicando elevado aumento da taxa de impacto ambiental podem ser visualizados na Figura 6.12, e mostram como a caldeira representa um equipamento com grande influência na formação do impacto ambiental da energia gerada, assim como fica evidente a redução do acréscimo no impacto ambiental específico, medido em mPts/GJ, à medida que caminha-se para o uso da tecnologia ultrassupercrítica.

Em equipamentos como os preaquecedores da água de alimentação da caldeira e as bombas há fornecimento de calor e trabalho, respectivamente, de forma que a taxa de impacto ambiental dos fluxos aumentam gradativamente no sentido do fluxo, a Figura 6.13 apresenta as taxas de impacto ambiental da linha dos preaquecedores da água de alimentação para a central subcrítica, sendo de 10,62 mPts/s no ponto 15 enquanto no ponto 28 é de 1399,26 mPts/s, o que confere um aumento de impacto ambiental no fluxo de 2295,57 mPts/GJ. No

caso da central supercrítica, apresentado na Figura 6.14, a taxa de impacto é de 10,99 mPts/s no ponto 15 e 2237,55 mPts/s no ponto 33, representando um acréscimo de 1334,65 mPts/GJ no impacto ambiental do fluxo. E conforme apresentado na Figura 6.15, no ponto 16 da central ultrassupercrítica a taxa de impacto ambiental é de 4,42 mPts/s enquanto no ponto 35 é de 2174,49 mPts/s, proporcionando um aumento de 1274,82 mPts/GJ no impacto ambiental do fluxo.

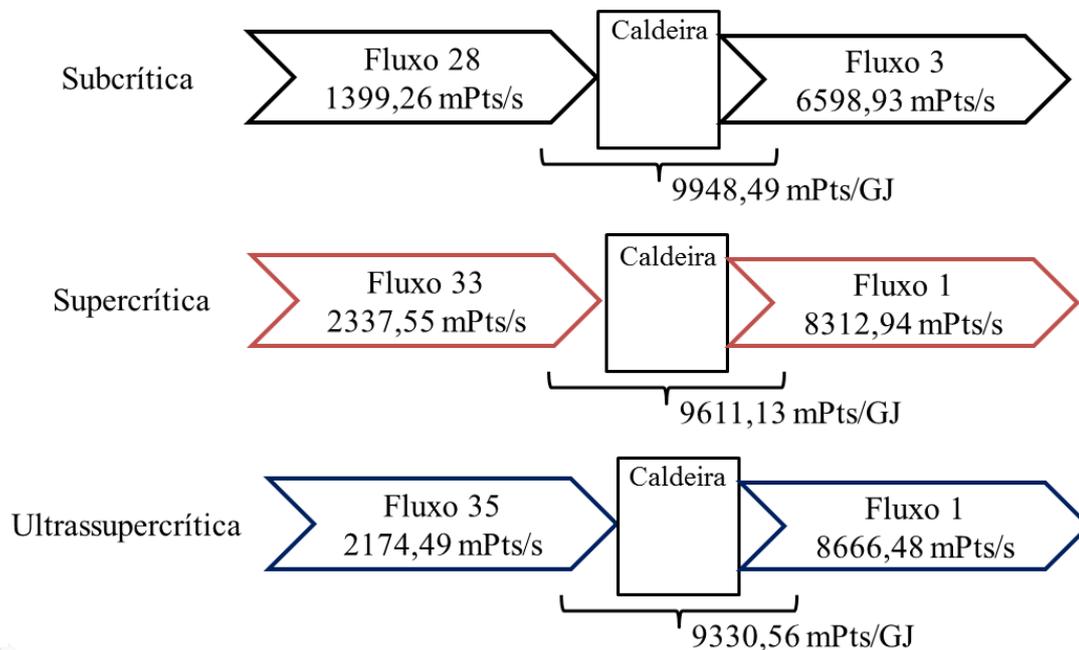


Figura 6.12 – Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos da caldeira, e seu respectiva taxa de impacto ambiental específica.

Fonte: Próprio autor.

Para a linha de preaquecedores de água de alimentação da caldeira (sistema regenerativo), fica evidente como os equipamentos em que há fornecimento de calor e trabalho contribuem para o gradativo aumento das taxas de impacto ambiental do fluxo, que conseqüentemente irá compor parte do impacto ambiental da eletricidade gerada na central termelétrica. É importante destacar como a mudança tecnológica para sistema supercríticos e ultrassupercríticos possibilitam redução do aumento das taxas de impacto ambiental também no subsistema dos preaquecedores, saindo de 2295,6 mPts/GJ no sistema subcrítico para 1274,8 mPts/GJ no ultrassupercrítico.

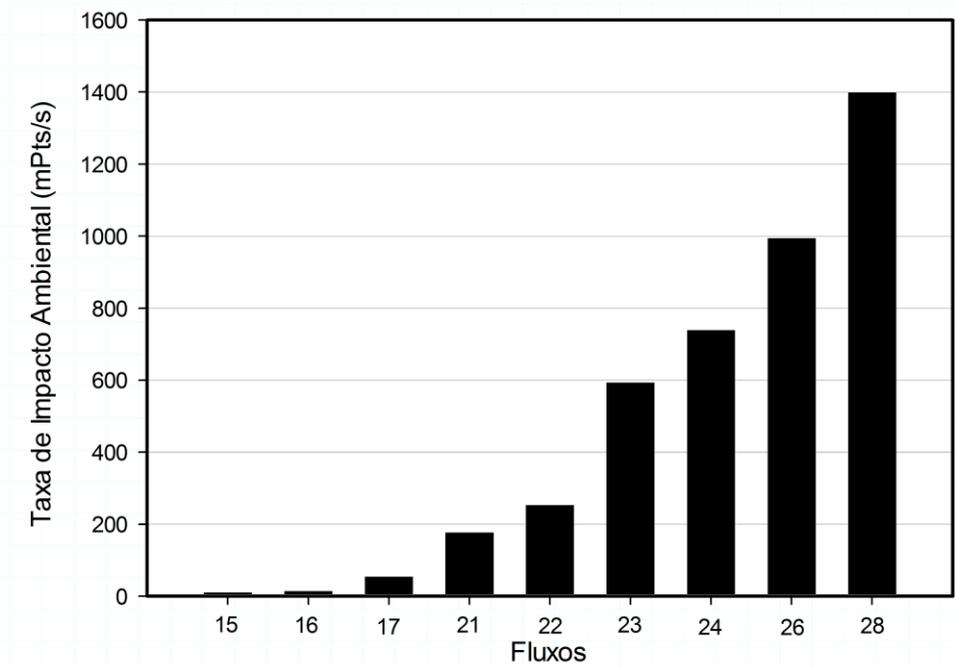


Figura 6.13 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central subcrítica.  
 Fonte: Próprio autor.

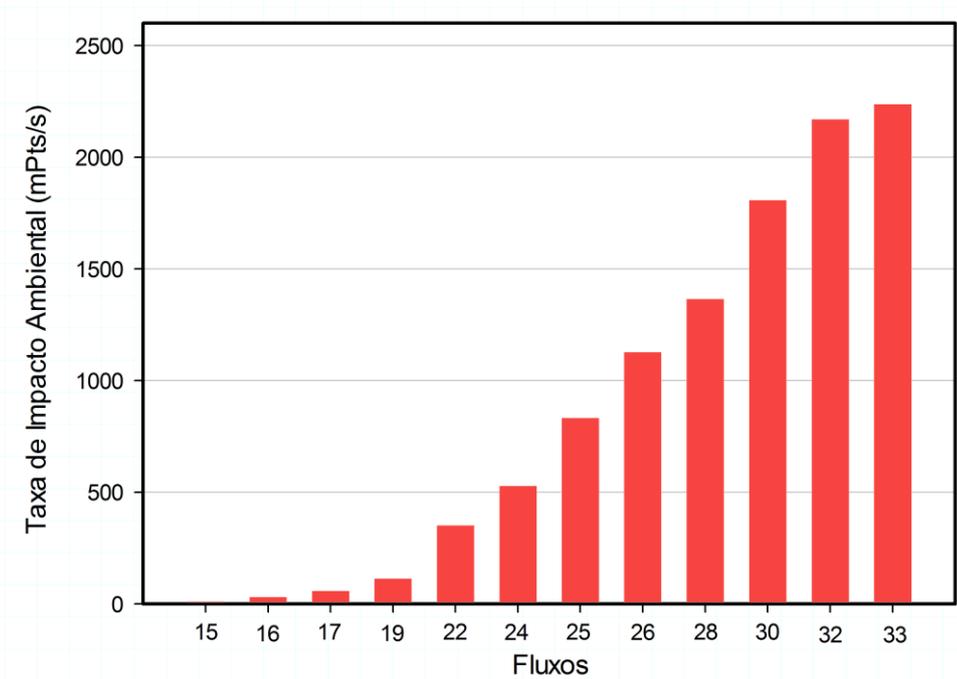


Figura 6.14 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central supercrítica.  
 Fonte: Próprio autor.

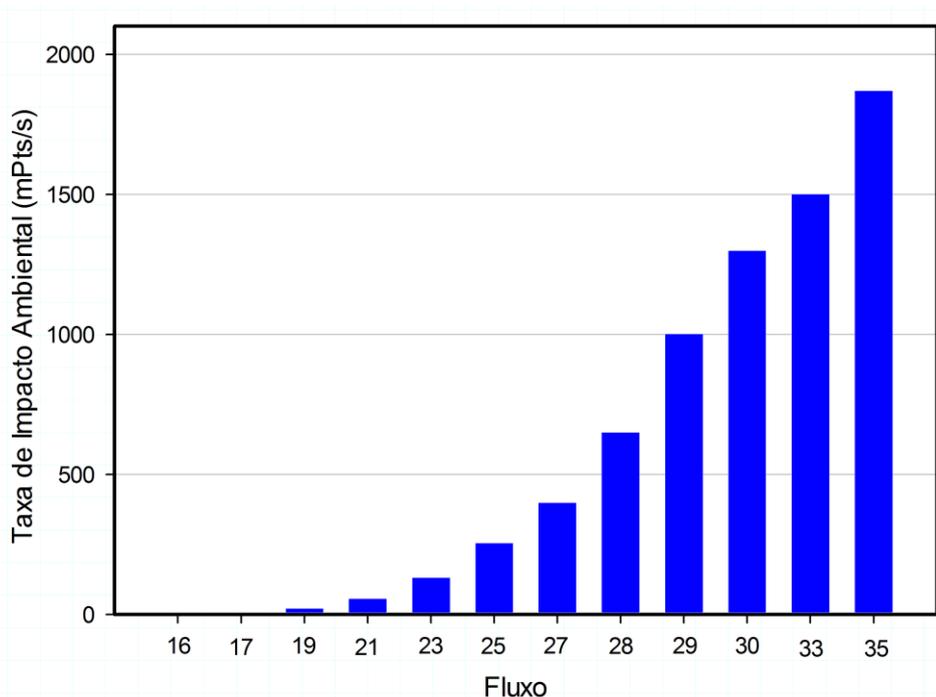


Figura 6.15 - Taxa de Impacto Ambiental dos fluxos da linha de preaquecedores de água de alimentação da central ultrasuper-crítica.  
Fonte: Próprio autor.

O condensador representa um componente dissipativo nos sistemas estudados e desta forma a taxa de impacto ambiental associada a este componente deve ser agregada ao impacto do produto do sistema. Nestes casos o fluxo de água de resfriamento que deixa o condensador constitui um fluxo rejeitado pelo sistema e representa o impacto ambiental associado a este componente, a taxa de impacto ambiental é de 435,25 mPts/s para a central sub-crítica, 565,82 mPts/s para super-crítica, e 349,39 mPts/s para ultrasuper-crítica, que fornecem portanto, taxas de impacto por kwh de eletricidade gerada de 3,13 mPts/kwh, 3,09 mPts/kwh, e 1,57 mPts/kwh, respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 6.16. Esta taxa de impacto ambiental pode ainda ser avaliada com relação a uma medida unitária do fluxo de água de resfriamento, obtendo uma taxa de impacto de 0,028 mPts/kgH<sub>2</sub>O, 0,030 mPts/kgH<sub>2</sub>O, e 0,018 mPts/kgH<sub>2</sub>O, respectivamente para as centrais sub-crítica, super-crítica e ultrasuper-crítica. A taxa de impacto ambiental do fluxo de água de resfriamento é um importante parâmetro a ser analisado tendo em vista os altos impactos que este proporciona ao ecossistema no qual é rejeitado.

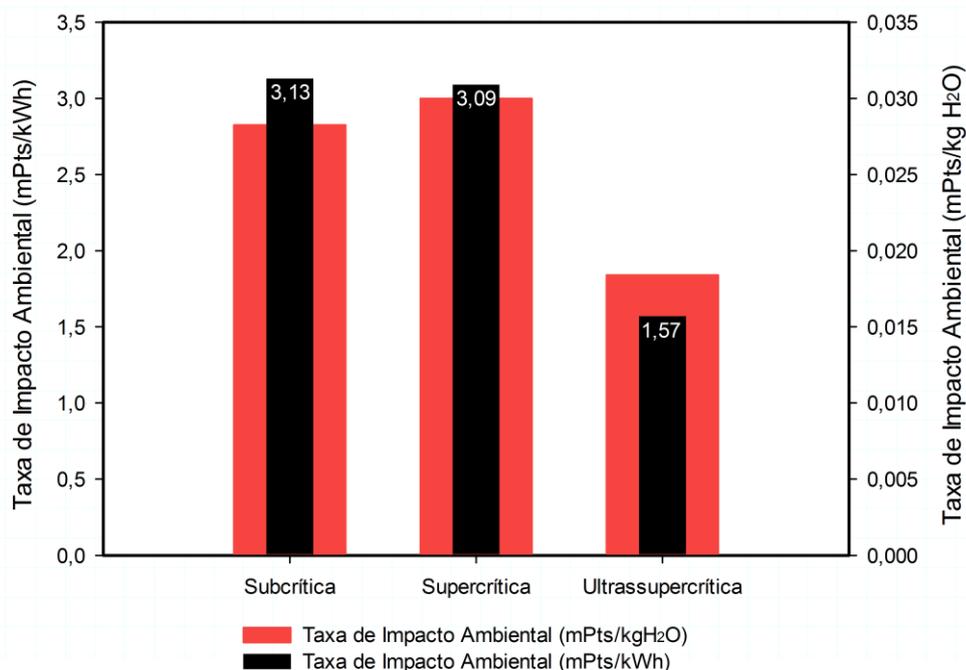


Figura 6.16 - Taxas de Impacto ambiental da água de resfriamento rejeitada para o ambiente no condensador das centrais termelétricas analisadas.

Fonte: Próprio autor.

O fluxo de gases de exaustão que deixa a caldeira constitui um fluxo rejeitado pelo sistema contendo elevado conteúdo exergético, sendo, portanto um fluxo poluidor com elevado potencial de dano ao meio ambiente. Tal fluxo tem uma taxa de impacto ambiental de 516,87 mPts/s para a central subcrítica, 643,30 mPts/s para supercrítica, e 702,26 mPts/s para ultrassupercrítica, que representam taxas de impacto por kWh de eletricidade gerada de 3,72 mPts/kwh, 3,51 mPts/kwh, e 3,16 mPts/kwh, respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 6.17.

A eletricidade (PE) gerada pelo sistema subcrítico tem um impacto ambiental específico de 11501,16 mPts/GJ, o que representa um impacto para a eletricidade de 41,40 mPts/kWh. O impacto total produzido pelo sistema para gerar uma unidade de eletricidade é dada pela taxa de impacto ambiental do fluxo de eletricidade (PE) somada as taxas de impacto dos fluxos rejeitados pelo sistema ao ambiente (29) e (30), totalizando 48,26 mPts/kwh. Para a central supercrítica o impacto ambiental específico é de 10806,96 mPts/GJ para a eletricidade gerada (PE), o que remete a um impacto de 38,90 mPts/kWh, de forma que o impacto ambiental total produzido na geração de eletricidade é de 45,50 mPts/kWh. E por fim, para a eletricidade (PE) gerada pela central ultrassupercrítica foi obtido impacto ambiental específico de 10011,94 mPts/GJ, que representa um impacto de 36,04 mPts/kWh para a eletricidade gerada, e para este caso o impacto ambiental total originado no sistema para geração de eletricidade é

de 40,78 mPts/kWh, resultante da soma do impacto do fluxo de eletricidade com o impacto dos fluxos de água de resfriamento rejeitado no condensador e fluxo dos gases de exaustão da caldeira.

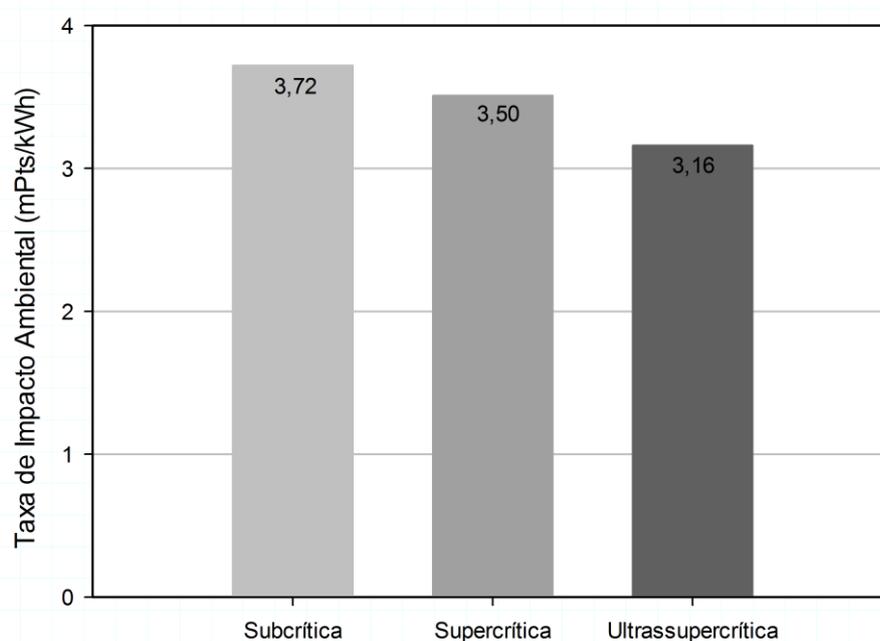


Figura 6.17 - Taxas de Impacto ambiental dos gases de exaustão rejeitados para o ambiente na caldeira das centrais termelétricas analisadas.

Fonte: Próprio autor.

O avanço tecnológico no sentido da utilização das unidades supercríticas e ultrassupercríticas promovem significativa redução no impacto ambiental que a geração termelétrica a carvão proporciona, tal fato pode ser confirmado pela análise do impacto ambiental da eletricidade gerada por cada sistema, conforme apresentada acima, e que pode ser visualizada na Figura 6.18 e Figura 6.19.

A mudança tecnológica de uma central subcrítica para uma central supercrítica, que representa um ganho de 2,0 % de eficiência exergética da planta, possibilita uma redução no impacto ambiental total da geração de eletricidade de 2,76 mPts/kWh (5,7%). Por outro lado a opção por uma central ultrassupercrítica em detrimento de uma subcrítica, representa ganho de 5,72% de eficiência exergética da planta, indica uma minimização no impacto ambiental total da geração de eletricidade de 7,48 mPts/kWh (15,5%). Já entre as tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica a diferença no impacto ambiental total da geração de eletricidade é de 4,72 MPts/kWh (10,4%).

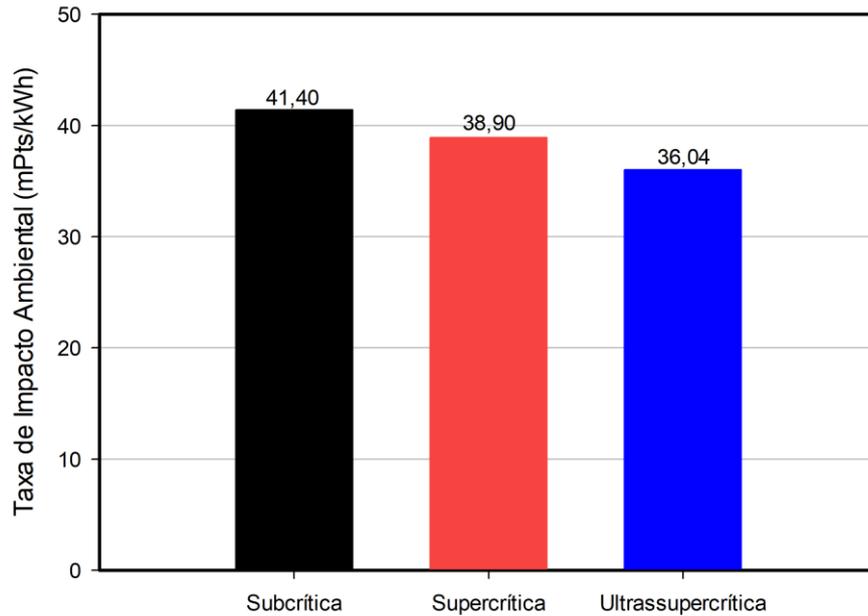


Figura 6.18 - Taxas de Impacto ambiental do fluxo de eletricidade gerada pelas centrais termelétricas analisadas. Fonte: Próprio autor.

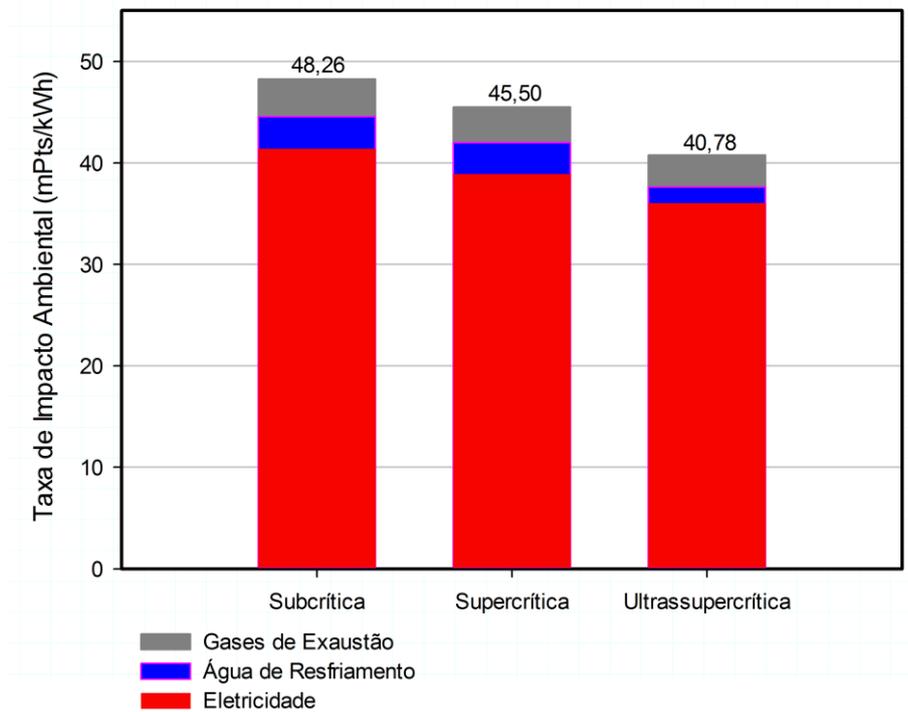


Figura 6.19 - Taxas de Impacto ambiental totais da geração de eletricidade pelas centrais termelétricas analisadas. Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para as taxas de impacto ambiental da eletricidade neste estudo para a geração a carvão em central subcrítica, supercrítica, e ultrassupercrítica podem ser comparados com resultados de outros sistemas de geração de energia, conforme apresentado na Tabela 6.26. O sistema de geração a carvão mostra-se como uma alternativa para geração de eletricidade que possui uma taxa de impacto ambiental razoavelmente superior a outros

sistemas, que utilizam, por exemplo, o gás natural como combustível. De acordo com os dados apresentados por Goedkoop, Effing e Collignon (2000) a taxa de impacto ambiental encontrada para as centrais a carvão no presente trabalho também é superior ao da eletricidade gerada na Europa, resultado este que se justifica pelo fato da matriz elétrica europeia ser constituída por um mix de fontes, sendo o carvão apenas uma parcela do total. Dentre os países da comunidade europeia há uma variação bem grande entre as taxas de impacto ambiental da sua geração de eletricidade, sendo o valor obtido neste estudo, intermediário ao verificados para países como Grécia, França e Grã Bretanha.

Tabela 6.26 - Taxa de impacto ambiental da eletricidade para sistemas de geração.

<b>Pesquisa</b>	<b>Sistema</b>	<b>Combustível</b>	<b>Taxa de Impacto Ambiental (mPts/kWh)</b>
Presente Trabalho	Central a carvão Ultrassupercrítica		40,78
	Central a carvão Supercrítica	Carvão Mineral	45,50
	Central a carvão Subcrítica		48,26
Cavalcanti, 2017	Ciclo combinado com campo solar integrado	Gás Natural/Solar	20
Cavalcanti, 2017	Ciclo combinado sem campo solar	Gás Natural	22
Casas-Ledón; Spauldo; Arteaga-Pérez, 2017	Ciclo combinado integrado baseado em resíduos (WICC)	Resíduos Sólidos Urbanos	13,5
Petrakopoulou et al., 2011	Ciclo combinado com CLC	Gás Natural	23
Petrakopoulou et al., 2011	Ciclo combinado sem CLC	Gás Natural	32
Goedkoop; Spriensma, 2000	Eletricidade LV Europa	-	22
	Eletricidade LV Grécia	-	61
	Eletricidade LV França	-	8,9
	Eletricidade LV Grã Bretanha	-	33

Fonte: Próprio autor.

A razão entre o impacto ambiental relacionado ao componente ( $\dot{Y}$ ) e a exergia da eletricidade gerada representa qual o impacto que a fabricação, operação e descarte dos equipamentos têm na formação do impacto ambiental dos fluxos do sistema. Analisando para a potência gerada por cada uma das turbinas, em cada um dos sistemas avaliados, obtém-se a influência dos impactos relacionados às turbinas na taxa de impacto ambiental do fluxo de energia produzida em cada uma delas, conforme pode ser verificado na Tabela 6.27.

Os resultados indicam uma importância pouco significativa do componente na formação do impacto da energia gerada, assim como pôde ser verificado que a mudança tecnológica não indica grandes alterações no sentido de minimização deste impacto relacionado ao componente.

Tabela 6.27 - Parcelas das taxas de impacto ambiental originadas do impacto relacionado ao componente, para o conjunto de turbinas.

	<b>Subcrítica</b>	<b>Supercrítica</b>	<b>Ultrassupercrítica</b>
Turbina Baixa Pressão	4,47 mPts/MWh	4,61 mPts/MWh	3,91 mPts/MWh
Turbina Pressão Intermediária	4,59 mPts/MWh	3,98 mPts/MWh	4,23 mPts/MWh
Turbina Alta Pressão	4,82 mPts/MWh	4,38 mPts/MWh	4,12 mPts/MWh

Fonte: Próprio autor.

Os valores dos impactos ambientais por unidade de exergia para os recursos e produtos, a taxa de impacto ambiental associada ao componente, com a destruição de exergia e com a formação de poluentes, o fator exergoambiental e a diferença relativa entre o impacto ambiental específico do produto e do recurso, podem ser verificados na Tabela 6.8, Tabela 6.16 e Tabela 6.24.

O maior impacto ambiental por unidade de exergia de recurso na central subcrítica é 13504,73 mPts/GJ, apresentado pela bomba de alimentação da caldeira (BFP) que corresponde ao impacto ambiental da potência gerada pela turbina auxiliar de acionamento da bomba. Já o maior impacto ambiental por unidade de produto é 16388,45 mPts/GJ apresentado pela bomba de extração de condensado (CEP) devido ao baixo incremento de exergia do fluxo utilizando um alto valor de recursos. Os resultados apresentados para a central ultrassupercrítica seguem o mesmo padrão, com maior impacto ambiental específico de recurso na bomba de alimentação da caldeira (BFP) com valor de 11180,31 mPts/GJ, enquanto o maior impacto ambiental específico de produtos ocorre na bomba de extração de condensado (CEP) cujo valor é de 17491,42 mPts/GJ.

Para a central supercrítica o resultado obtido indica o desaerador como o componente com maior impacto ambiental específico de recursos, com total de 11082,24 mPts/GJ, que é dado pelo impacto ambiental dos fluxos que alimentam o desaerador. O aquecedor auxiliar do final da linha de preaquecedores de água de alimentação possui o maior impacto ambiental por unidade de produto, tal fato é resultado da eficiência muito baixa de tal componente.

Para nenhum dos sistemas analisados a taxa de impacto ambiental associada ao componente (produção, operação e manutenção e descarte) se mostra significativa na análise, entretanto a caldeira é o componente que possui maior valor 10,05 mPts/s, que corresponde a 90,9% do total da taxa de impacto ambiental relacionada aos equipamentos da planta USC, seguido pelas turbinas de baixa pressão 3,1%, alta pressão 2,7% e de pressão intermediária 2,5%. Para a central SC a caldeira representa 91,4% (9,33 mPts/s) do total da taxa de impacto ambiental, seguido pelas turbinas de pressão intermediária 3,2%, alta pressão 2,4%, e de baixa

pressão 2,1%. Na central subcrítica a caldeira representa 91,7% (7,76 mPts/s) do impacto ambiental total associado aos componentes, seguido por turbinas com 2,8%, 2,6% e 2,3%, para baixa pressão, pressão intermediária e alta pressão, respectivamente.

A taxa de impacto ambiental relacionada à destruição de exergia é 4779,30 mPts/s e representa 35,36% da taxa de impacto ambiental total do sistema USC, deste total 86,6% ocorre na caldeira devido a ocorrência da reação química de combustão e da intensa troca de calor com grande diferença de temperatura. A formação de poluentes é a principal fonte de impacto ambiental do sistema com uma taxa de 8723,82 mPts/s, representando 64,55% da taxa de impacto ambiental total do sistema devido ao grande aporte de emissões proporcionado pela combustão de carvão mineral, sendo totalmente relacionada a caldeira pois esta representa a única fonte de formação de poluentes no sistema.

Para a central supercrítica a taxa de impacto ambiental relacionada à destruição de exergia é 4734,9 mPts/s e representa 37,18% da taxa de impacto ambiental total do sistema, deste total 82,5% ocorre na caldeira. A formação de poluentes, maior fonte de impacto ambiental do sistema, apresenta uma taxa de impacto de 7990,47 mPts/s, representando 62,74% da taxa de impacto ambiental total do sistema, com relação direta com a caldeira.

Já para a central subcrítica a taxa de impacto ambiental relacionada à destruição de exergia é de 4078,83 mPts/s, representando 38,81% da taxa de impacto ambiental total do sistema, sendo que 79,4% ocorre na caldeira. A formação de poluentes, constitui neste caso também a maior fonte de impacto ambiental do sistema, com uma taxa de impacto ambiental de 6420,9 mPts/s, que representa 61,10% da taxa de impacto ambiental do sistema.

E como já mencionado a taxa de impacto ambiental associada aos componentes é praticamente nula no total do sistema representando menos de 1%, para todos os casos analisados. A distribuição do impacto ambiental total dos sistemas pode ser visualizada na Figura 6.20.

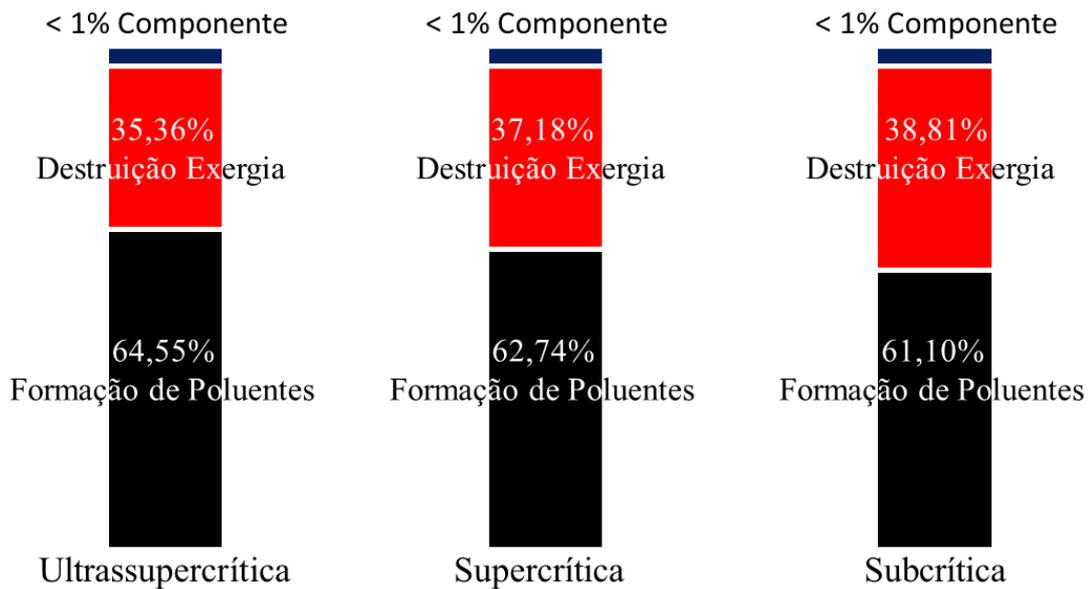


Figura 6.20 – Distribuição do impacto ambiental total dos sistemas.  
Fonte: Próprio autor.

A diferença relativa ( $r_{b,k}$ ) entre o impacto ambiental específico do produto e do recurso, indica o potencial para redução do impacto associado com o componente, no sistema USC analisado tem-se que a caldeira com o valor de 97,60%, CEP 74,70% e LPH-1 48,40%, conforme pode ser visto na Figura 6.21, são os componentes do sistema que apresentam valores altos, e que portanto possuem potencial para redução do impacto através de melhorias no equipamento que venham a incrementar a eficiência exergética destes.

A comparação da importância das fontes de formação de impacto ambiental no componente é realizada com o auxílio do fator exergoambiental ( $f_{b,k}$ ), que expressa a contribuição relativa do impacto ambiental relacionado ao componente ( $\dot{Y}_k$ ) para o impacto ambiental total, e para o sistema USC estudado apenas a caldeira apresentou valor de fator exergoambiental na faixa  $30\% < f_{b,k} < 70\%$ , como pode ser verificado na Figura 6.22, todos os demais equipamentos apresentam valores muito baixos para  $f_{b,k}$ , confirmando que  $\dot{Y}_k$  não é representativo nas análises podendo até mesmo ser omitido.

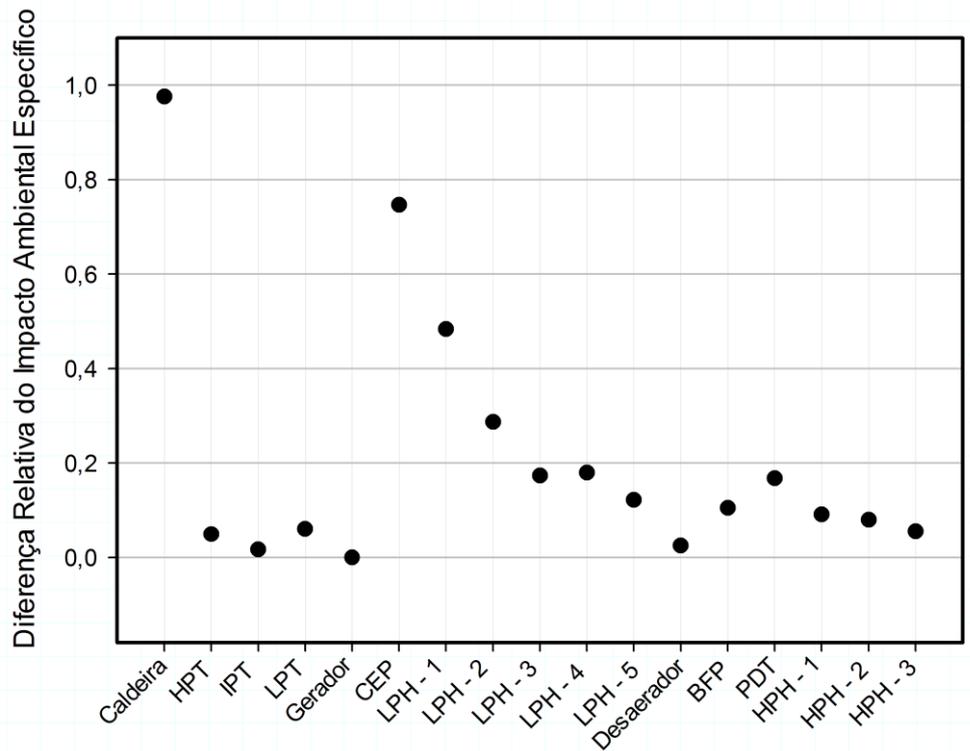


Figura 6.21 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema ultrassupercrítico.  
 Fonte: Próprio autor.

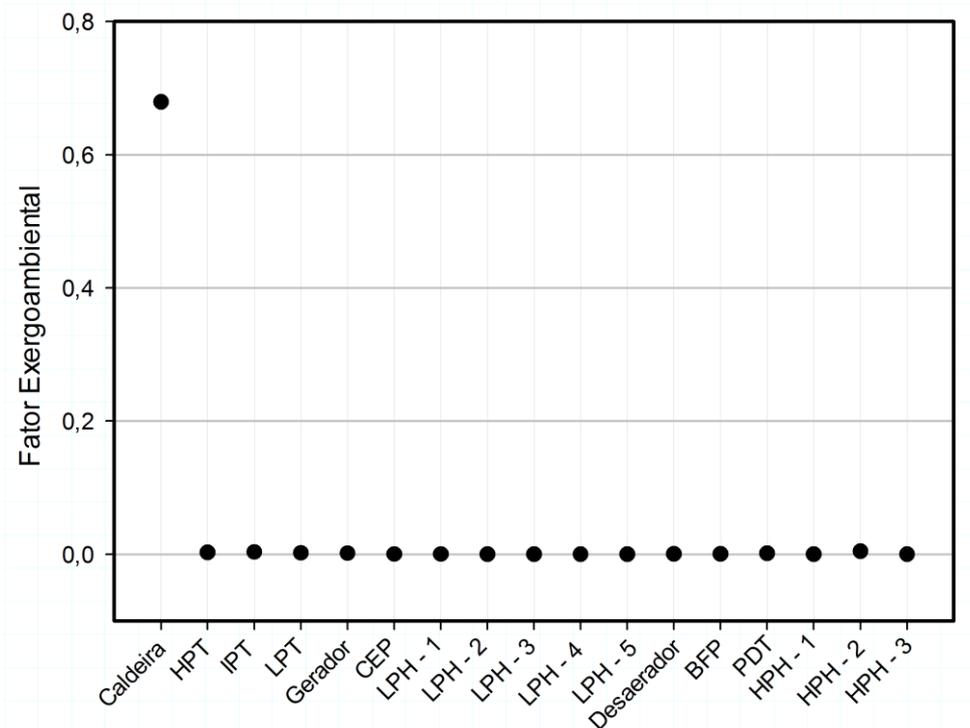


Figura 6.22 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema ultrassupercrítico.  
 Fonte: Próprio autor.

Para a central supercrítica a diferença relativa ( $r_{b,k}$ ) entre o impacto ambiental específico do produto e do recurso, tem valor de 103,67% para a caldeira, de 52,6% para CEP, 52,3% para o LPH-1, e 75,88% para o aquecedor auxiliar, conforme pode ser visto na Figura 6.23,

sendo estes os componentes do sistema que apresentam os valores mais altos, e que portanto possuem potencial para redução do impacto através de melhorias no equipamento que venham a incrementar suas eficiências.

Já o fator exergoambiental ( $f_{b,k}$ ), que expressa a contribuição relativa do impacto ambiental relacionado ao componente ( $\dot{Y}_k$ ) para o impacto ambiental total, para o sistema SC estudado apenas a caldeira apresentou valor de fator exergoambiental na faixa  $30\% < f_{b,k} < 70\%$ , como pode ser verificado na Figura 6.24, todos os demais equipamentos apresentam valores muito baixos para  $f_{b,k}$ , confirmando que  $\dot{Y}_k$  não é representativo nas análises podendo até mesmo ser omitido.

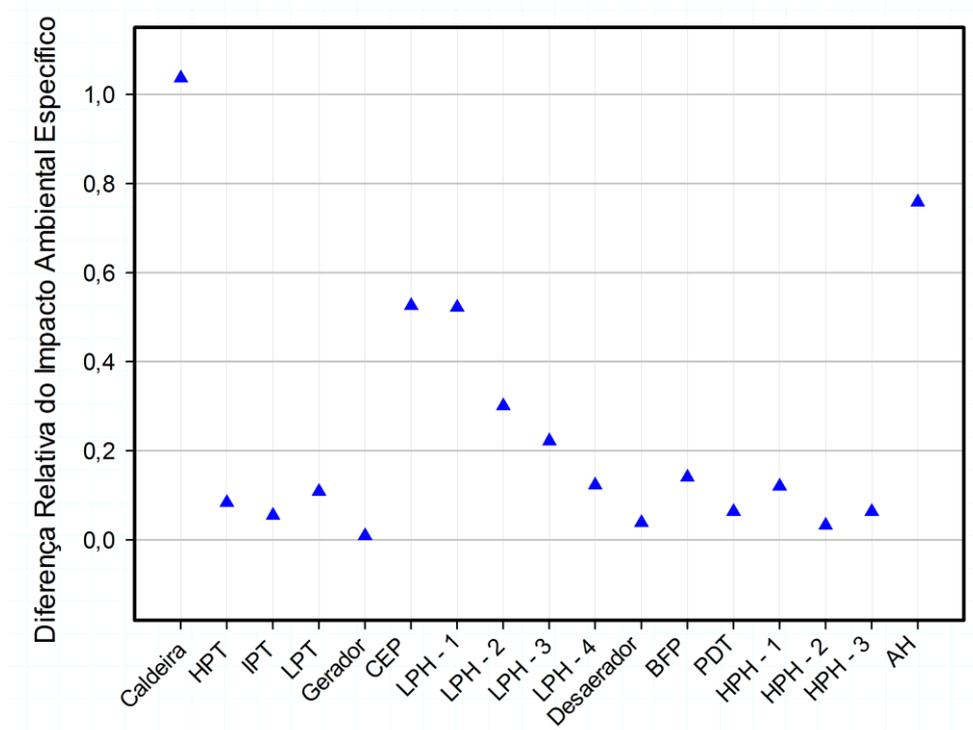


Figura 6.23 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema supercrítico.

Fonte: Próprio autor.

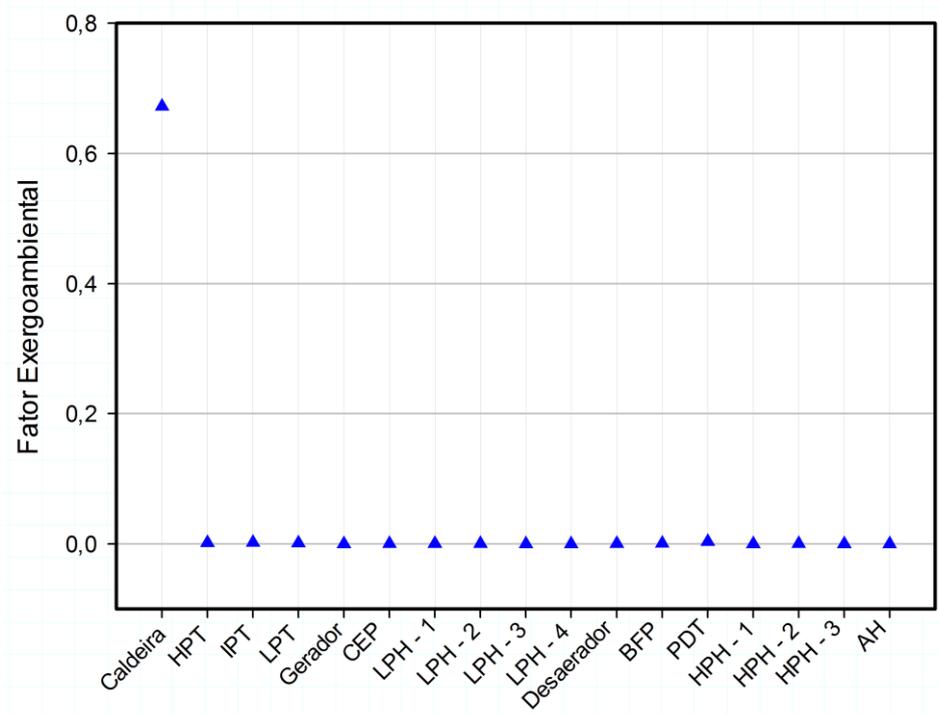


Figura 6.24 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema supercrítico.  
Fonte: Próprio autor.

Para a central subcrítica a diferença relativa ( $r_{b,k}$ ) entre o impacto ambiental específico do produto e do recurso, tem valor de 110,38% para a caldeira, e de 42,5% para CEP, conforme pode ser visto na Figura 6.25, sendo estes os únicos componentes do sistema que apresentam os valores mais altos, e que portanto possuem potencial para redução do impacto através de melhorias no equipamento que venham a incrementar suas eficiências.

Já o fator exergoambiental ( $f_{b,k}$ ) para o sistema subcrítico estudado assim como para os sistemas ultracriticado e supercrítico apenas a caldeira apresentou valor de fator exergoambiental na faixa  $30\% < f_{b,k} < 70\%$ , como pode ser verificado na Figura 6.26, todos os demais equipamentos apresentam valores muito baixos para  $f_{b,k}$ , confirmando que  $\dot{Y}_k$  não é representativo nas análises podendo até mesmo ser omitido.

De uma forma geral para as três centrais analisadas a caldeira e a bomba de extração de condensado (CEP) são os únicos equipamentos que apresentam um alto valor para a diferença relativa ( $r_{b,k}$ ) em todos os casos, representando portanto os componentes críticos para promoção de melhorias de eficiência visando redução das taxas de impacto ambiental. E quanto ao fator exergoambiental ( $f_{b,k}$ ) em todos os casos apenas a caldeira apresenta valores altos suficientes para indicar o impacto relacionado ao componente como representativo no impacto ambiental total.

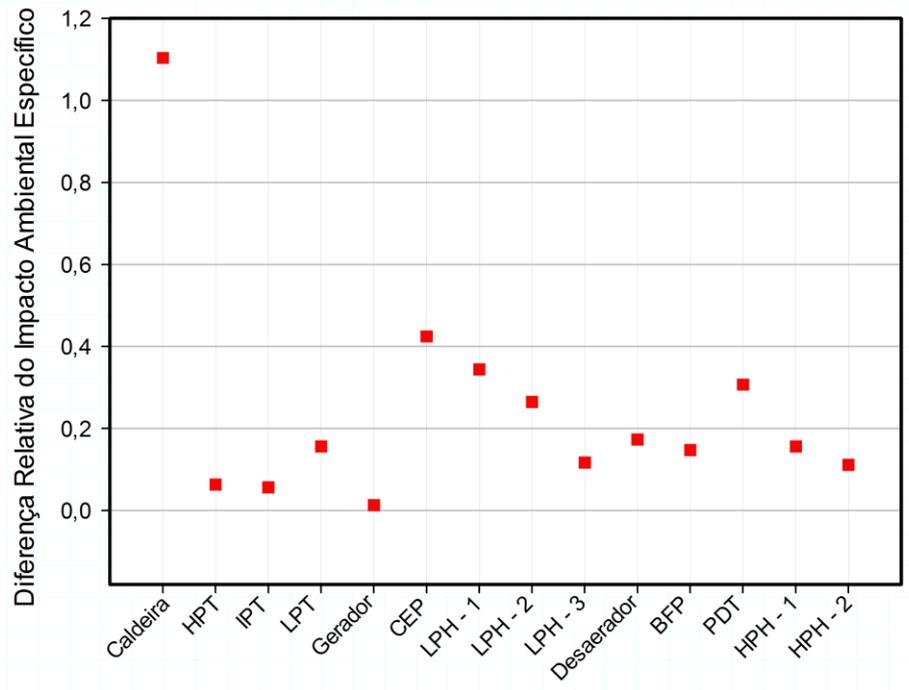


Figura 6.25 - Diferença relativa do impacto ambiental específico dos componentes do sistema subcrítico.  
 Fonte: Próprio autor.

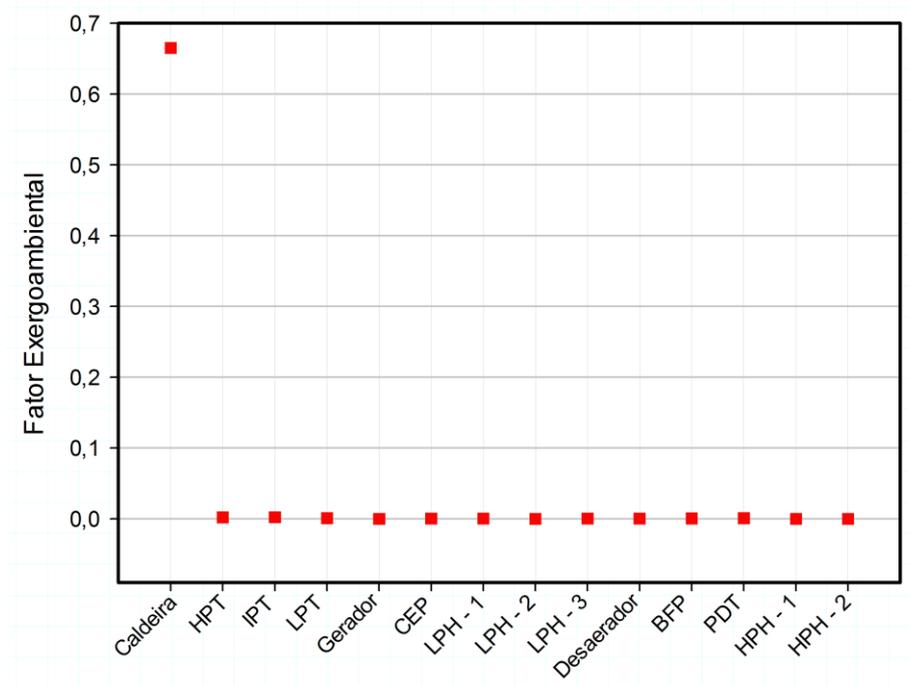


Figura 6.26 - Fator exergoambiental dos componentes do sistema subcrítico.  
 Fonte: Próprio autor.

### **6.4.3. EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS, GASES DE EFEITO ESTUFA E A FORMAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL**

O impacto ambiental resultante da utilização do combustível (carvão mineral) é associado aos fluxos do sistema através do vetor de atribuição externa de impactos ambientais, e tal impacto representa a principal fonte do sistema uma vez que os impactos ambientais relacionados ao componente tem participação irrisória, como já foi apresentado. O aumento de eficiência apresentado pela substituição tecnológica de centrais termelétricas subcríticas (convencionais) por unidades supercríticas, ou ainda ultrasupercríticas permite uma redução significativa no consumo específico de carvão mineral, sendo o combustível a principal fonte de atribuição de impacto do sistema é possível consequentemente obter menores taxas de impacto ambiental para a eletricidade gerada.

De acordo com as análises desenvolvidas o consumo específico de carvão mineral do sistema subcrítico é de 328,5 g/kWh, para o sistema supercrítico 310 g/kWh, e para o ultrasupercrítico 279 g/kWh. Estes resultados demonstram como a adequação tecnológica do parque térmico a carvão é fundamental para atingir uma geração de energia mais limpa e sustentável. Por exemplo, como apresentado no Capítulo 4, a China apresentava em 2015 uma taxa média de consumo de carvão de 315 g/kWh, em um processo evolutivo que partiu de um consumo específico de 380 g/kWh em 2003 onde a eficiência média de seu parque térmico a carvão era bem inferior ao valor de 38,6% atingido em 2014. E observa-se margem para avanços ainda maiores neste sentido, como a central de Anqing que opera com condições de pressão de 28 Mpa e temperatura de 600/620°C em suas duas unidades de 1000 MW atingindo eficiência próxima a 45%, e que apresenta uma taxa de consumo de carvão de apenas 273 g/kWh.

O fato mais importante resultante de um menor consumo de carvão está associado à redução das emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, estas que são diretamente associadas a taxa de consumo de carvão. Assim como mencionado acima, o combustível é o fator mais relevante na formação de impacto ambiental da geração de eletricidade, e as emissões representam praticamente todo o fator de dano do impacto ambiental total representado através do ecoindicador 99. A taxa de impacto ambiental total do combustível é de 146,7 mPts/kg e deste montante um total de 140,7 mPts/kg (95,9%) está associado aos poluentes, uma vez que neste estudo a combustão do carvão está inserida no escopo da formação do impacto ambiental do combustível. O fator de dano relacionado à extração e dano ao recurso mineral é de apenas 5,99 mPts/kg (4,1%).

As emissões de gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ) no escopo da análise exergoambiental desenvolvida neste estudo apresenta um fator de dano que é razoavelmente baixo comparado ao fator de dano das demais emissões, sendo ele de apenas 5,45 mPts por kg de emissão, mas sua importância é relativamente alta na formação da taxa de impacto ambiental da eletricidade gerada uma vez que o dióxido de carbono em termos de quantidade é a principal emissão da queima do carvão. As emissões de  $\text{CO}_2$  apresentam uma redução de 5,5% quando utilizada a tecnologia supercrítica em detrimento da subcrítica, e uma redução de 15,0% para a utilização de tecnologia ultrassupercrítica, conforme pode ser verificado na Figura 6.27.

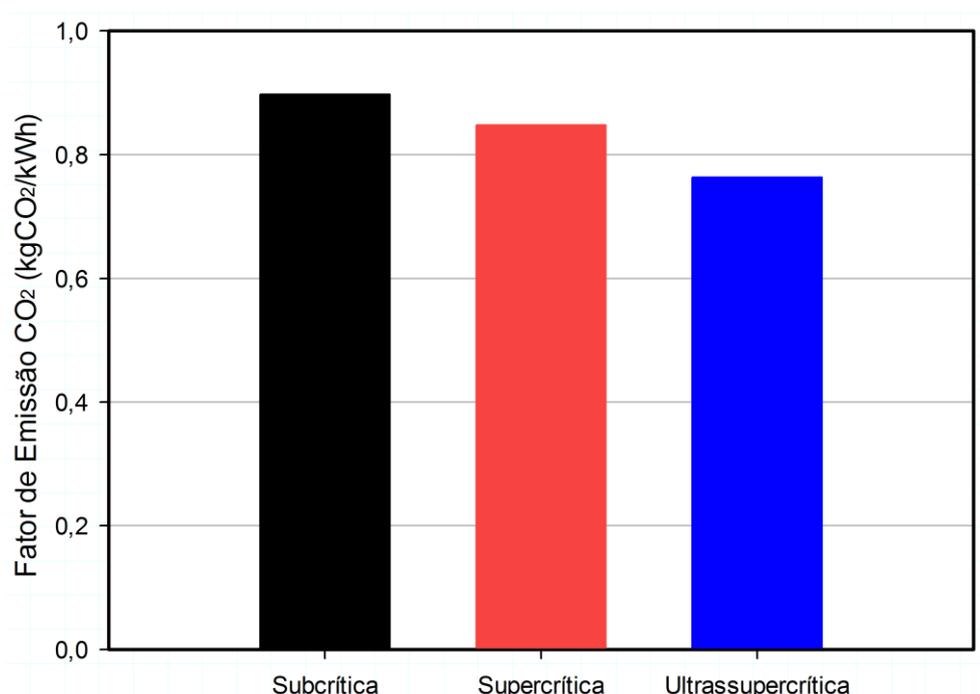


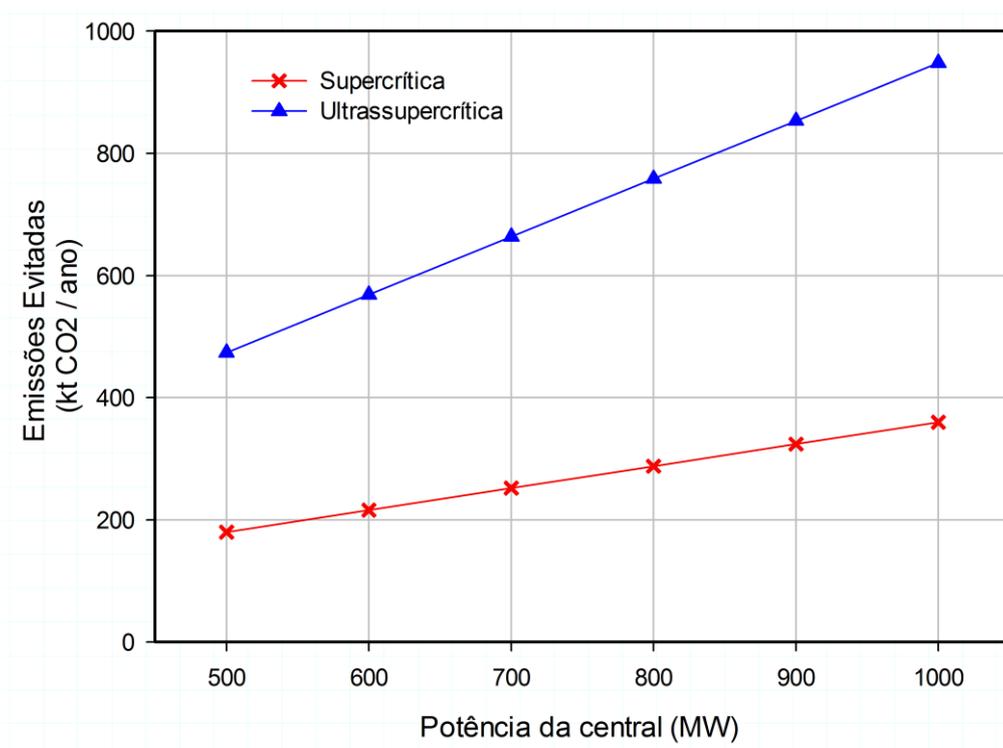
Figura 6.27 - Emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para as centrais subcrítica, supercrítica, e ultrassupercrítica.  
Fonte: Próprio autor.

As tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), tais como processos de absorção por solventes, membranas, adsorção, separação criogênica, armazenamento geológico, ainda não se apresentam como formas viáveis para implantação em centrais de grande porte, e desta forma a melhoria de eficiência representa a principal forma de minimizar o impacto de emissões do dióxido de carbono nas mudanças climáticas. A substituição de uma central subcrítica por uma supercrítica ou ainda ultrassupercrítica poderia proporcionar uma quantidade significativa de emissões evitadas anuais de  $\text{CO}_2$ . Uma estimativa de emissões evitadas por potência da central termelétrica pode ser verificada na Tabela 6.28, e Figura 6.28.

Tabela 6.28 - Emissões Anuais Evitadas de CO<sub>2</sub>.

Potência da Central (MW)	Supercrítica (t CO <sub>2</sub> /ano)	Ultrassupercrítica (t CO <sub>2</sub> /ano)
500	179.896,01	474.078,13
600	215.875,21	568.893,76
700	251.854,42	663.709,39
800	287.833,62	758.525,01
900	323.812,82	853.340,64
1000	359.792,02	948.156,27

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.28 - Emissões Anuais Evitadas de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Próprio autor.

As demais emissões constituídas por dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), material particulado (MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub>, TSP) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), apesar de em quantidade não apresentarem tamanha importância como o dióxido de carbono, são responsáveis por boa parte da formação do impacto ambiental resultante do processo devido ao seu alto fator de dano. Da mesma forma como apresentado para o CO<sub>2</sub> a adequação tecnológica das centrais possibilitam significativa redução das emissões, conforme Figura 6.29, e conseqüentemente uma razoável queda na taxa de impacto ambiental do produto do processo. Diferentemente do dióxido de carbono, as emissões destes poluentes possuem tecnologia disponível para controle e tratamento dos gases que as reduzem a níveis muito baixos, tais como sistemas de

dessulfurização seco e úmido, redução catalítica seletiva (SCR), ciclones, precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, entre outros. A aplicação destes equipamentos apesar de exigirem um consumo de energia do sistema, e de gerarem outros resíduos como o gesso e efluentes líquidos formados em processos de dessulfurização, e as cinzas do processo de remoção de particulado, fornecem resultados muito satisfatórios no sentido de reduzir a taxa de impacto ambiental da geração de eletricidade por centrais térmicas a carvão.

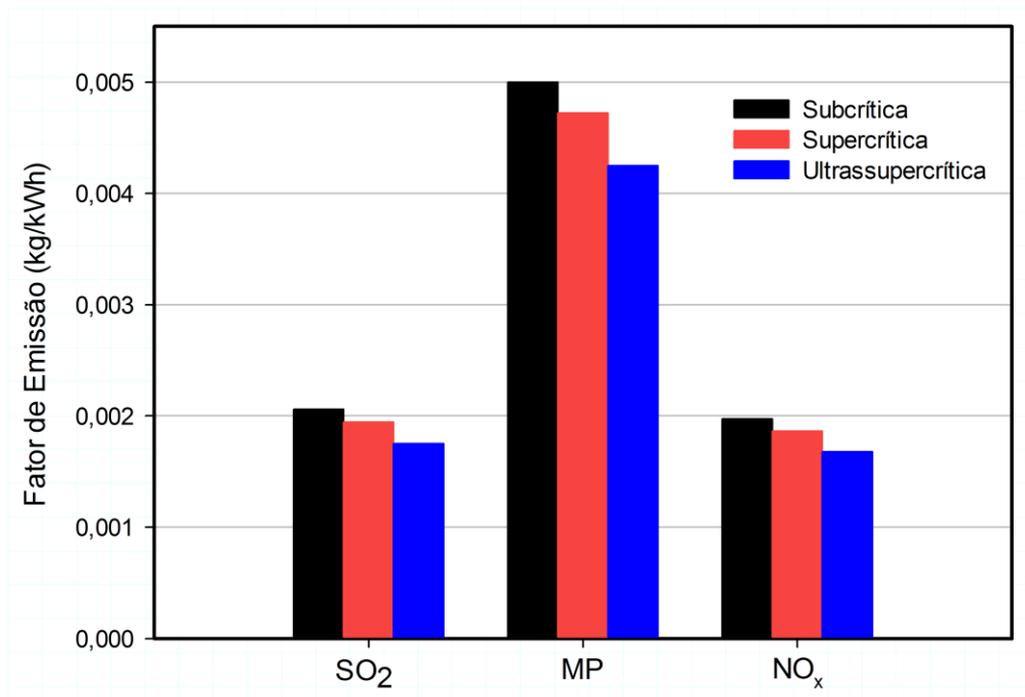


Figura 6.29 - Emissões de material particulado (MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub>, TSP), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).  
Fonte: Próprio autor.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

Atualmente os problemas ambientais decorrentes do uso do carvão na geração de eletricidade, principalmente emissões de poluentes e gases de efeito estufa, têm causado grande preocupação levando em consideração a elevada utilização de tal recurso combustível, sendo ele responsável por quase 40% da matriz elétrica global. Visando minimizar os aspectos negativos do uso do carvão e maximizar o aproveitamento energético do combustível, novas centrais comissionadas tem sido equipadas com tecnologias supercrítica ou ultrasupercrítica que possibilitam atingir uma maior eficiência.

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo aplicar a metodologia exergoambiental para centrais termelétricas a carvão, no intuito de avaliar a melhoria do desempenho ambiental de unidades equipadas com tecnologias supercrítica e ultrasupercrítica, quando comparadas a uma central convencional subcrítica. A aplicação desta metodologia baseada no conceito de exergia consiste em uma alternativa interessante para avaliação de impactos ambientais de sistemas de conversão de energia. Espera-se que com o desenvolvimento de estudos aplicando esta teoria para variados sistemas de conversão de energia, seja possível optar pelas formas mais atrativas e viáveis do ponto de vista ambiental, assim como possam ser reveladas as melhores alternativas para otimizar estes sistemas.

A análise exergoambiental aplicada no estudo identifica a importância de cada componente em relação ao impacto ambiental total, além das possibilidades de promover uma redução de impacto ambiental. A metodologia consiste em três etapas que são a análise

exergética do sistema, uma análise de ciclo de vida de cada componente do sistema e de todos os fluxos de entrada, e por fim a atribuição dos impactos ambientais que foram obtidos na análise de ciclo de vida aos fluxos exergéticos do sistema, para assim realizar o cálculo das variáveis exergoambientais.

Os resultados da análise exergética confirmaram que a caldeira é a principal fonte de irreversibilidades do sistema, assim como já foi apresentado por diversos estudos relacionados. O subsistema das turbinas demonstrou uma redução considerável de destruição de exergia nas centrais supercrítica e ultrassupercrítica, sendo resultado das condições de vapor com altas pressões e temperaturas. Para o subsistema de aquecedores de água de alimentação foi verificado aumento da eficiência exergética dos equipamentos no sentido do fluxo, comportamento este semelhante nos três sistemas estudados. A eficiência exergética total das plantas mostrou variação significativa, sendo de 35,82% para a subcrítica, 37,85% para supercrítica, e 41,54% para ultrassupercrítica, estando estes resultados coerentes com apresentados em outros trabalhos.

Com relação à análise exergoambiental os resultados gerais para os três sistemas indicaram elevado incremento da taxa de impacto ambiental dos fluxos exergéticos que são produtos em equipamentos onde há fornecimento de calor, trabalho ou combustível, e desta forma verificou-se que os fluxos da caldeira foram aqueles que sofreram o maior incremento de impacto ambiental, devido ao impacto do combustível e da formação de poluentes neste componente.

O fluxo de água de resfriamento no escopo do trabalho é tratado como um rejeito do sistema e, portanto a taxa de impacto ambiental relacionada a esse fluxo foi analisada com relação à eletricidade gerada pelos sistemas. Para o sistema subcrítico a taxa por kWh de eletricidade gerada foi de 3,13 mPts/kWh, para o supercrítico foi de 3,09 mPts/kWh e 1,57 mPts/kWh para ultrassupercrítico. A eletricidade gerada foi o principal fluxo analisado nas centrais, uma vez que se trata do real objetivo do sistema, e verificou-se uma redução significativa na taxa de impacto ambiental quando utilizadas as tecnologias supercrítica e ultrassupercrítica em detrimento da subcrítica. As taxas de impacto ambiental encontradas foram de 41,40 mPts/kWh, 38,90 mPts/kWh, e 36,04 mPts/kWh, para as centrais subcrítica, supercrítica, e ultrassupercrítica, respectivamente. A redução de impacto ambiental obtida com a utilização da tecnologia supercrítica foi de 5,7%, e com a ultrassupercrítica de 15,5%.

As taxas de impacto ambiental obtidas para a eletricidade gerada pelas centrais termelétricas a carvão estudadas foram comparadas às de outros sistemas de conversão de

energia, e foi constatado que sistemas a carvão mesmo os mais eficientes ainda fornecem um impacto muito superior, praticamente o dobro de um sistema a gás natural, por exemplo.

De uma forma geral as três centrais analisadas apresentaram resultados semelhantes quanto à participação das taxas de impacto ambiental em relação ao total do sistema, sendo taxa de impacto relacionada a formação de poluentes a mais importante, seguida pela relacionada a destruição de exergia. A taxa de impacto relacionada aos componentes tem valor irrisório, próximo a 1% para os três sistemas, e sendo assim poderia até mesmo ser descartada da análise.

Constatou-se que definitivamente o combustível representa a principal fonte de impacto ambiental do sistema, e sendo assim a adaptação tecnológica é uma excelente alternativa visto que reduz consideravelmente o consumo específico de carvão, que é de 328,5 g/kWh para a central subcrítica, e é reduzido para valores de 310 g/kWh e 279 g/kWh para supercrítica e ultrasupercrítica, respectivamente. Esta redução do consumo de combustível é muito significativa, pois as emissões estão diretamente associadas ao consumo de carvão, além de que elas representam praticamente todo o fator de dano do impacto ambiental total do combustível, com cerca de 95,9%, sendo o fator de dano relacionado a extração do recurso de apenas 4,1%.

Conclui-se que com relação as tecnologias para centrais a carvão, os sistemas supercrítico e ultrasupercrítico consistem em alternativas muito favoráveis no sentido de minimizar os aspectos prejudiciais ao meio ambiente, proporcionando melhor aproveitamento energético do recurso combustível. A perspectiva é que ocorram maiores avanços, principalmente relacionados aos materiais da caldeira, turbinas e tubulações, permitindo atingir maiores temperaturas e pressões, conseqüentemente maior eficiência e menor impacto ambiental.

Em relação à metodologia aplicada, conclui-se que esta representa uma excelente alternativa para comparar quantitativamente impactos ambientais de diferentes sistemas de conversão de energia em uma mesma métrica, possibilitando identificar quais devem ser tomados como prioritários em políticas de expansão da matriz elétrica. Recomenda-se portanto que esta ferramenta de análise seja cada vez mais utilizada para agregar informação para a tomada de decisão no setor energético.

## **7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Realizar a análise exergoambiental das plantas para diferentes composições de carvão, visando avaliar o impacto que a utilização de um carvão de má qualidade pode ter no desempenho ambiental da central.

Trabalhar a metodologia utilizando outros ecoindicadores que expressem aspectos ambientais particulares.

Abordar uma análise econômica associada a avaliação ambiental da central, de forma a sustentar o argumento de qual seria a melhor alternativa baseando-se tanto no aspecto ambiental como econômico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCY FOR NATURAL RESOURCES AND ENERGY. **FY2015 Annual Report on Energy - Energy White Paper**. 2015.

AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; HOSSEINPOUR, S. **On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor**. *Energy Conversion and Management*, v. 164, p.385-398, 2018.

ALJAZEERA. **Japan uses climate cash to build coal plants in India**. 2015. Disponível em: <<http://america.aljazeera.com/articles/2015/3/25/Japan-coal-climate.html>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

ALSTOM. **Major Milestone Achieved in the Development of Advanced Ultrasupercritical Steam Power Plants**. 2014. Disponível em: <[www.alstom.com/press-centre/2014/12/major-milestone-achieved-in-the-development-of-advanced-ultra-supercritical-steam-power-plants/](http://www.alstom.com/press-centre/2014/12/major-milestone-achieved-in-the-development-of-advanced-ultra-supercritical-steam-power-plants/)>.

ANDRULEIT, H. et al. **Energy Study 2013**. Hannover, Germany. 2013. Disponível em: <[http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Downloads/energiestudie\\_2013\\_en.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2013_en.pdf?__blob=publicationFile&v=2)>.

ASME. **Eddystone Station, 325 MW Generating Unit 1**. 2003. Disponível em: <<https://www.asme.org/about-asme/who-we-are/engineering-history/landmarks/226-eddystone-station-unit-1>>.

BAILIE, R. C. **Energy Conversion Engineering**. Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

BARNES, I. **Upgrading the Efficiency of the World's Coal Fleet to Reduce CO2 Emissions**. *Cornerstone The Official Journal of The World Coal Industry*, v. 3, n. 1, p. 4–9, 2014.

BARUYA, P. **Fueling Increased Electricity Production**. *Corner Stone - The Official Journal of the World Coal Industry*, v. 4, 2016.

BEÉR, J. M. **High efficiency electric power generation: The environmental role**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 33, n. 2, p. 107–134, 2007.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. J. **Thermal Design and Optimization**. 1996.

BGR. **Energy Study - Reserves, resources and availability of energy resources**. p. 180, 2016.

BHUSHAN, C. et al. **Heat on power: green rating of coal-based thermal power plants**. New Delhi, India. 2015.

BITHAS, K.; KALIMERIS, P. **A Brief History of Energy Use in Human Societies**. In: *Revisiting the Energy-Development Link*. p. 5–11, 2016.

BLANCO-MARIGORTA, A. M.; MASI, M.; MANFRIDA, G. **Exergo-environmental analysis of a reverse osmosis desalination plant in Gran Canaria**. *Energy*, v. 76, p. 223–232, 2014.

BLANKENSPoor, A. **Maasvlakte Power Plant 3: Theory versus practice**. 2015. Disponível em: <[http://www.mega-roject.eu/assets/exp/resources/Aris\\_Blankenspoor\\_MPP3\\_theory\\_versus\\_%0Apractice\\_rev\\_20150410\\_sv.pdf%0A](http://www.mega-roject.eu/assets/exp/resources/Aris_Blankenspoor_MPP3_theory_versus_%0Apractice_rev_20150410_sv.pdf%0A)>. Acesso em: 23 mar. 2018.

BLUM, T.; HALD, J. **Benefit of Advanced Steam Power Plants in Materials of Advanced Power Engineering, Part II**. European Commission and University of Liège, v. 21, p. 1007–1015, 2002.

BOLTER, J. R. **Parsons Memorial Lecture: Sir Charles Parsons and Electric Power Generation: A Turbine Designer's Perspective**. Institute of Mechanical Engineers, London, U.K., v. 208, p. 159–176, 1994.

BONFORTE, G. *et al.* **Exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of an integrated solar gas turbine/combined cycle power plant**. *Energy*, v.156, p.352-359, 2018.

BOORAS, G.; HOLT, N. **Pulverized coal and igcc plant cost and performance estimates** *Gasification Technologies*. Palo Alto, California. 2004. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.168.2103&rep=rep1&type=pdf>>.

BORBA, R. F. **Carvão Mineral**. In: *Balanço Mineral Brasileiro*. 2001. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>>.

BORGNAKKE; SONNTAG. **Fundamentals of Thermodynamics**. 7a Ed. Wiley & Sons, 2009.

BOYANO, A. *et al.* **Conventional and advanced exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming reactor for hydrogen production**. *Journal of Cleaner Production*, v. 20, pag. 152-160, 2012.

BRITISH PETROLEUM. **Energy Outlook Edition - Energy Economics**. 2016.

BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy June 2017 Coal**. *Statistical Review of World Energy*, n. June, 2017.

BROWN, G. **British power generation achieves first ever coal-free day**. *The Guardian*. 2017. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2017/apr/21/britain-set-for-first-coal-free-day-since-the-industrial-revolution>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

BURNARD, K. *et al.* **Emissions Reduction through Upgrade of Coal-Fired Power Plants**. p. 58, 2014.

- BURNARD, K.; BHATTACHARYA, S. **Power generation from coal - IEA**. 2011.
- CABRERA, M. M. **Exergoenvironmental Analysis of oxyfuel-based combined-cycle power plants including CO2 capture**. Thesis. Technical University of Berlin, 2010.
- CARTER, L. D. **Regulatory and Other Challenges To Coal Use In The U. S.** 2014.
- CARVALHO JR, J. A.; LACAVALA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. Editora UNESP. p136.
- CARVALHO, S. V. S. **Fluência de Materiais**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.
- CASAS-LEDÓN, Y.; SPAUDO, F.; ARTEAGA-PÉREZ, L. E. **Exergoenvironmental analysis of a waste-based Integrated Combined Cycle (WICC) for heat and power production**. Journal of Cleaner Production, v. 164, p. 187–197, 2017.
- CATF. **Cradle to Grave: The environmental impacts from coal**. Clean Air Task Force, p. 12, 2001.
- CAVALCANTI, E. J. C. **Análise Exergoeconômica e Exergoambiental**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- CAVALCANTI, E. J. **Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 67, p. 507–519, 2017.
- CAVALCANTI, E. J. C.; SOUZA, G. F.; LIMA, M. S. R. **Evaluation of cogeneration plant with steam and electricity production based on thermoeconomic and exergoenvironmental analyses**. International Journal of Exergy, v. 25, n. 3, 2018.
- CAVALCANTI, E. J. C. et al. **Exergoeconomic and exergoenvironmental comparison of diesel-biodiesel blends in a direct injection engine at variable loads**. Energy Conversion and Management, v.183, p.450-461, 2019.
- CEA. **Quarterly Review report, renovation e modernisation of thermal power stations**. India. 2015. Disponível em: <[http://www.cea.nic.in/reports/articles/thermal\\_qrr.pdf](http://www.cea.nic.in/reports/articles/thermal_qrr.pdf)>.
- CEC. **Status atual e perspectivas do setor de energia da China**. 2015. Disponível em: <<http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2015-03-10/134972.html>>. Acesso em: 3 fev. 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 5a Ed. 2006.
- CENTRE FOR SCIENCE AND ENVIRONMENT. **The State of our Power Plants, Green Rating of Coal-based Thermal Power Sector**. New Delhi, India. 2015.
- CHANDA, P.; MUKHOPADHYAY, S. **Operation and Maintenance of Thermal Power Stations**. India. 2016.

CHINA ENERGY FUND COMMITTEE - CEFC. **China Energy Focus 2014 - Towards Clean Coal**. Hong Kong, China. 2014.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 101p. 2003.

CLIMATE ANALYTICS. **Implications of the Paris Agreement for Coal Use in the Power Sector**. n. November, p. 42, 2016.

CRABTREE, J. **India: At the coalface**. 2015. Disponível em: <<https://www.ft.com/content/a15c6fca-d63d-11e4-b3e7-00144feab7de>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

CZIESLA, F.; BEWERUNGE, J.; SENZEL, A. **Lünen – State-of-the-Art Ultra Supercritical Steam Power Plant Under Construction**. PowerGen Europe, p. 21, 2009.

DEANE, P. **The first industrial revolution**. p. 318. 1979.

DINCER, I.; CENGEL, Y. A. **Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering**. Entropy. v. 3. p. 116-149. 2001.

DODSON, S. **Japan and Ukraine work together in review of coal-fired power plants**. 2014. Disponível em: <<http://www.worldcoal.com/coal/12082014/Ukraine-and-Japan-in-coal-partnership-1193/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

EC. **Coal and other solid fuels**. 2016. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/oil-gas-and-coal/coal-and-other-solid-fuels>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

EIA. **International Energy Outlook 2017 Overview**. U.S. Energy Information Administration. p.143. 2017.

EIA. **What is U.S. electricity generation by energy source?**. 2016a. Disponível em: <<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=427&unit=3>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

EIA. **Annual Energy Outlook**. 2016b. Disponível em: <[https://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er(2016).pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2018.

ELECTRIC POWER DEVELOPMENT. **Replacement activities completed at Isogo Thermal - Annual Report**. 2009. Disponível em: <<http://www.jppower.co.jp/english/ir/pdf/2009-06.pdf>>.

ENDCOAL. **Global Coal Plant Tracker**. 2016. Disponível em: <<https://endcoal.org/plant-tracker/>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

ENERGY HUB WEST. **Toekomst**. 2016. Disponível em: <<http://www.hetverhaalvansteenakool.nl/het-verhaal-van-steenakool#!/toekomst/item/8>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

ENERGY, P. O. N. **Putting a Price on Energy**. International. 2010.

EPA. **Bituminous and Subbituminous Coal Combustion. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors.** 1993. Disponível em: <<https://cfpub.epa.gov/webfire/index.cfm?action=fire.showfactor&factorid=592>>.

EPA. **Proposed Carbon Pollution Standards for New Power Plants.** 2013. Disponível em: <[www2.epa.gov/carbon-pollution-standards/2013-proposed-carbon-pollution-standard-new-power-plants](http://www2.epa.gov/carbon-pollution-standards/2013-proposed-carbon-pollution-standard-new-power-plants)>.

EURELETRIC. **Power statistics and trends: the five dimensions of the Energy Union.** 2015. Disponível em: <[http://www.eemg-mediators.eu/downloads/Power\\_statistics\\_and\\_trends\\_-\\_5\\_dimensions\\_-\\_December\\_2015.pdf](http://www.eemg-mediators.eu/downloads/Power_statistics_and_trends_-_5_dimensions_-_December_2015.pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2018.

FAN, H. et al. **China's R&D of advanced ultra-supercritical coal-fired power generation for addressing climate change.** Thermal Science and Engineering Progress, v. 5. p. 364–371, 2018.

FENSOM, A. **Japan: An Industry Saviour?.** 2015. Disponível em: <<https://www.worldcoal.com/special-reports/13052015/japan-coal-demand-what-does-the-future-hold-coal2265/>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

FRANKE, J.; KRAL, R. **Supercritical Boiler Technology for Future Market Conditions.** Pearsons Conference. 2003. Disponível em: <[http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson-boiler/Supercritical\\_Boiler\\_Technology\\_for\\_Future\\_Market\\_Conditions.pdf](http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson-boiler/Supercritical_Boiler_Technology_for_Future_Market_Conditions.pdf)>.

FUKUDA, Y. **Development of Advanced Ultrasupercritical Fossil Power Plants in Japan: Materials and High Temperature Corrosion Properties.** Materials Science Forum, v. 696, p. 236–241, 2011.

FUKUDA, Y.; SHIMIZU, M. **Hot Corrosion and Steam Oxidation Properties of New Heat Resistant Steels for Ultrasupercritical Boilers.** Materials Science Forum, v. 522–523, p. 189–196, 2006.

GIANFRANCESCO, A. D. **Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants.** Woodhead Publishing, 2017.

GINOFRANCESCO, A. DI et al. **ENCIO project: An European Approach to 700°C Power Plant.** 2013.

GLADYSZ, P.; ZIEBIK, A. **Environmental analysis of bio-CCS in a integrated oxy-fuel combustion power plant with CO<sub>2</sub> transport and storage.** Biomass and Bioenergy, v. 85, pag.109-118, 2016.

GOEDKOOP, M.; EFFING, S.; COLLIGNON, M. **Eco-indicator 99 Manual for Designers.** 2000.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report.** 2000.

GUAY, J. **Fukushima and the Japanese Coal Myth**. 2013. Disponível em: <[http://www.huffingtonpost.com/justingay/fukushima-and-the-japanes\\_b\\_3062522.html](http://www.huffingtonpost.com/justingay/fukushima-and-the-japanes_b_3062522.html)>. Acesso em: 15 abr. 2018.

GUPTA, A. K. **Advanced Technologies for Clean and Efficient Energy Conversion**. In: Power Systems. Southampton: Lunf Institute of Technology. WitPress. 2008. .

HAAS, H. et al. **Turbines for Advanced Steam Conditions**. Chicago. 1982.

HENDERSON, C. **Coal-Fired Power Plant Efficiency Improvement in India Energy**. London, United Kingdom. 2015.

HONG, X. et al. **Advanced exergoenvironmental evaluation for a coal-fired power plant of near-zero air pollutant emission**. Applied Thermal Engineering, v. 128, p. 1139–1150, 2018.

HUSSY, C. et al. **International Comparison of Fossil Power Efficiency and CO2 Intensity – Update 2014**. ECOFYS – Sustainable energy for everyone, Mitsubishi. 2014.

IEA. **Power Generation From Coal**. International Energy Agency. Paris. 2011.

IEA. **IEA High Efficiency, low emissions (HELE) - Coal Roadmap**. International Energy Agency. Paris, France. 2012.

IEA. **The potential for equipping China’s existing coal fleet with carbon capture and storage**. Paris, France. 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/the-potential-for-equipping-chinas-existing-coal-fleet-with-carbon-capture-and-storage.html>>.

IEA. **Key World Energy Statistics**. International Energy Agency Statistics. 2017.

IMIA. **Supercritical Boilers**. Doha, Qatar. 2016.

INDIA ENERGY. **India energy security scenarios – website**. Stembro, 2015. Disponível em: <http://www.indiaenergy.gov.in/>.

J-POWER. **Symbiosis between Energy and the Environment – Isogo Thermal Power Station**. 2010. Disponível em: <<http://www.cea.nic.in/reports/cea-jcoal/presentation/Isogo-TPS.pdf>>.

JANCOVICI, J. M. **What is coal reserve?**. 2014. Disponível em: <<https://jancovici.com/en/energy-transition/coal/what-is-a-coal-reserve/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

JOINT ORE RESERVES COMMITTEE. **The JORC Code**. p.1–44, 2012.

KANCHAN, S.; KUMARANKANDATH, A. **The Indian Power Sector: Need of Sustainable Energy Access**. Socio-Ecological Narratives, 2015.

KASHANI, M. G. **Análise Exergo-Econômica-Ambiental de uma Planta de Cogeração de Lucro Máximo**. Dissertação de Mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 104 p. 2014.

KEÇEBAŞ, A. **Exergoenvironmental analysis for a geothermal district heating system: An application**. *Energy*, v. 94, p. 391–400, 2016.

KELLER, M. **Supercritical thinking: To achieve world's best performance, this coal fired power plant applies bullet like pressure to stem**. 2016. Disponível em: <<http://www.gereports.com/supercritical-thinking-thiscoal-power-plant-applies-bullet-like-pressures-to-steam-to-achieve-worlds-best-performance/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

KHOSHGOFTAR MANESH, M. H. et al. **Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation of the coupling of a gas fired steam power plant with a total site utility system**. *Energy Conversion and Management*, v. 77, p. 469–483, 2014.

KIKUCHI, Y. **Future Possibilities of Coal-Fired Power Generation Based on COP21**. MITSUI & CO. Global Strategic Studies Institute (MGSSI). 2016. Disponível em: <[https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/1221838\\_10744.html](https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/1221838_10744.html)>

KIMURA, H. et al. **Development of technologies for improving efficiency of large coal-fired thermal power plants**. *Hitachi Review*, v. 60, n. 7, p. 365–371, 2011.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam, its generation and use**. Ohio, USA: The Babcock & Wilcox Company, 2005.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London, England: Butterworths Academic Press. 1985. 296p.

LARSON, A. **Trianel Coal Power Plant Lünen. North Rhine-Westphalia**. Germany. 2014. Disponível em: <[www.powermag.com/trianel-coal-power-plant-lnen-north-rhinewestphalia-germany](http://www.powermag.com/trianel-coal-power-plant-lnen-north-rhinewestphalia-germany)>. Acesso em: 30 mar. 2018.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. **SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems**. *Energy*, v. 31, n. 8–9, p. 1257–1289, 2006.

LI, W.; YU, C. **Development Path Prospect of China's Advanced, High Efficiency Coal-Fired Power Plants**. 2016. Disponível em: <<http://hele.coalconferences.org/ibis/HELE/home>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

LOCKWOOD, T. **Blog: HELE workshop**. 2016. Disponível em: <<http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/blog-section/blog-posts/hele-workshop>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2a Edição. Rio de Janeiro. 2002.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. **Theory of the exergetic cost**. *Energy*, v. 18, n. 9, p. 939–954, 1993.

- MAKINO, K. **Promotion of investment for highly efficient power generation**. 2016. Disponível em: <<http://www.sccinstitute.com/media/93407/keiji-makino.pdf>>.
- MASUYAMA, F. **Advances in Physical Metallurgy and Processing of Steels**. History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels. ISIJ International, v. 41, n. 6, p. 612–625, 2001.
- MCHUGH, L. **What's Driving India's Coal Demand Growth**. Corner Stone - The Official Journal of the World Coal Industry, v. 4, 2016.
- MEYER, L. et al. **Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems**. Energy, v. 34, n. 1, p. 75–89, 2009.
- MILLER, B. G. **Coal Energy Systems**. Elsevier Academic Press. 2005. 543p.
- MILLER, B. G. **Clean Coal Engineering Technology**. Boston: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2011.
- MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 8a Ed. Wiley & Sons, 2014.
- MUHAMMED, M. S. **Exergoeconomic Analysis And Optimization Of Combined Cycle Power Plants With Complex**. Thesis. University of Belgrade. 2015.
- NALBANDIAN, H. **Performance and Risks of Advanced Pulverized Coal Plants**. Energia, v. 20, p. 1–6, 2009.
- NATIONAL GRID UK. **Electricity**. 2017. Disponível em: <<https://www.nationalgrid.com/uk/electricity>>. Acesso em: 3 maio. 2018.
- NETL. **Reducing CO2 Emissions by improving the Efficiency of the Existing Coal-Fired Power Plant Fleet**. Pittsburgh. 2008. Disponível em: <<https://www.netl.doe.gov/FileLibrary/Research/EnergyAnalysis/Publications/ImprovEfficExistCFPP-raphicElements.pdf>>.
- NICOL, K. **Status of advanced ultra-supercritical pulverised coal technology**. IEA Clean Coal Centre – CCC/229. 2013.
- NIPPON. **Japan's Nuclear Power Plants**. 2018. Disponível em: <<https://www.nippon.com/en/features/h00238/>>. Acesso em: 8 nov. 2018.
- OEYNHAUSEN, H. et al. **Advanced Steam Conditions**. Chicago. 1996.
- OLIVEIRA, E. A. **Perspectivas da Geração Termelétrica a Carvão no Brasil no Horizonte 2010-2030**. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- OZBILEN, A.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Development of a four-step Cu-Cl cycle for hydrogen production Part I: Exergoeconomic and Exergoenvironmental analyses**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, pag. 7814-7825, 2016.

PELTIER, R. **John W. Turk Jr. Power Plant earns Power's highest honor.** Power, v. 8, 2013.

PESCIA, D. **Flexibility in thermal power plants with a focus on existing coal-fired power plants.** p. 116, 2017.

PETRAKOPOULOU, F. et al. **Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a combined cycle power plant with chemical looping technology.** International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 5, n. 3, p. 475–482, 2011a.

PETRAKOPOULOU, F. et al. **Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation of power plants including CO<sub>2</sub> capture.** Chemical Engineering Research and Design, v. 89, p. 1461-1469, 2011b.

PETRAKOPOULOU, F. **Comparative Evaluation of Power Plants with CO<sub>2</sub> Capture : Thermodynamic , Economic and Environmental Performance.** p. 230, 2011.

PETRAKOPOULOU, F. et al. **Environmental evaluation of power plant using conventional and advanced exergy-based methods.** Energy, v. 45, p. 23-30, 2012.

PMF IAS. **Types of Coal: Peat, Lignite, Bituminous Coal & Anthracite Coal.** 2016. Disponível em: <<https://www.pmfias.com/coal-formation-of-coal-types-of-coal-peat-lignite-bituminous-coal-anthracite-coal/>>. Acesso em: 1 nov. 2018.

PORTOCARRERO, M. M. P. T. **Desempenho Econômico de centrais termelétricas de ciclo combinado: efeito de alguns parâmetros de concepção.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro, 2015.

PROGRESS ENERGY. **Thermal Equipment Incorporated (TEI) - Executive Summary.** 2007.

RESTREPO, Á.; BAZZO, E. **Co-firing: An exergoenvironmental analysis applied to power plants modified for burning coal and rice straw.** Renewable Energy, v. 91, p. 107–119, 2016.

REUTERS. **FACTBOX-Japan plans to build new coal-fired power stations.** 2016. Disponível em: <<http://uk.reuters.com/article/japan-carbon-plant-idUKL3N16X0RE>>. Acesso em: 4 maio. 2018.

ROJAS, M. M. **The Paris Agreement and 21st Century Coal.** Corner Stone, v. 4, n. 1, p. 18–21, 2016.

ROJAS, S. P. **Análise Exérgica , Termoeconômica E Ambiental De Um Sistema De Geração De Energia . Estudo De Caso : Usina Termelétrica Ute - Rio Madeira.** Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. p. 195. 2007.

ROMANOSKY, R. **A comprehensive overview of the United States advanced ultrasupercritical (USC) materials.** Presentation at: Advanced ultrasupercritical coal-fired power plants, Vienna, 19-20. September, 2012.

ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**. Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

ROSEN, M. A. **Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics**. Applied Energy, v. 72, n. 1, p. 427–441, 2002a.

ROSEN, M. A. **Exergy and government policy: Is there a link?** Exergy, An International Journal, v. 2, p. 224–226, 2002b.

ROSEN, M. A. **Can exergy help us understand and address environmental concerns?** Exergy, an International Journal, v. 2, p. 214–217, 2002c.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. **On Exergy and Environmental Impact**. International Journal of Energy Research, v. 21, n. 7, p. 643–654, 1997.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. **Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems**. International Journal of Thermal Sciences, v. 43, n. 2, p. 121–133, 2004.

ROSEN, M. A.; DINCER, I.; KANOGLU, M. **Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact**. Energy Policy, v. 36, n. 1, p. 128–137, 2008.

RUEGGER, W. A.; RETZLAFF, K. M. **Steam Turbines for Ultrasupercritical Power Plants**. GER3945, 39th General Electric Turbine State-of-the-Art Technology Seminar,. 1996.

SANDLER, S. I. **Chemical, Biochemical and Engineering Thermodynamics**. 4<sup>th</sup> edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2006.

SANTOIANNI, D. **Setting the Benchmark: The World's Most Efficient Coal-Fired Power Plants**. Corner Stone - The Official Journal of the World Coal Industry, v. 3, 2015.

SCARMINACH, S. **Hartford Electric Light Company and the Marketing of Electric Appliances**. 2017. Disponível em: <<http://blogs.lib.uconn.edu/archives/2017/07/10/hartford-electric-light-company-and-the-marketing-of-electric-appliances/>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

SCHNEIDER, C. G. **Dirty Air, Dirty Power: Mortality and Health Damage Due to Air Pollution from Power Plants**. n. June, p. 40, 2004.

SCHULZ, S.; SCHWARTZKOPFF, J. **G7 Coal Phase Out: Germany**. London, United Kingdom. 2015.

SCHWEINFURTH, S. P. **An introduction to coal quality. The National Coal Resource Assessment Overview: An Introduction to Coal Quality**. U.S. Geological Survey Professional Paper 1625-F, 20 p 2009.

SHENG, L.; YAO, D. **Study on emissions characteristics of particles in coal-burning power plant**. Environmental Pollution Control, v. 8, p. 62–65, 2010.

SHENYANG BLOWER WORKS GROUP. **Supercritical high pressure boiler feed pump for power generating unit**. 2018. Disponível em: <[http://www.sbw-turbo.com/product\\_show.asp?productid=136&TypeAid=11&TypeBid=111&TypeCid=69](http://www.sbw-turbo.com/product_show.asp?productid=136&TypeAid=11&TypeBid=111&TypeCid=69)>. Acesso em: 18 dez. 2018.

SHIDORE, S. **India's Power Sector and the Climate Challenge**. Working Paper. The Stanley Foundation and the Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, University of Texas at Austin. 2015.

SIEBE SWART. **Planta a carvão Maasvlakte 1100 MWe**. 2013. Disponível em: <<https://siebeswart.photoshelter.com/image/I0000Ht1cVbDul3o>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

SILVA, D. G. **Análise Termoeconômica de uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itaubá. 2004.

SILVA, M. B. **Classificação internacional do carvão (CEE-NU) da Camada Inferior, Mina do Leão, RS, Brasil**. Geociências. v. 65. p. 29–33, 2012.

SLOSS, L. L. **Coal in the Indian energy future – emissions and policy considerations**. IEA Clea Coal Centre. London, United Kingdom, 42p. 2015.

SOUTHWESTERN ELETRIC POWER COMPANNY. **John W. Turk Jr. Power Plant**. 2013. Disponível em: <<https://www.swepco.com/global/utilities/lib/docs/info/projects/TurkPlant/TurkPowerPlantFactSheetrev3-21-13v3.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

STEAG. **Lünen Power Plant**. 2018. Disponível em: <<https://www.steag.com/en/modal/content/02-leistung/german-power-plants/luenen-power-plant/>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

STEIN-BRZOZOWSKA, G. et al. **Nickel-base superalloys for ultra-supercritical coal-fired power plants: Fireside corrosion**. Laboratory studies and power plant exposures. Fuel, v. 108, p. 521–533, 2013.

TAKASHI, I.; SHINTARO, S. **Japan is a highly industrialized nation whose welfare is very dependente on a reliable fuel supply from overseas**. J-POWER. 2015.

TERMUEHLEN, H. **100 Years of Power Plant Development, Focus on Steam and Gas Turbines as Prime Movers**. New York. The American Society of Mechanical Engineers – ASME Press. 2001.

TERMUEHLEN, H.; EMSPERGER, W. **Clean and efficient coal-fired power plants : development toward advanced technologies**. New York. The American Society of Mechanical Engineers – ASME Press. 2003.

THOMAS, L. **Coal Geology**. 2 Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2013.

- TSATSARONIS, G. **Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 19, n. 3, p. 227–257, 1993.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **New Coal-fired Power Plant Performance and Cost Estimates**. p. 82. 2009.
- UKEGUCHI, Y. et al. **Boiler Business and Technology Development**. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, v. 52, p. 55–63, 2015.
- USGS. **World Coal Quality Inventory**. 2015. Disponível em: <[www.usgs.gov/](http://www.usgs.gov/)>.
- VISWANATHAN, R.; SARVER, J.; TANZOSH, J. M. **Boiler materials for ultra-supercritical coal power plants - Steamside oxidation**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 15, n. 3, p. 255–274, 2006.
- VISWANATHAN, V.; PURGERT, R.; RAWLS, P. **Coal-Fired power materials - Part II**. Advanced Materials & Processes, p. 41–45, 2008.
- WALL, G. **Engineering Sustainability, Reviewers for 2005**. Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability, v. 159, n. 1, p. 46–46, 2006.
- WANG, Z. **Thoughts on the Clean and Efficient Development of China's Coal Power under the New Normal**. Beijing, China. 2015.
- WANG, L. et al. **Advanced thermodynamic analysis and evaluation of a supercritical power plant**. Energies 5, 1850–1863. 2012.
- WARD, C. R. **Coal Geology and Coal Technology**. Melbourne: Blackwell Scientific, 1984.
- WEN, L. **Shenhua's Evolution From Coal Producer to Clean Energy Supplier**. Corner Stone - The Official Journal of the World Coal Industry, v. 3, 2015.
- WIATROS-MOTYKA, M. **An overview of HELE technology deployment in the coal power plant fleets**. December, 2016.
- WILLIAMS, J. **America's best coal plants**. Power Engineering, v. 7, 2014.
- WOOD, G. H. J. et al. **Coal Resource Classification System of the U . S . Geological Survey**. U.S. Geological Survey. 1992.
- WORLD ENERGY COUNCIL. **Survey of Energy Resources**. p. 1-618, 2010.
- WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources**. p. 1–1028, 2016.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear Power in Japan**. 2017. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

WORLD COAL INSTITUTE. **The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal the Coal Resource. Where Does Coal Come From ? What Is It.** World Coal Institute, p. 1–44, 2005.

YAMAZAKI, T. **Japan's Electricity Market Reform and Beyond. Ministry of Economy, Trade, and Industry. Japan.** 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/media/workshops/2015/esapplenaryjuly2015/Yamazaki.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

YANG, Y. et al. **Comprehensive exergy-based evaluation and parametric study of a coal-fired ultra-supercritical power plant.** Appl. Energy 112, 1087–1099. 2013.

YÜRÜSOY, M.; KEÇEBAS, A. **Advanced exergo-environmental analyses and assessments of a real district heating system with geothermal energy.** Applied Thermal Engineering, v. 113, p. 449–459, 2017.

ZENG, F. **The Origin of Coal and World Reserves.** In: Coal, Oil Shale, Natural Bitumen, Heavy Oil and Peat. China. 2009.

ZHAO, P. **A computer program for the exergoeconomic analysis of energy conversion plants.** Thesis. Technical University of Berlin. p. 153. 2015.

ZHU, Q. **China – Policies , HELE technologies and CO2 reductions.** IEA Clean Coal Centre – CCC/269. London, United Kingdom. 2016.

# APÊNDICE A

## Cálculo da Potência das Turbinas, Bombas, Fornecimento de Calor Na Caldeira, Calor Rejeitado no Condensador, e Eficiência de Primeira Lei

Os fluxos apresentados na Tabela 6.1, Tabela 6.9 e Tabela 6.17 relacionados às potências de eixo das turbinas, e potência das bombas podem ser obtidos a partir da análise de 1ª lei da termodinâmica, assim como pode ser obtida a eficiência de primeira lei, e a vazão mássica de água de resfriamento, conforme apresentado a seguir.

### A.1 CENTRAL SUBCRÍTICA

#### Turbina de Alta Pressão (HPT)

$$W_{HPT} = \dot{m}_3(h_3 - h_5) \quad (\text{A.1})$$

$$W_{HPT} = 425,8 \cdot (3394 - 3055) = 144346,2 \text{ kW}$$

#### Turbina Pressão Intermediária (IPT)

$$W_{IPT} = \dot{m}_6(h_6 - h_7) + (\dot{m}_6 - \dot{m}_7) \cdot (h_7 - h_{10}) \quad (\text{A.2})$$

$$W_{IPT} = 380,5 \cdot (3530 - 3287) + (380,5 - 21) \cdot (3287 - 3065) = 172270,5 \text{ kW}$$

#### Turbina de Baixa Pressão (LPT)

$$W_{LPT} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) \cdot (h_{13} - h_{14}) \quad (\text{A.3})$$

$$W_{LPT} = 316,9 \cdot (3065 - 2852) + (316,9 - 12,2) \cdot (2852 - 2738) + (316,9 - 12,2 - 23,3) \cdot (2738 - 2620) + (316,9 - 12,2 - 23,3 - 10,2) \cdot (2620 - 2417) = 190494,3 \text{ kW}$$

#### Bomba de Extração de Condensado (CEP)

$$\dot{W}_{CEP} = \dot{m}_{15}(h_{16} - h_{15}) \quad (\text{A.4})$$

$$\dot{W}_{CEP} = 335,5 \cdot (195,3 - 194,3) = 335,5 \text{ kW}$$

#### Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP)

$$\dot{W}_{BFP} = \dot{m}_{23}(h_{24} - h_{23}) \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{W}_{BFP} = 425,8 \cdot (717,6 - 692,1) = 10857,9 \text{ kW}$$

#### Fornecimento de Calor na Caldeira

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{\dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_{28}) + \dot{m}_4 \cdot (h_6 - h_4)}{\eta_{Caldeira}} \quad (\text{A.6})$$

De acordo com U.S. Environmental Protection Agency (2009) a eficiência da caldeira para centrais deste tipo é de 87,54%, e será utilizado para o cálculo do fornecimento na caldeira.

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{425,8 \cdot (3394 - 1068,14) + 380,5 \cdot (3530 - 3055)}{0,8754}$$

$$\dot{Q}_{Caldeira} = 1337775,52 \text{ kW}$$

### Calor Rejeitado no Condensador e Vazão de Água de Resfriamento

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -\dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_{9a} \cdot h_{9a} + \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -271,2 \cdot 2417 - 45,7 \cdot 275,4 - 18,6 \cdot 2185,92 + 335,5 \cdot 194,3 = -643546,64 \text{ kW}$$

Será utilizado um valor padrão de 10°C para a diferença de temperatura entre os fluxos de entrada e saída de água resfriamento.

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (h_{35^\circ\text{C}} - h_{25^\circ\text{C}}) \quad (\text{A.8})$$

$$643546,64 = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (146,7 - 104,9)$$

$$\dot{m}_{\text{água resfriamento}} = 15395,85 \text{ kg} \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{s}$$

### Eficiência de 1ª Lei do ciclo

$$\eta_{\text{Ciclo}} = \frac{\dot{W}_{\text{Ciclo}}}{\dot{Q}_e} \quad (\text{A.9})$$

$$\eta_{\text{Ciclo}} = \frac{(144346,2 + 172270,5 + 190494,3 - 335,50)}{1337775,52} = 0,3788 = 37,88\%$$

## A.2 CENTRAL SUPERCRÍTICA

### Turbina de Alta Pressão (HPT)

$$W_{HPT} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot (h_2 - h_4) \quad (\text{A.10})$$

$$W_{HPT} = 562,2 \cdot (3304 - 3021) + (562,2 - 43,385) \cdot (3021 - 2932) = 205277,14 \text{ kW}$$

### Turbina Pressão Intermediária (IPT)

$$W_{IPT} = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_6) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7) \cdot (h_6 - h_8) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_8 - h_9) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8 - \dot{m}_9) \cdot (h_9 - h_{11}) \quad (\text{A.11})$$

$$W_{IPT} = 467 \cdot (3592 - 3399) + (467 - 21,96 - 27,22) \cdot (3399 - 3222) + (467 - 21,96 - 27,22 - 12,9) \cdot (3222 - 3064) + (467 - 21,96 - 27,22 - 12,9 - 22,39) \cdot (3064 - 2895)$$

$$W_{IPT} = 292710,07 \text{ kW}$$

### Turbina de Baixa Pressão (LPT)

$$W_{LPT} = \dot{m}_{11} \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13}) + (\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) \cdot (h_{13} - h_{14}) \quad (\text{A.12})$$

$$W_{LPT} = 350,9 \cdot (2895 - 2656) + (350,9 - 13,1) \cdot (2656 - 2622) + (350,9 - 13,1 - 9,6) \cdot (2622 - 2394) = 170179,90 \text{ kW}$$

### Bomba de Extração de Condensado (CEP)

$$\dot{W}_{CEP} = \dot{m}_{15} \cdot (h_{16} - h_{15}) \quad (\text{A.13})$$

$$\dot{W}_{CEP} = 365,02 \cdot (199,3 - 194,2) = 1861,60 \text{ kW}$$

### Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP)

$$\dot{W}_{BFP} = \dot{m}_{25}(h_{26} - h_{25}) \quad (\text{A.14})$$

$$\dot{W}_{BFP} = 562,2 \cdot (822,3 - 781,213) = 23099,11 \text{ kW}$$

### Fornecimento de Calor na Caldeira

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{33}) + \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_4)}{\eta_{Caldeira}} \quad (\text{A.15})$$

De acordo com U.S. Environmental Protection Agency (2009) a eficiência da caldeira para centrais deste tipo é de 87,54%, e será utilizado para o cálculo do fornecimento na caldeira.

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{562,2 \cdot (3304 - 1260) + 467 \cdot (3592 - 2932)}{0,8754}$$

$$\dot{Q}_{Caldeira} = 1664789,58 \text{ kW}$$

### Calor Rejeitado no Condensador e Vazão de Água de Resfriamento

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -\dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_{7i} \cdot h_{7i} + \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -328,2 \cdot 2394 - 9,6 \cdot 275,2 - 27,22 \cdot 2537,5 + 365,02 \cdot 194,2 = -786536,59 \text{ kW}$$

Será utilizado um valor padrão de 10°C para a diferença de temperatura entre os fluxos de entrada e saída de água resfriamento.

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (h_{35^\circ\text{C}} - h_{25^\circ\text{C}})$$

$$786536,59 = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (146,7 - 104,9)$$

$$\dot{m}_{\text{água resfriamento}} = 18816,66 \text{ kg. H}_2\text{O/s}$$

### Eficiência de 1ª Lei do ciclo

$$\eta_{Ciclo} = \frac{\dot{W}_{Ciclo}}{\dot{Q}_e} = \frac{(205277,14 + 292710,07 + 170179,9 - 1861,602)}{1664789,58}$$

$$\eta_{Ciclo} = 0,4002 = 40,02\%$$

## A.3 CENTRAL ULTRASSUPERCRÍTICA

### Turbina de Alta Pressão (HPT)

$$\dot{W}_{HPT} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot (h_2 - h_4) \quad (\text{A.17})$$

$$\dot{W}_{HPT} = 563,2 \cdot (3444 - 3070) + (563,2 - 34,9) \cdot (3070 - 2983) = 256598,9 \text{ kW}$$

### Turbina Pressão Intermediária (IPT)

$$\dot{W}_{IPT} = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_6) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6) \cdot (h_6 - h_8) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_6 - \dot{m}_7 - \dot{m}_8) \cdot (h_8 - h_{10}) \quad (\text{A.18})$$

$$\dot{W}_{IPT} = 488,1 \cdot (3717 - 3560) + (488,1 - 15,6) \cdot (3560 - 3378) + (488,1 - 15,6 - 16,9 - 30,4) \cdot (3378 - 3212) = 233209,9 \text{ kW}$$

### Turbina de Baixa Pressão (LPT)

$$W_{LPT} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot (h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12}) \cdot (h_{12} - h_{13}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13}) \cdot (h_{13} - h_{14}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{14}) \cdot (h_{14} - h_{15}) \quad (\text{A.19})$$

$$W_{LPT} = 399,3 \cdot (3212 - 3033) + (399,3 - 18,8) \cdot (3033 - 2857) + (399,3 - 18,8 - 19,8) \cdot (2857 - 2687) + (399,3 - 18,8 - 19,8 - 17,9) \cdot (2687 - 2610) + (399,3 - 18,8 - 19,8 - 17,9 - 14,4) \cdot (2610 - 2345) = 313183,3 \text{ kW}$$

### Bomba de Extração de Condensado (CEP)

$$\dot{W}_{CEP} = \dot{m}_{17} \cdot (h_{17} - h_{16}) \quad (\text{A.20})$$

$$\dot{W}_{CEP} = 373,2 \cdot (165,2 - 160,6) = 1716,72 \text{ kW}$$

### Bomba de Alimentação da Caldeira (BFP)

$$\dot{W}_{BFP} = \dot{m}_{29}(h_{29} - h_{28}) \quad (\text{A.21})$$

$$\dot{W}_{BFP} = 563,2 \cdot (902,2 - 855,1) = 26526,72 \text{ kW}$$

### Fornecimento de Calor na Caldeira

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{35}) + \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_4)}{\eta_{Caldeira}} \quad (\text{A.22})$$

De acordo com U.S. Environmental Protection Agency (2009) a eficiência da caldeira para centrais deste tipo é de 87,54%, e será utilizado para o cálculo do fornecimento na caldeira.

$$\dot{Q}_{Caldeira} = \frac{563,2 \cdot (3444 - 1255) + 488,1 \cdot (3717 - 2983)}{0,8754}$$

$$\dot{Q}_{Caldeira} = 1817580,76 \text{ kW}$$

### Calor Rejeitado no Condensador e Vazão de Água de Resfriamento

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -\dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_{8i} \cdot h_{8i} + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} \quad (\text{A.23})$$

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = -328,8 \cdot 2345 - 14,4 \cdot 183,8 - 30,4 \cdot 2505 + 373,2 \cdot 160,6 = -789898,8 \text{ kW}$$

Será utilizado um valor padrão de 10°C para a diferença de temperatura entre os fluxos de entrada e saída de água resfriamento.

$$\dot{Q}_{Rejeitado} = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (h_{35^\circ\text{C}} - h_{25^\circ\text{C}})$$

$$789898,8 = \dot{m}_{\text{água resfriamento}} \cdot (146,7 - 104,9)$$

$$\dot{m}_{\text{água resfriamento}} = 18897,10 \text{ kg. H}_2\text{O/s}$$

### Eficiência de 1ª Lei do ciclo

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{\dot{W}_{\text{ciclo}}}{\dot{Q}_e} = \frac{(256598,9 + 233209,9 + 313183,3 - 1716,720)}{1817580,76}$$

$$\eta_{\text{ciclo}} = 0,4392 = 43,92\%$$

## APÊNDICE B

### Cálculo do Consumo Específico de Combustível e das Emissões de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e Material Particulado

Com base na composição do carvão mineral e seu poder calorífico, ambos apresentados na Tabela 5.4, e dos valores obtidos no Anexo A (Fornecimento de calor na caldeira e Eficiência do ciclo) é possível obter a estimativa do consumo de combustível e das emissões para cada uma das centrais analisadas.

$$\dot{m}_{comb.} = \frac{\dot{Q}_{caldeira}}{PCI_{comb.}} \quad (B.1)$$

$$n_{CO_2} = \frac{Y_C \cdot \dot{m}_{comb.} \cdot M_{CO_2}}{100 \cdot M_C} \quad (\text{kg/s}) \quad (B.2)$$

$$e_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot 3600}{\dot{W}_{Total}} \quad (\text{kg/kWh}) \quad (B.3)$$

Onde,

$n_{CO_2}$ , emissão específica de CO<sub>2</sub> (kg/s);

$e_{CO_2}$ , fator de emissão de CO<sub>2</sub> (kg/kWh);

$Y_C$ , porcentagem em peso de carbono presente na composição química elementar do carvão mineral;

$M_{CO_2}$ , peso molecular do dióxido de carbono;

$M_C$ , peso molecular do carbono;

$\dot{W}_{Total}$ , potência líquida total gerada pela central.

$$n_{SO_2} = \frac{Y_S \cdot \dot{m}_{comb.} \cdot M_{SO_2}}{100 \cdot M_S} \quad (\text{kg/s}) \quad (B.4)$$

$$e_{SO_2} = \frac{n_{SO_2} \cdot 3600}{\dot{W}_{Total}} \quad (\text{kg/kWh}) \quad (B.5)$$

Onde,

$n_{SO_2}$ , emissão específica de SO<sub>2</sub> (kg/s);

$e_{SO_2}$ , fator de emissão de SO<sub>2</sub> (kg/kWh);

$Y_S$ , porcentagem em peso de enxofre presente na composição química elementar do carvão mineral;

$M_{SO_2}$ , peso molecular do dióxido de enxofre;

$M_S$ , peso molecular do enxofre;

$\dot{W}_{Total}$ , potência líquida total gerada pela central.

### Central Subcrítica

- **Consumo específico de carvão mineral**

$$\dot{m}_{comb.} = \frac{1337775,52}{29316,10} = 45,6328 \text{ kg/s}$$

- **Emissões CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>**

$$n_{CO_2} = \frac{74,455 \cdot 45,6328 \cdot 44}{100 \cdot 12} = 124,58 \text{ kg/s}$$

$$n_{CO_2} = \frac{124,58 \cdot 3600}{500000} = 0,897 \text{ kg/kWh}$$

$$n_{SO_2} = \frac{0,313 \cdot 45,6328 \cdot 64}{100 \cdot 32} = 0,2856 \text{ kg/s}$$

$$e_{SO_2} = \frac{0,2856 \cdot 3600}{500000} = 0,002056 \text{ kg/kWh}$$

### Central Supercrítica

- **Consumo específico de carvão mineral**

$$\dot{m}_{comb.} = \frac{1664789,58}{29316,10} = 56,7875 \text{ kg/s}$$

- **Emissões CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>**

$$n_{CO_2} = \frac{74,455 \cdot 56,7875 \cdot 44}{100 \cdot 12} = 155,03 \text{ kg/s}$$

$$n_{CO_2} = \frac{155,03 \cdot 3600}{660000} = 0,8456 \text{ kg/kWh}$$

$$n_{SO_2} = \frac{0,313 \cdot 56,7875 \cdot 64}{100 \cdot 32} = 0,3554 \text{ kg/s}$$

$$e_{SO_2} = \frac{0,3554 \cdot 3600}{660000} = 0,001938 \text{ kg/kWh}$$

### Central Ultrasepercrítica

- **Consumo específico de carvão mineral**

$$\dot{m}_{comb.} = \frac{1817580,76}{29316,10} = 61,9994 \text{ kg/s}$$

➤ **Emissões CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>**

$$n_{CO_2} = \frac{74,455 \cdot 61,9994 \cdot 44}{100 \cdot 12} = 169,26 \text{ kg/s}$$

$$n_{CO_2} = \frac{169,26 \cdot 3600}{800000} = 0,76167 \text{ kg/kWh}$$

$$n_{SO_2} = \frac{0,313 \cdot 61,9994 \cdot 64}{100 \cdot 32} = 0,3880 \text{ kg/s}$$

$$e_{SO_2} = \frac{0,3880 \cdot 3600}{800000} = 0,00175 \text{ kg/kWh}$$

➤ **Emissões de Material Particulado (MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub>, e TSP)**

A estimativa das emissões de partículas na combustão de carvão pulverizado varia de acordo com o teor de cinzas do carvão e do tipo de processo de combustão. Para fornalhas operando com carvão pulverizado a estimativa das emissões pode ser realizada conforme descrito por Bailie (1978) e apresentado por Carvalho Jr e Lacava (2003), o fator de emissão é dado como 2 vezes em libras o percentual de cinzas por tonelada de carvão queimado, assim como descrito Equação B.6.

$$n_{MP} = \frac{2 \cdot Y_{Cinzas} \cdot \dot{m}_{comb.}}{1000 \cdot 2,205} \text{ (kg/s)} \quad (\text{B.6})$$

$$e_{MP} = \frac{n_{MP} \cdot 3600}{\dot{W}_{Total}} \text{ (kg/kWh)} \quad (\text{B.7})$$

A distribuição das partículas de acordo com o tamanho pode ser estimado nas seguintes proporções com base no total de material particulado formado: 49,39% de partículas totais em suspensão (TSP), 48,26% de partículas inaláveis (MP<sub>10</sub>), e 2,35% de partículas inaláveis finas (MP<sub>2,5</sub>) (HONG et al., 2018; SHENG; YAO, 2010).

**Central Subcrítica**

$$n_{MP} = \frac{2 \cdot 16,76 \cdot 45,6328}{1000 \cdot 2,205} = 0,6937 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{10}} = 0,4826 \cdot 0,6937 = 0,3348 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{2,5}} = 0,0235 \cdot 0,6937 = 0,0163 \text{ kg/s}$$

$$n_{TSP} = 0,4939 \cdot 0,6937 = 0,3427 \text{ kg/s}$$

$$e_{MP} = \frac{0,6937 \cdot 3600}{500000} = 0,004996 \text{ kg/kWh}$$

### Central Supercrítica

$$n_{MP} = \frac{2 \cdot 16,76 \cdot 56,7875}{1000 \cdot 2,205} = 0,86327 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{10}} = 0,4826 \cdot 0,86327 = 0,41661 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{2,5}} = 0,0235 \cdot 0,86327 = 0,02029 \text{ kg/s}$$

$$n_{TSP} = 0,4939 \cdot 0,86327 = 0,42637 \text{ kg/s}$$

$$e_{MP} = \frac{0,86327 \cdot 3600}{660000} = 0,00471 \text{ kg/kWh}$$

### Central Ultrassupercrítica

$$n_{MP} = \frac{2 \cdot 16,76 \cdot 61,9994}{1000 \cdot 2,205} = 0,9425 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{10}} = 0,4826 \cdot 0,9425 = 0,45485 \text{ kg/s}$$

$$n_{MP_{2,5}} = 0,0235 \cdot 0,9425 = 0,02215 \text{ kg/s}$$

$$n_{TSP} = 0,4939 \cdot 0,9425 = 0,46550 \text{ kg/s}$$

$$e_{MP} = \frac{0,9425 \cdot 3600}{800000} = 0,00424 \text{ kg/kWh}$$

### ➤ Emissões NO<sub>x</sub>

As emissões de óxidos de nitrogênio são originadas a partir do nitrogênio presente do ar (NO<sub>x</sub> térmicos) e a partir do nitrogênio contido no combustível (NO<sub>x</sub> do combustível). De acordo com EPA (1993), Carvalho Jr. Lacava (2003) e Lora (2002) o fator de emissão de óxidos de nitrogênio varia bastante de acordo com as condições da combustão, mas pode ser estimado, conforme apresentado na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Fatores de emissão de NO<sub>x</sub> para diferentes tecnologias de queima de carvão

Combustível e tecnologia utilizada	Fator de emissão de NO <sub>x</sub>
Carvão betuminoso (caldeiras de grande porte com queima frontal)	6 (kg / t)
Carvão betuminoso (caldeiras de grande porte com queima tangencial)	5 (kg / t)
Carvão betuminoso (stokers)	5,5 (kg / t)

Para este estudo considerou-se o uso de carvão betuminoso em caldeira de grande porte com queima tangencial.

$$n_{NO_x} = \frac{\dot{m}_{comb.} \cdot 6}{1000} \text{ (kg/s)} \quad (\text{B.8})$$

$$e_{NO_x} = \frac{n_{NO_x} \cdot 3600}{\dot{W}_{Total}} \text{ (kg/kWh)} \quad (\text{B.9})$$

**Subcrítica:**  $n_{NO_x} = \frac{45,6328 \cdot 6}{1000} = 0,273797 \text{ kg/s}$

$$e_{NO_x} = \frac{0,273797 \cdot 3600}{500000} = 0,001971 \text{ kg/kWh}$$

**Supercrítica:**  $n_{NO_x} = \frac{56,7875 \cdot 6}{1000} = 0,340725 \text{ kg/s}$

$$e_{NO_x} = \frac{0,340725 \cdot 3600}{660000} = 0,001859 \text{ kg/kWh}$$

**Ultrassupercrítica:**  $n_{NO_x} = \frac{61,9994 \cdot 6}{1000} = 0,371996 \text{ kg/s}$

$$e_{NO_x} = \frac{0,371996 \cdot 3600}{800000} = 0,001674 \text{ kg/kWh}$$

## APÊNDICE C

# Cálculo da exergia dos gases de exaustão da caldeira

Considerando uma combustão com 20% de excesso de ar, com combustível e ar entrando em temperatura ambiente 298 K (25 °C), e sendo a temperatura dos gases de exaustão 620 K (347 °C).

Tabela C.1 – Vazão molar e vazão mássica dos componentes dos gases de exaustão, e suas respectivas frações molares ( $y_i$ ).

Composto	Subcrítica		Supercrítica		Ultrasupercrítica		$y_i$
	$\dot{n}_i$ (kmol/s)	$\dot{m}_i$ (kg/s)	$\dot{n}_i$ (kmol/s)	$\dot{m}_i$ (kg/s)	$\dot{n}_i$ (kmol/s)	$\dot{m}_i$ (kg/s)	
N <sub>2</sub>	14,48507	405,5820	18,076247	506,1349	19,722591	552,2325	0,7705
CO <sub>2</sub>	2,831324	124,5783	3,533274	155,4641	3,855076	169,6233	0,1506
H <sub>2</sub> O	0,837717	15,0789	1,045406	18,8173	1,140619	20,5311	0,0446
O <sub>2</sub>	0,641245	20,5198	0,800225	25,6072	0,873107	27,9394	0,0341
SO <sub>2</sub>	0,004421	0,2829	0,005517	0,3531	0,006019	0,3852	0,0002
$\dot{n}_T$ (kmol/s)	18,799777	566,0419	23,460669	706,3766	25,597412	770,7115	-

Para obter o  $\Delta h$  e  $\Delta s$  foram utilizadas as Equações 5.26, 5.27, e para o CO<sub>2</sub> as Equações 5.28 e 5.29, respectivamente, utilizando os coeficientes a, b, c e d apresentados na

Tabela 5.8.

Utilizando as Equações 5.14, 5.23, 5.24 e 5.30 apresentadas no Capítulo 5 – Fundamentação Teórica obtém-se, portanto a exergia total dos gases de exaustão (física + química) para as condições estabelecidas. A seguir está detalhada a rotina em Matlab utilizada para o cálculo da exergia dos gases.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
By: Danilo H D Rocha    20/08/2018
%      exergia_gases.m
%      Rotina para obtenção da exergia total dos gases de exaustão.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all

%Temperatura saída dos gases%
T=620;
%Vazões Molares e fração molar%
%%%      Subc      Super      Ultras      y
CO2=[2.831324  3.533274  3.855076  0.150604];
H2O=[0.837717  1.045406  1.140619  0.04456];
SO2=[0.004421  0.005517  0.006019  0.000235];

```

```
N2=[14.48507 18.076247 19.722591 0.770492];
Ox2=[0.641245 0.800225 0.873107 0.034109];
Total=[18.799777 23.460669 25.597412];
```

```
%%% Valores dos Coeficientes, e Exergia química padrão %%%
%%% a b c d bch %%%
CN2=[28.883 -0.157*(10^-2) 0.808*(10^-5) -2.871*(10^-9) 720];
COx2=[25.46 1.519*(10^-2) -0.715*(10^-5) 1.311*(10^-9) 3970];
CCO2=[22.243 5.977*(10^-2) 3.499*(10^-5) 7.464*(10^-9) 20140];
CH2O=[32.218 0.192*(10^-2) 1.055*(10^-5) -3.593*(10^-9) 11710];
CSO2=[25.762 5.791*(10^-2) -3.809*(10^-5) 8.607*(10^-9) 303500];
```

```
% Cálculo deltaH e deltaS %
```

```
SO2deltaH=(CSO2(1,1)*(T-298.15))+((CSO2(1,2)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CSO2(1,3)/3)*((T^3)-(298.15^3)))+(CSO2(1,4)/4)*((T^4)-(298.15^4));
SO2deltaS=(CSO2(1,1)*log((T/298.15)))+(CSO2(1,2)*(T-298.15))+((CSO2(1,3)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CSO2(1,4)/3)*((T^3)-(298.15^3));
CO2deltaH=75.464*(T-298.15)-(0.936*(10^-4))*((T^2)-(298.15^2))-1322.84*((T^(1/2))-(298.15^(1/2)));
CO2deltaS=75.464*log(T/298.15)-1.872*(10^-4)*(T-298.15)+1322.84*((T^(-1/2))-(298.15^(-1/2)));
H2OdeltaH=(CH2O(1,1)*(T-298.15))+((CH2O(1,2)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CH2O(1,3)/3)*((T^3)-(298.15^3)))+(CH2O(1,4)/4)*((T^4)-(298.15^4));
H2OdeltaS=(CH2O(1,1)*log((T/298.15)))+(CH2O(1,2)*(T-298.15))+((CH2O(1,3)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CH2O(1,4)/3)*((T^3)-(298.15^3));
N2deltaH=(CN2(1,1)*(T-298.15))+((CN2(1,2)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CN2(1,3)/3)*((T^3)-(298.15^3)))+(CN2(1,4)/4)*((T^4)-(298.15^4));
N2deltaS=(CN2(1,1)*log((T/298.15)))+(CN2(1,2)*(T-298.15))+((CN2(1,3)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(CN2(1,4)/3)*((T^3)-(298.15^3));
Ox2deltaH=(COx2(1,1)*(T-298.15))+((COx2(1,2)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(COx2(1,3)/3)*((T^3)-(298.15^3)))+(COx2(1,4)/4)*((T^4)-(298.15^4));
Ox2deltaS=(COx2(1,1)*log((T/298.15)))+(COx2(1,2)*(T-298.15))+((COx2(1,3)/2)*((T^2)-(298.15^2)))+(COx2(1,4)/3)*((T^3)-(298.15^3));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SUBCRÍTICA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Cálculo da Exergia Física %
```

```
SBBphSO2=SO2(1,1)*((SO2deltaH)-298.15*(SO2deltaS));
SBBphCO2=CO2(1,1)*((CO2deltaH)-298.15*(CO2deltaS));
SBBphH2O=H2O(1,1)*((H2OdeltaH)-298.15*(H2OdeltaS));
SBBphN2=N2(1,1)*((N2deltaH)-298.15*(N2deltaS));
SBBphOx2=Ox2(1,1)*((Ox2deltaH)-298.15*(Ox2deltaS));
```

```
% Cálculo da Exergia Química %
```

```
SBbchSO2=SO2(1,4)*CSO2(1,5)+8.314*298.15*(SO2(1,4)*log(SO2(1,4)));
SBbchCO2=CO2(1,4)*CCO2(1,5)+8.314*298.15*(CO2(1,4)*log(CO2(1,4)));
SBbchH2O=H2O(1,4)*CH2O(1,5)+8.314*298.15*(H2O(1,4)*log(H2O(1,4)));
SBbchOx2=Ox2(1,4)*COx2(1,5)+8.314*298.15*(Ox2(1,4)*log(Ox2(1,4)));
SBbchN2=N2(1,4)*CN2(1,5)+8.314*298.15*(N2(1,4)*log(N2(1,4)));
```

```
% Exergia Total %
```

```
BtotalSB=(SBBphSO2+SBBphCO2+SBBphH2O+SBBphOx2+SBBphN2)+Total(1,1)*(SBbchSO2+SBbchCO2+SBbchH2O+SBbchOx2+SBbchN2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SUPERCRÍTICA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Cálculo da Exergia Física %
```

```

SCBphSO2=SO2(1,2)*((SO2deltaH)-298.15*(SO2deltaS));
SCBphCO2=CO2(1,2)*((CO2deltaH)-298.15*(CO2deltaS));
SCBphH2O=H2O(1,2)*((H2OdeltaH)-298.15*(H2OdeltaS));
SCBphN2=N2(1,2)*((N2deltaH)-298.15*(N2deltaS));
SCBphOx2=Ox2(1,2)*((Ox2deltaH)-298.15*(Ox2deltaS));
% Cálculo da Exergia Química %
SCbchSO2=SO2(1,4)*CSO2(1,5)+8.314*298.15*(SO2(1,4)*log(SO2(1,4)));
SCbchCO2=CO2(1,4)*CCO2(1,5)+8.314*298.15*(CO2(1,4)*log(CO2(1,4)));
SCbchH2O=H2O(1,4)*CH2O(1,5)+8.314*298.15*(H2O(1,4)*log(H2O(1,4)));
SCbchOx2=Ox2(1,4)*COx2(1,5)+8.314*298.15*(Ox2(1,4)*log(Ox2(1,4)));
SCbchN2=N2(1,4)*CN2(1,5)+8.314*298.15*(N2(1,4)*log(N2(1,4)));
% Exergia Total %
BtotalSC=(SCBphSO2+SCBphCO2+SCBphH2O+SCBphOx2+SCBphN2)+Total(1,2)*(SCbchSO2
+SCbchCO2+SCbchH2O+SCbchOx2+SCbchN2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ULTRASSUPERCRÍTICA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cálculo da Exergia Física %
USCBphSO2=SO2(1,3)*((SO2deltaH)-298.15*(SO2deltaS));
USCBphCO2=CO2(1,3)*((CO2deltaH)-298.15*(CO2deltaS));
USCBphH2O=H2O(1,3)*((H2OdeltaH)-298.15*(H2OdeltaS));
USCBphN2=N2(1,3)*((N2deltaH)-298.15*(N2deltaS));
USCBphOx2=Ox2(1,3)*((Ox2deltaH)-298.15*(Ox2deltaS));
% Cálculo da Exergia Química %
USCbchSO2=SO2(1,4)*CSO2(1,5)+8.314*298.15*(SO2(1,4)*log(SO2(1,4)));
USCbchCO2=CO2(1,4)*CCO2(1,5)+8.314*298.15*(CO2(1,4)*log(CO2(1,4)));
USCbchH2O=H2O(1,4)*CH2O(1,5)+8.314*298.15*(H2O(1,4)*log(H2O(1,4)));
USCbchOx2=Ox2(1,4)*COx2(1,5)+8.314*298.15*(Ox2(1,4)*log(Ox2(1,4)));
USCbchN2=N2(1,4)*CN2(1,5)+8.314*298.15*(N2(1,4)*log(N2(1,4)));
% Exergia Total %
BtotalUSC=(USCBphSO2+USCBphCO2+USCBphH2O+USCBphOx2+USCBphN2)+Total(1,3)*(US
CbchSO2+USCbchCO2+USCbchH2O+USCbchOx2+USCbchN2);

%%saida de dados no bloco de notas
nome=sprintf('Exergia_gases.dat');
arquivo=fopen(nome,'w');
fprintf(arquivo,'Exergia Total Gases Exaustão Subcrítica = %.2f
\r\n',BtotalSB);
fprintf(arquivo,'Exergia Total Gases Exaustão Supercrítica = %.2f
\r\n',BtotalSC);
fprintf(arquivo,'Exergia Total Gases Exaustão Ultrassupercrítica = %.2f
\r\n',BtotalUSC);
fclose(arquivo);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

O conteúdo exergético do fluxo de gases de exaustão da caldeira para cada um dos sistemas estudados pode ser verificado na Tabela C.2.

Tabela C.2 – Exergia física, química e total dos gases de combustão.

Central	$\dot{B}_{Gases}^{PH}$ [kW]	$\dot{B}_{Gases}^{CH}$ [kW]	$\dot{B}_{Gases}^{Total}$ [kW]
Subcrítica	62661,40	46579,99	109241,39
Supercrítica	78196,58	58128,21	136324,79
Ultrassupercrítica	85318,55	63422,25	148740,80

# APÊNDICE D

## Códigos de Programação em Matlab dos Cálculos das Taxas de Impacto Ambiental para os Sistemas Analisados

### D.1 CENTRAL SUBCRÍTICA

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%       By: Danilo H D Rocha       20/08/2018
%       constr_matriz_SB.m
%       Arquivo principal para obter as taxas de impacto ambiental a
%       partir da matriz de incidência.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Construção da Matriz de Incidência A(mxn) do sistema de estudo%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

A=zeros(37,37);
A(1,1)=1;A(1,2)=1;A(1,3)=-1;A(1,4)=1;A(1,7)=-1;A(1,35)=1;A(1,37)=-1;%Caldeira%
A(2,3)=1; A(2,4)=-1; A(2,5)=-1; A(2,6)=-1; %HPT%
A(3,7)=1; A(3,8)=-1; A(3,9)=-1; A(3,10)=-1; A(3,12)=-1; A(3,13)=-1; %IPT%
A(4,12)=1; A(4,14)=-1; A(4,15)=-1; A(4,16)=-1; A(4,17)=-1; A(4,18)=-1; %LPT%
A(5,17)=1; A(5,24)=1; A(5,20)=-1; A(5,11)=1; A(5,36)=-1; %Condensador%
A(6,6)=1; A(6,13)=1; A(6,18)=1; A(6,19)=-1; A(6,21)=-1; %Gerador%
A(7,21)=1; A(7,22)=-1; A(7,20)=1; %CEP%
A(8,22)=1; A(8,16)=1; A(8,25)=1; A(8,23)=-1; A(8,24)=-1; %LPH#1%
A(9,23)=1; A(9,15)=1; A(9,27)=-1; A(9,25)=-1; A(9,26)=1; %LPH#2%
A(10,27)=1; A(10,14)=1; A(10,26)=-1; A(10,28)=-1; %LPH#3%
A(11,9)=1; A(11,28)=1; A(11,32)=1; A(11,29)=-1; %Desaerador%
A(12,29)=1; A(12,30)=1; A(12,31)=-1; %BFP%
A(13,10)=1; A(13,11)=-1; A(13,30)=-1; %PDT%
A(14,31)=1; A(14,8)=1; A(14,34)=1; A(14,33)=-1; A(14,32)=-1; %HPH#4%
A(15,33)=1; A(15,5)=1; A(15,34)=-1; A(15,35)=-1; %HPH#5%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada dos valores das equações auxiliares%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x1=5.276382; x2=1.476881; x3=12.40515; x4=22.23784; x5=24.54238; x6=31.66758;
x7=1.858684; x8=34.98712; x9=22.74552; x10=94.92652; x11=7.066597;
x12=1490.313; x13=0.023827; x14=0.110669; x15=0.107684; x16=0.09349;
x17=6.724443; x18=0.315951; x19=0.2403; x20=12.9514;

A(16,1)=1; %Equação Auxiliar 1%
A(17,2)=1; %Equação Auxiliar 2%
A(18,3)=1; A(18,35)=-1; A(18,7)=-x1; A(18,4)=x1; %Equação Auxiliar 3%
A(19,3)=1; A(19,4)=-x2; %Equação Auxiliar 4%
A(20,3)=1; A(20,5)=-x3; %Equação Auxiliar 5%
A(21,7)=1; A(21,8)=-x4; %Equação Auxiliar 6%
A(22,7)=1; A(22,9)=-x5; %Equação Auxiliar 7%
A(23,7)=1; A(23,10)=-x6; %Equação Auxiliar 8%
A(24,7)=1; A(24,12)=-x7; %Equação Auxiliar 9%
A(25,12)=1; A(25,14)=-x8; %Equação Auxiliar 10%
A(26,12)=1; A(26,15)=-x9; %Equação Auxiliar 11%
A(27,12)=1; A(27,16)=-x10; %Equação Auxiliar 12%

```

```

A(28,12)=1; A(28,17)=-x11; %Equação Auxiliar 13%
A(29,19)=1; A(29,21)=-x12; %Equação Auxiliar 14%
A(30,20)=1; A(30,17)=-x13; A(30,24)=-x13; A(30,11)=-x13; %Equação Auxiliar 15%
A(31,24)=1; A(31,16)=-x14; A(31,25)=-x14; %Equação Auxiliar 16%
A(32,25)=1; A(32,15)=-x15; A(32,26)=-x15; %Equação Auxiliar 17%
A(33,26)=1; A(33,14)=-x16; %Equação Auxiliar 18%
A(34,10)=1; A(34,11)=-x17; %Equação Auxiliar 19%
A(35,32)=1; A(35,8)=-x18; A(35,34)=-x18; %Equação Auxiliar 20%
A(36,34)=1; A(36,5)=-x19; %Equação Auxiliar 21%
A(37,1)=1; A(37,2)=1; A(37,37)=-x20; %Equação Auxiliar 22%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada do Vetor de Atribuição Externa Y%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

B=zeros(37,1);
B(1,1)=-7.755105;
B(2,1)=-0.193082;
B(3,1)=-0.219690;
B(4,1)=-0.236423;
B(5,1)=-0.001962;
B(6,1)=-0.000566;
B(7,1)=-0.000323;
B(8,1)=-0.001225;
B(9,1)=-0.001225;
B(10,1)=-0.001225;
B(11,1)=-0.007683;
B(12,1)=-0.008776;
B(13,1)=-0.029206;
B(14,1)=-0.001225;
B(15,1)=-0.001225;
B(16,1)=6694.247587;
B(17,1)=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtenção do Vetor correspondente as Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

T=det(A);
C=inv(A);
R=C*B;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Imprimir em arquivo de saída (.txt)a matriz de incidência e as taxas de
% impacto ambiental obtidas para os fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[n,m]=size(A);
nome=sprintf('Matriz_SB.dat');
arquivo=fopen(nome,'w');
for i=1:1:n
for k=1:1:m
fprintf(arquivo,'%4f',A(i,k));
fprintf(arquivo,' ');
end
fprintf(arquivo,'\r\n');
end
fprintf(arquivo,'\r\n B* \r\n');
for j=1:1:n
fprintf(arquivo,'%3f \r\n',R(j,1));
end
fclose(arquivo);

```

## D.2 CENTRAL SUPERCRÍTICA

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%       By: Danilo H D Rocha       16/07/2018
%       constr_matriz_SC.m
%       Arquivo principal para obter as taxas de impacto ambiental a
%       partir da matriz de incidência.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Construção da Matriz de Incidência A(mxn) do sistema de estudo%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A=zeros(44,44);
A(1,1)=1; A(1,2)=-1; A(1,7)=-1; A(1,6)=1; A(1,41)=1; A(1,44)=-1; %Caldeira%
A(2,2)=1; A(2,3)=-1; A(2,4)=-1; A(2,6)=-1; A(2,5)=-1; %HPT%
A(3,7)=1; A(3,8)=-1; A(3,10)=-1; A(3,11)=-1; A(3,12)=-1; A(3,13)=-1; A(3,15)=-
1; A(3,14)=-1; %IPT%
A(4,15)=1; A(4,16)=-1; A(4,17)=-1; A(4,18)=-1; A(4,19)=-1; %LPT%
A(5,32)=1; A(5,18)=1; A(5,21)=-1; A(5,25)=1; A(5,43)=-1; %Condensador%
A(6,5)=1; A(6,14)=1; A(6,19)=1; A(6,22)=-1; A(6,20)=-1; %Gerador%
A(7,21)=1; A(7,23)=-1; A(7,22)=1; %CEP%
A(8,17)=1; A(8,23)=1; A(8,24)=-1; A(8,25)=-1; %LPH#1%
A(9,16)=1; A(9,24)=1; A(9,26)=-1; A(9,27)=-1; A(9,28)=1; %LPH#2%
A(10,13)=1; A(10,26)=1; A(10,28)=-1; A(10,29)=-1; A(10,30)=1; A(10,27)=1; % LPH#3%
A(11,12)=1; A(11,29)=1; A(11,30)=-1; A(11,31)=-1; %LPH#4%
A(12,11)=1; A(12,31)=1; A(12,33)=-1; A(12,36)=1; %Desaerador%
A(13,33)=1; A(13,34)=-1; A(13,42)=1; %BFP%
A(14,10)=1; A(14,32)=-1; A(14,42)=-1; %PDT%
A(15,9)=1; A(15,34)=1; A(15,36)=-1; A(15,35)=-1; A(15,37)=1; %HPH#6%
A(16,4)=1; A(16,35)=1; A(16,37)=-1; A(16,38)=-1; A(16,39)=1; %HPH#7%
A(17,3)=1; A(17,38)=1; A(17,39)=-1; A(17,40)=-1; %HPH#8%
A(18,8)=1; A(18,9)=-1; A(18,40)=1; A(18,41)=-1; %AH%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada dos valores das equações auxiliares%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x1=27.9474; x2=0.2219; x3=0.0661; x4=11.6220; x5=0.4806; x6=0.3700; x7=3.4859;
x8=16.3894; x9=14.9155; x10=1.6549; x11=24.8210; x12=20.3097; x13=49.7136;
x14=34.3237; x15=30.0768; x16=2.7192; x17=44.5174; x18=85.2450; x19=4.9684;
x20=3.9000; x21=1.3341; x22=354.5334; x23=3.7453; x24=0.019044; x25=12.949763;

A(19,1)=1; %Equação Auxiliar 1%
A(20,17)=1; A(20,25)=-x1; %Equação Auxiliar 2%
A(21,27)=1; A(21,16)=-x2; A(21,28)=-x2; %Equação Auxiliar 3%
A(22,28)=1; A(22,13)=-x3; A(22,30)=-x3; %Equação Auxiliar 4%
A(23,12)=1; A(23,30)=-x4; %Equação Auxiliar 5%
A(24,36)=1; A(24,9)=-x5; A(24,37)=-x5; %Equação Auxiliar 6%
A(25,37)=1; A(25,4)=-x6; A(25,39)=-x6; %Equação Auxiliar 7%
A(26,3)=1; A(26,39)=-x7; %Equação Auxiliar 8%
A(27,2)=1; A(27,3)=-x8; %Equação Auxiliar 9%
A(28,2)=1; A(28,4)=-x9; %Equação Auxiliar 10%
A(29,2)=1; A(29,6)=-x10; %Equação Auxiliar 11%
A(30,7)=1; A(30,8)=-x11; %Equação Auxiliar 12%
A(31,7)=1; A(31,10)=-x12; %Equação Auxiliar 13%
A(32,7)=1; A(32,11)=-x13; %Equação Auxiliar 14%
A(33,7)=1; A(33,12)=-x14; %Equação Auxiliar 15%
A(34,7)=1; A(34,13)=-x15; %Equação Auxiliar 16%
A(35,7)=1; A(35,15)=-x16; %Equação Auxiliar 17%
A(36,15)=1; A(36,16)=-x17; %Equação Auxiliar 18%
A(37,15)=1; A(37,17)=-x18; %Equação Auxiliar 19%

```

```

A(38,15)=1; A(38,18)=-x19; %Equação Auxiliar 20%
A(39,10)=1; A(39,32)=-x20; %Equação Auxiliar 21%
A(40,8)=1; A(40,9)=-x21; %Equação Auxiliar 22%
A(41,20)=1; A(41,22)=-x22; %Equação Auxiliar 23%
A(42,2)=1; A(42,41)=-1; A(42,7)=-x23; A(42,6)=x23; %Equação Auxiliar 24%
A(43,21)=1; A(43,18)=-x24; A(43,25)=-x24; A(43,32)=-x24; %Equação Auxiliar 25%
A(44,1)=1; A(44,44)=-x25; %Equação Auxiliar 26%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada do Vetor de Atribuição Externa Y%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
B=zeros(44,1);
B(1,1)=-10.204337;
B(2,1)=-0.249681;
B(3,1)=-0.323501;
B(4,1)=-0.217741;
B(5,1)=-0.002425;
B(6,1)=-0.000566;
B(7,1)=-0.003529;
B(8,1)=-0.001225;
B(9,1)=-0.001225;
B(10,1)=-0.001225;
B(11,1)=-0.001225;
B(12,1)=-0.009332;
B(13,1)=-0.017979;
B(14,1)=-0.050676;
B(15,1)=-0.001225;
B(16,1)=-0.001225;
B(17,1)=-0.001225;
B(18,1)=-0.001225;
B(19,1)=8330.6306;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtenção do Vetor correspondente as Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T=det(A);
C=inv(A);
R=C*B;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Imprimir em arquivo de saída (.txt)a matriz de incidência e as taxas de
impacto ambiental obtidas para os fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[n,m]=size(A);
nome=sprintf('Matriz_SC.dat');
arquivo=fopen(nome,'w');
for i=1:1:n
for k=1:1:m
fprintf(arquivo,'% .4f',A(i,k));
fprintf(arquivo,' ');
end
fprintf(arquivo,'\r\n');
end
fprintf(arquivo,'\r\n B* \r\n');
for j=1:1:n
fprintf(arquivo,'% .3f \r\n',R(j,1));
end
fclose(arquivo);

```

### D.3 CENTRAL ULTRASSUPERCRÍTICA

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%       By: Danilo H D Rocha       05/09/2018
%       constr_matriz_USC.m
%       Arquivo principal para obter as taxas de impacto ambiental a
%       partir da matriz de incidência.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clear all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Construção da Matriz de Incidência A(mxn) do sistema de estudo%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A=zeros(46,46);
A(1,1)=1;A(1,2)=1;A(1,3)=-1;A(1,8)=-1;A(1,6)=1;A(1,44)=1;A(1,46)=-1;
%Caldeira%
A(2,3)=1; A(2,4)=-1; A(2,5)=-1; A(2,6)=-1; A(2,7)=-1; %HPT%
A(3,8)=1; A(3,9)=-1; A(3,10)=-1; A(3,11)=-1; A(3,13)=-1; A(3,14)=-1; A(3,15)=-1;
%IPT%
A(4,14)=1; A(4,16)=-1; A(4,17)=-1; A(4,18)=-1; A(4,19)=-1; A(4,20)=-1;
A(4,21)=-1; %LPT%
A(5,12)=1; A(5,20)=1; A(5,23)=-1; A(5,26)=1; A(5,45)=-1; %Condensador%
A(6,7)=1; A(6,15)=1; A(6,21)=1; A(6,22)=-1; A(6,24)=-1; %Gerador%
A(7,23)=1; A(7,25)=-1; A(7,24)=1; %CEP%
A(8,25)=1; A(8,19)=1; A(8,27)=-1; A(8,26)=-1; %LPH#1%
A(9,18)=1; A(9,27)=1; A(9,29)=-1; A(9,28)=-1; A(9,30)=1; %LPH#2%
A(10,17)=1; A(10,29)=1; A(10,31)=-1; A(10,30)=-1; A(10,28)=1; %LPH#3%
A(11,16)=1; A(11,31)=1; A(11,32)=-1; A(11,33)=-1; A(11,34)=1; %LPH#4%
A(12,33)=1; A(12,32)=1; A(12,34)=-1; A(12,13)=1; A(12,35)=-1; %LPH#5%
A(13,10)=1; A(13,36)=-1; A(13,40)=1; A(13,35)=1; %Desaerador%
A(14,36)=1; A(14,38)=-1; A(14,37)=1; %BFP%
A(15,11)=1; A(15,12)=-1; A(15,37)=-1; %PDT%
A(16,9)=1; A(16,41)=1; A(16,39)=-1; A(16,40)=-1; A(16,38)=1; %HPH#6%
A(17,5)=1; A(17,39)=1; A(17,42)=-1; A(17,41)=-1; A(17,43)=1; %HPH#7%
A(18,4)=1; A(18,43)=-1; A(18,42)=1; A(18,44)=-1; %HPH#8%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada dos valores das equações auxiliares%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x1=3.397157; x2=21.480195; x3=20.127814; x4=1.657318; x5=34.994807;
x6=37.601298; x7=20.903353; x8=28.724006; x9=1.859785; x10=26.112257;
x11=32.342839; x12=48.763704; x13=107.905986; x14=8.445036; x15=466.004940;
x16=0.008833; x17=0.009239; x18=0.110363; x19=0.046209; x20=0.139781;
x21=0.085653; x22=7.580267; x23=0.447058; x24=0.302036; x25=0.246143;
x26=12.9514;

A(19,1)=1; %Equação Auxiliar 1%
A(20,2)=1; %Equação Auxiliar 2%
A(21,3)=1; A(21,8)=-x1; A(21,6)=x1; A(21,44)=-1; %Equação Auxiliar 3%
A(22,3)=1; A(22,4)=-x2; %Equação Auxiliar 4%
A(23,3)=1; A(23,5)=-x3; %Equação Auxiliar 5%
A(24,3)=1; A(24,6)=-x4; %Equação Auxiliar 6%
A(25,8)=1; A(25,9)=-x5; %Equação Auxiliar 7%
A(26,8)=1; A(26,10)=-x6; %Equação Auxiliar 8%
A(27,8)=1; A(27,11)=-x7; %Equação Auxiliar 9%
A(28,8)=1; A(28,13)=-x8; %Equação Auxiliar 10%
A(29,8)=1; A(29,14)=-x9; %Equação Auxiliar 11%
A(30,14)=1; A(30,16)=-x10; %Equação Auxiliar 12%
A(31,14)=1; A(31,17)=-x11; %Equação Auxiliar 13%
A(32,14)=1; A(32,18)=-x12; %Equação Auxiliar 14%
A(33,14)=1; A(33,19)=-x13; %Equação Auxiliar 15%
A(34,14)=1; A(34,20)=-x14; %Equação Auxiliar 16%

```

```

A(35,22)=1; A(35,24)=-x15; %Equação Auxiliar 17%
A(36,23)=1; A(36,20)=-x16; A(36,26)=-x16; A(36,12)=-x16; %Equação Auxiliar 18%
A(37,26)=1; A(37,19)=-x17; %Equação Auxiliar 19%
A(38,28)=1; A(38,18)=-x18; A(38,30)=-x18; %Equação Auxiliar 20%
A(39,30)=1; A(39,17)=-x19; %Equação Auxiliar 21%
A(40,32)=1; A(40,16)=-x20; A(40,34)=-x20; %Equação Auxiliar 22%
A(41,34)=1; A(41,13)=-x21; %Equação Auxiliar 23%
A(42,11)=1; A(42,12)=-x22; %Equação Auxiliar 24%
A(43,40)=1; A(43,9)=-x23; A(43,41)=-x23; %Equação Auxiliar 25%
A(44,41)=1; A(44,5)=-x24; A(44,43)=-x24; %Equação Auxiliar 26%
A(45,43)=1; A(45,4)=-x25; %Equação Auxiliar 27%
A(46,1)=1; A(46,2)=1; A(46,46)=-x26; %Equação Auxiliar 28%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Entrada do Vetor de Atribuição Externa Y%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

B=zeros(46,1);
B(1,1)=-10.053455;
B(2,1)=-0.293855;
B(3,1)=-0.274051;
B(4,1)=-0.339868;
B(5,1)=-0.002403;
B(6,1)=-0.000566;
B(7,1)=-0.001522;
B(8,1)=-0.001225;
B(9,1)=-0.001225;
B(10,1)=-0.001225;
B(11,1)=-0.001225;
B(12,1)=-0.001225;
B(13,1)=-0.009344;
B(14,1)=-0.020504;
B(15,1)=-0.056062;
B(16,1)=-0.001225;
B(17,1)=-0.001225;
B(18,1)=-0.001225;
B(19,1)=9095.199814;
B(20,1)=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtenção do Vetor correspondente as Taxas de Impacto Ambiental dos fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

T=det(A);
C=inv(A);
R=C*B;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Imprimir em arquivo de saída (.txt)a matriz de incidência e as taxas de
% impacto ambiental obtidas para os fluxos%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[n,m]=size(A);
nome=sprintf('Matriz_USC.dat');
arquivo=fopen(nome,'w');
for i=1:1:n
for k=1:1:m
fprintf(arquivo,'% .4f',A(i,k));
fprintf(arquivo,' ');
end
fprintf(arquivo,'\r\n');
end
fprintf(arquivo,'\r\n B* \r\n');
for j=1:1:n
fprintf(arquivo,'% .3f \r\n',R(j,1));
end
fclose(arquivo)

```