



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS
FUNDAMENTAIS**



GUILHERME ROSSI MÁSALA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA COM FOCO NA TURBINA
A VAPOR E NO CONDENSADOR**

**OURO PRETO - MG
2017**

GUILHERME ROSSI MÁSALA DE OLIVEIRA
guilhermemasala@gmail.com

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA COM FOCO NA TURBINA
A VAPOR E NO CONDENSADOR**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Elisangela Martins Leal, DSc.

OURO PRETO – MG
2017

O482a Oliveira, Guilherme Rossi.
Análise energética de um sistema de geração de energia de uma usina siderúrgica com foco na turbina a vapor e no condensador [manuscrito] / Guilherme Rossi Oliveira. - 2017.

60f.: il.: grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Elisangela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Siderurgia. 2. Desenvolvimento energetico. 3. Análise Energética. 4. Usinas siderurgicas - Automação. I. Leal, Elisangela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 31º dia do mês de março do ano de dois mil e dezessete às 9 horas, na sala 27, localizada na Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Guilherme Rossi Másala de Oliveira**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Profa. DSc. Maria Perpétuo Socorro Mol Pereira e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Análise Energética de um Sistema de Geração de Energia de uma Usina Siderúrgica com foco na Turbina a vapor e no Condensador**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno Aprovado com a nota/conceito 9,4.

Ouro Preto, 31 de março de 2017.

Elisângela Martins Leal

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Luis Antonio Bortolaia

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Maria Perpétuo Socorro Mol Pereira

Profa. DSc. Maria Perpétuo Socorro Mol Pereira
Professora Avaliadora

Guilherme Rossi

Guilherme Rossi Másala de Oliveira
Aluno

Dedico aos meus pais, pelo apoio incontestável, à minha avó Vera e meu irmão João Gabriel, sem vocês seria tudo mais difícil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Heloiza e Vicente, minha avó Vera e irmão João Gabriel por sempre acreditarem em meus sonhos.

À minha orientadora e amiga Elisangela pela orientação, dedicação e confiança.

À todos os professores, funcionários e colegas da UFOP que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Aos irmãos da República CP, em especial Guilherme Norton e Nicholas Abdalla, pelo apoio, por me ouvirem e motivarem sempre que precisei.

Ao grande amigo Eder pelos ensinamentos e dedicação para que este trabalho fosse concluído da melhor maneira.

Aos colaboradores da Gerdau, gerência de Utilidades, Denis e José Geraldo pelos ensinamentos.

À Nathália por me mostrar que não há barreira que não possa ser superada quando se tem um sonho, pela inspiração e motivação nos momentos mais difíceis.

“Durante toda a sua vida, estudara o Universo, mas desprezara sua mais clara mensagem: para criaturas pequenas como nós, a vastidão só é suportável através do amor.”

Carl Sagan

RESUMO

OLIVEIRA, G. R. M. Análise energética de um sistema de geração de energia de uma usina siderúrgica com foco na turbina a vapor e no condensador. 2017. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

A siderurgia apresenta fundamental importância no contexto energético do Brasil, sendo caracterizada como um dos grandes consumidores de eletricidade no país. Para ter competitividade no mercado global, uma indústria siderúrgica precisa apresentar um excelente plano estratégico. Este plano inclui um planejamento energético eficiente, buscando um melhor aproveitamento dos recursos e baixos impactos ambientais e custos operacionais. As centrais termelétricas em Ciclo Rankine das usinas siderúrgicas integradas demonstram grande potencial econômico, uma vez que fazem uso dos próprios gases residuais do processo. O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros operacionais do condensador e da turbina na potência final do Ciclo Rankine, utilizando-se de um modelo computacional criado através do *software* GatecycleTM. A pesquisa é realizada por meio de uma abordagem quantitativa, exploratória e de caráter bibliográfico. São apresentados os principais fatores que propiciam perda de geração de potência para o estudo de caso estabelecido e prediz-se quantitativamente suas influências através das simulações. Os resultados obtidos mostraram uma influência negativa (-5%) do aumento da temperatura da água de resfriamento de 15°C a 40°C utilizada no condensador na potência líquida do ciclo, assim como uma influência positiva (+20%) do aumento da temperatura de superaquecimento do vapor de 350°C a 480°C, mantendo-se a pressão constante. Foram propostos outros pares termodinâmicos para comparação do estudo de caso, verificando uma melhor configuração com o par 6 MPa e 480°C. Pôde-se também avaliar e discutir o funcionamento da unidade térmica tendo em vista o conhecimento dos equipamentos e as condições que apresentam melhor rendimento.

Palavras-chave: Siderúrgica, Sistema de Geração de Energia, Análise Energética, Modelagem Computacional, Ciclo Rankine, Turbina a Vapor, Condensador.

ABSTRACT

OLIVEIRA, G. R. M. Energy analysis of a power generation system of a steel industry focused on the steam turbine and condenser. 2017. Undergraduate Thesis. (Graduation in Mechanical Engineering). Federal University of Ouro Preto.

The steel industry is of fundamental importance in the Brazilian energy context, characterized as one of the great consumers of electricity in the country. To be competitive in the global market, a steel industry needs to present an excellent strategic plan. This plan includes efficient energy planning, seeking a better use of resources and low environmental impacts and operational costs. The Rankine cycle thermoelectric power plants of the integrated steel industry demonstrate great economic potential, as they make use of the process's own waste gases. The main objective of this work is to analyze the influence of the operational parameters of the condenser and the turbine on the final power of the Rankine cycle, using a computational model created through GatecycleTM software. The research is carried out by a quantitative, exploratory and bibliographical approach. The main factors that lead to loss of power generation for the established case study are presented and their influences are predicted quantitatively through the simulations. The results obtained showed a negative influence (-5%) of the cooling water temperature increase used in the condenser in the net cycle power, as well as a positive influence (+20%) in the increase of the vapor superheat temperature, at constant pressure. Other thermodynamic pairs were proposed for comparison with the case study, finding a better configuration using the pair 6 MPa and 480°C. It was also possible to evaluate and discuss the operation of the thermal unit in order to know the equipment and conditions that present the best performance.

Keywords: *Steel industry, Energy Generation System, Energy Analysis, Computational Modeling, Rankine Cycle, Steam Turbine, Condenser.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de Energia Elétrica no Brasil no ano de 2014.....	1
Figura 2: Equipamentos e diagrama temperatura <i>versus</i> entropia do Ciclo Rankine Ideal.....	6
Figura 3: Diagrama temperatura <i>versus</i> entropia – Afastamento do Ciclo Rankine Ideal para o Real.....	8
Figura 4: Diagrama temperatura <i>versus</i> entropia – Afastamento do Ciclo Rankine Ideal para o Real para o caso de bomba e turbina isoentrópica.....	9
Figura 5: Diagrama temperatura <i>versus</i> entropia – O efeito do superaquecimento do vapor a temperaturas mais altas no Ciclo Rankine Ideal.....	10
Figura 6: Diagrama esquemático e temperatura <i>versus</i> entropia de um Ciclo Rankine Ideal regenerativo.	11
Figura 7: Turbina de Laval: Diagramas de pressão e velocidades e esquema da disposição das palhetas.	13
Figura 8: Turbina Curtis: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.	14
Figura 9: Turbina Rateau: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.	15
Figura 10: Turbina Curtis-Rateau: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.....	16
Figura 11: Turbina Parsons: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.	17
Figura 12: Seção de uma turbina a vapor de condensação com uma extração de vapor.....	18
Figura 13: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 aberta.	20
Figura 14: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 com vista externa do lado da turbina.....	20
Figura 15: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 com vista externa do lado do gerador.	21
Figura 16: Corte transversal de um condensador.	22
Figura 17: Corte longitudinal de um condensador com indicação dos principais componentes.	23
Figura 18: Desenho técnico do condensador utilizado nas simulações da planta.	25
Figura 19: Desenho do corte BB do condensador utilizado nas simulações da planta.	26
Figura 20: Produção de aço bruto no mundo em 2005.....	28

Figura 21: Produção de aço bruto no mundo em 2015.....	29
Figura 22: Distribuição dos produtores de aço no Brasil.	30
Figura 23: Fluxograma da rotina integrada.	31
Figura 24: Fluxograma da rotina semi-integrada.	32
Figura 25: Esquema de um alto forno.	33
Figura 26: Esquema mostrando um material sendo laminado.....	35
Figura 27: Central termelétrica simplificada.	36
Figura 28: Diversidade de ícones disponíveis no <i>software</i> Gatecycle™.	38
Figura 29: Modelo de teste de uma turbina a gás.	39
Figura 30: Fluxograma das etapas para realização deste trabalho.....	43
Figura 31: Modelo incluindo a turbina a vapor e o condensador.	46
Figura 32: Relação entre temperatura da água de resfriamento, potência da turbina e pressão do condensador.	48
Figura 33: Relação entre vazão da água de resfriamento, potência da turbina e pressão do condensador.	49
Figura 34: Relação entre coeficiente global de transferência de calor, pressão no condensador e potência da turbina.....	51
Figura 35: Relação entre pressão do vapor e potência da turbina a temperatura constante.	52
Figura 36: Diagrama de Mollier para a água.	53
Figura 37: Relação entre temperatura do vapor e potência da turbina a pressão constante.	54
Figura 38: Diagrama de Mollier para a água com pares termodinâmicos destacados.	55
Figura 39: Relação entre vazão de extração e a potência da turbina.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas de projeto da turbina a vapor.	19
Tabela 2: Especificações técnicas de projeto do condensador casco e tubo.	24
Tabela 3: Descrição dos itens componentes do condensador.....	27
Tabela 4: Países que mais produzem aço bruto do mundo em 2014 e 2015.	30
Tabela 5: PCI dos gases residuais siderúrgicos.	36
Tabela 6: Capacidade instalada de algumas siderúrgicas nacionais.....	37
Tabela 7: Variáveis e indicadores.....	44
Tabela 8: Dados de operação da turbina.....	47
Tabela 9: Pares termodinâmicos e respectivas potências.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

h_1	Entalpia do fluido de trabalho antes da bomba
h_2	Entalpia do fluido de trabalho antes da caldeira
h_{2r}	Entalpia real de saída da bomba
h_{2s}	Entalpia de saída da bomba para o processo isentrópico
h_3	Entalpia do fluido de trabalho antes da turbina
h_4	Entalpia do fluido de trabalho antes do condensador
h_{4r}	Entalpia real de saída da turbina
h_{4s}	Entalpia de saída da turbina para o processo isentrópico
h_e	Entalpia de entrada
h_s	Entalpia de saída
q_e	Quantidade de calor fornecido ao fluido de trabalho
q_s	Quantidade de calor rejeitado pelo fluido de trabalho
$w_{bomba,e}$	Trabalho realizado pela bomba
w_e	Trabalho realizado sobre o fluido de trabalho
w_{liq}	Trabalho líquido da planta
w_s	Trabalho realizado pelo fluido de trabalho
$w_{turb,s}$	Trabalho realizado pela turbina
η_B	Eficiência isentrópica da bomba
η_T	Eficiência isentrópica da turbina
η_t	Eficiência térmica do ciclo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Ciclo Rankine Ideal	6
2.2	Ciclo Rankine Real	7
2.3	Eficiência do Ciclo Rankine	9
2.3.1	Superaquecimento do vapor	10
2.3.2	Ciclo Rankine Regenerativo.....	11
2.4	Turbinas a vapor	12
2.5	Condensadores.....	21
2.6	Siderurgia.....	27
2.7	Central termelétrica em uma usina siderúrgica	35
2.8	Ferramenta de simulação numérica	37
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Tipo de pesquisa	40
3.2	Materiais e métodos.....	42
3.3	Variáveis e indicadores.....	43
3.4	Instrumento de coleta de dados	44
3.5	Tabulação de dados	45
3.6	Considerações finais do capítulo	45
4	RESULTADOS	46
4.1	Variação das condições da água de resfriamento	47
4.2	Variação da condição do condensador	50
4.3	Variação das condições do vapor de entrada.....	52

4.4	Variação da extração da turbina	56
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
5.1	Conclusões.....	57
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será feita uma breve explicação a respeito da importância da indústria siderúrgica no Brasil assim como as características e os processos que envolvem a geração de energia em tais usinas. Sendo assim, apresenta-se o problema que deu origem à análise, a razão de sua importância, a justificativa para sua realização, o objetivo geral e os específicos e a estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do problema

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015a), o setor industrial corresponde à 33% do consumo total de energia elétrica no Brasil, sendo que a produção do ferro-gusa e aço é responsável por 6,2% desta fatia, ficando abaixo somente do setor de alimentos e bebidas, com 8,4%. A Figura 1 mostra os fluxos de energia no país.

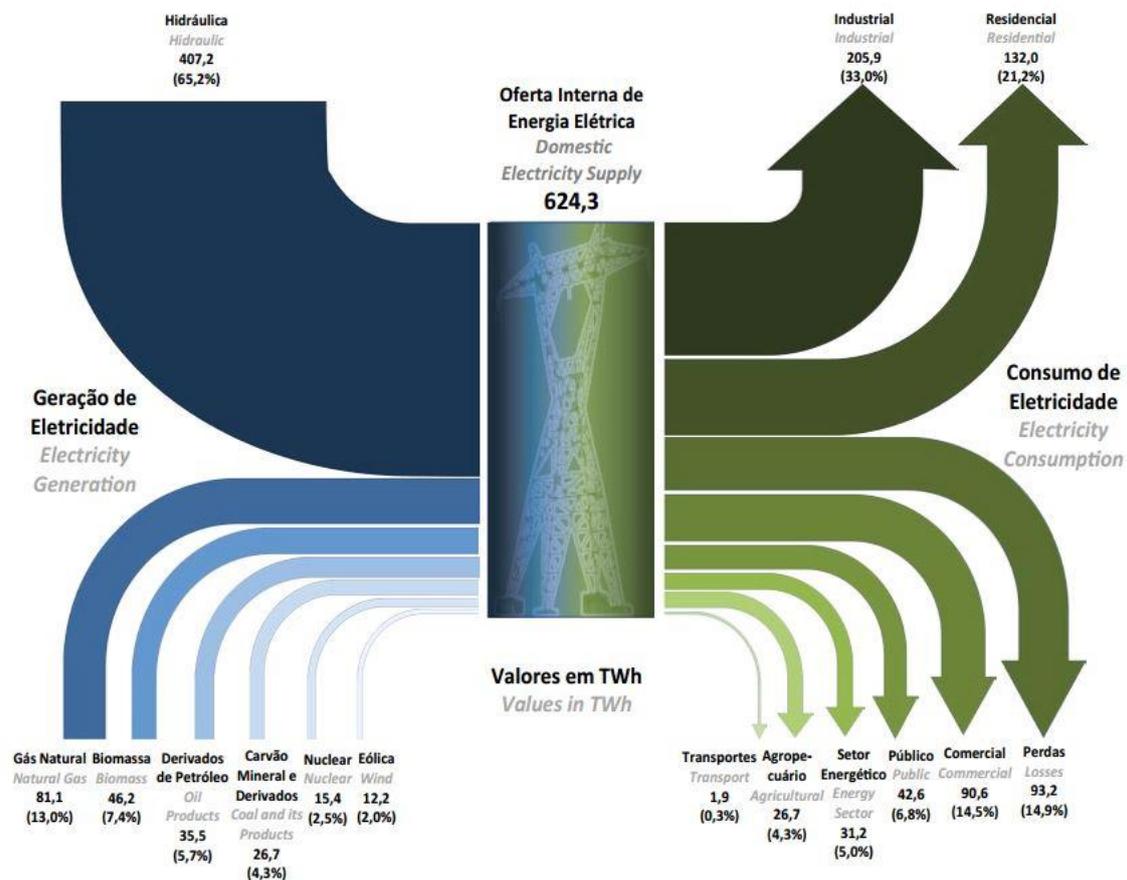


Figura 1: Fluxo de Energia Elétrica no Brasil no ano de 2014.
Fonte: EPE, 2015a.

A maior geração de energia elétrica advém das fontes hidráulicas, responsáveis por uma fatia de 65,2% da geração total. Os grandes consumidores são a indústria e o setor residencial, responsáveis por utilizar mais da metade da energia total que é gerada nacionalmente.

Sendo caracterizadas como grandes consumidoras de energia, as usinas siderúrgicas têm caráter primordial na história da indústria nacional, de tal maneira que atendem as necessidades do mercado interno e também o crescimento e desenvolvimento de outros países através das exportações.

O processo metalúrgico é nada mais que a extração de metais a partir dos minérios e sua posterior elaboração e conformação para atingir o produto final necessário ao homem. A divisão no qual ocorre a produção do aço em forma de semiacabados, laminados, trefilados e tubos sem costura, é considerada como um grupo específico na divisão de metalurgia, seção na qual estão inseridas outras atividades correlatadas. Dentro da metalurgia, a siderurgia representa os produtores independentes de ferro-gusa e de ferro-ligas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

Apesar da indústria siderúrgica nacional ter boa integração logística, abundância em ferro de ótima qualidade e poder contar com mão de obra mais barata que a concorrência global, apresenta boa competitividade apenas na porta de fábrica. Os produtos importados concorrem diretamente com a produção nacional devido à estrutura tributária e à logística de distribuição da produção interna, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (EPE, 2015b).

Para Ferraz, Kupfer e Haguenuer (1995), a competitividade é a aptidão da empresa em estabelecer e praticar táticas concorrenciais que lhes permitam expandir ou manter, de forma duradoura, uma posição sustentável no mercado. É neste âmbito que a eficiência energética tem um papel crucial. A análise de uma planta de auto geração pode indicar meios de redução de custos, objetivando um processo mais rentável e um produto final mais competitivo no mercado global.

No processo de obtenção do aço, algumas etapas geram combustíveis residuais que podem ser utilizados para geração de energia na própria planta. As centrais termelétricas instaladas em usinas siderúrgicas podem utilizar os próprios combustíveis residuais para auto geração, barateando o processo, uma vez que não é necessária a compra de combustíveis de fornecedores externos.

A busca constante por eficiências térmicas mais elevadas tem resultado em configurações interessantes correspondentes à variação dos parâmetros de produção. Um processo de geração energético eficiente pode significar economia em combustíveis e logo produtos finais mais baratos.

Uma planta termelétrica utiliza o vapor d'água como fluido de trabalho por apresentar características desejáveis como baixo custo, alta disponibilidade e alta entalpia de vaporização. O ciclo ideal das usinas de potência a vapor é o Ciclo Rankine, que consiste basicamente em quatro equipamentos: bomba, caldeira, turbina e condensador. E, além disso, deve apresentar vários equipamentos auxiliares que ajudam a aumentar a eficiência do ciclo.

Uma imagem negativa é formada acerca do setor siderúrgico por se relacionar a grande demanda de matérias primas não renováveis e aos impactos ambientais encadeados pelo processo de obtenção do aço.

Diante deste cenário, manter a competitividade e apresentar um comprometimento socioambiental perante à sociedade têm função primordial. É necessário minimizar as perdas e maximizar o aproveitamento de matérias primas e de energia em todas as etapas do processo.

Para atender ao proposto acima, faz-se necessário o conhecimento específico em cima de cada etapa e equipamento constituinte do processo siderúrgico, permitindo que o mesmo sirva como ferramenta de avaliação do próprio processo em questão. Pois se é conhecido o comportamento de cada etapa diante de todas as variações de parâmetros, pode-se tirar relevantes conclusões, sendo que em alguns casos é possível detectar a deterioração do equipamento ou processo, antecipando uma intervenção no mesmo diante de um colapso operacional, e noutros casos permite também analisar e controlar se a eficiência em si está em valores pretendidos e quais são os melhores pontos de operação.

De acordo com o exposto, tem-se a seguinte problemática:

Como comporta uma turbina a vapor e um condensador diante das oscilações de cenários impostos pela rotina de uma usina siderúrgica integrada?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento industrial acarretou muitos benefícios às sociedades, no entanto, com alguns efeitos colaterais. A poluição ambiental trouxe consequências como chuva ácida, aquecimento global e ainda problemas de saúde.

Dos gases do efeito estufa, o que apresenta maior relevância para a indústria do aço é dióxido de carbono (CO₂). Cerca de 1,9 toneladas de CO₂ são emitidas por tonelada de aço produzido e por volta de 4-5% da emissão mundial de CO₂ são conferidos a este setor. Governantes do mundo todo tomam medidas buscando frear o aquecimento global. Neste

panorama, a indústria siderúrgica se encontra altamente inclinada às reduções energéticas e emissivas de CO₂ (PORZIO et al., 2013).

Em uma planta térmica que utiliza os próprios gases de processo para geração de energia elétrica, uma eficiência energética elevada está atrelada a um gasto reduzido de combustíveis, um menor impacto sobre o meio ambiente e conseqüentemente custos reduzidos em relação à demanda energética do processo siderúrgico.

No que se refere aos países emergentes, como o Brasil, existe um elevado interesse em aumentar a eficiência energética deste ramo industrial e conduzir os custos para baixo com intuito de não ficar para trás dos competidores globais (SHAABAN et al., 2011).

É certo que determinadas perdas nos processos podem ser evitadas. Contudo, deve-se analisar a viabilidade de ações tanto técnica quanto econômica dos investimentos em melhoria, uma vez que o retorno pode acontecer através da própria economia gerada. Assim sendo, o consumo específico do produto final ou dos processos é menor, gerando um melhor aproveitamento dos recursos naturais com menores impactos ambientais e custos operacionais. Sob esta ótica, a escolha deste tema obtém fundamental relevância, uma vez justificada sua utilidade em três âmbitos: pesquisador, pesquisado e sociedade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar tecnicamente o comportamento de uma turbina a vapor e um condensador inseridos no contexto de uma central termelétrica em uma usina siderúrgica integrada.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica a respeito do Ciclo Rankine, turbinas a vapor, condensadores, processo siderúrgico e o *software* Gatecycle™;
- Identificar os parâmetros de operação da central termelétrica selecionada para o estudo de caso;
- Prever o comportamento da turbina a vapor e do condensador fora das condições normais de operação mediante alteração de parâmetros atrelados à rotina da usina siderúrgica em questão;

- Encontrar equações que descrevam o comportamento dos parâmetros de operação;
- Permitir sugerir melhorias, adequações e pontos de operação visando a melhoria da eficiência energética do processo;
- Realizar sugestões de trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho será dividido em cinco capítulos e apresenta-se segundo a estrutura a seguir:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito de uma planta termelétrica, introduzindo seu ciclo, tratando dos seus principais elementos componentes e introduzindo os conceitos de análise energética. Além disso fala da siderurgia e da ferramenta de simulação computacional utilizada.

Posteriormente, o terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados, partes essenciais na obtenção dos resultados.

As discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados são relatados no quarto capítulo. Além disso, são propostos pontos de operação para o aumento da eficiência do sistema de geração.

E finalmente, o quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo aborda-se o embasamento teórico através de conceitos e formulação analítica da planta de potência a vapor proposta, então apresenta-se os equipamentos principais constituintes do ciclo estudado e forma-se uma base fundamentada sobre o tema proposto. Trata-se também da siderurgia como um todo e das centrais termelétricas inseridas neste contexto. Ao final aborda-se a ferramenta computacional escolhida para realizar as simulações dos cenários.

2.1 Ciclo Rankine Ideal

O ciclo de vapor mais simples é conhecido como Ciclo Rankine Ideal, onde as perdas em cada um dos quatro componentes são desconsideradas. Ele não envolve nenhuma irreversibilidade interna e consiste nos quatro processos explicados a seguir e mostrados na Figura 2.

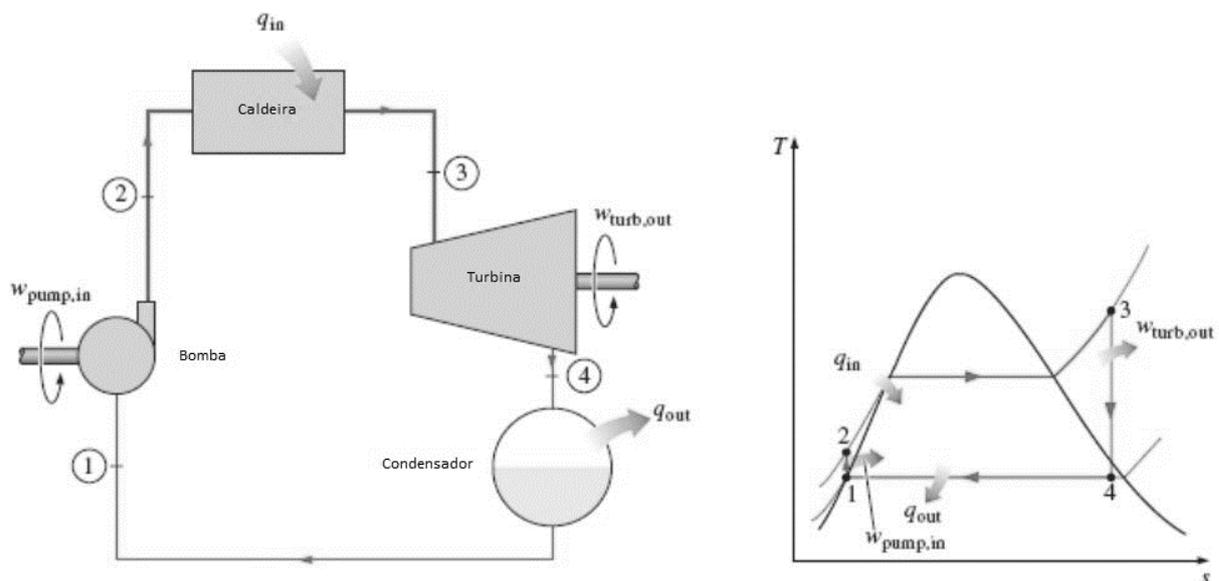


Figura 2: Equipamentos e diagrama temperatura *versus* entropia do Ciclo Rankine Ideal.
Fonte: Çengel, 2006.

A Figura 2 mostra os seguintes processos, considerando o Ciclo Rankine Ideal:

- 1-2: Compressão isentrópica em uma bomba;
- 2-3: Fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira;
- 3-4: Expansão isentrópica em uma turbina;

4-1: Rejeição de calor a pressão constante em um condensador.

A bomba faz com que a água passe de líquido saturado (estado 1) para líquido comprimido à pressão de entrada da caldeira (estado 2). Ao entrar na caldeira, o fluido de trabalho está como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido (estado 3). O vapor superaquecido entra na turbina, onde se expande e produz trabalho de eixo. Este processo se realiza isentropicamente. O fluido de trabalho deixa a turbina (estado 4) e vai para o condensador, onde ocorre sua total condensação. Desta forma, o fluido de trabalho deixa o condensador como líquido saturado (estado 1), e o ciclo se completa com o fluido de trabalho retornando à bomba.

Devido às variações de energia cinética e potencial serem mínimas, elas são geralmente desprezadas. Sendo assim, a equação de energia aplicada a um dispositivo de escoamento em regime permanente, por unidade de vapor, se reduz a (ÇENGEL, 2006):

$$(q_e - q_s) + (w_e - w_s) = h_s - h_e \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1)$$

Tem-se que nenhum trabalho é realizado pela caldeira e o condensador, e considera-se que a bomba e a turbina sejam isentrópicas. Deste modo, a equação de energia aplicada aos dispositivos é expressa como:

$$\text{Bomba } (q = 0): w_{bomba,e} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$\text{Caldeira } (w = 0): q_e = h_3 - h_2 \quad (3)$$

$$\text{Turbina } (q = 0): w_{turb,s} = h_3 - h_4 \quad (4)$$

$$\text{Condensador } (w = 0): q_s = h_4 - h_1 \quad (5)$$

A eficiência térmica do ciclo é dada por:

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e} \quad (6)$$

Sendo:

$$w_{liq} = q_e - q_s = w_{turb,s} - w_{bomba,e} \quad (7)$$

2.2 Ciclo Rankine Real

Quando se considera as irreversibilidades dos equipamentos, tem-se um afastamento do ciclo real em relação ao ciclo ideal. De acordo com Borgnakke e Sonntag (2009), as perdas na turbina têm o maior impacto neste afastamento, devido ao trabalho da turbina ser o principal valor no numerador da expressão para o cálculo do rendimento térmico do ciclo. As perdas

associadas ao escoamento do fluido na bomba são parecidas com as da turbina, contudo muito menores. Nas tubulações ocorre queda de pressão, provocada pelo atrito e a transferência de calor ao ambiente. Analogamente, ocorre na caldeira uma queda de pressão, sendo necessário um trabalho adicional para elevar a água a uma pressão mais elevada que a pressão desejada.

A Figura 3 compara o ciclo real com o ideal considerando a irreversibilidade de vários componentes.

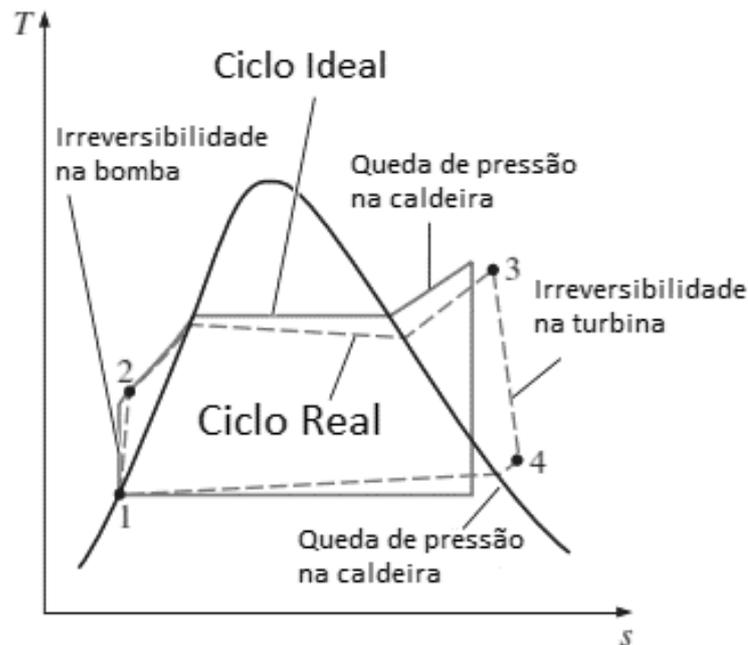


Figura 3: Diagrama temperatura *versus* entropia – Afastamento do Ciclo Rankine Ideal para o Real.
Fonte: Çengel, 2006.

As irreversibilidades como o atrito do fluido e a perda de calor para a vizinhança fazem com que aconteça queda de pressão na caldeira, no condensador e nas tubulações entre os elementos do sistema. Como indicado na Figura 3, a pressão indicada na entrada da turbina é mais baixa do que aquela de saída da caldeira (estado 2 a 3). A queda de pressão no condensador em geral é pequena, mas deve ser levada em consideração (estado 4 a 1).

Portanto, devido às irreversibilidades, a bomba consome mais trabalho e a turbina produz menos trabalho, sendo o desvio calculado utilizando-se as eficiências isentrópicas definidas como (ÇENGEL, 2006):

$$\eta_B = \frac{w_s}{w_r} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad (8)$$

e

$$\eta_T = \frac{w_r}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4r}}{h_3 - h_{4s}} \quad (9)$$

Sendo: 2r e 4r os estados de saída reais da bomba e da turbina, respectivamente, e 2s e 4s os estados correspondentes para o caso isentrópico, conforme Figura 4.

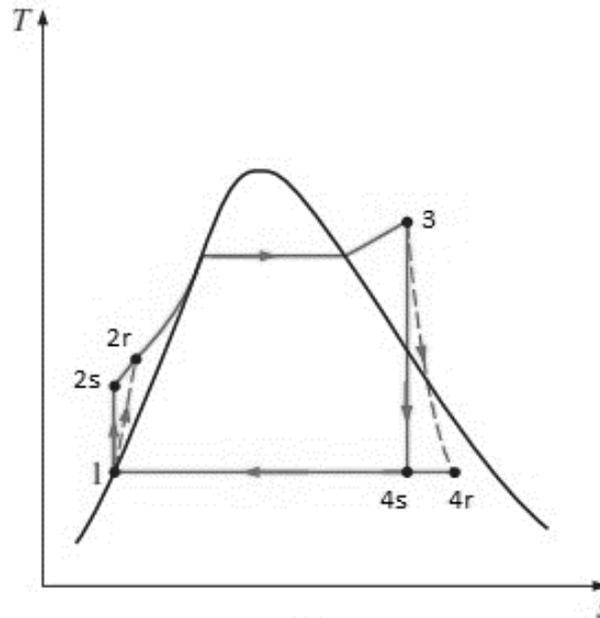


Figura 4: Diagrama temperatura *versus* entropia – Afastamento do Ciclo Rankine Ideal para o Real para o caso de bomba e turbina isoentrópica.

Fonte: Çengel, 2006.

A Figura 4 indica o diagrama de afastamento do ciclo real para o ideal mostrando as irreversibilidades que ocorrem apenas na bomba e na turbina. Os estados 2r e 4r estão afastados à direita dos estados 2s e 4s indicando que a entropia aumenta no processo real devido suas irreversibilidades.

2.3 Eficiência do Ciclo Rankine

Um ciclo a vapor tem sua eficiência aumentada quando a pressão e a temperatura do vapor na saída da caldeira aumentam e a pressão no condensador diminui. Contudo, o aumento da pressão na caldeira ou a diminuição da pressão no condensador devem resultar na redução na qualidade do vapor na saída da turbina.

De acordo com Moran e Shapiro (2006), se a qualidade da mistura que passa através da turbina se torna muito baixa, com título menor que 90%, a umidade pode causar erosão nas pás

da turbina e conseqüentemente há redução na eficiência da turbina e uma necessidade maior de manutenção.

2.3.1 Superaquecimento do vapor

Um trocador de calor chamado superaquecedor é responsável por adicionar energia ao vapor que entra na turbina, tornando-o superaquecido. Este efeito sobre o desempenho dos ciclos de potência a vapor é mostrado na Figura 5.

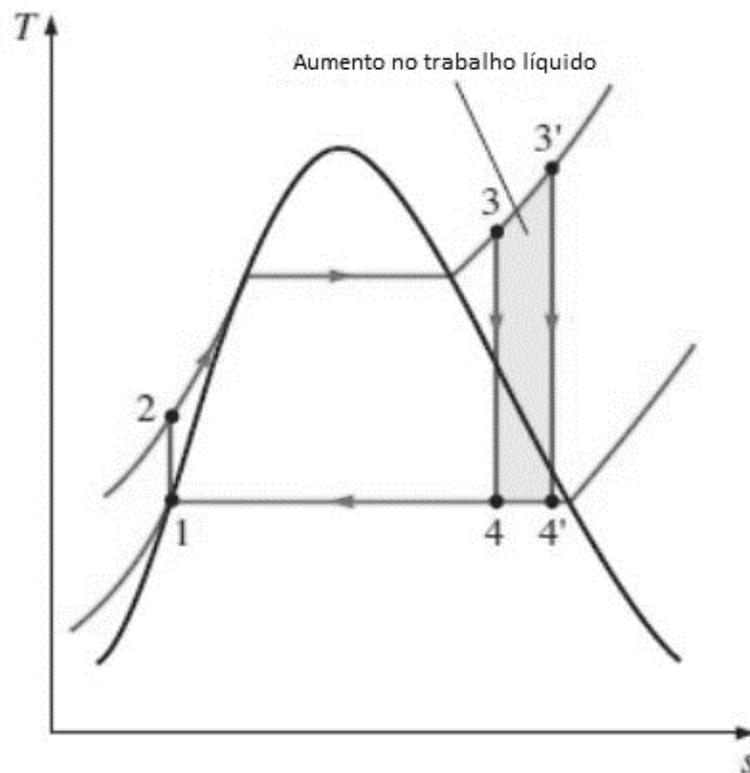


Figura 5: Diagrama temperatura *versus* entropia – O efeito do superaquecimento do vapor a temperaturas mais altas no Ciclo Rankine Ideal.

Fonte: Çengel, 2006.

Na Figura 5, a área escura do diagrama representa o aumento do trabalho líquido e a área sob a curva do processo 3-3' representa o aumento do fornecimento de calor. O ciclo com superaquecedor tem uma temperatura média de fornecimento de calor maior que o sem superaquecedor, portanto uma eficiência maior. O estado de exaustão da turbina melhora, uma vez que o vapor apresenta menor umidade.

2.3.2 Ciclo Rankine Regenerativo

A condição de aumento da eficiência do ciclo através do aquecimento da água de alimentação pode ser alcançada por uma modificação do Ciclo Rankine que incorpora aquecedores para a elevação da temperatura do líquido que sai da bomba antes que ele entre na caldeira, conforme mostra a Figura 6. De forma prática, a regeneração é realizada pela extração do vapor da turbina, uma vez que esse vapor, em vez de realizar mais trabalho caso completasse a expansão dentro da turbina, é usado para aquecer a água de alimentação. O dispositivo utilizado para a troca térmica é chamado de aquecedor de água de alimentação, e pode ser do tipo aberto (mistura de dois estados de fluido) ou fechados (sem mistura dos fluidos).

A regeneração não apenas melhora a eficiência do ciclo, mas também oferece um meio conveniente de desaerar a água de alimentação (remover o ar que se infiltra no condensador) para evitar corrosão da caldeira. Ela também ajuda a reduzir a grande vazão volumétrica de vapor nos últimos estágios da turbina (devido aos altos volumes específicos a baixas pressões). Assim, a regeneração tem sido usada em todas as usinas a vapor modernas desde sua introdução no início dos anos 1920 (ÇENGEL, 2006, p. 460).

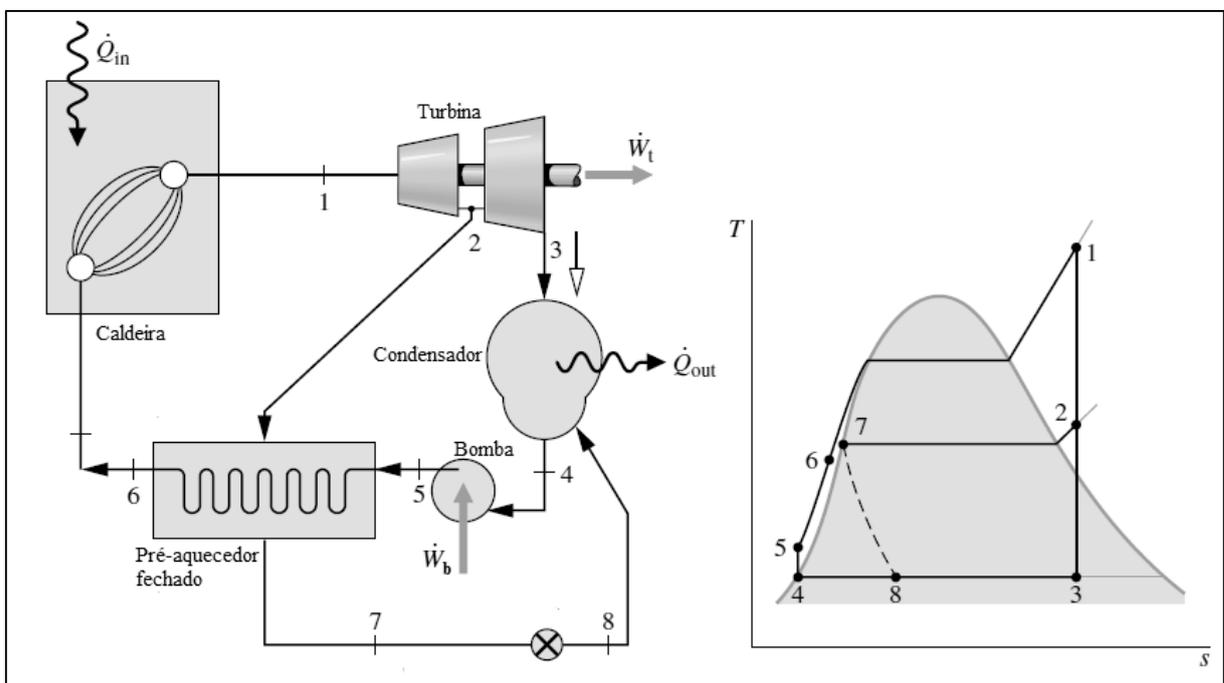


Figura 6: Diagrama esquemático e temperatura *versus* entropia de um Ciclo Rankine Ideal regenerativo. Fonte: Moran e Shapiro, 2006.

A Figura 6 mostra o diagrama esquemático e o diagrama temperatura-entropia de um Ciclo Rankine Ideal Regenerativo. Este ciclo possui um pré-aquecedor da água de alimentação fechado.

2.4 Turbinas a vapor

O fato das turbinas a vapor serem máquinas de combustão externa caracteriza uma grande vantagem, uma vez que o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza a conversão da energia do combustível em potência de eixo não entra em contato com os gases resultantes da queima do combustível.

Outra vantagem que deve ser considerada é o fato de que, calor com parâmetros definidos pode ser propiciado pelas extrações e, sendo assim, o vapor com alto conteúdo energético entrega trabalho na turbina antes de ser fornecido a um consumidor de calor.

De acordo com Lora e Nascimento (2004), as turbinas podem ser classificadas segundo sua finalidade, sendo para acionamento elétrico ou mecânico. A primeira é utilizada para acionar gerador elétrico e normalmente opera com velocidade síncrona (1800 ou 3600 rpm) e com potência entre 16 a 1300 MW. Já a segunda é utilizada para acionar bombas, compressores, ventiladores e outros equipamentos rotativos. Normalmente opera entre 900 e 10000 rpm e com potências entre 500 kW a 10MW.

Quanto ao princípio de funcionamento, verifica-se duas classificações de acordo com o tipo de conversão de energia térmica do vapor em trabalho útil. Nas turbinas de ação (ou impulso) o funcionamento ocorre devido à queda de pressão do vapor nos bocais, resultando em queda de entalpia e temperatura, e conseqüentemente aumento da energia cinética do vapor que é transformado em trabalho mecânico ao incidir sobre as palhetas. As palhetas são atravessadas por vapor a pressão constante. As turbinas de reação fazem uso simultâneo da pressão do vapor e a sua expansão no rotor. O vapor não se expande completamente nos bocais, de forma que continua a sofrer redução de pressão à medida que sua velocidade também diminui devido à alta velocidade com que estas palhetas móveis se movimentam. Assim, parte da energia vem da transformação de energia térmica em energia cinética efetuada pelo bocal e a outra parte é transformada no próprio rotor. O rotor trabalha com vapor à pressão variável, diminuindo de montante a jusante.

As turbinas de ação são classificadas de acordo com o arranjo dos estágios, sendo eles apresentados abaixo.

A turbina de ação simples ou de Laval é constituída de um ou mais bocais fixos, tendo uma série de palhetas conectadas ao eixo e montadas em um disco periférico, formando o rotor, conforme a Figura 7.

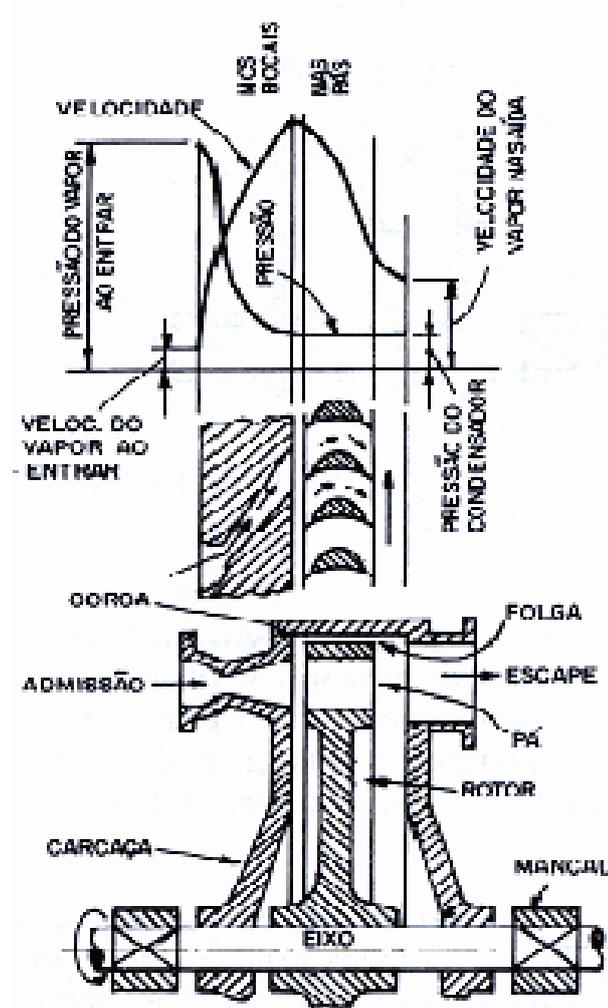


Figura 7: Turbina de Laval: Diagramas de pressão e velocidades e esquema da disposição das palhetas.
Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

O bocal é responsável por efetuar toda a expansão do vapor, gerando um fluxo de alta velocidade. A turbina não é capaz de absorver toda a energia cinética do fluxo pelas palhetas móveis, de forma que o vapor sairá com elevada velocidade e causará um baixo rendimento, portanto, são indicadas para pequenas potências.

A turbina Curtis segue o mesmo princípio da de Laval, contudo, ao buscar reduzir a perda de energia decorrente da alta velocidade residual, duas ou mais filas de palhetas móveis são montadas. O estágio de velocidade escalonada também conta com palhetas fixas intercaladas com as palhetas móveis montadas na carcaça da turbina para redirecionar o jato de vapor, conforme a Figura 8.

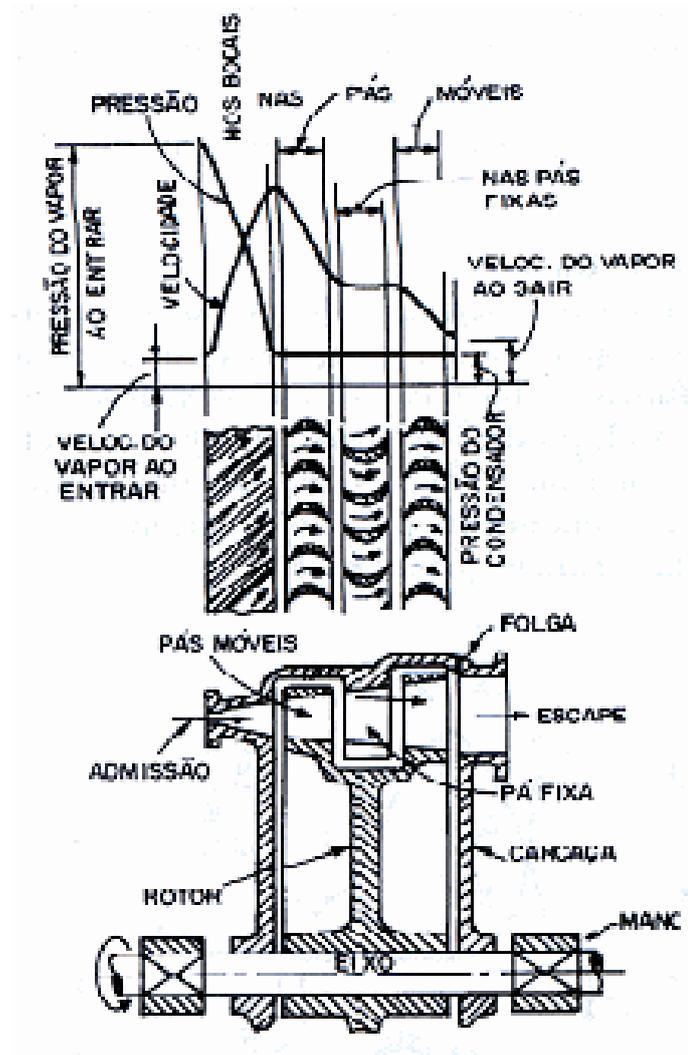


Figura 8: Turbina Curtis: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.
Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

Verifica-se que há uma queda abrupta de pressão nos bocais e a velocidade mantém-se nas palhetas fixas e reduz-se nas palhetas móveis.

A turbina Rateau caracteriza-se pela semelhança com duas ou mais turbinas Laval em série, sendo que a queda de pressão que ocorreria em um único conjunto de bocais é dividida em duas ou mais fileiras de bocais, conforme a Figura 9.

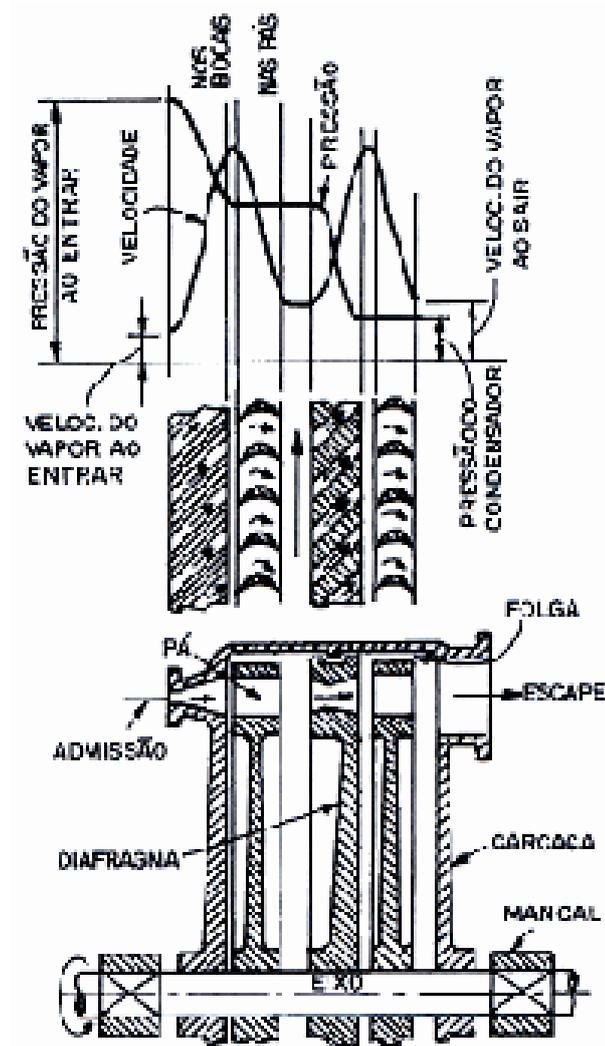


Figura 9: Turbina Rateau: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.
Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

Na turbina Rateau a pressão é escalonada e seu benefício é que se obtém uma velocidade apropriada de palhetas no âmbito de resistência dos materiais. A pressão reduz-se nos bocais e mantém-se nas palhetas e a velocidade aumenta-se nos bocais e mantém-se nas palhetas.

A turbina Curtis-Rateau toma como princípio adquirir velocidades de palhetas apropriadas e conseqüentemente maiores rendimentos. Para isso há um arranjo agregando estágios Curtis (escalonamento de velocidade) e Rateau (escalonamento de pressão), conforme a Figura 10.

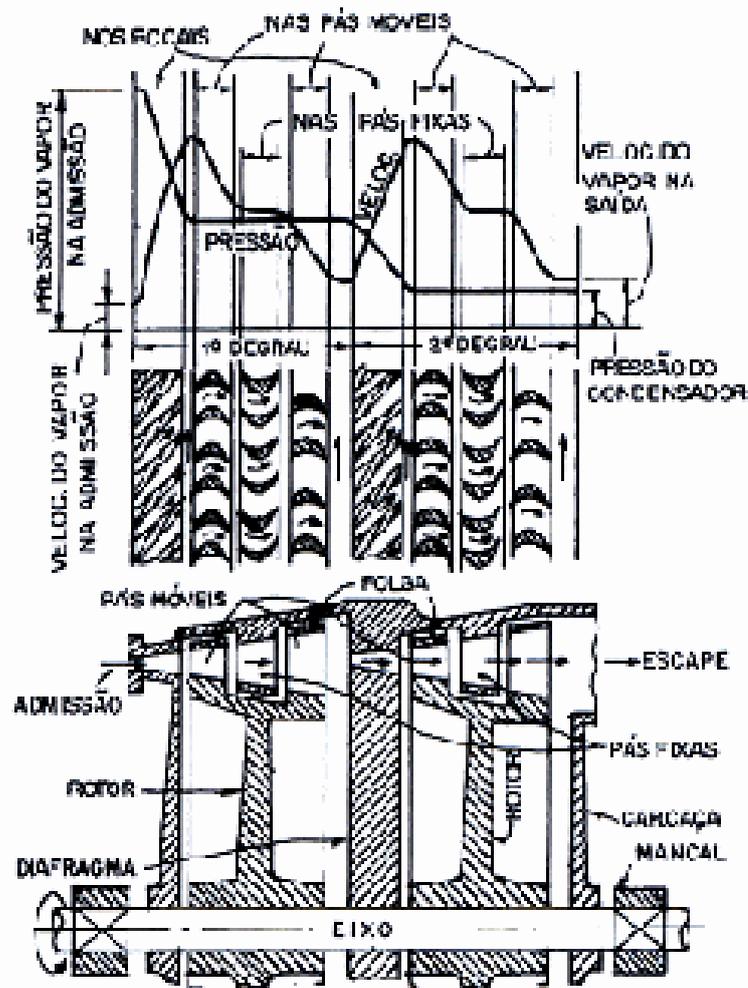


Figura 10: Turbina Curtis-Rateau: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas. Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

Ocorre grande queda de pressão e temperatura do vapor devido à presença de estágios Curtis, de forma que o emprego de materiais mais leves e baratos são indicados nos estágios Rateau posteriores. A pressão reduz-se somente nos bocais. A velocidade mantém-se nas palhetas fixas e reduz-se nas palhetas móveis.

As turbinas de reação são de múltiplos estágios que são divididas por quedas fracionárias nas fileiras de palhetas fixas e móveis, buscando uma queda contínua de pressão entre a admissão e o escape, de acordo com a Figura 11.

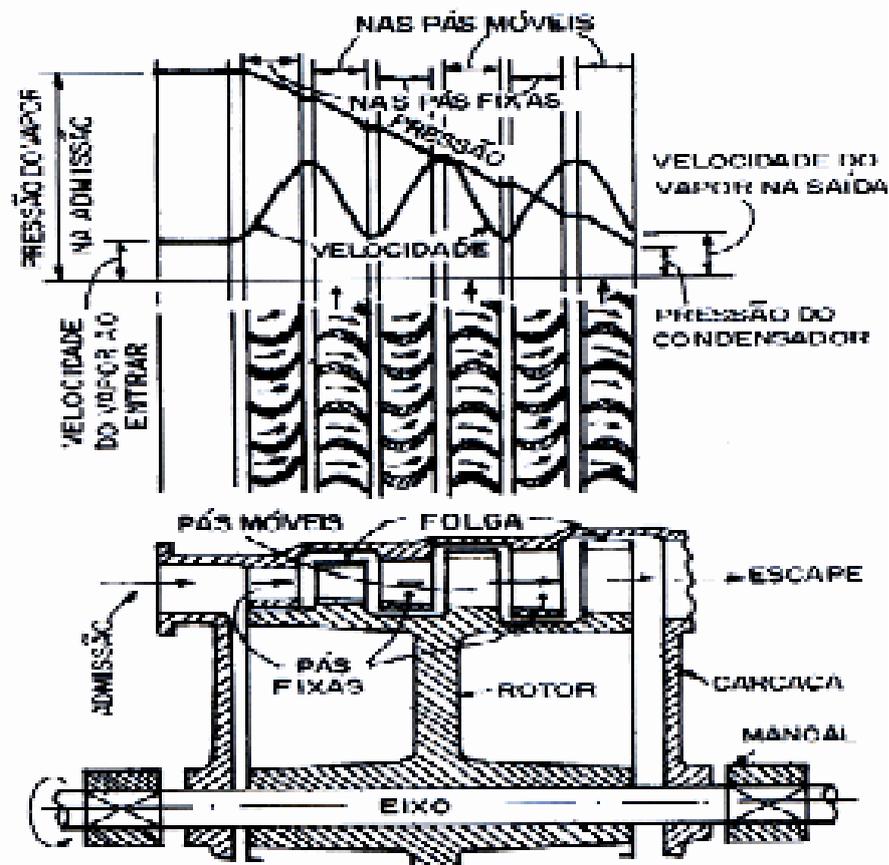


Figura 11: Turbina Parsons: Diagramas de pressão e velocidade e esquema da disposição das palhetas.
Fonte: Lora e Nascimento, 2004.

As fileiras sucessivas de palhetas devem apresentar aumento contínuo em seus tamanhos pelo fato da expansão do vapor ser acompanhada do aumento de seu volume específico.

As turbinas são subdivididas quanto à descarga do vapor, sendo as principais descritas abaixo.

A turbina de contrapressão de fluxo direto é caracterizada pelo vapor na saída da turbina se apresentar a pressão igual ou superior à atmosférica. A de contrapressão com sangria fornece parte do fluxo de vapor para um consumidor externo, uma vez que o volume de vapor de extração é menor que o de escape. Já a de contrapressão com extração controlada é similar à com sangria, contudo, é utilizada quando o fluxo de vapor de extração é consideravelmente elevado se comparado com o de escape e tem-se variação na demanda no vapor extraído.

A turbina de condensação e fluxo direto se diferencia das anteriores, sendo que o vapor de escape é direcionado para o condensador e se encontra a uma pressão menor que a atmosférica, ou seja, em vácuo. A turbina de condensação com extração apresenta condensador onde ocorre o escape do vapor na condição de vácuo, e há a possibilidade de extrair vapor em quantidades variáveis sob pressão constante.

Na Figura 12 mostra-se a seção de uma turbina a vapor de condensação com uma saída para extração de vapor.

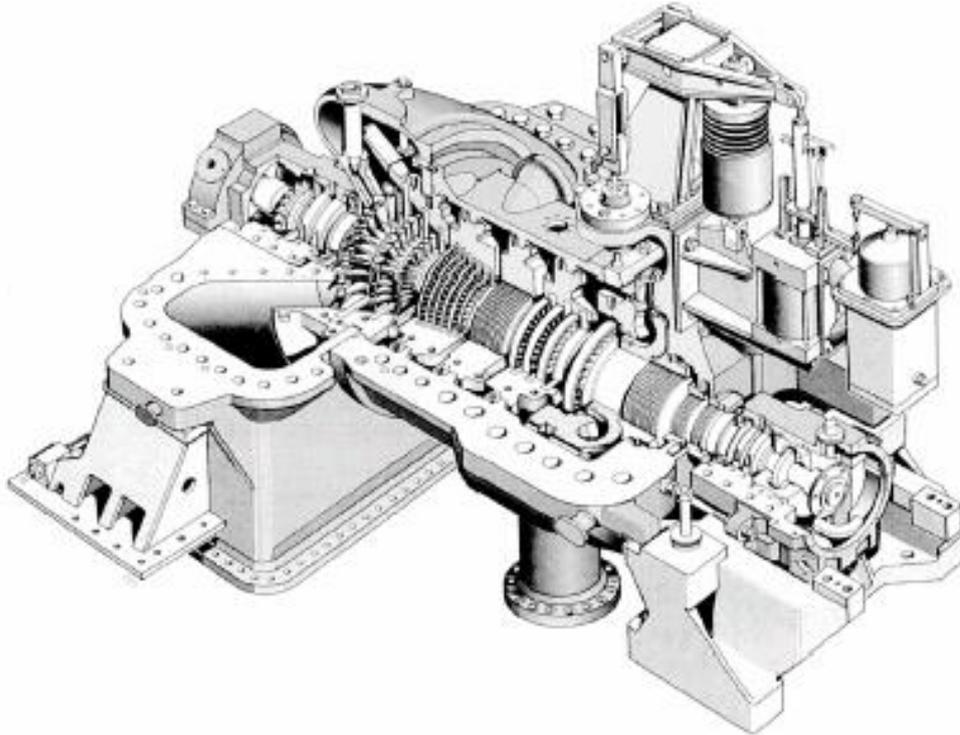


Figura 12: Seção de uma turbina a vapor de condensação com uma extração de vapor.
Fonte: Díez, 2017.

Há ainda a turbina de condensação com reaquecimento, sendo que o vapor entrega trabalho no estágio de alta pressão e retorna à caldeira para reaquecimento, retornando posteriormente ao estágio de menor pressão.

A grande maioria das turbinas apresenta fluxo axial, com fluxo através das palhetas e paralelo ao eixo, entretanto, existem as de fluxo radial, sendo o fluxo na direção radial ao eixo.

As turbinas axiais são subdivididas entre as de fluxo simples, com escoamento na mesma direção desde a admissão até o escape, as de fluxo duplo, quando o fluxo é admitido no centro do cilindro e dividido em duas direções opostas e por último as de fluxo reverso, tendo a turbina duas carcaças concêntricas e de tamanhos diferentes, de modo que o fluxo escoe em uma direção pela carcaça menor e retorne na outra direção pela carcaça externa.

A turbina a vapor adotada para este trabalho é da marca Mitsubishi, modelo 7EL-7, funcionamento por ação (impulso), do tipo extração e condensação com cilindro simples de sete estágios Rateau, sendo três de alta pressão e quatro de baixa pressão, com fluxo simples e caixa de redução. As especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações técnicas de projeto da turbina a vapor.

Turbina a vapor Mitsubishi 7EL-7		
Potência	15	MW
Pressão do vapor de admissão	5,9	MPa
Temperatura do vapor de admissão	480	°C
Pressão de extração	1,25	MPa
Pressão de exaustão (condensador)	0,015	MPa
Fluxo máximo de vapor de admissão	120	ton/h
Fluxo máximo de vapor de extração	90	ton/h
Fluxo máximo de vapor de exaustão	45	ton/h
Velocidade da turbina	7108	rpm
Velocidade do gerador	3600	rpm

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Os dados da tabela acima são utilizados na fase de criação de um modelo para a simulação. Este modelo será utilizado para análise técnica dos equipamentos do Ciclo Rankine que estão dispostos na empresa. A Figura 13 apresenta uma foto da turbina a vapor em questão aberta.

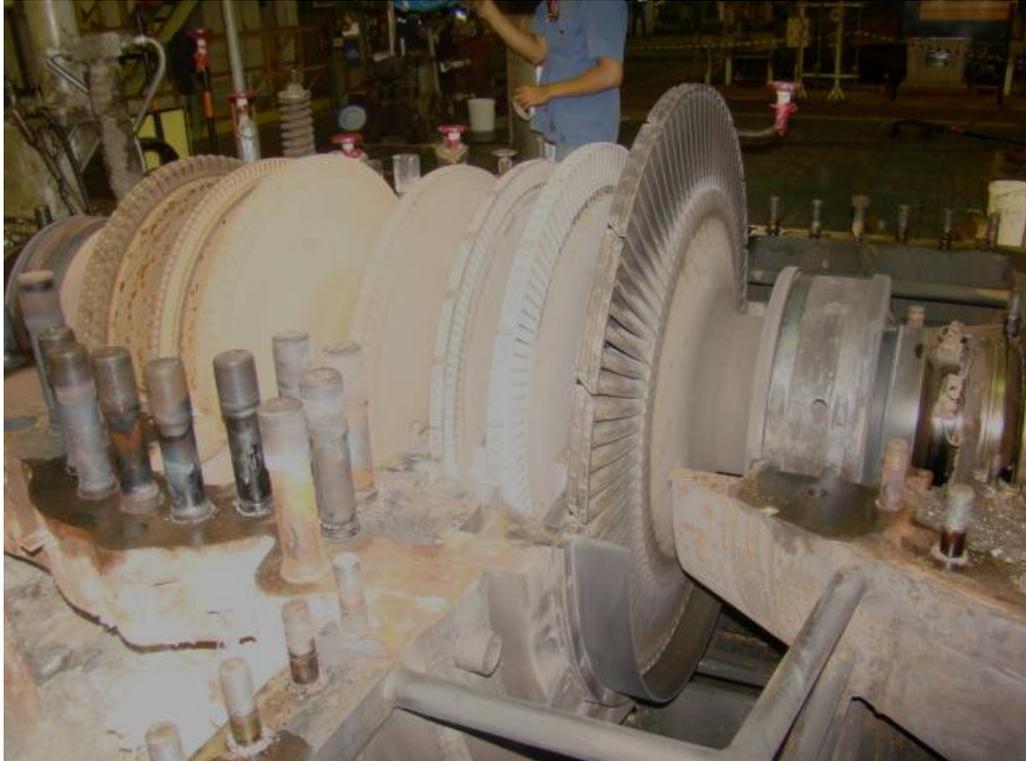


Figura 13: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 aberta.
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Pode-se visualizar a turbina a vapor analisada, sendo possível a identificação dos seus estágios. Já a Figura 14 mostra externamente a turbina a vapor adotada para o estudo.



Figura 14: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 com vista externa do lado da turbina.
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Pela Figura 14 pode-se identificar o governador da turbina onde ocorre a admissão de vapor. A Figura 15 mostra uma visão externa da turbina do lado contrário à anterior.



Figura 15: Foto da turbina a vapor Mitsubishi modelo 7EL-7 com vista externa do lado do gerador.

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Identifica-se a carcaça do gerador que é acoplado à turbina a vapor para geração de energia elétrica e de seu mancal do lado não acoplado.

2.5 Condensadores

Os condensadores são considerados equipamentos auxiliares das centrais termelétricas, mas, apesar do que a função indica, têm primordial papel no funcionamento de uma planta.

O vapor de exaustão da turbina é encaminhado para o condensador onde ocorre sua condensação ao entrar em contato com a superfície dos tubos, os quais são refrigerados pela água que circula pelo interior dos mesmos. O vácuo no condensador é efeito da mudança repentina do volume específico do vapor durante a condensação.

Sua função principal é a manutenção do vácuo na saída da turbina, podendo interferir drasticamente na geração se não for capaz de manter um valor adequado. A diminuição da pressão do vapor de exaustão da turbina causa uma redução da temperatura de condensação, ou

seja, da temperatura de rejeição de calor ao ambiente. Consequentemente, aumenta-se o salto térmico disponível na turbina e o rendimento do ciclo.

De acordo com Kern (1980), pelo fato de trabalhar em vácuo, ocorre a penetração de gases não condensáveis no condensador. Isso faz com a transferência de calor seja prejudicada, a pressão aumente e consequentemente a sua eficiência seja reduzida.

Ainda, segundo Lora e Nascimento (2004), a temperatura e a pressão do vapor e a sua pressão no condensador dependem da temperatura e da vazão da água de resfriamento.

Deve-se ter uma atenção especial para que o vácuo não seja quebrado. O ejetor de vapor é responsável por remover esses gases incondensáveis e manter o nível de vácuo para uma boa operação da turbina. Os condensadores têm colaborado consideravelmente na evolução das turbinas a vapor.

A Figura 16 mostra um condensador de superfície de dois passes em corte.

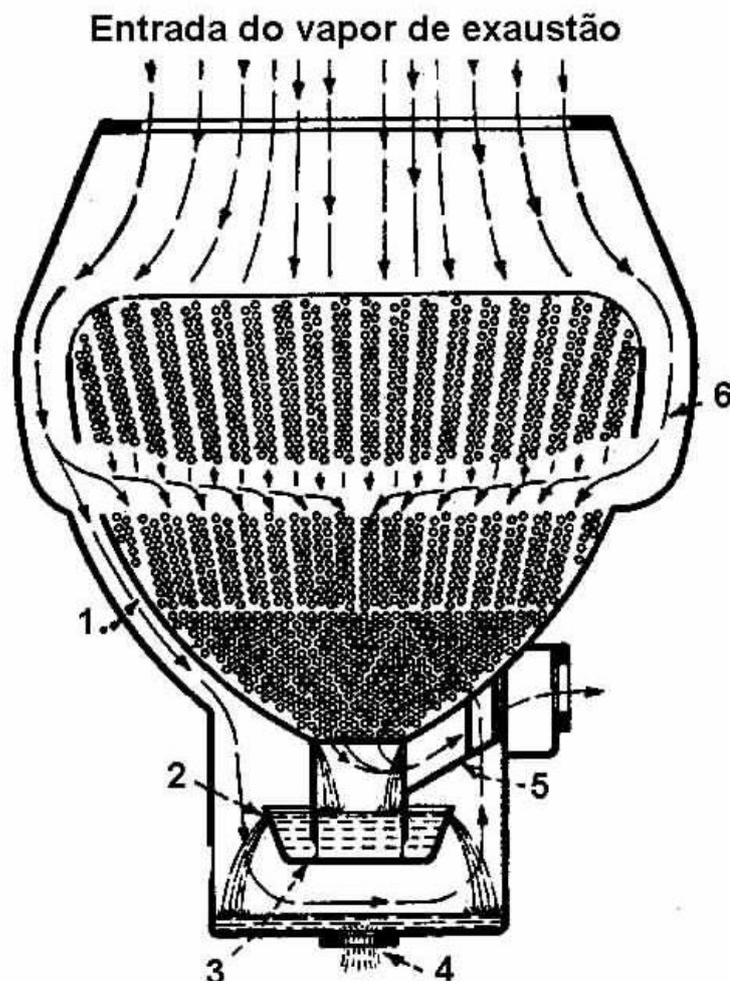


Figura 16: Corte transversal de um condensador.
Fonte: Gaffert, 1964.

Conforme observado na Figura 16, a área de passo reduz à medida que o volume também reduz. O item 1 indica a passagem do vapor para reaquecimento do condensado, o 2 representa os orifícios para formar uma cascata uniforme de condensando através do vapor de reaquecimento, o 3 mostra a bacia coletora de condensado, o 4 a saída do condensado, o 5 são os tubos de ventilação do poço de condensado e o 6 a passagem direta do vapor ao grupo inferior de tubos. Segundo Gaffert (1964), a disposição que os tubos se apresentam são grandes influenciadores no rendimento da máquina.

A Figura 17 mostra um corte através de um condensador de superfície de dois passes.

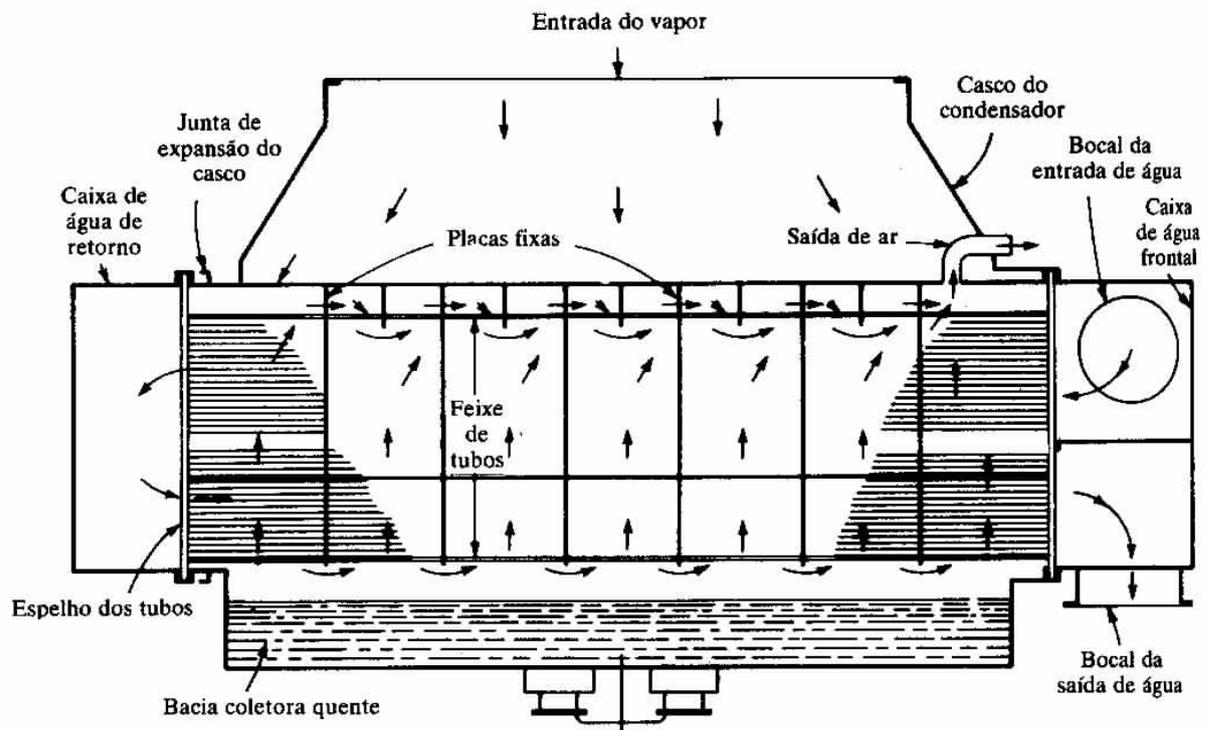


Figura 17: Corte longitudinal de um condensador com indicação dos principais componentes.
Fonte: Gaffert, 1964.

É constituído principalmente de uma carcaça, caixas de água, porta de entrada de vapor de exaustão da turbina, saídas para remoção do ar pelo lado da carcaça e um poço quente equipado com saídas de ar e de condensado.

De acordo comm Gaffert (1964), a construção de condensadores deve seguir alguns princípios básicos:

- 1- Deixar espaço livre ao vapor para que se forme uma manta de vapor ao redor dos tubos mais eficazes;

- 2- Procurar passos livres ao vapor para facilitar a chegada deste ao centro do condensador;
- 3- Conseguir a maior carga por unidade de superfície;
- 4- Empregar a ventilação e o reaquecimento no poço de condensado.

O condensador adotado para este estudo é classificado como de superfície, do tipo casco e tubo, tendo vapor de exaustão da turbina no lado do casco e água de resfriamento das torres de resfriamento no lado dos tubos. Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas de projeto do condensador casco e tubo.

Características do condensador				
---	Casco	Unidade	Tubo	Unidade
Fluido	Vapor		Água da torre de resfriamento	
Fluxo	45	ton/h	2200	m ³ /h
Temperatura de entrada	53,5	°C	35	°C
Temperatura de saída	53,5	°C	44,2	°C
Pressão de entrada	14,71	kPa	392,27	kPa
Superfície de resfriamento	520	m ²	---	---
Tubos de resfriamento	2832	peças	---	--
Número de passes	1	passe	2	passes
Coefficiente global de transferência de calor			2559	J/s-m ² K
Fator de incrustação	---	---	85	%

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Os dados da tabela acima são utilizados na fase de criação de um modelo para a simulação. A Figura 18 representa o desenho técnico do condensador, identificando-se uma vista externa do equipamento.

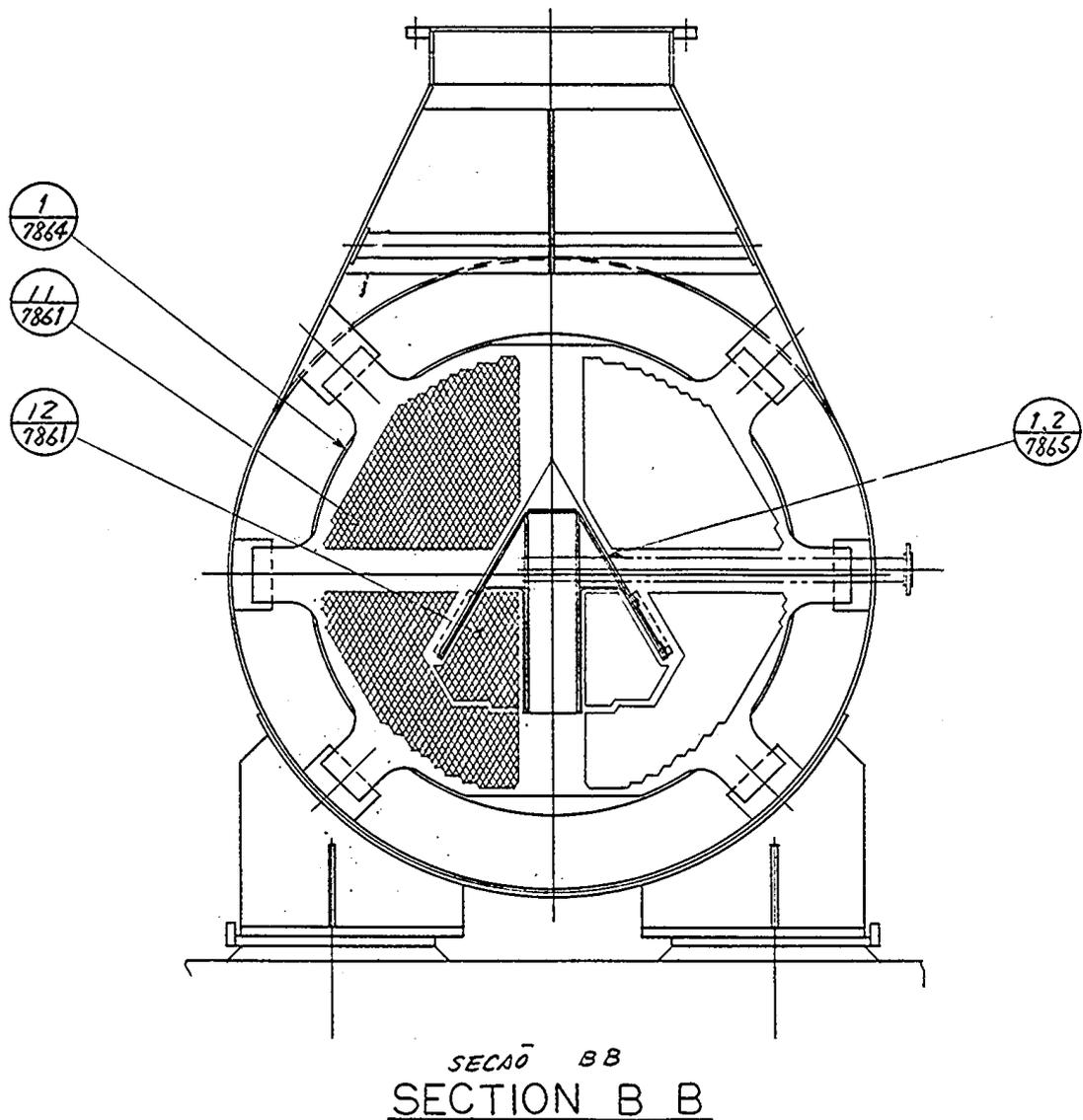


Figura 19: Desenho do corte BB do condensador utilizado nas simulações da planta.
 Fonte: Mitsubishi Heavy Industries LTD, 2017.

Pela figura 19 pode-se ver um corte da seção transversal que mostra os dois estágios do condensador, assim como seus defletores, suporte dos tubos e tubos. A Tabela 3 descreve os itens indicados no desenho.

Tabela 3: Descrição dos itens componentes do condensador.

Identificação dos itens do condensador	
Código	Descrição
7883	Chumbador
7882	Vedação para teste de hidrostático
7881	Conexão para teste hidrostático
7878	Vedação da câmara de água
7873	Tampa da câmara de água
7872	Câmara de retorno de água
7871	Câmara de água
7865	Placa Defletora
7864	Suporte dos tubos
7861	Placa de tubos

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

De acordo com a Tabela 3 é possível identificar os itens dos desenhos do condensador utilizado para a simulação dos casos.

2.6 Siderurgia

O Instituto Aço Brasil (2017) classifica a atividade siderúrgica como sendo de fundamental importância para as nações, ao ponto de servir como medidor de desenvolvimento. É evidente a função social e econômica impactada pela indústria do aço sobre a sociedade como um todo.

Devido ao fato de ser abundante e possuir ligas com propriedades adaptáveis a quase todas as condições requeridas, o ferro se tornou o metal mais empregado. Sendo assim, a metalurgia se divide em siderurgia e metalurgia dos não ferrosos (MACHADO, SOBRINHO e ARRIVABENE, 2003).

O Brasil apresenta um consumo médio de aço per capita de 102,6 kg/habitante, valor baixo se comparado com países como China com 488,6 kg/habitante, Alemanha com 483,8

kg/habitante, Canadá com 404,6 kg/habitante, Polônia com 324,6 kg/habitante e Estados Unidos da América com 297,4 kg/habitante. Esse indicador mostra o potencial de desenvolvimento do mercado interno para o desenvolvimento econômico do país (WORLD STEEL, 2016).

Materiais como plásticos, alumínio, outros metais e madeiras apresentam elevada capacidade de concorrer com o aço, contudo, ele ainda domina muitas aplicações como na indústria de base como transportes, construção civil, construção naval, aviação, máquinas e equipamentos, mineração e indústrias ligadas à produção e transporte de energia, as quais são amplamente dependentes das propriedades características do aço. Tais segmentos indicam consumos crescentes, podendo elevar a expansão econômica dos países emergentes produtores de aço. (EPE, 2009)

A Figura 20 apresenta o percentual da produção de aço bruto nas diversas regiões do mundo no ano de 2005.

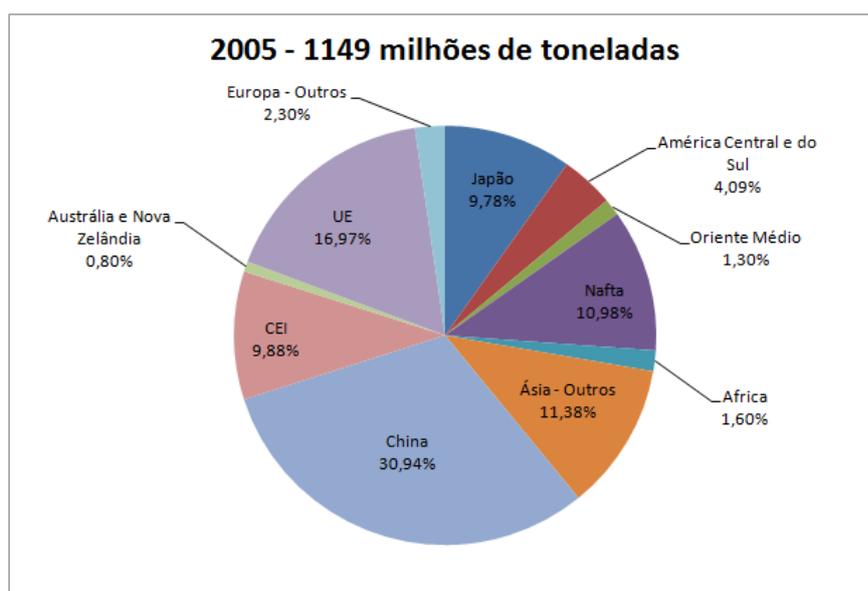


Figura 20: Produção de aço bruto no mundo em 2005.
Fonte: World Steel, 2016.

Percebe-se a grande influência da China e União Europeia na produção de aço, somando juntas uma fatia de quase 48% da produção total. A Figura 21 apresenta o percentual da produção de aço bruto nas diversas regiões do mundo no ano de 2015.

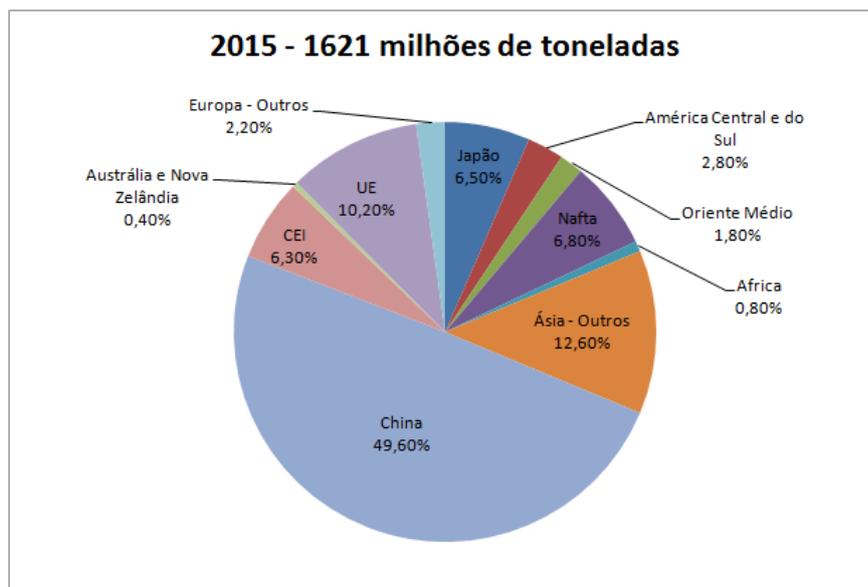


Figura 21: Produção de aço bruto no mundo em 2015.
Fonte: World Steel, 2016.

Destaca-se na Figura 21 o aumento elevado da produção de aço por parte da China entre os anos de 2005 e 2015, elevando seu percentual global de 30,94% para 49,60%.

Segundo o Instituto Aço Brasil (2014), o setor siderúrgico brasileiro vem perdendo competitividade tanto nos mercados internos quanto nos externos devido ao câmbio sobrevalorizado, carga tributária elevada e cumulatividade de impostos, deficiências de infraestrutura e logística precárias e onerosas, aumento dos custos de energia e da mão de obra, entre outros. Ainda alegam que há um excedente de 600 milhões de toneladas de capacidade de produção de aço, fator que levou a queda dos preços do mercado internacional e ao aumento de práticas predatórias que, somados aos incentivos fiscais brasileiros concedidos por alguns estados, provocaram aumento das importações de aço. Com isso, o processo de desindustrialização foi aprofundado.

A Tabela 4 exhibe a lista dos dez países com maior produção de aço bruto do mundo.

Tabela 4: Países que mais produzem aço bruto do mundo em 2014 e 2015.

País	2015		2014	
	Colocação	Milhões de toneladas	Colocação	Milhões de toneladas
China	1º	803,8	1º	822,8
Japão	2º	105,2	2º	110,7
Índia	3º	89,4	4º	87,3
EUA	4º	78,8	3º	88,2
Rússia	5º	70,9	6º	71,5
Coréia do Sul	6º	69,7	5º	71,5
Alemanha	7º	42,7	7º	42,9
Brasil	8º	33,3	9º	33,9
Turquia	9º	31,5	8º	34,0
Ucrânia	10º	23,0	10º	27,2

Fonte: World Steel, 2016.

O Brasil ocupa a posição de 8º em 2015, sendo um dos maiores produtores de aço do mundo e ainda foi o sexto maior exportador líquido de aço (exportações – importações) do mundo em 2014 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017). A companhia brasileira Gerdau ocupa a 17ª posição entre os grupos que mais produzem aço bruto do mundo com 17,03 milhões de toneladas em 2015.

A Figura 22 representa a distribuição geográfica dos produtores de aço no Brasil.



Figura 22: Distribuição dos produtores de aço no Brasil.
Fonte: Instituto Aço Brasil, 2013.

As usinas siderúrgicas no Brasil estão instaladas em 10 estados, contudo, 94% da produção total corresponde à região sudeste. A capacidade instalada é de 47 milhões de toneladas de aço por ano, e um parque produtor que conta com 29 usinas, sendo 14 integradas e 15 semi-integradas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).

As usinas siderúrgicas são classificadas segundo o grau de integração, podendo ser integrada (Figura 23), semi-integrada (Figura 24) e não integrada.

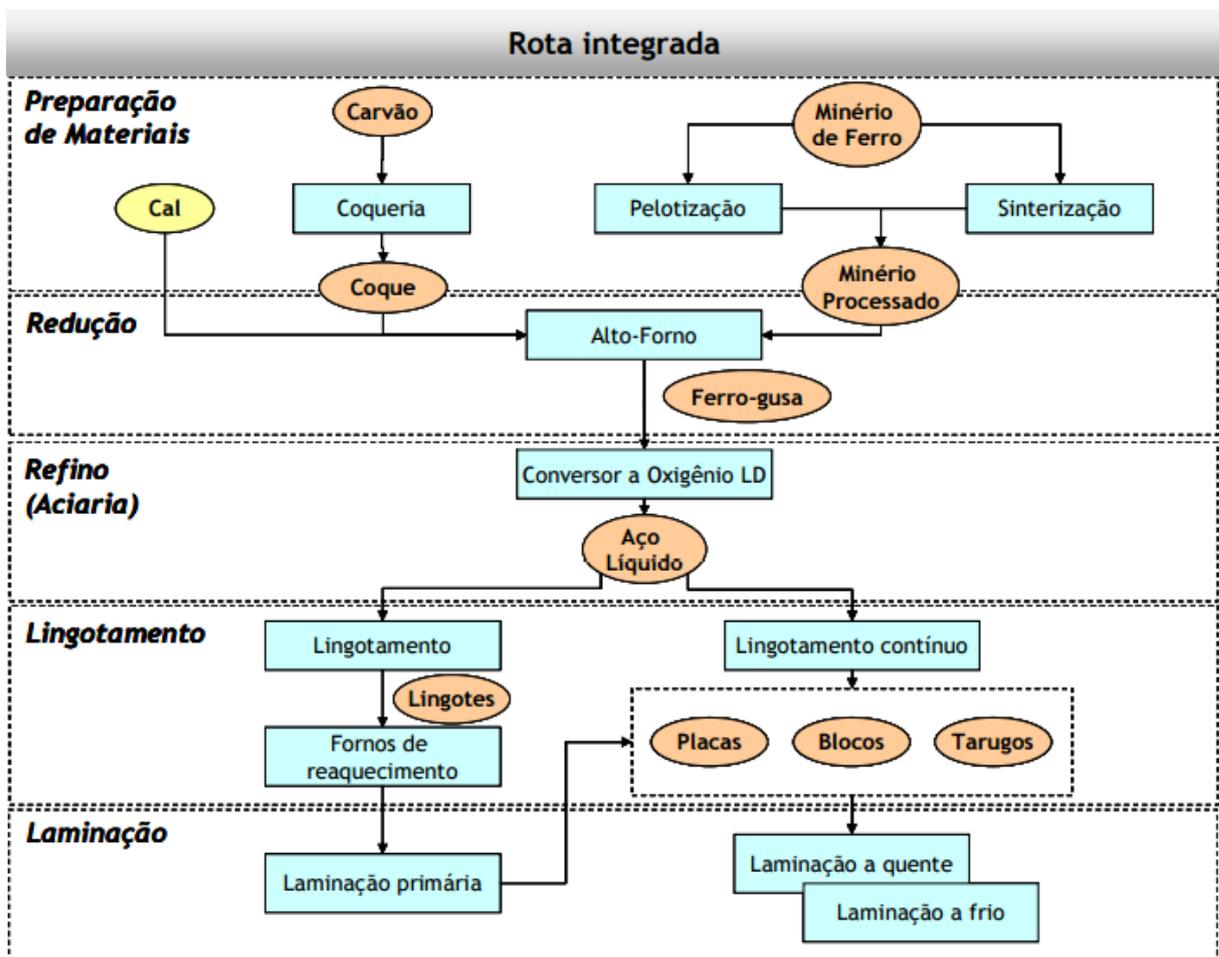


Figura 23: Fluxograma da rotina integrada.
Fonte: EPE, 2009.

As usinas integradas (Figura 23) adquirem as matérias primas no estado bruto, executam todas as fases do processo industrial e vendem os produtos acabados. Os altos fornos, alimentados com coque obtido a partir do carvão nas coquerias, são utilizados para a redução do minério de ferro, formando o ferro-gusa que é transformado em aço líquido na aciaria, constituída de um forno a oxigênio, geralmente um conversor LD (Linz-Donawitz).

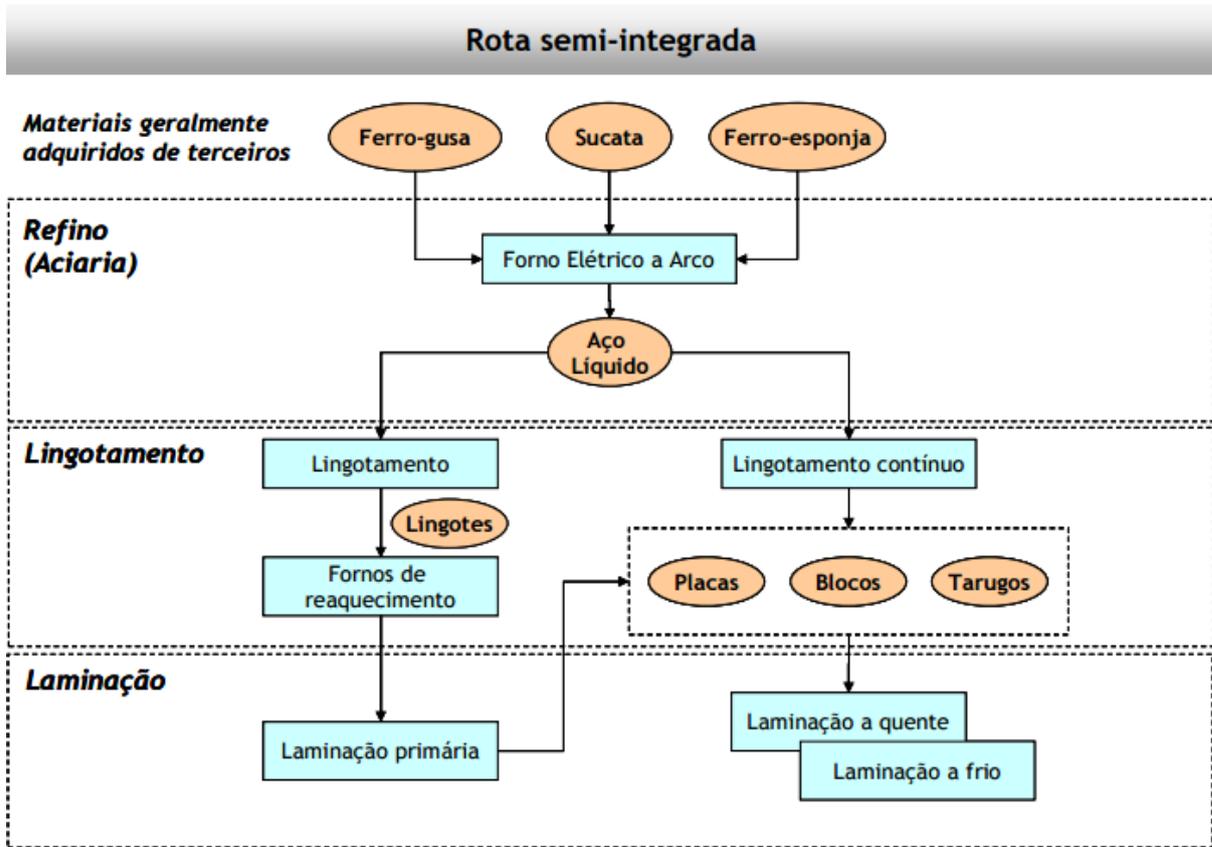


Figura 24: Fluxograma da rotina semi-integrada.
Fonte: EPE, 2009.

Nas usinas semi-integradas (Figura 24) não há a preparação dos materiais nem a redução. Geralmente elas executam as fases de refino e laminação, uma vez que o aço é obtido a partir da fusão de metálicos (sucata, ferro-gusa e/ou ferro esponja) principalmente adquiridos de terceiros e refinados em forno elétrico.

Segundo Machado, Sobrinho e Arrivabene (2003), a coqueria é a unidade industrial que transforma a mistura de carvões minerais em coque. O coque metalúrgico é utilizado pelos altos fornos, atuando como combustível, redutor, fornecedor de carbono ao ferro-gusa e permeabilizador de carga.

A coqueria gera alguns resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que podem ser reaproveitados no próprio processo. O gás de coqueria e o alcatrão são exemplos desses efluentes, sendo ricos combustíveis utilizados em vários setores da usina, inclusive para geração de energia elétrica.

O processo de sinterização é fundamental para a elevada produção do ferro-gusa nos altos fornos. Consiste na aglomeração de partículas de minério de ferro, gerando um produto chamado sinter.

Para a obtenção do ferro o processo é basicamente a redução dos seus óxidos por meio de um combustível carbonoso redutor, normalmente o coque, carvão vegetal ou mineral. Altas velocidades para a redução dos óxidos são desejadas e, para isso, deve-se elevar a temperatura acima de 1000°C, de forma que se obtenha o ferro por redução direta ou indireta.

A redução direta ocorre quando o minério de ferro se reduz a ferro metálico sem que ocorra a fusão da carga no reator, de forma que o produto metálico obtido na fase sólida é chamado de ferro esponja. Esse processo foi utilizado até a invenção dos altos fornos.

Já na redução indireta utiliza-se o alto forno para realizar a fusão redutora de minérios de ferro na presença de carvão vegetal ou coque e fundente, os quais são carregados no topo e, na descida, são transformados pela ação dos gases ascendentes, provenientes da combustão do carvão com o oxigênio soprado pelas ventaneiras, obtendo-se escória e ferro-gusa líquidos pelo cadinho e poeiras e gases no topo (MACHADO, SOBRINHO e ARRIVABENE, 2003).

A Figura 25 identifica um alto forno.

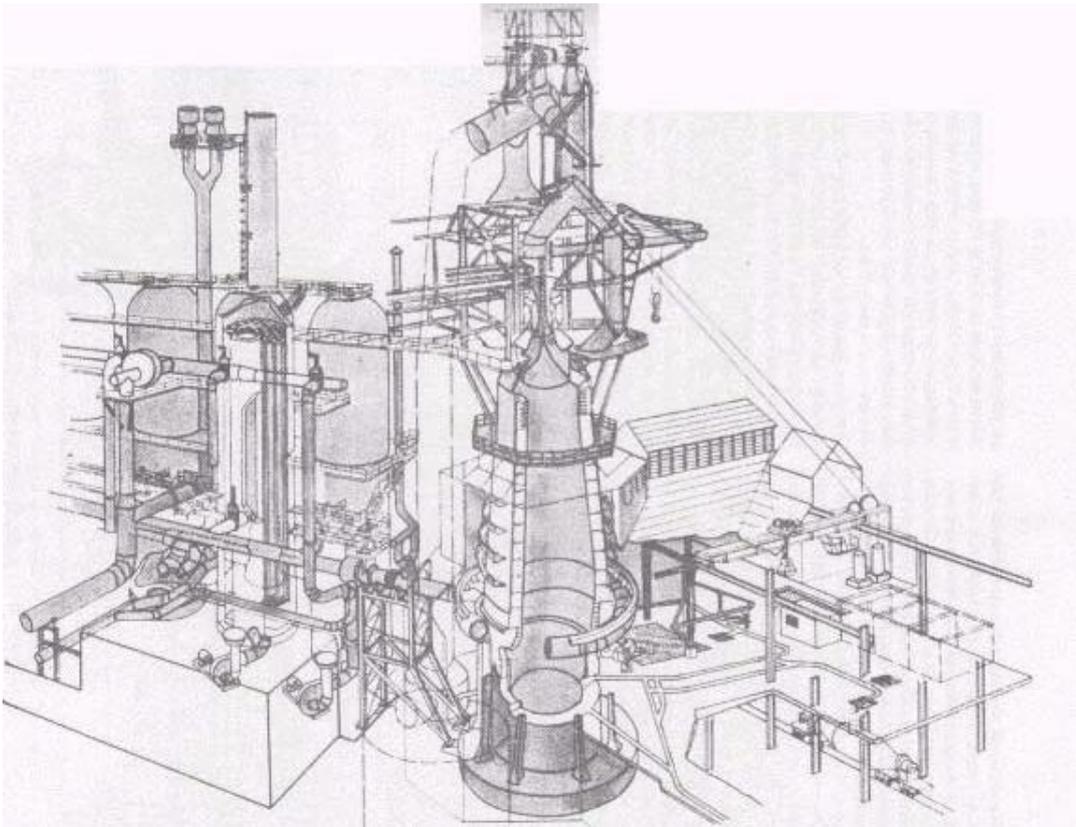


Figura 25: Esquema de um alto forno.
Fonte: Machado, Sobrinho e Arrivabene, 2003.

O esquema mostra um alto forno e seus principais equipamentos periféricos, como os regeneradores, ventoinhas, sistema de coleta de gases, casa de corrida, correia transportadora e carro torpedo.

Os altos fornos geram o ferro-gusa, que é o produto principal, e ainda o gás de topo, pó e escória, que são recuperados como subprodutos.

O Gás de Alto Forno é recuperado e utilizado como combustível, podendo ser utilizado puro ou misturado com os outros gases residuais.

O próximo passo é a etapa de refino, que engloba a produção propriamente dita do aço na aciaria até o lingotamento onde acontece a solidificação do aço. Uma etapa intermediária é o refino secundário, que visa melhorar as características estruturais do aço e reduzir o tempo de corrida da aciaria.

Nas usinas integradas usa-se o método convencional do convertedor a oxigênio, também conhecido como convertedor LD. Ocorre a injeção de oxigênio nas partes inferiores, fazendo com que o ar atravesse o ferro-gusa líquido e do ferro-gusa se forme o aço.

O refino secundário utiliza uma técnica de desoxidação para se obter valores desejados de alguns produtos como nitrogênio e hidrogênio que são absorvidos durante o vazamento. Além disso, é responsável por ajustar a temperatura, composição química, adição de elementos especiais, dessulfuração para teores abaixo de 0,005% e descarburização para teores abaixo de 0,002% (MACHADO, SOBRINHO e ARRIVABENE, 2003).

Este processo gera um gás residual chamado de Gás de Aciaria que é reaproveitado e utilizado como combustível na usina.

Posteriormente, o lingotamento é responsável por vazar o aço líquido em moldes (lingotes) onde ocorre a solidificação. Um método mais avançado é o lingotamento contínuo, que consiste da produção de placas diretamente do aço líquido em um único equipamento. Este consiste em um importante avanço tecnológico no processo siderúrgico.

Por último ocorre o processo da laminação, que consiste em passar o material entre dois cilindros que, girando em sentido contrário, conformam o material.

A Figura 26 mostra o processo de laminação.

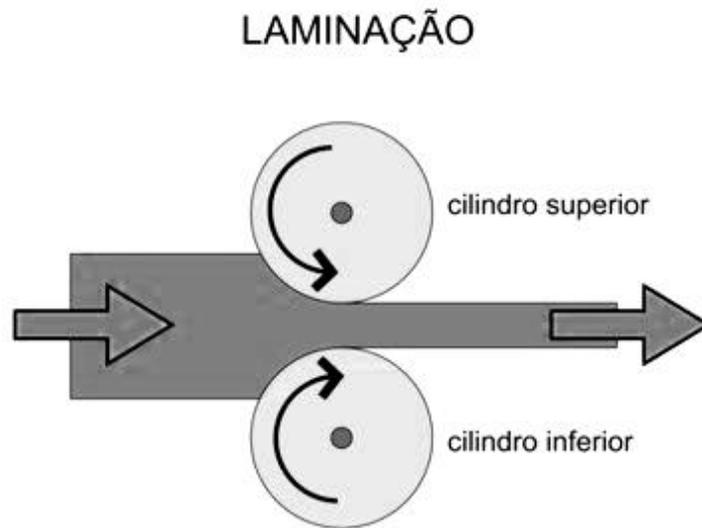


Figura 26: Esquema mostrando um material sendo laminado.
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na laminação os produtos semi-acabados são transformados em produtos acabados que devem atender as especificações estabelecidas em termos de propriedades mecânicas, forma, dimensões, dentre outros critérios (MACHADO, PAULO e FLÁVIO, 2003).

Ainda, tem-se nas usinas siderúrgicas a área de utilidades, responsável pela geração e distribuição de energéticos e utilidades. O setor é encarregado por gerar, receber e distribuir energia elétrica, gerar vapor e ar comprimido, gerenciar os combustíveis e sistemas de águas.

2.7 Central termelétrica em uma usina siderúrgica

Geralmente as usinas siderúrgicas integradas têm uma central termelétrica para geração de eletricidade, vapor de processo e ar soprado. Para tal são utilizados como combustíveis os obtidos na própria usina, isto é, os gases residuais de processo (Gás de Alto Forno, Gás de Aciaria e Gás de Coqueria) e o alcatrão mineral, assim como combustíveis adicionais (óleo mineral, gás natural, outros).

A Tabela 5 indica o poder calorífico inferior (PCI) dos gases siderúrgicos.

Tabela 5: Poder Calorífico Inferior (PCI) dos gases residuais siderúrgicos.

Combustíveis residuais	PCI [kJ/Nm ³]
Gás de Coqueria	17974
Gás de Aciaria	8151
Gás de Alto Forno	3344

Fonte: Machado, Sobrinho e Arrivabene, 2003.

Estes são os principais gases utilizados como combustíveis nas centrais termelétricas. Tem-se ainda o Alcatrão, combustível residual líquido obtido na coqueria e que possui PCI de 35950 kJ/kg. Os gases são queimados em torres de combustão caso inexista ou haja limitações das termelétricas. Logo, constata-se que a utilização de combustíveis residuais para geração de utilidades é uma boa alternativa, tendo benefícios como:

- Melhor aproveitamento de produtos residuais gerados no processo;
- Redução do consumo e dependência externa de energia elétrica;
- Redução de emissão de poluentes.

Apesar da geração de energia elétrica ter tamanha importância para as usinas siderúrgicas, a atividade não caracteriza o principal objetivo para a mesma. O atendimento de ar soprado para os altos fornos e o calor de processo para as demais áreas são prioritários, deixando comumente a geração elétrica como objetivo secundário.

A Figura 27 mostra um layout simplificado de centrais termelétricas composto de uma caldeira que utiliza os combustíveis residuais para gerar vapor em alta pressão e temperatura, um turbo soprador que gera ar soprado e um turbo gerador que gera energia elétrica.

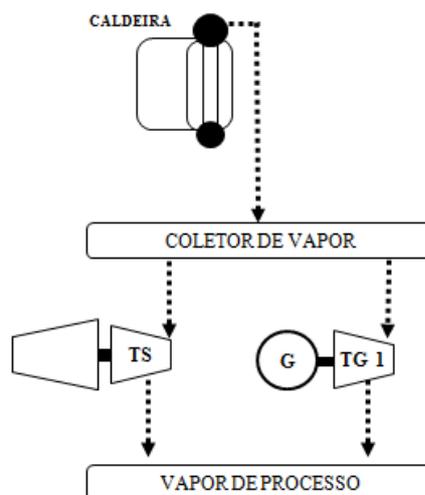


Figura 27: Central termelétrica simplificada.

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Uma central termelétrica com ciclo a vapor tem como máquina térmica a turbina a vapor, com objetivo de produzir energia elétrica e ar soprado. Métodos de aumento de eficiência são utilizados, por exemplo, o aquecimento regenerativo realizado pela extração de vapor das turbinas para aquecimento da água de alimentação das caldeiras.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2013), 42% do total de energia elétrica consumido pelo setor siderúrgico nacional é gerado pelas próprias usinas.

A Tabela 6 apresenta uma lista com a capacidade instalada das centrais termelétricas de usinas siderúrgicas no Brasil.

Tabela 6: Capacidade instalada de algumas siderúrgicas nacionais.

Empresa	Capacidade Instalada (kW)	Usina	Localização
Açominas	102890	Gerdau Açominas	Ouro Branco, MG
Barreiro	12900	Usina Termelétrica Barreiro	Belo Horizonte, MG
Brasil Verde	1200	Brasil Verde Agroindústrias	Conceição do Pará, MG
Calsete	2000	Calsete Siderurgia	Sete Lagoas, MG
Cosipa	27000	Companhia Siderúrgica Paulista	Cubatão, SP
Cosipar	10000	Companhia Siderúrgica do Pará	Marabá, PA
CSA	490000	Companhia Siderúrgica do Atlântico	Rio de Janeiro, RJ
CSN	235200	Companhia Siderúrgica Nacional	Volta Redonda, RJ
CST	278200	Companhia Siderúrgica de Tubarão	Serra, ES
Ipatinga	40000	Usina Térmica Ipatinga	Ipatinga, MG
Siderpa	2400	Siderúrgica Paulino	Sete Lagoas, MG
Sol	196520	Companhia Siderúrgica de Tubarão	Serra, ES
Usiminas	18810	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais	Ipatinga, MG
Valinho	2000	Siderúrgica Valinho	Divinópolis, MG
Vetorial	3500	Vetorial Siderurgia	Ribas do Rio Pardo, MS

Fonte: EPE, 2009.

Percebe-se a alta capacidade de geração de algumas unidades chegando a valores acima de 100 MW.

2.8 Ferramenta de simulação numérica

Para avaliar e simular as diferentes configurações operacionais pode ser utilizado o *software* GatecycleTM, desenvolvido pela empresa General Electric, disponibilizado como um produto comercial e utilizado como ferramenta em estudos de simulação em termelétricas em geral.

O GatecycleTM é um programa computacional que simula o comportamento de plantas térmicas ou sistemas de cogeração tanto no ponto de projeto como fora do ponto de projeto. As

simulações ou execuções do programa no ponto de projeto utilizam uma gama detalhada de modelos analíticos para a análise de processos termodinâmicos, de transferência de calor e mecânica dos fluidos.

É possível encontrar o ícone dos equipamentos como turbina a gás, turbina a vapor, caldeira, economizador, condensador, aquecedor de água, superaquecedor, bomba, tubulação, válvula e equipamentos comuns que fazem parte de uma planta termelétrica, conforme Figura 28.

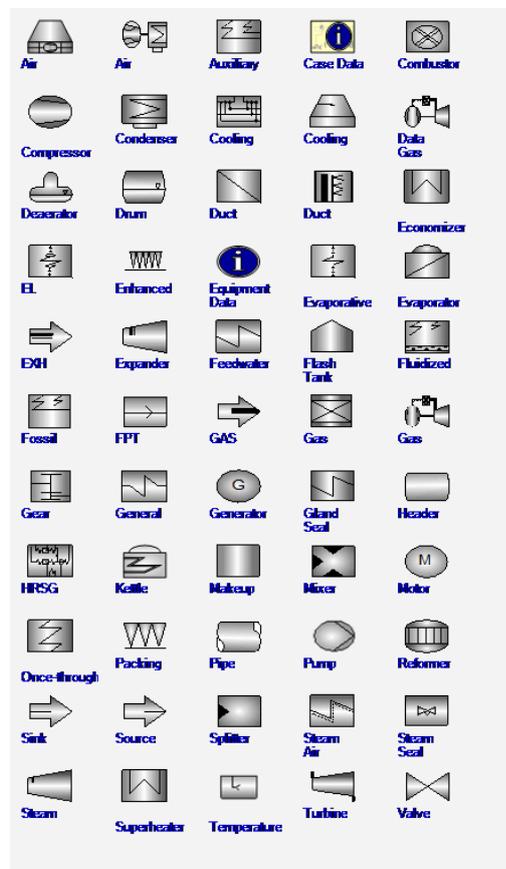


Figura 28: Diversidade de ícones disponíveis no *software* Gatecycle™.
Fonte: Gatecycle™, 2013.

Através dos ícones, o usuário pode desenhar o ciclo térmico e realizar as conexões necessárias. Quando o ciclo estiver formado, faz-se a inserção de dados e condições de operação, como mostrado no exemplo da Figura 29.

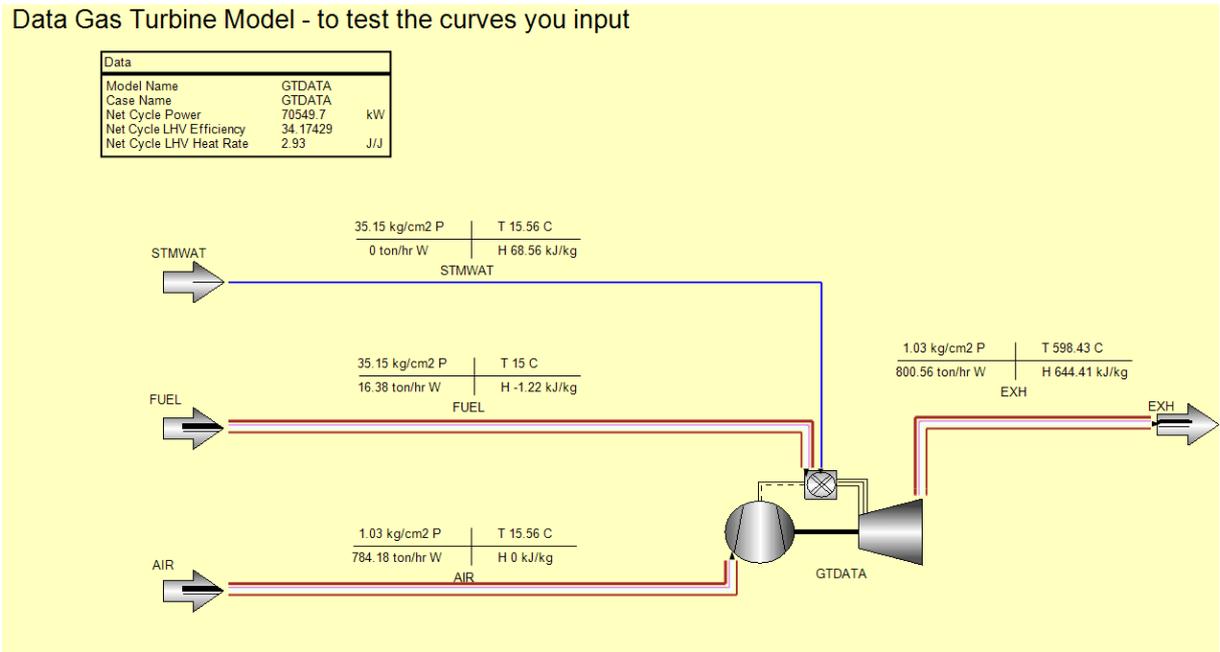


Figura 29: Modelo de teste de uma turbina a gás.
Fonte: Gatecycle™.

É mostrado um modelo de teste de uma turbina a gás, este já vem inserido na biblioteca do *software* para realização de simulações e estudos.

Cada equipamento solicitará uma certa quantidade de dados numéricos e o método de cálculo que será aplicado, o que pode aumentar a flexibilidade da simulação.

A programação determina a eficiência de toda a planta e os balanços de massa e energia nos diferentes pontos.

A partir do momento em que se tem o modelo, o programa o reconhece como a configuração física da planta e, em seguida, permite a criação de diversos casos, que são criados em separado, contudo, interligados diretamente com o modelo. Os casos possibilitam análises da planta fora do ponto de projeto.

Além disso, o software apresenta uma interface com o Microsoft Excel através de uma extensão chamada CycleLink. Com ela é possível exportar os dados para o Microsoft Excel e facilitar as análises das curvas de dependência de variáveis e análise de resultados.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreverá a característica do desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de determinar a sua natureza e classificação, a área da pesquisa, método e instrumentos de coleta utilizados, assim como as variáveis e indicadores adotados, para que possam ser feitas as análises e cálculos necessários.

3.1 Tipo de pesquisa

Segundo Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, é uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é encontrar soluções para um problema, mediante o uso de procedimentos científicos.

De acordo com Minayo (2003), existem duas formas de realizar uma pesquisa, a qualitativa e a quantitativa. O método qualitativo é baseado na interpretação, o qual ocupa um lugar central na teoria e é constituído por um conjunto de técnicas que serão adotadas para construir uma realidade. A pesquisa é, assim, uma atividade básica da ciência que se preocupa com as ciências sociais sem que possa ser quantificada, trabalhando com crenças, significados, valores e outros construtos profundos de relações que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis.

A pesquisa qualitativa explora as características e cenários que não podem ser facilmente descritos numericamente. Os dados são coletados pela observação, descrição e gravação.

Já a pesquisa quantitativa, para Silva (2001), é todo o tipo de informação que pode ser traduzido em números utilizando métodos estatísticos, as opiniões e dados obtidos de acordo com os boletins de informação e pesquisa de campo.

Com relação ao objetivo da pesquisa, Gil (1999) classifica a pesquisa como exploratória, na qual sua finalidade é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, tendo em vista hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, envolvendo levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso. E ainda proporcionar uma visão geral, aproximada acerca de determinado fato; descritiva, em que se observa, analisa, e descreve as características de determinada população ou fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, tendo como principal técnica a coleta de dados; e explicativa, que identifica os fatores que contribuem ou

determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas, sejam estas impressas ou digitalizadas e obtidas via Internet, e também por meio de dados que se obtêm através de estudo de casos e experimentos. Já a pesquisa experimental está mais próxima às Ciências Naturais, sendo a grande responsável pelos maiores avanços científicos, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, com o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas especiais, e equipamentos adequados.

Fonseca (2002) especifica pesquisa documental como sendo elaborada através das mais diversas fontes sem tratamentos analíticos. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa participante caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas.

Já a pesquisa-ação é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita associação com uma ação ou resolução de um problema no qual os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Segundo Yin (2001), estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Para Gil (1999), os exemplos mais característicos desse tipo de pesquisa são os de investigações sobre ideologias ou aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema.

Baseado nas informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à abordagem, em uma pesquisa quantitativa, pois utiliza de dados numéricos, cálculos e processo de análise estatístico, deixando de lado resultados alcançados por observações e interpretações. Quanto ao objetivo, é uma pesquisa exploratória, devido ao fato de que irá se observar e analisar o princípio de funcionamento de um ciclo térmico a vapor conforme um caso de referência, a fim de descrever, registrar e comparar os resultados obtidos pela potência da turbina de acordo com as mudanças nas variáveis do sistema. O presente trabalho ainda abrange uma pesquisa de caráter bibliográfico, visto que é fundamentada em uma variedade de livros, teses, dissertações, artigos e internet, com o objetivo de enriquecimento teórico para realização do estudo proposto e experimental, uma vez que realiza simulações de variados cenários utilizando um software adequado. Será feito um estudo de caso de uma central termelétrica de uma usina siderúrgica integrada, onde serão observados o comportamento de alguns parâmetros do ciclo a vapor de

forma a fazer um melhor detalhamento em parte do ciclo que envolve a turbina a vapor e o condensador.

3.2 Materiais e métodos

Para o presente trabalho será necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar o equacionamento e a modelagem dos principais parâmetros intervenientes na determinação da eficiência térmica do ciclo analisado, além de descrever e detalhar os componentes a serem estudados do ciclo a vapor, tais como: turbina a vapor e condensador.

A modelagem e equacionamento do Ciclo Rankine serão divididos em partes pela aplicação da conservação de energia em regime permanente para cada volume de controle constituinte.

Na turbina será determinada a potência gerada através das variáveis conhecidas: potência nominal da turbina, temperaturas de entrada e saída do fluido de trabalho, pressões de entrada e saída do fluido de trabalho, vazão de entrada, extração e exaustão do fluido de trabalho.

Nos condensadores será simulada a capacidade de geração de vácuo pelo conhecimento das variáveis: para o fluido de trabalho e fluido a ser condensado sabe-se a temperatura de entrada e saída, vazão, pressão de entrada e saída, além de superfície de resfriamento, número de tubos e passes.

O equacionamento e a modelagem termodinâmica dos volumes de controle permitem o desenvolvimento de rotinas computacionais para a análise da sensibilidade e comparação energética dos mesmos. A análise de sensibilidade será realizada através da variação de parâmetros recorrentes da rotina de uma usina siderúrgica integrada onde não há prioridade para geração de energia elétrica, e sim de fornecimento de ar soprado aos altos fornos e vapor ao processo. Será então possível inferir os melhores pontos de operação assim como os principais responsáveis pela melhor geração elétrica envolvendo a turbina e o condensador.

Para a realização da simulação da modelagem termodinâmica dos ciclos, será empregado o *software* GatecycleTM, permitindo a realização de análise numérica, gráfica e de sensibilidade. Nele será realizada a simulação termodinâmica do ciclo englobando a turbina e o condensador, onde serão destacadas as principais influências dos componentes do ciclo na geração elétrica.

A Figura 30 representa um fluxograma com as etapas para a realização deste trabalho.

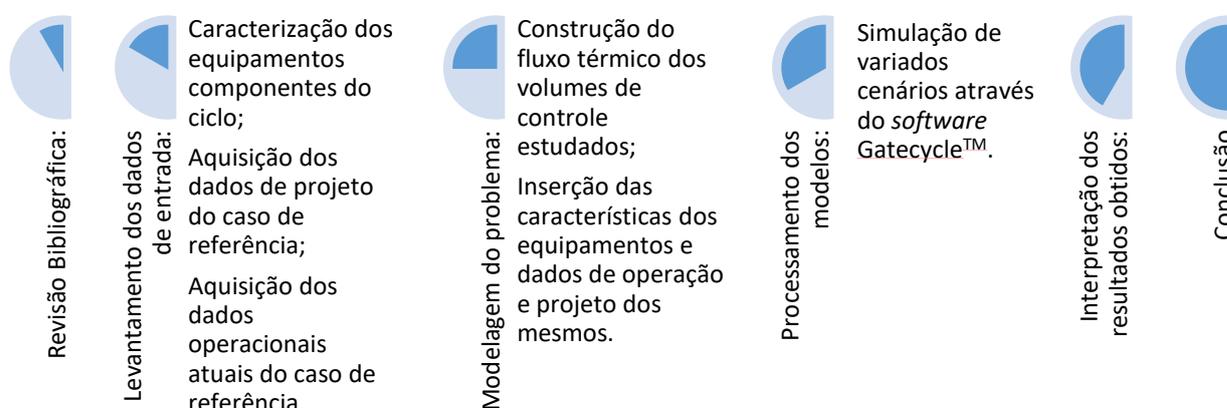


Figura 30: Fluxograma das etapas para realização deste trabalho.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Após a revisão bibliográfica será feito um levantamento de todos os dados que caracterizam o ciclo, como o tipo dos equipamentos e as informações de operação. Posteriormente o problema será modelado, tendo-se então o fluxo térmico e o modelo dos processos. Os *softwares* Gatecycle™ e Microsoft Excel auxiliam no processamento e análise de todos os dados obtidos. Por fim, tem-se uma interpretação das informações obtidas e uma conclusão.

3.3 Variáveis e indicadores

Segundo Gil (1999) pode-se dizer que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Características Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de Turbina; • Tipo de Condensador; • Variáveis operacionais de cada equipamento.
Turbina	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão de entrada e de saída; • Temperatura de entrada e de saída; • Vazão de entrada, extração e exaustão. • Potência líquida gerada;
Condensador	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão de entrada e de saída; • Perda de pressão; • Temperatura de entrada e de saída; • Vazão do fluido de trabalho e condensado; • Área de superfície; • Número de tubos; • Coeficiente global de transferência de calor; • Efetividade.

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

3.4 Instrumento de coleta de dados

Nesta etapa acontece a coleta de dados em torno do tema abordado a fim de obter o embasamento necessário para a pesquisa através de revisões bibliográficas, observações e experimentos.

Como já mencionado neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa e exploratória, logo todos os dados necessários para o estudos serão adquiridos através de uma profunda pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações, manuais e catálogos, associada com uma observação direta a fim de reunir dados práticos, e também através de um estudo de caso que será realizado com o intuito de conseguir informações úteis para realizar simulações de pontos de operação recorrentes no cenário siderúrgico.

Utiliza-se o PIMS (*Plant Information Management System*) para o conhecimento das informações do processo industrial. O sistema coleta e centraliza dados de diferentes áreas da

planta em uma base única, armazenando-os por um longo período de tempo e disponibilizando-os para a análise dos processos.

3.5 Tabulação de dados

A partir dos dados obtidos pela teoria e prática, estes serão implementados no *software* Gatecycle™, que permite maior facilidade na modelagem do ciclo, melhor visualização dos dados e simulação dos ciclos propostos neste trabalho. Ao mesmo tempo utiliza-se o *software* Microsoft Excel juntamente com a extensão CycleLink a fim de facilitar a simulação dos casos e realizar análises gráficas. Emprega-se o *software* Microsoft Word para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas de forma a executar este trabalho. Abordaram-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além de ter delimitado a área em que ocorre esta pesquisa e também a forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, de acordo com a modelagem computacional realizada e a simulação de cenários no *software* Gatecycle™ e Microsoft Excel, além de mostrar de forma gráfica as análises e por fim será feita uma discussão dos resultados.

4 RESULTADOS

Para a execução das análises, primeiramente foi criado um modelo (condição de projeto) no Gatecycle™ onde os parâmetros de operação da turbina e do condensador foram inseridos.

Na Figura 31 é apresentado o modelo no software.

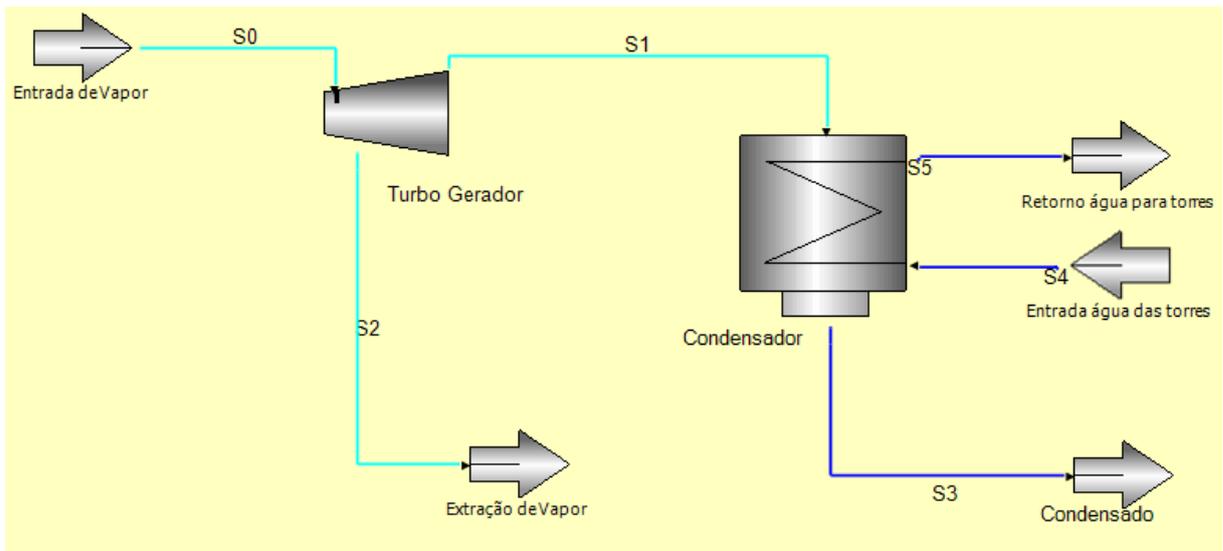


Figura 31: Modelo incluindo a turbina a vapor e o condensador.
Fonte: Gatecycle™.

As linhas S0, S1 e S2 ilustram os fluxos de vapor e as linhas S3, S4 e S5 os fluxos de água. No modelo, a superfície de controle é definida pela turbina que recebe o fluido de trabalho, extração e o condensador que recebe água das torres de resfriamento para retirar calor do vapor e condensá-lo.

A Tabela 8 mostra os dados de operação das máquinas tomados em um período de funcionamento padrão, isto é, sem paradas de manutenção e com fornecimento de fluido de trabalho constante. Estes dados foram inseridos na criação de um ponto de operação no modelo computacional.

Tabela 8: Dados de operação da turbina e do condensador em dias típicos.

Turbina a vapor		
Temperatura de entrada	480	°C
Pressão de entrada	5,9	MPa
Vazão de entrada	90	ton/h
Temperatura de saída	63	°C
Pressão de saída	17,65	KPa
Vazão de saída	38,5	ton/h
Temperatura de extração	330	°C
Pressão de extração	1,25	MPa
Vazão de extração	51,5	ton/h
Condensador (água de resfriamento)		
Temperatura de entrada	35	°C
Pressão de entrada	0,32	MPa
Vazão de entrada	2200	ton/h
Temperatura de saída	44	°C
Pressão de saída	0,29	MPa
Vazão de saída	2200	ton/h

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

A partir do modelo criado com os dados descritos pela Tabela 8, foram desenvolvidos os casos considerando cenários possíveis de ocorrer na rotina de uma usina siderúrgica, uma vez que o vapor produzido pelas caldeiras é prioritariamente direcionado para os turbosopradores que alimentam os altos fornos e para o atendimento da demanda de vapor de processos na usina. A sobra é direcionada aos turbo geradores para geração elétrica, causando oscilações comuns de carga e raramente operando em suas capacidades nominais. Além disso, há a possibilidade de quebra de equipamentos, causando, por exemplo, o funcionamento parcial de uma torre de resfriamento de água e ocasionando um fornecimento de água de resfriamento deficiente.

Os próximos tópicos descrevem os casos e são feitas as análises em cima das simulações realizadas.

4.1 Variação das condições da água de resfriamento

A água das torres de resfriamento é utilizada como fluido refrigerante para garantir a condensação do vapor de exaustão da turbina no condensador. A temperatura e vazão da água de resfriamento são responsáveis por manter a temperatura e a pressão do vapor no condensador

em níveis adequados. Um aumento na pressão do condensador indica menor aproveitamento energético do vapor e, portanto, reduz-se a capacidade de geração elétrica.

Sendo assim, possíveis aumentos de temperatura ambiente ou até mesmo a quebra de equipamentos, como um motor ou uma hélice da torre de resfriamento, reduziriam a capacidade de fornecimento de água de resfriamento afetando diretamente a capacidade de geração da turbina.

A Figura 32 mostra a influência da temperatura da água gerada pelas torres de resfriamento na potência da turbina e na pressão do condensador, considerando valores máximo e mínimo de temperatura normalmente alcançados em situações extremas nas estações de verão e inverno.

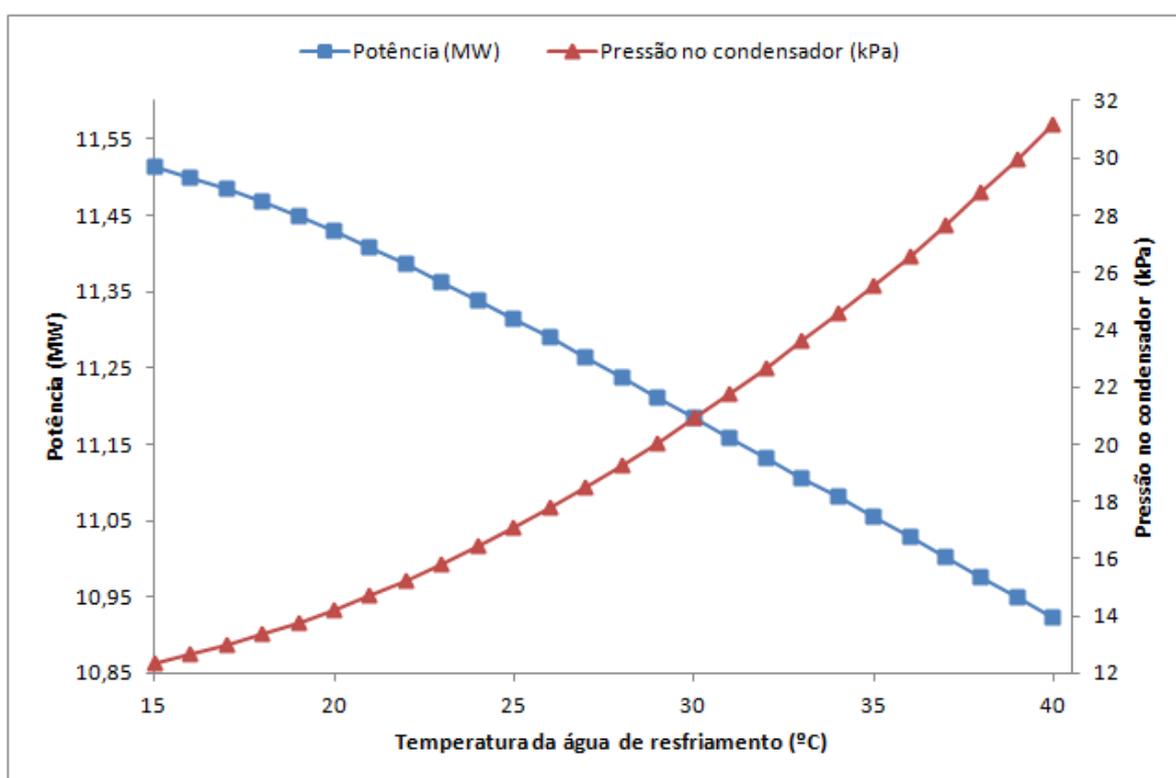


Figura 32: Relação entre temperatura da água de resfriamento, potência da turbina e pressão do condensador. Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Verifica-se que temperaturas altas provocam um aumento de pressão no condensador e, conseqüentemente, afetam a geração de energia da máquina. Isso é evidenciado pelo acoplamento entre pressão e temperatura no processo de condensação do vapor. Quanto maior a temperatura de entrada no condensador da água de resfriamento maior a pressão de saída da turbina (pressão de operação do condensador no lado do vapor).

Um aumento da temperatura da água de resfriamento de 15°C para 40°C ocasiona um aumento de 152% na pressão do condensador e uma redução de 5% na potência da máquina.

A relação entre temperatura (T) e pressão (P) (Figura 32, linha com marcadores triangulares) é descrita pela equação ($P = 0,0184T^2 + 0,2567T + 12,033$) tendo $R^2 = 1$ e entre temperatura e potência (Pot) (Figura 32, linha com marcadores quadrados) pela equação ($Pot = -0,0002T^2 - 0,0189T + 11,544$) tendo $R^2 = 0,9994$.

A Figura 33 ilustra a influência da vazão da água de resfriamento na potência da turbina e na pressão do condensador.

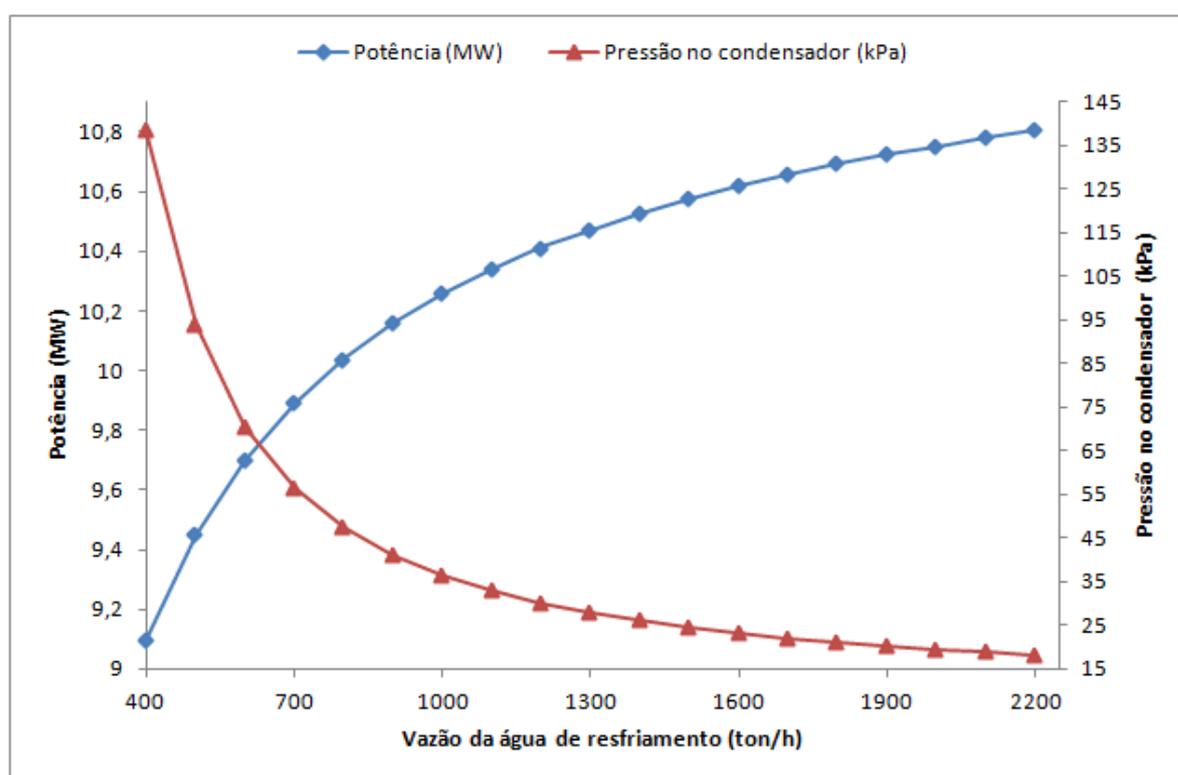


Figura 33: Relação entre vazão da água de resfriamento, potência da turbina e pressão do condensador.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

A vazão nominal de 2200 ton/h evidencia o melhor ponto de operação para o condensador, fato notado pela pressão mínima obtida no condensador e consequente melhor potência gerada conforme figura acima.

Com o aumento da vazão da água de resfriamento de 400 ton/h para 2200 ton/h percebe-se uma redução de 87% na pressão do condensador e um aumento de 19% na potência entregue pela turbina, mantendo-se a temperatura constante. Cabe salientar que a redução da vazão de água de resfriamento no condensador ocasiona o aumento da pressão na saída da turbina. Quanto maior a pressão na saída, menor será o salto entálpico ocorrido no vapor, o que

fica evidenciado com o a redução da vazão de água. Outro fato a ser notado é o comportamento assintótico da curva de pressão do condensador evidenciando que abaixo de 700 ton/h ocorre uma perda significativa na potência do sistema. Este fato por vezes acontece na empresa estudada devido a capacidade de geração de água refrigerada ser menor que a nominal necessária pelos condensadores, sendo ainda grandemente afetada em casos de manutenção corretiva nas torres de resfriamento.

A relação entre vazão (Q) e pressão (Figura 33, linha com marcadores triangulares) é descrita pela equação ($P = 147,67 \times Q^{-0,716}$) tendo $R^2 = 0,9981$ e entre vazão e potência (Figura 33, linha com marcadores quadrados) pela equação ($Pot = 0,5981 \ln Q + 9,0741$) tendo $R^2 = 0,9982$.

4.2 Variação da condição do condensador

O coeficiente global de transferência de calor do condensador pode ter seu valor reduzido com o tempo de operação, podendo sofrer incrustações e até mesmo perder parte de sua área superficial pelo tamponamento de algum tubo que venha a ser danificado.

A Figura 34 ilustra a influência do coeficiente global na pressão do condensador e na potência da turbina.

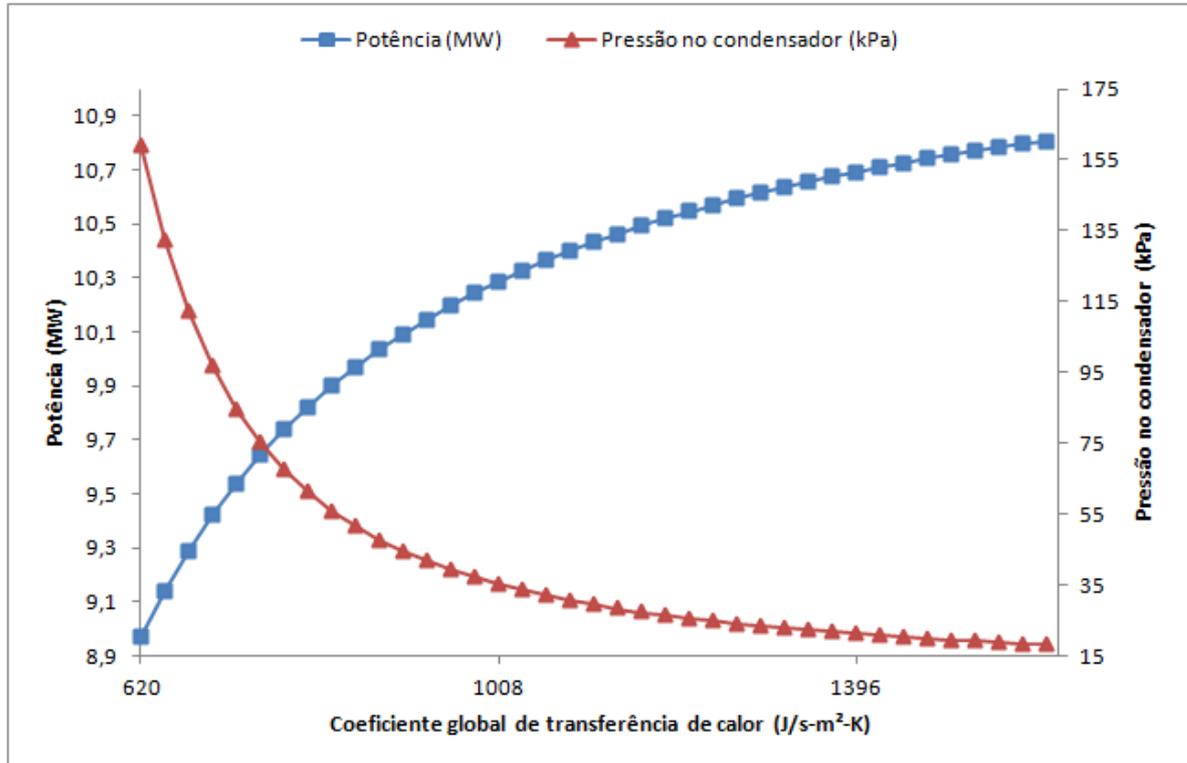


Figura 34: Relação entre coeficiente global de transferência de calor, pressão no condensador e potência da turbina.

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

O valor do coeficiente global de transferência de calor de 2559 J/s-m²K representa a condição de projeto do condensador e, pela simulação, foram definidos valores menores para acompanhar o comportamento da pressão no condensador e geração.

Tem-se que uma alteração do coeficiente global entre 620 J/s-m²K e 2559 J/s-m²K aumenta em 88% a pressão no condensador e reduz em 20% a potência da turbina. Também se observa um comportamento assintótico na curva de pressão do condensador. Tomando como base o valor de 1008 J/s-m²K (39% do valor de condição de projeto do condensador), há uma alteração significativa com a sua redução. Isso também fica evidenciado na curva de potência gerada.

A relação entre o coeficiente global (cg) e a pressão (Figura 34, linha com marcadores triangulares) é descrita pela equação $P = 0,0004cg^4 - 0,0392cg^3 + 1,4177cg^2 - 22,963cg + 172,84$ tendo $R^2 = 0,9951$ e entre o coeficiente global e a potência (Figura 34, linha com marcadores quadrados) pela equação $Pot = 8,7695 \times cg^{0,0573}$ tendo $R^2 = 0,9906$.

4.3 Variação das condições do vapor de entrada

A pressão e temperatura do vapor na entrada da turbina são mais baixas do que aquelas na saída da caldeira, devido à perda de carga que ocorre nas tubulações e conexões. Mas, ocasionalmente, quedas acentuadas de pressão e temperatura podem vir a acontecer caso ocorra problemas com a caldeira ou mesmo nas tubulações, como vazamentos. Consequentemente, a turbina entregará menos trabalho.

O comportamento da potência em função da pressão do vapor a temperatura constante de 480°C é mostrado na Figura 35.

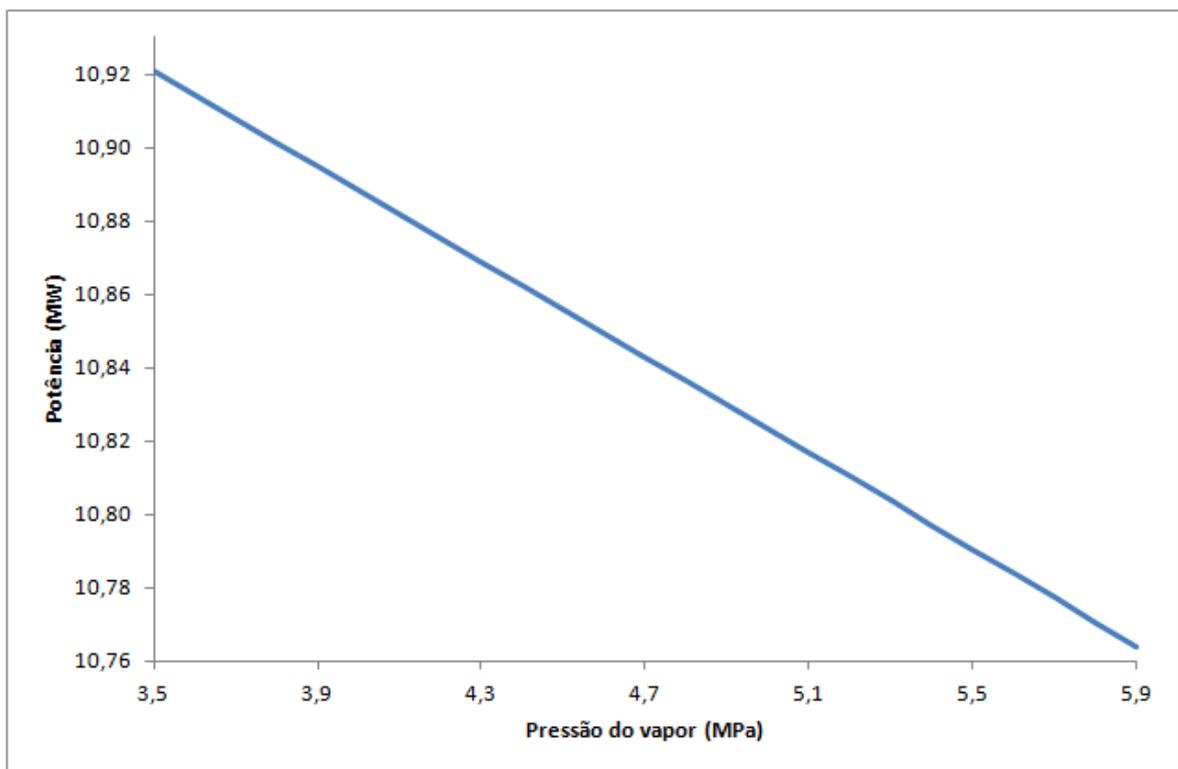


Figura 35: Relação entre pressão do vapor e potência da turbina a temperatura constante.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Percebe-se pela figura acima que ao aumentar a pressão do vapor de 3,5 MPa para 5,9 MPa (capacidade nominal) a potência da turbina é reduzida em 1%.

Os indicadores apresentam relação linear descrita pela equação ($Pot = -0,0065P + 10,927$) tendo $R^2 = 1$.

O fato da geração ser maior com valores de pressão menores é explicado pelo Diagrama de Mollier, conforme Figura 36.

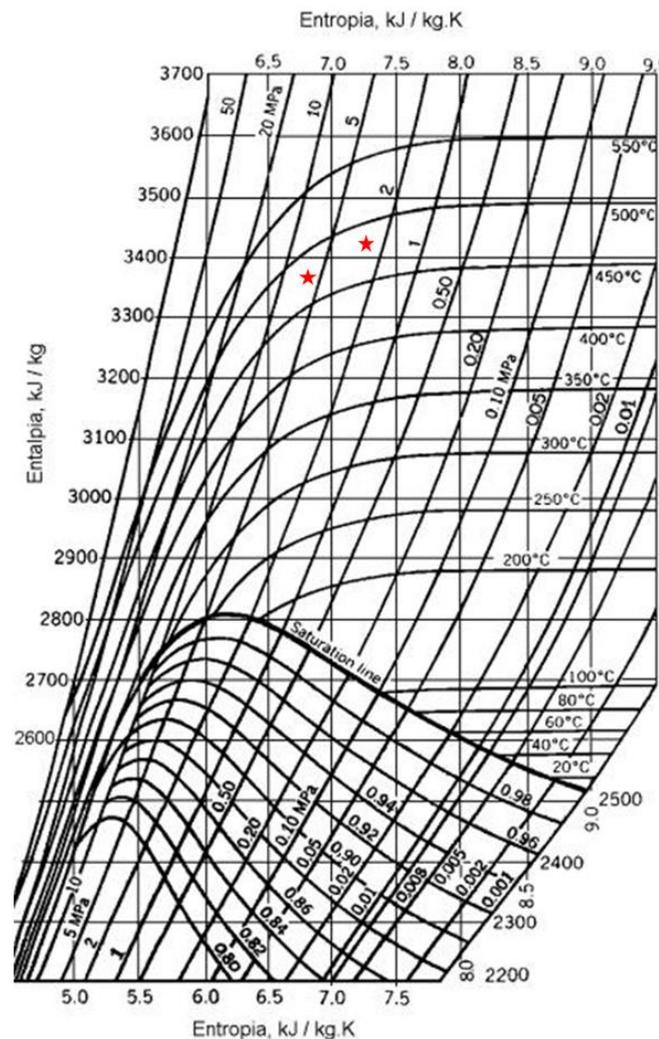


Figura 36: Diagrama de Mollier para a água.

Fonte: Apostila Termodinâmica do CEFET/RJ, 2017. Pesquisa direta, 2017.

De acordo com o diagrama percebe-se que o ponto de menor pressão (indicado pela estrela à direita) é aquele que apresenta maior valor de entalpia, acima da linha de 3400 kJ/kg, e o ponto de maior pressão (indicado pela estrela à esquerda) está abaixo da mesma linha. Logo, a geração da turbina quando se tem vapor a 3,5 MPa é maior do que com 5,9 MPa, para uma mesma temperatura de 480°C, devido ao valor da entalpia ser maior naquele ponto e, portanto, ocorrer um maior salto entálpico através da turbina, mantendo-se as condições de saída da turbina.

Outro parâmetro analisado é a temperatura do vapor de entrada e sua influência na potência considerando a pressão constante de 5,9 MPa, de acordo com a Figura 37.

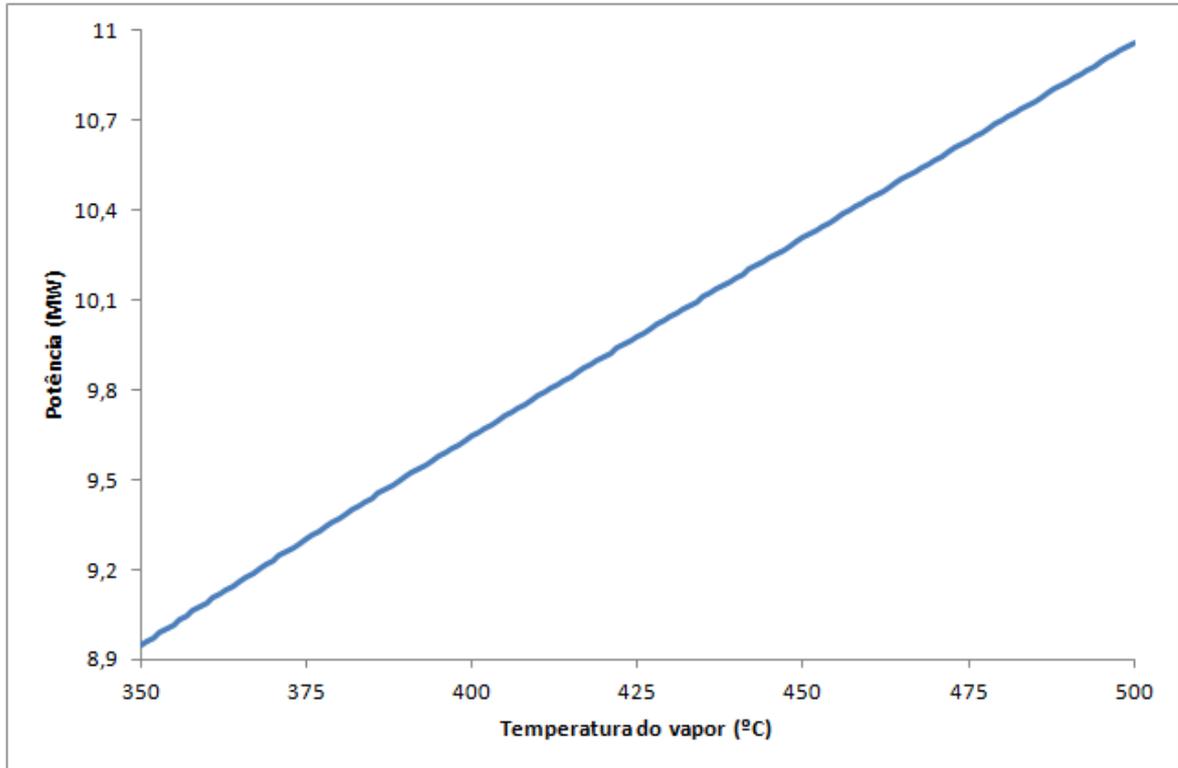


Figura 37: Relação entre temperatura do vapor e potência da turbina a pressão constante.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Um aumento da temperatura do vapor de entrada da turbina de 350°C até 480°C (capacidade nominal) representa 20% de aumento na potência da turbina.

A relação linear entre temperatura e potência é descrita pela equação ($Pot = 0,0134T + 8,953$) tendo $R^2 = 0,9998$.

A próxima análise considera alguns pares termodinâmicos e suas respectivas potências geradas pela turbina, conforme a Tabela 9.

Tabela 9: Pares termodinâmicos e respectivas potências.

Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Potência (MW)
12	500	10,55
10	450	9,97
6	400	9,63
6	480	10,69
5	450	10,37
4	415	10,02

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

A Figura 38 apresenta os pares termodinâmicos da Tabela 9 destacados no Diagrama de Mollier.

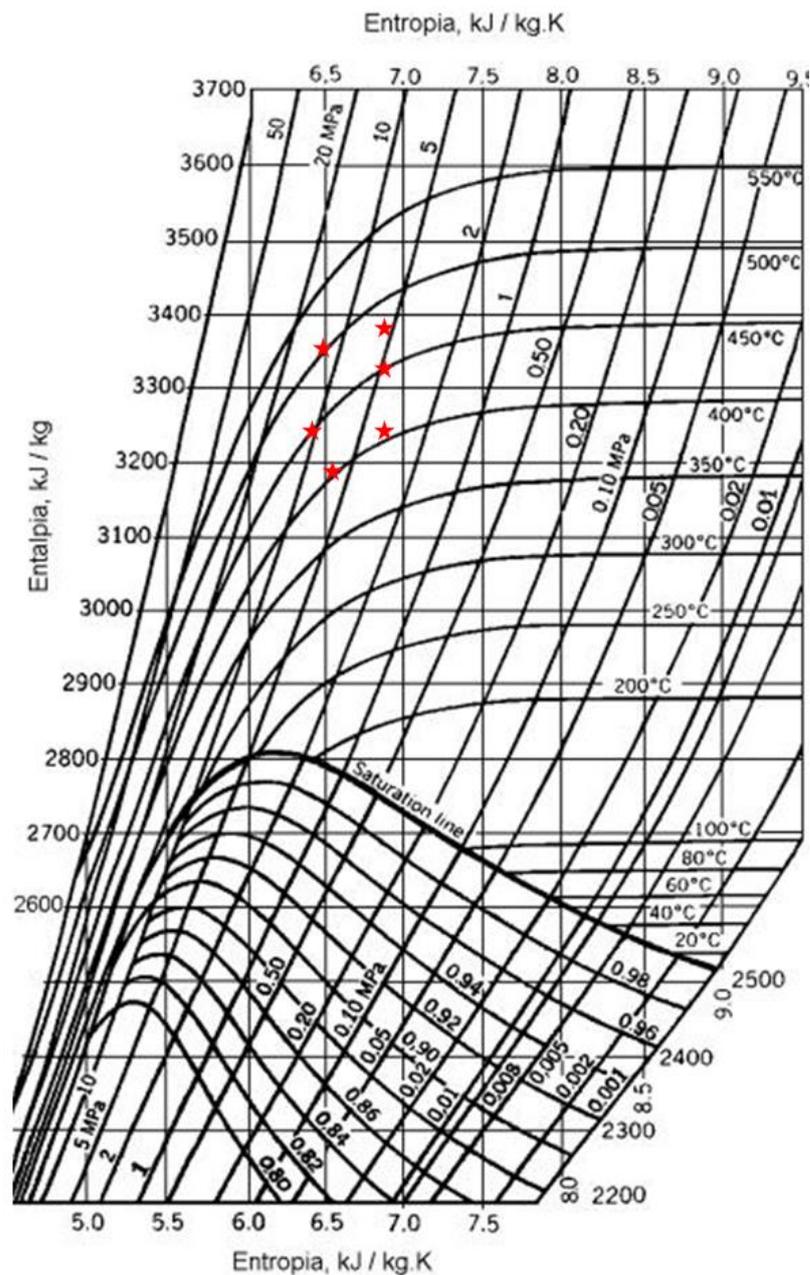


Figura 38: Diagrama de Mollier para a água com pares termodinâmicos destacados.
 Fonte: Apostila Termodinâmica do CEFET/RJ, 2017. Pesquisa direta, 2017.

Percebe-se que o par termodinâmico de pressão 6 MPa e temperatura 480°C apresenta geração um pouco maior que aquele com pressão de 12 MPa e temperatura de 500°C. É mais interessante trabalhar com esse par, uma vez que não se fará necessário caldeiras com materiais resistentes que possam trabalhar com vapor em tais condições.

Nota-se que os pontos com maior entalpia são aqueles com maior capacidade de geração. Isso ocorre pois eles são capazes de deixar maior quantidade energética através da turbina.

4.4 Variação da extração da turbina

São feitas simulações na turbina em questão com alimentação de vapor em uma vazão constante de 90 ton/h e casos onde ocorrem oscilações na vazão de extração de vapor. Por se tratar de um Ciclo Rankine Regenerativo, esse vapor é utilizado nos aquecedores de água de alimentação e também é direcionado a outros processos da usina.

Neste item foi realizada a simulação visando acompanhar a potência com a variação da vazão de extração, conforme a Figura 39.

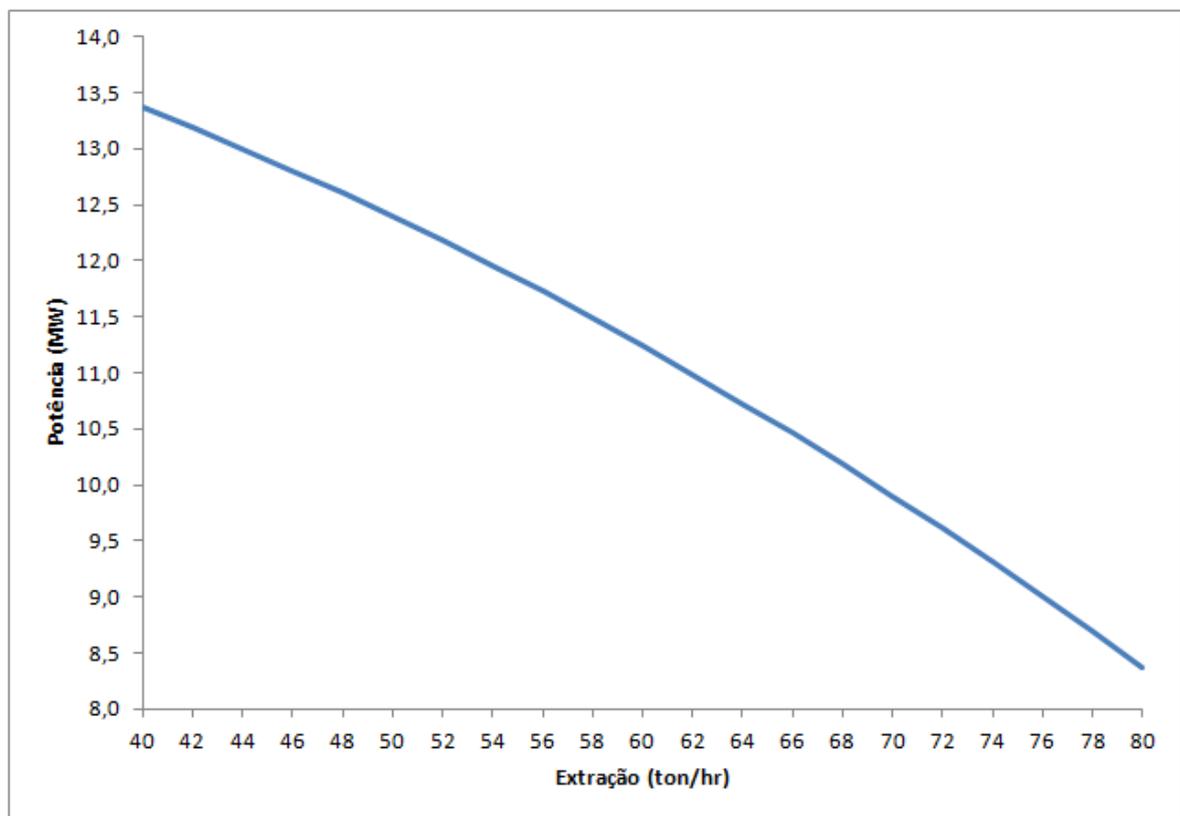


Figura 39: Relação entre vazão de extração e a potência da turbina.
Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

Ao dobrar a vazão de extração de 40 ton/h para 80 ton/h nota-se uma redução de 37% na geração da turbina. A relação entre a vazão de extração (Q_{ex}) e a potência é dada pela equação ($Pot = -0,0037Q_{ext}^2 - 0,168Q_{ext} + 13,538$) tendo $R^2 = 1$.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise técnica de como se comportam uma turbina a vapor e um condensador inseridos no contexto de uma central termelétrica em uma usina siderúrgica integrada. Além disso, também permitiu um estudo de caso em uma empresa do setor para obter dados reais do processo.

Os parâmetros de operação da central termelétrica em questão foram identificados através do sistema PIMS (*Plant Information Management System*), de manuais e desenhos técnicos disponibilizados pela empresa. Isso possibilitou a criação de um modelo computacional através do *software* Gatecycle™ e, a partir de então, foi possível prever e descrever o comportamento das máquinas diante cenários criados atrelados à rotina da usina em questão, respondendo à pergunta problema deste trabalho.

Foram apresentados os principais fatores que propiciam perda de geração de potência para o estudo de caso estabelecido, previu-se quantitativamente suas influências através das simulações e destacou-se os melhores pontos de operação para os equipamentos analisados.

A relação entre os parâmetros analisados para cada equipamento foi descrita através de equações e notou-se comportamentos esperados de acordo com a revisão bibliográfica. Dessa forma, foram atingidos o objetivo geral e os específicos.

Os resultados obtidos mostraram que um aumento da temperatura da água de resfriamento do condensador entre 15°C e 40°C (valores normalmente alcançados em situações extremas nas estações de verão e inverno) ocasiona um aumento de 152% na pressão do condensador e uma redução de 5% na potência da máquina. Foi observado também que a variação da vazão de água de resfriamento a temperatura constante de 400 ton/h a 2200 ton/h propicia uma redução de 87% na pressão do condensador e um aumento de 19% na potência entregue pela turbina. Ressaltando-se que quando o condensador trabalha com uma vazão abaixo de 700 ton/h há uma perda significativa na potência do sistema.

Uma análise realizada com base no coeficiente global de transferência de calor mostrou que ao variar seu valor entre 620 J/sm²K e 2559 J/sm²K a pressão no condensador é reduzida

em 88% e a potência da turbina é aumentada em 20%. Entretanto, notou-se que valores abaixo de $1008 \text{ J/sm}^2\text{K}$ devem ser evitados pois afetam de forma significativa a pressão no condensador e potência gerada.

Observou-se também que a elevação da pressão de entrada do vapor de 3,5 MPa a 5,9 MPa a temperatura constante propicia redução na potência da turbina em 1% e que o efeito do superaquecimento do vapor a pressão constante de 350°C a 480°C propicia 20% de aumento na potência da turbina.

Foram propostos outros pares termodinâmicos do vapor de entrada na turbina para comparação do estudo de caso, verificando uma melhor configuração para o par 6MPa e 480°C , esses similares aos de projeto da turbina a vapor.

Analisou-se o efeito da vazão de extração de vapor de 40 ton/h para 80 ton/h e notou-se uma redução de 37% na geração da turbina.

Por fim, o trabalho mostrou que com um *software* adequado tem-se inúmeras possibilidades de análise que podem auxiliar de forma satisfatória na melhoria da eficiência energética do processo.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Após a modelagem e simulações desenvolvidas no presente trabalho, podem ser sugeridas algumas propostas para continuidade em futuros trabalhos.

- Análise de outros possíveis cenários (reaquecimento, superaquecimento do vapor, trocador de calor aberto e fechado na regeneração) além dos investigados neste trabalho, variando outros parâmetros e percebendo suas influências na geração do ciclo.
- Criação de um modelo que englobe os demais equipamentos da área, como caldeiras, trocadores de calor e bombas a fim de analisar a interdependência dos mesmos.
- Tratar do problema proposto envolvendo uma análise econômica e predizer em valores os impactos que as perdas de geração podem causar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. Volume III, 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill. 1986.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill. 2006.

DÍEZ, P. F. **Turbinas de vapor**. Cantabria, Espanha (Apostila). Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Disponível em: <<http://www.diee.unican.es>>. Acesso em: 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional**. p. 155, 2015a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia no Setor Siderúrgico Brasileiro**. P. 89, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2024 - PDE**. p. 467, 2015b.

FAIRES, V. M.; SIMMANG, C. M. **Termodinâmica**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1983.

FERRAZ, João C; KUPFER, Devid; HAGUENAUER, Lia. **Made In Brasil: desafios competitivos para a indústria**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997/1996.

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

GAFFERT, G. A. **Centrais de vapor**. Buenos Aires: Editorial Reverté, 1946.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço: Processo siderúrgico**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--classificacoes.asp>>. Acesso em: 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A indústria do aço no Brasil e no mundo**. Instituto do Aço Brasil. Rio de Janeiro - RJ: 2013. 43 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço Brasil Informa** Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_Set14_web.pdf>. Acesso em: 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Números de Mercado**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_Set14_web.pdf>. Acesso em: 2017.

KERN, Donald Q. **Processos de transmissão de calor**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica**. Volume I, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V. P. F. M.; ARRIVABENE, L. F. **Siderurgia para não Siderurgistas**. Vitória: Associação Brasileira de Metais - ABM, 2003.

MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5. ed. England: John Wiley and Sons. 2006.

PORZIO, G. F. et al. **Reducing the energy consumption and CO2 emissions of energy intensive industries through decision support systems - An example of application to the steel industry**. Applied Energy, v. 112, p. 818–833, 2013.

SHAABAN, M.; NOR, K. M.; MEMBER, S. **Prospects of Cogeneration for the Iron and Steel Industry in Malaysia**. The 5th International Power Engineering and Optimization Conference, p. 6–7, 2011.

SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 7. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2009.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures**. 2016.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.