



**Carlos Thomaz Guimarães Lopes Junior**

**Análise Termodinâmica Comparativa entre  
um Ciclo Rankine Tradicional e um Inovador  
Utilizando Gases Residuais do Processo  
Siderúrgico como Combustível**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Professor José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro, 25 de Setembro de 2007



**Carlos Thomaz Guimarães Lopes Junior**

**Análise Termodinâmica Comparativa entre  
um Ciclo Rankine Tradicional e um Inovador  
Utilizando Gases Residuais do Processo  
Siderúrgico como Combustível**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Sérgio Leal Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Eloi Fernandez y Fernandez**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Professor Carlos Eduardo Reuther de Siqueira**

Petrobras / Universidade Católica de Petrópolis

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Setembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientar e da universidade.

### **Carlos Thomaz Guimarães Lopes Junior**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2000. No mesmo ano foi efetivado como Engenheiro da Promon Engenharia, onde atuou em projetos industriais ligados às áreas de geração de energia elétrica, óleo&gás, siderurgia, entre outros. Em 2002 participou do projeto da Usina Termelétrica de Três Lagoas (240 MW, ciclo simples). Em 2003, participou do projeto da Usina Termelétrica de Norte Fluminense (780 MW, ciclo combinado).

#### Ficha Catalográfica

Lopes Junior, Carlos Thomaz Guimarães

Análise termodinâmica comparativa entre um ciclo Rankine tradicional e um inovador utilizando gases residuais do processo siderúrgico como combustível / Carlos Thomaz Guimarães Lopes Junior ; orientador: José Alberto dos Reis Parise. – 2007.

122 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Energia. 3. Cogeração. 4. Geração de eletricidade. 5. Balanço térmico. 6. Ciclo Rankine. 7. Análise termodinâmica. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

## Dedicatória

Dedico este trabalho à memória dos meus avós

Rosemay Guimarães e Georges Guimarães

## **Agradecimentos**

À minha esposa Ana Carolina e meus filhos Carlos André e Ana Luiza pelo amor e paciência, aos meus pais Carlos Thomaz e Heloisa pela formação e apoio incondicional e ao meu irmão Gabriel pela amizade.

Ao meu orientador José Alberto dos Reis Parise pelo suporte e toda a orientação sem a qual este trabalho não poderia ser realizado.

Aos colegas da Promon Engenharia Kesavan Nair, Nelson Rocha, João Fontoura e Carlos Filizola pelo apoio e incentivo durante a elaboração desta Dissertação.

À Promon Engenharia por ter me cedido as horas necessárias para o desenvolvimento do curso de Mestrado.

À GE-Enter software pela seção da licença provisória do programa Gate Cycle ®.

## Resumo

Lopes Junior, Carlos Thomaz Guimarães; José Alberto dos Reis Parise (Orientador). **Análise Termodinâmica Comparativa entre um Ciclo Rankine Tradicional e um Inovador Utilizando Gases Residuais do Processo Siderúrgico.** Rio de Janeiro, 2007. 122p. MSc. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho realiza uma comparação entre o ciclo Rankine tradicional e uma nova proposta de ciclo Rankine para uma planta de cogeração na indústria siderúrgica. O ciclo inovador é caracterizado por um sistema de regeneração por injeção direta de vapor seguida de bombeamento bifásico substituindo o uso de pré-aquecedores como no ciclo tradicional. Para a simulação dos ciclos de potência é empregado o Software Gate Cycle. São simuladas e estudadas diversas alternativas de configuração para a aplicação da nova tecnologia. A melhor alternativa de configuração do ciclo inovador é então comparada com o ciclo tradicional por meio da aplicação das análises de Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. Observou-se, entretanto, pouca diferença no desempenho do ciclo tradicional e do ciclo modificado.

## Palavras-Chave

Energia ; Cogeração ; Geração de Eletricidade ; Balanço Térmico ; Ciclo Rankine ; Análise Termodinâmica.

## Abstract

Lopes Junior, Carlos Thomaz Guimarães; José Alberto dos Reis Parise (Advisor). **Thermodynamic Comparison between a Traditional Rankine Cycle with an Innovative Rankine Cycle Using Residual Gases from the Siderurgic Process.** Rio de Janeiro, 2007. 122p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work, a comparison between a traditional Rankine cycle and a proposed innovative Rankine cycle, for a cogeneration plant in the steel industry, is carried out. The innovative cycle is characterized by a regeneration system with direct steam injection followed by two-phase pumping, instead of the water pre-heaters used in the traditional cycle. Different configuration alternatives for the technology application were simulated and studied. The best alternative was then selected and compared with the traditional cycle using First and Second Laws of Thermodynamics analyses. Little difference was observed, however, between the traditional and the modified cycle performances.

## Key-Words

Energy ; Cogeneration ; Electricity Generation ; Heat Balance ; Rankine Cycle ; Thermodynamic Analysis.

## Sumário

<b><u>1</u></b>	<b>18</b>
<b><u>Introdução</u></b>	<b>18</b>
<u>1.1.</u>	19
<u>O Modelo do Setor Elétrico Brasileiro</u>	19
<u>1.2.</u>	23
<u>Panorama da Energia Termelétrica no Brasil</u>	23
<u>1.3.</u>	27
<u>O Ciclo Rankine</u>	27
<u>1.4.</u>	28
<u>Revisão Bibliográfica</u>	28
<u>1.5.</u>	32
<u>Organização do Trabalho</u>	32
<b><u>2</u></b>	<b>33</b>
<b><u>Descrição dos Sistemas Estudados</u></b>	<b>33</b>
<u>2.1.</u>	33
<u>Ciclo Rankine Tradicional</u>	33
<u>2.2.</u>	44
<u>Ciclo Rankine Inovador</u>	44
<b><u>3</u></b>	<b>49</b>
<b><u>Modelo Matemático</u></b>	<b>49</b>
<u>3.1.</u>	49
<u>Modelagem dos Componentes do Ciclo Convencional</u>	49
<u>3.2.</u>	58
<u>Modelagem Matemática do Ciclo Rankine Inovador</u>	58



<b><u>4</u></b>	<b>61</b>
<b><u>Simulação</u></b>	<b>61</b>
<b><u>4.1.</u></b>	61
<b><u>Descrição do Software Gate Cycle ®</u></b>	61
<b><u>4.2.</u></b>	62
<b><u>Condições Ambientais</u></b>	62
<b><u>4.3.</u></b>	63
<b><u>Combustível</u></b>	63
<b><u>4.4.</u></b>	65
<b><u>Dados de Entrada do Programa</u></b>	65
<b><u>4.5.</u></b>	65
<b><u>Premissas Comparativas</u></b>	65
<b><u>4.6.</u></b>	66
<b><u>Simulação do Ciclo Tradicional</u></b>	66
<b><u>4.7.</u></b>	70
<b><u>Simulação do Ciclo Inovador</u></b>	70
<b><u>5</u></b>	<b>100</b>
<b><u>Análise Comparativa</u></b>	<b>100</b>
<b><u>5.1.</u></b>	100
<b><u>Resultados para o Ciclo Rankine Tradicional</u></b>	100
<b><u>5.2.</u></b>	102
<b><u>Resultados para o Ciclo Rankine Inovador</u></b>	102
<b><u>6</u></b>	<b>104</b>
<b><u>Conclusões</u></b>	<b>104</b>

<a href="#"><u>7</u></a>	<b>108</b>
<a href="#"><u>Bibliografia</u></a>	<b>108</b>
<a href="#"><u>Apêndices</u></a>	<b>111</b>
<a href="#"><u>Apêndice 1- O Ciclo Rankine</u></a>	111
<a href="#"><u>Apêndice 2- Análise de Primeira Lei</u></a>	114
<a href="#"><u>Apêndice 3- Análise de Segunda Lei</u></a>	116

## Lista de Figuras

- Figura 01 - Figura 1-Estrutura da oferta interna de energia no Brasil e no mundo (extraído do BEN 2006, ano base 2005).
- Figura 02 - Esquema do Ciclo Rankine Tradicional.
- Figura 03 - Diagrama T vs S para o Ciclo Tradicional.
- Figura 04 - Esquema de uma caldeira aquotubular típica (Lora e Nascimento, 2004).
- Figura 05 - Corte de um turbina a vapor de carcaça única série A5/A9 da GE.
- Figura 06 - Esquema de uma turbina a vapor de grande porte.
- Figura 07 - Esquema de um condensador de dois passes.
- Figura 08 - Corte de uma bomba tipo can modelo VIC-L da Goulds Pumps.
- Figura 09 - Esquema de um trocador de calor tipo casco e tubo.
- Figura 10 - Esquema de um desaerador.
- Figura 11 - Esquema em corte de uma bomba horizontal multiestágios.
- Figura 12 - Esquema do ciclo Rankine inovador.
- Figura 13 - Diagrama T vs S para o ciclo Rankine inovador.
- Figura 14 - Esquema do volume de controle da caldeira para o balanço de energia.
- Figura 15 - Esquema do volume de controle da caldeira para o balanço de exergia
- Figura 16 - Esquema do volume de controle da turbina a vapor.
- Figura 17 - Esquema do volume de controle do condensador para o balanço de energia.

- Figura 18 - Esquema do volume de controle do condensador para o balanço de exergia.
- Figura 19 - Esquema do volume de controle da bomba de condensado.
- Figura 20 - Esquema do volume de controle do pré-aquecedor 1.
- Figura 21 - Esquema do volume de controle para o desaerador.
- Figura 22 - Esquema do volume de controle para o bomba de alimentação da caldeira.
- Figura 23 - Esquema do volume de controle para a válvula.
- Figura 24 - Esquema do volume de controle para o T de mistura 1.
- Figura 25 - Esquema da bomba bifásica 1.
- Figura 26 - Diagrama do ciclo Rankine tradicional.
- Figura 27 - Diagrama T vs S mostrando o procedimento de simulação da bomba bifásica.
- Figura 28 - Diagrama do ciclo modificado – Alternativa 1.
- Figura 29 - Diagrama T vs S da Alternativa 1.
- Figura 30 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura- Alternativa 1.
- Figura 31 - Gráfico de variação da eficiência energética vs título da mistura- Alternativa 1.
- Figura 32 - Diagrama do ciclo modificado – Alternativa 2.
- Figura 33 - Diagrama T vs S da Alternativa 2.
- Figura 34 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura- Alternativa 2.
- Figura 35 - Gráfico de variação da eficiência energética vs título da mistura- Alternativa 2.
- Figura 36 - Procedimento para definição do título da mistura no diagrama T vs S.

- Figura 37 - Diagrama do ciclo modificado- Alternativa 3.
- Figura 38 - Diagrama T vs S da Alternativa 3.
- Figura 39 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura 3- Alternativa 3.
- Figura 40 - Gráfico de variação da eficiência vs título da mistura 3- Alternativa 3.
- Figura 41 - Diagrama do ciclo modificado- Alternativa 4.
- Figura 42 - Diagrama T vs s da Alternativa 4.
- Figura 43 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura 4- Alternativa 4.
- Figura 44 - Gráfico de variação da eficiência vs título da mistura 4- Alternativa 4.
- Figura 45 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura 3- Alternativa 5.1.
- Figura 46 - Gráfico de variação da eficiência vs título da mistura 3- Alternativa 5.1.
- Figura 47 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura 3- Alternativa 5.2.
- Figura 48 - Gráfico de variação da eficiência vs título da mistura 3- Alternativa 5.2.
- Figura 49 - Gráfico de variação da potência mecânica líquida vs título da mistura 3- Alternativa 5.3.
- Figura 50- Gráfico de variação da eficiência vs título da mistura 3- Alternativa 5.3.
- Figura 51- Eficiências das alternativas em relação ao ciclo tradicional.
- Figura 52- Diagrama do ciclo da alternativa selecionada (5.1).
- Figura 53- Diagrama T vs S para a alternativa selecionada (5.1).

- Figura 54- Diagrama de fluxo de irreversibilidades para o ciclo Rankine tradicional.
- Figura 55- Diagrama de fluxo de irreversibilidades para o ciclo Rankine inovador.
- Figura 56- Diagrama T vs S- Comparação entre bombeamento bifásico e bombeamento de líquido.
- Figura 57 - Esquema Simplificado do Ciclo Rankine.
- Figura 58 - Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com superaquecimento.
- Figura 59 - Esquema de um ciclo Rankine com reaquecimento.
- Figura 60 - Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com reaquecimento.
- Figura 61 - Esquema do ciclo Rankine com regeneração.
- Figura 62 - Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com regeneração.
- Figura 63 - Esquema de um volume de controle.
- Figura 64 - Esquema de um volume de controle sofrendo um processo real- balanço energético.
- Figura 65 - Esquema de uma máquina térmica reversível.
- Figura 66 - Esquema de um volume de controle sofrendo um processo real- balanço de exergia.

## **Lista de Tabelas**

- Tabela 01- Cenários possíveis de crescimento da matriz energética (Britto e Figueiredo, 2005).
- Tabela 02 - Características do gás de alto forno.
- Tabela 03 - Características do gás de coqueria.
- Tabela 04 - Características do gás de mistura.

- Tabela 05 - Propriedades termodinâmicas das correntes do ciclo Rankine tradicional.
- Tabela 06 - Tabela resumo de resultados da Alternativa 1.
- Tabela 07 - Resumo de resultados da Alternativa 2.
- Tabela 08 - Resumo de resultados da Alternativa 3.
- Tabela 09 - Resumo de Resultados da Alternativa 4.
- Tabela 10 - Resumo de Resultados da Alternativa 5.1.
- Tabela 11 - Resumo de Resultados da Alternativa 5.2.
- Tabela 12 - Resumo de Resultados da Alternativa 5.3.
- Tabela 13 - Comparação das Alternativas.
- Tabela 14 - Propriedades termodinâmicas da alternativa selecionada (5.1).
- Tabela 15 - Resumo dos resultados para o ciclo tradicional.
- Tabela 16 - Resumo dos resultados para o ciclo inovador.

## Nomenclatura

$E$	Exergia [kJ]
$\dot{E}$	Fluxo de exergia total [kW]
$\dot{E}_e$	Taxa de exergia associada ao influxo de massa [kW]
$\dot{E}^q$	Taxa de exergia devida à transferência de calor para o volume de controle [kW]
$\dot{E}_s$	Taxa de exergia associada ao efluxo de massa [kW]
$e_c$	Exergia específica relativa a energia cinética [kJ/kg]
$e_f$	Exergia física específica [kJ/kg]
$e_p$	Exergia específica relativa a energia potencial [kJ/kg]

$e_q$	Exergia química específica [kJ/kg]
$h$	Entalpia específica [kJ/kg]
$I$	Irreversibilidade [kJ]
$\dot{I}$	Taxa de irreversibilidade [kW]
$\dot{m}$	Vazão mássica de uma corrente [kg/h]
$\dot{m}_e$	Vazão mássica entrando no Volume de Controle [kg/h]
$\dot{m}_s$	Vazão mássica saindo do Volume de Controle [kg/h]
$P_0$	Pressão do ambiente [bar]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior [kJ/kg]
$PCS_{gm}$	Poder calorífico superior do gás de mistura [kJ/kg]
$\dot{Q}_F$	Taxa de rejeito de calor do aquecedor de combustível [kW]
$\dot{Q}_R$	Taxa de rejeição de calor no condensador [kW]
$\dot{Q}_r$	Taxa de Calor Fornecido ao Volume de Controle [kW]
$[(q_0)_{rev}]_1^0$	Calor específico fornecido em um processo reversível [kJ/kg]
$\dot{Q}_{vc}$	Taxa de Calor Fornecido ao Volume de Controle [kW]
$s$	Entropia específica [kJ/kgK]
$T_F$	Temperatura do Reservatório Frio [°C]
$T_Q$	Temperatura do Reservatório Quente [°C]
$T_r$	Temperatura da Fonte de Calor para o Volume de Controle [°C]
$T_0$	Temperatura do Ambiente [°C]
$\dot{W}_t$	Taxa de Realização de Trabalho pela Turbina [kW]
$\dot{W}_s$	Taxa de Consumo de Trabalho pelo Soprador [kW]
$\dot{W}_{bc}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba de Condensado [kW]



$\dot{W}_{ba}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba de Alimentação da Caldeira [kW]
$\dot{W}_e$	Potência Elétrica Gerada [kW]
$\dot{W}_{b1}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba Bifásica 1 [kW]
$\dot{W}_{b2}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba Bifásica 2 [kW]
$\dot{W}_{b3}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba Bifásica 3 [kW]
$\dot{W}_{b4}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba Bifásica 4 [kW]
$\dot{W}_{b5}$	Taxa de Consumo de Trabalho pela Bomba Bifásica 5 [kW]
$W_{rev}$	Trabalho reversível [kJ]
$W_{vc}$	Trabalho Realizado pelo Volume de Controle [kJ]
$\dot{W}_{vc}$	Taxa de Trabalho Realizado pelo o Volume de Controle [kW]
$[(w_x)_{rev}]_1^0$	Trabalho específico reversível realizado [kJ/kg]

## Símbolos Gregos

$\delta$	Taxa de irreversibilidade em relação à irreversibilidade total
$\eta$	Eficiência Energética
$\eta_{Carnot}$	Eficiência de Carnot
$\eta_g$	Eficiência do Gerador
$\varphi$	Razão da exergia química pelo poder calorífico superior
$\Psi$	Eficiência Exergética