

# 1

## Introdução

Esta dissertação tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre duas alternativas de configuração de ciclos Rankine. A primeira é o ciclo tradicional com pré-aquecimento da água de alimentação de caldeira. A segunda, um ciclo inovador com sistema de regeneração composto por “degraus” de injeção de vapor seguida de bombeamento bifásico. São estudadas diversas alternativas de configuração, desde a substituição de um pré-aquecedor pela injeção de vapor/bombeamento bifásico, até a substituição de todos os pré-aquecedores. Portanto, o ciclo inovador é apresentado como uma proposta de “*retrofit*” para uma planta operando em um ciclo Rankine convencional. Uma vez determinada a alternativa de melhor eficiência, esta é comparada através de uma análise de Segunda Lei da Termodinâmica com o ciclo tradicional.

A busca por melhores eficiências em sistemas de geração de energia é o que tem permitido a evolução de pesquisas tecnológicas nas áreas termodinâmica e metalúrgica, entre outras. Estas pesquisas vêm sendo aprofundadas na medida em que se percebe que os recursos naturais são cada vez mais escassos e devem ser aproveitados da melhor forma possível.

Os aspectos econômico e ambiental têm importância fundamental nos dias atuais e a perspectiva é que se tenha uma nova configuração da matriz energética mundial nas próximas décadas, passando de uma matriz à base de combustíveis fósseis para uma matriz à base de fontes renováveis.

Nesse contexto, é importante a difusão do conhecimento sobre novas técnicas de geração de energia ampliando, assim, as possibilidades para os projetistas dentro dessa nova realidade. Devem-se conhecer os mecanismos pelos quais a energia e os recursos são degradados, aprender a julgar quais sistemas trabalham melhor e sistematicamente melhorar os projetos de modo a reduzir o consumo de recursos naturais e prevenir resíduos de prejudicarem o meio ambiente.

O ciclo Rankine, ou ciclo de água/vapor, é largamente utilizado em plantas de geração de energia nos dias de hoje e certamente continuará sendo no futuro. Neste trabalho, uma planta típica operando em um ciclo Rankine sem reaquecimento e com

sistema de regeneração por pré aquecimento da água, é simulada. Chamar-se-á este de “ciclo Rankine tradicional”. O ciclo é então modificado, substituindo-se os pré-aquecedores por “degraus” de injeção direta de vapor seguida de bombeamento bifásico. Chamar-se-á este de “ciclo Rankine inovador”.

O estudo aqui desenvolvido tem como propósito realizar uma comparação, à luz da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, aplicada às duas alternativas de tecnologia para o aproveitamento do poder calorífico dos gases residuais do processo siderúrgico. As alternativas mencionadas são: 1- o ciclo Rankine tradicional com pré-aquecedores de água de alimentação de caldeira e; 2- o ciclo Rankine utilizando etapas de injeção de vapor na água de alimentação e bombeamento bifásico, o qual será chamado de “ciclo Rankine inovador”.

A motivação para o trabalho é a crescente demanda por projetos de geração termelétrica com altas eficiências, investimentos adequados e de baixo impacto ambiental.

## 1.1.

### **O Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**

O setor de energia elétrica apresentou grande desenvolvimento nas décadas de rápido crescimento econômico do País, comandado pelo Ministério das Minas e Energia e pelo sistema Eletrobrás e abrangendo as áreas de geração, transmissão e distribuição. A farta disponibilidade de recursos hídricos levou naturalmente o Brasil a ser um dos líderes mundiais em hidreletricidade, possibilitando a construção e operação de gigantescas unidades em todo o território nacional, com amplo domínio desta tecnologia (Lora e Nascimento, 2004).

O Setor Elétrico Brasileiro vem passando por um processo de transformação, desde o início das privatizações na década de 90. Com a entrada do capital privado no setor tornou-se necessária a introdução de novos agentes de modo a regularizar a operação do sistema nesse novo ambiente. Dentre estes novos agentes pode-se destacar a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e o ONS (Operador Nacional do Sistema) (Corrêa Neto, 2001).

Em 1996, com o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro, foram definidas as condições básicas para o novo modelo pelo MME (Ministério das Minas e

Energia), incluindo a criação da ANEEL e do ONS, do Mercado Atacadista de Energia (MAE) e de uma operadora, a Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (ASMAE) onde fossem realizadas as transações de compra e venda de energia elétrica (Lora e Nascimento, 2004).

Com a conclusão do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RESEB), em 1998, estavam lançadas as bases do novo modelo do setor elétrico brasileiro.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada em 1996 pela Lei nº 9.427, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, de acordo com a legislação e em conformidade com as diretrizes e as políticas do governo federal (Lora e Nascimento, 2004).

De acordo com o novo modelo, a produção de energia elétrica compreende três modalidades de exploração: produção pelo serviço público, produção independente e autoprodução.

A produção independente, em decorrência da criação do Produtor Independente de Energia – PIE no novo modelo, possibilita a entrada de novos investidores com autonomia para realização de contratos bilaterais de compra e venda, de forma competitiva e com flexibilidade para consolidação de suas estratégias neste segmento (Lora e Nascimento, 2004).

No segmento de distribuição de energia elétrica, cujo processo de privatização teve início nos anos 1990, a participação do capital privado já é majoritária. No setor de transmissão, o processo de licitação das linhas de transmissão, que constituem a rede básica, foi iniciado à mesma época das privatizações das empresas de distribuição e continua em andamento (Lora e Nascimento, 2004).

Em 1997, regulamentou-se o acesso às redes de transmissão, o que garantiu que o PIE pudesse vender excedentes de eletricidade a terceiros, independentemente das concessionárias locais, levando em consideração a dimensão do consumo e o nível de tensão das respectivas conexões.

Atualmente, todas as concessionárias têm assinado junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o contrato de concessão, permissão ou autorização para

distribuição ou geração de energia elétrica, no qual estão definidas as respectivas áreas de atuação ou características dos empreendimentos hídricos ou térmicos, bem como os direitos, deveres e obrigações legais junto ao Poder Concedente, à ANEEL, à outras instituições legais, e em relação aos clientes livres ou cativos. Os contratos de concessão, permissão ou autorização para distribuição prevêem reajustes anuais da tarifa, além da Revisão Tarifária Periódica, que ocorre a cada quatro anos (Anônimo, 2007a).

As condições gerais de fornecimento de energia elétrica das concessionárias de serviço público de distribuição, junto aos seus consumidores cativos e livres, são estabelecidas pela Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000, que trata das estruturas tarifárias convencionais e diferenciadas, dos pedidos de fornecimento, nível de tensão, ponto de entrega, da unidade consumidora, da classificação e cadastro, dos contratos, faturamento e outros relacionados ao atendimento. (Anônimo, 2007a)

Em síntese, o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro, acima referido, objetivava, em grandes linhas, a retirada do setor público como grande investidor na área elétrica e abria espaços importantes para a participação da iniciativa privada. Esta estratégia levou em conta as limitações orçamentárias do Estado, o que poderia gerar crescentes déficits de energia que colocariam o crescimento econômico em risco. Foram privatizadas grande parte das empresas de distribuição, e algumas partes do sistema de geração. Foi concebido o mercado atacadista de energia bem como a figura do Produtor Independente de Energia. Nesse quadro, a criação da ANEEL substituindo o antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, e de outras Agências, como ANATEL e ANP, procurava colocar os diversos interesses de governo, sociedade e consumidores dentro do órgão regulador, que trataria de sua adequada conciliação. Entretanto, o novo modelo, concebido no contexto da RESEB, não apresentou os resultados esperados em termos de modicidade tarifária, bem como em termos da expansão da oferta de energia elétrica, tendo sido um dos fatores que levaram ao racionamento do período 2001-2002.

Assim, em 15 de março de 2004, por meio da Lei nº 10.848, mudanças relevantes foram instituídas, caracterizando uma grande reestruturação no Setor Elétrico, cujos principais aspectos são (Anônimo, 2007a):

- A licitação pública de projetos de geração incluirá a oferta de energia referente a novos empreendimentos e à geração existente, através de leilões públicos,

para o atendimento do mercado das concessionárias de distribuição nos próximos cinco anos;

- A comercialização de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição é permitida somente no ambiente de contratação regulada;
- Geradores, produtores independentes e comercializadores atuam no ambiente de contratação regulada e livre, por meio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE);
- Criação de novos agentes institucionais: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Comitê de Monitoramento do Sistema Elétrico (CMSE) e Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) , em substituição à ASMAE;
- Obrigatoriedade em desverticalizar as empresas de energia elétrica em termos de suas atividades de distribuição, geração e transmissão, além do descruzamento societário, isto é, a distribuidora não pode ter participação em outras empresas.

(Anônimo, 2007A)

A Lei n 10.848 de 15 de março de 2004 insere-se em um contexto diferente daquele que norteou o RESEB de 1998. Retoma para o Ministério das Minas e Energia os papéis de agente de planejamento e de Poder Concedente (parte das funções realocadas nos anos anteriores), muito embora estejam mantidos os principais elementos definidores do Projeto de Reestruturação. Outro novo elemento no quadro geral do setor elétrico consiste na crescente conscientização da importância do meio ambiente no presente e futuro do Brasil. No passado, considerações ambientais tiveram reduzido peso na concepção e construção das grandes barragens brasileiras; nos últimos dez anos, todavia, os projetos do setor elétrico passaram a subordinar-se ao crivo das restrições ambientais. O maior desafio presente é o de dotar o País das condições institucionais que permitam uma evolução do setor elétrico em sintonia com as demandas de médio e longo prazo bem como com as referidas restrições ambientais, de maneira a atender com folga à demanda requerida pelo necessário crescimento econômico e social, a partir do uso do potencial hidráulico nacional. Neste contexto, o papel das usinas termelétricas passará a ser crescente, tanto nos regimes de complementação, quanto na geração de base, pois os novos aproveitamentos hidrelétricos a serem explorados, em particular aqueles da região Norte, não deverão contemplar grandes reservatórios de acumulação pluri-anual.

## 1.2.

### Panorama da Energia Termelétrica no Brasil

#### 1.2.1.

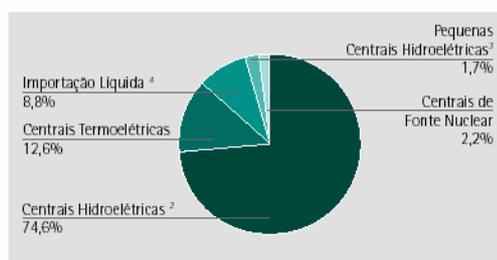
#### A Matriz Energética Brasileira

Atualmente, a matriz energética está suprindo a demanda do país (cerca de 98 GW) mas sem alternativa em caso de baixa dos reservatórios das hidrelétricas. A segurança do sistema de geração e oferta de energia é um fator limitante para o crescimento da indústria do país. Daí a necessidade de investimento em projetos de geração de energia elétrica.

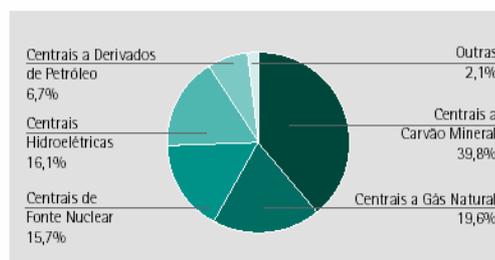
O Brasil possui um total de **1.606** empreendimentos em operação, gerando **97.756.555** kW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de **25.968.486** kW na capacidade de geração do País, proveniente dos **84** empreendimentos atualmente em construção e mais **506** outorgadas (ANEEL, 2007).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2006 (MME, 2006), a participação da energia termelétrica na oferta interna energética do Brasil é de 12,6 % (Figura 1), enquanto que no mundo, esta fonte de geração representa 59,4% (19,6% referente a centrais a gás natural e 39,8% a centrais a carvão mineral) de toda a produção de energia.

■ Gráfico 1 | Energia Elétrica  
Estrutura da oferta interna <sup>1</sup>  
Brasil 2005



■ Gráfico 2 | Energia Elétrica  
Estrutura da oferta segundo a Fonte de Geração  
Mundo 2005



<sup>1</sup> Inclui centrais elétricas autoprodutoras.

<sup>2</sup> Centrais hidroelétricas são aquelas com potência superior a 30 MW.

<sup>3</sup> Pequenas centrais hidroelétricas são aquelas com potência igual ou inferior a 30 MW.

<sup>4</sup> A importação inclui a parcela paraguaia de Itaipu.

Figura 1-Estrutura da oferta interna de energia no Brasil e no mundo (extraído do BEN 2006, ano base 2005)

A geração de energia por termelétricas assumiu um papel importante na estratégia de composição da matriz energética brasileira a partir de 2001, com a crise do “apagão”, quando os níveis dos reservatórios das hidrelétricas baixaram reduzindo a oferta de energia hidrelétrica. Como esta fonte representa 74,6% da capacidade de energia elétrica do país, a diversificação da matriz energética tornou-se uma prioridade e com isso foi criado o Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT).

A geração termelétrica a partir do gás natural surgiu como alternativa para suprir o déficit de energia, visto que as centrais termelétricas exigem prazos de implementação e investimentos menores que as hidrelétricas, junto com baixo nível de emissões.

Através do Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), o governo forneceu subsídios para que o investimento em plantas termelétricas fosse economicamente interessante, especialmente as de ciclo combinado (Brayton-Rankine) (Oliveira, 2006).

Com a finalização do gasoduto Brasil-Bolívia e com a produção da baía de Campos, a oferta de gás natural estava garantida permitindo a viabilidade de implementação das centrais de geração a partir do gás natural. No entanto, esta situação se modificou recentemente em consequência dos últimos incidentes envolvendo Brasil e Bolívia (Oliveira, 2006). Com a possibilidade de falta de gás boliviano, caminha-se para uma aceleração do aumento da produção própria, buscando a auto-suficiência do país..

### **1.2.2.**

#### **Cogeração em Siderurgia**

Muitas vezes os processos industriais geram resíduos que podem ser aproveitados para a geração de energia adicional. É a chamada cogeração, que nas duas últimas décadas passou a ser utilizada com frequência.

As siderúrgicas aproveitam, há tempos, os gases resultantes dos seus processos para a geração de energia elétrica e de vapor de processo, elemento essencial em várias áreas da produção de aço. Esta recuperação de energia pode reduzir em até cerca de U\$ 15 o preço da tonelada de aço (Jardanovski, 2004).

A cogeração na indústria siderúrgica vem sendo utilizada como uma maneira de

aproveitar os gases de alto forno, de coqueria e de aciaria que eram normalmente emitidos para a atmosfera. O aproveitamento destes gases, ao mesmo tempo que gera energia e vapor de processo, também é importante do ponto de vista ambiental, pois os gases, após a queima na caldeira e a troca de calor com a água/ vapor, apresentam temperatura mais baixa e menor concentração de CO<sub>2</sub> e de outros gases poluentes do que se fossem liberados diretamente para a atmosfera.

Existem formas diferentes de se aproveitar a energia dos gases. Por exemplo, existem as chamadas turbinas de topo de alto fornos, que queimam o gás de alto forno utilizando ar comprimido como comburente em uma câmara de combustão e expandem os gases de combustão em uma turbina propriamente dita, gerando energia elétrica no topo da chaminé do alto forno.

Nas centrais termelétricas da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), o uso dos gases de coqueria e de alto-forno como combustíveis proporcionou à usina total autonomia energética, com 30 MW de excedente de produção. A prioridade é o acionamento dos sopradores e a produção de vapor de processo. A geração de energia elétrica adicional é comercializada com as distribuidoras (Jardanovski, 2004).

Já a Usiminas está construindo uma nova central termelétrica que vai gerar 60 MW, o que representa um quarto de seu consumo total, queimando gás de alto forno em uma caldeira para gerar vapor e acionar uma turbina a vapor. A siderúrgica, que já tem uma unidade de 60 MW operando, elevará seu índice de auto-suficiência para 50% com a construção da nova unidade (Guimarães, 2007).

### **1.2.3.**

#### **Perspectivas para o Futuro**

O interesse por energias renováveis vem aumentando à medida que o aquecimento global e seus efeitos começam a ser perceptíveis. A geração a partir de fontes renováveis vem surgindo como grande alternativa aos combustíveis fósseis e deve, a médio e longo prazo, aumentar significativamente sua participação na matriz energética mundial.

No entanto, a geração de energia elétrica a partir dos bio-combustíveis em larga escala ainda não é viável a curto prazo, pois demanda uma área de plantação muito extensa além de um amadurecimento da tecnologia.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2006 (Patusco, 2006), a geração por termelétricas (13,9 TWh) em 2005 caiu 6,7 % em relação a 2004, enquanto que a geração por centrais hidrelétricas aumentou 5,3 %. Isto é o reflexo do baixo custo da energia gerada por centrais hidrelétricas, amortizadas em relação ao custo da energia gerada por centrais termelétricas, as quais, além do custo de implantação, têm o custo do combustível atrelado ao seu preço final.

Dois cenários podem ser traçados sobre a perspectiva de crescimento da matriz energética para os próximos anos. No cenário conservador, assume-se que somente as usinas sem restrições judiciais entrarão em operação conforme o previsto. Já no cenário otimista, além destas usinas, as com leves restrições irão cumprir seu prazo de implantação (Britto e Figueiredo, 2005).

<b>Previsão para Capacidade Instalada em MW</b>				
	<b>Conservadora</b>	<b>Taxa Anual de Crescimento</b>	<b>Otimista</b>	<b>Taxa Anual de Crescimento</b>
2005	93,8	3,40	94,7	4,43
2006	97,9	4,44	106,2	12,10
2007	98,3	0,39	108,6	2,29
2008	98,3	0,00	109,6	0,95
2009	98,3	0,00	110,2	0,53

Tabela 1- Cenários possíveis de crescimento da matriz energética (Britto e Figueiredo, 2005)

No cenário otimista, o crescimento da capacidade instalada nos próximos anos (2008 e 2009) será de 1,6 GW enquanto que no cenário pessimista não haverá crescimento significativo.

No entanto, com a recente licença ambiental prévia concedida para as hidrelétricas do Rio Madeira (com previsão de entrada em operação em 2012-2013), a matriz terá uma capacidade extra de 6.450 MW, o que pode evitar o risco de racionamento na próxima década.

### 1.3.

#### O Ciclo Rankine

As dificuldades práticas na compressão do vapor seco no ciclo de Carnot levaram ao ciclo Rankine. Desde então, o ciclo concebido pelo escocês William John M. Rankine, este vem sendo amplamente utilizado em plantas de geração termelétrica a vapor, até os dias de hoje.

A presente dissertação é dedicada ao estudo de dois tipos de ciclo Rankine, o clássico, com pré-aquecimento da água de alimentação (regeneração) e uma nova proposta, o ciclo Rankine utilizando injeção de vapor e compressão bi-fásica. Este último será descrito mais detalhadamente no item 2.2.

A eficiência típica das plantas utilizando o ciclo Rankine convencional real está da faixa entre 30 a 40% (razão entre a potência líquida gerada pelo ciclo e o calor adicionado). Plantas mais modernas, que utilizam reaquecimento e regeneração, produzem vapor em condições supercríticas, com temperatura de 600 °C e pressão de 350 bar e chegam a obter eficiências de 48 a 49 % (El Wakil, 1984).

O ciclo Rankine inovador, objeto de análise deste trabalho, consiste na substituição dos pré-aquecedores de água por pontos de injeção de vapor seguidos de bombeamento bifásico. Com isso obtêm-se menores irreversibilidades pois a transferência de calor é um processo mais irreversível do que o aproveitamento do trabalho realizado sobre as bombas bifásicas (Cunningham e Briesch, 2005).

A patente do ciclo inovador é depositada pela Siemens Corporation (Intellectual Property Department). No capítulo 2, tanto o ciclo inovador como o ciclo tradicional, utilizado como base de comparação, serão descritos em detalhes.

As formas de otimização do ciclo Rankine e um resumo da teoria da termodinâmica são apresentados no Apêndice 1.

#### 1.4.

#### Revisão Bibliográfica

Nos parágrafos abaixo são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos na área de análise termodinâmica de ciclos térmicos. Não existem trabalhos publicados especificamente sobre a tecnologia de injeção de vapor seguida de bombeamento bifásico no sistema de regeneração de termelétricas. Isto pode ser explicado pelo fato de a patente (Cunningham e Briesch, 2005) ser relativamente recente. Portanto, os trabalhos a seguir abrangem aspectos gerais do presente trabalho.

Dentre os trabalhos disponíveis na literatura, sobre a termodinâmica da geração de energia elétrica, tem-se:

El-Wakil (1984), que detalha as tecnologias de geração de energia por termelétricas. São detalhados os aspectos construtivos dos principais equipamentos e sistemas que compõem uma planta típica de geração termelétrica. Ciclos Rankine, Brayton e combinados Brayton-Rankine são os principais objetos de estudo porém também são abordados os princípios da geração de energia a partir de energia nuclear, bem como as tecnologias de geração a partir de fontes renováveis de geração (eólica, solar, geotérmica e dos oceanos). Alternativas de incremento da eficiência (reaquecimento e regeneração) do ciclo Rankine são apresentadas assim como métodos de otimização. Em especial destaca-se aqui uma discussão sobre o posicionamento dos pré-aquecedores da água de alimentação. El-Wakil (1984) demonstra que as pressões de extração de vapor da turbina devem ser selecionadas de maneira que a diferença de temperatura obtida nos pré-aquecedores seja igual à diferença entre a temperatura de evaporação na caldeira e a temperatura de condensação no condensador dividida pelo número de pré-aquecedores mais um.

Bohem (1987) apresenta os principais aspectos de projeto de sistemas térmicos tais como a seleção do fluido de trabalho, alternativas tecnológicas, avaliação econômica e análise de viabilidade. A abordagem de Boehm (1987) é mais prática incluindo um capítulo sobre estimativas de custo preliminar de equipamentos e outro de sugestões de projeto.

Ampliando o espectro de estudo, Lora e Nascimento (2004) abrangem desde a estrutura modelo do setor elétrico brasileiro até a descrição das tecnologias e

modalidades de geração termelétrica. Todas as fases de estruturação de um projeto de uma termelétrica são abordadas, incluindo desde o planejamento, projeto, até a operação da planta. Aspectos teóricos, técnicos, econômicos, legais e ambientais, relativos ao projeto e operação de centrais termelétricas, são apresentados e discutidos em detalhe.

Diversos trabalhos voltados à análise do desempenho de centrais termelétricas têm sido publicados. Kotas (1985), em uma obra referencial, propõe um método de análise exergética para plantas termelétricas. O método é baseado no estudo da degradação da exergia em processos de geração de energia elétrica. A técnica de análise é baseada na Segunda Lei da Termodinâmica e consiste na avaliação do balanço exergético de um determinado sistema buscando identificar os seus pontos fracos. O diagrama de Grassmann é utilizado para representar graficamente o fluxo da exergia através do processo. Aplicações termoeconômicas do método são apresentadas e discutidas. Este método serviria de base para os estudos termoeconômicos de Lozano e Valero (1993), que desenvolveram a teoria estrutural da termoeconomia onde propõem um método padrão para a avaliação termoeconômica de sistemas de energia. A teoria é baseada na Segunda Lei da Termodinâmica e no conceito de custo aplicado à exergia, permitindo a análise do processo de formação do custo. São apresentados os métodos de avaliação pelo custo médio e pelo custo marginal. O último é analisado em detalhe sendo apresentando todo o desenvolvimento da metodologia.

Fontoura (1990) realizou a simulação de uma planta de cogeração com ciclo combinado estudando diversas possíveis configurações e analisando através da aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica. Modulações de carga e recursos adicionais como a injeção de vapor na turbina a gás e a queima suplementar de combustível também são objeto de análise.

Zhang et al (2006) realizam uma análise de custo da exergia para uma planta termelétrica à carvão. O trabalho se baseia na teoria estrutural da termoeconomia de Valero et al (1993), particularmente no método pelos custos marginais, para avaliar a distribuição e aproveitamento dos recursos através da planta. O estudo sustenta que o custo da irreversibilidade é mais adequado que o custo da exergia para quantificar e representar o desempenho da planta.

Borgert Junior (2003) apresenta um estudo exercoeconômico da utilização de

um ciclo de absorção para geração de energia adicional. O calor residual de uma planta de cogeração existente é reaproveitado para fornecer calor ao novo ciclo de potência por absorção. São estudados duas alternativas: o ciclo Rankine (utilizando uma mistura de água/amônia) e o ciclo Kalina. Este último é um ciclo projetado especialmente para a geração de potência com o uso da mistura água/amônia como fluido de trabalho. Para a avaliação econômica foi utilizada a teoria dos custos exergéticos médios de Lozano e Valero (1993) buscando otimizar o custo da potência gerada. O trabalho mostra que o custo da potência gerada (em relação à planta instalada) caiu 3,06% no caso do ciclo Rankine e 3,14% para o ciclo Kalina.

Vieira (2003) aplica o método de análise exergoeconômica para a Usina Termelétrica de Figueira (ciclo Rankine utilizando carvão mineral pulverizado como combustível). Através da teoria dos custos da exergia de Lozano e Valero (1993), é feito um diagnóstico da operação da planta, localizando e quantificando as irreversibilidades. A partir daí, o autor identifica as principais fontes de irreversibilidade da planta e a influência de cada subsistema na composição do custo da eletricidade.

Santos (2004) produz uma análise termoeconômica para uma planta de cogeração composta por um motor, acionado a gás natural, e um sistema de refrigeração por absorção, acionado pelos gases de exaustão do motor. A análise é feita em duas etapas: primeiramente, é feita a análise exérgica e, posteriormente, é desenvolvida a análise termoeconômica pelo método da alocação de custos à exergia desenvolvido por Lozano e Valero (1993).

Borelli (2005) propõe um algoritmo capaz de fornecer o custo da energia elétrica para diversas configurações de ciclos combinados. Faz-se uso da termoeconomia para valorar e alocar o custo da degradação da exergia ao longo dos processos. A modelagem matemática é desenvolvida para configurações com três níveis de pressão na caldeira de recuperação e condensação total do vapor. A análise termoeconômica é feita para uma usina de ciclo combinado do tipo 2 x 1 (duas turbinas a gás e uma turbina a vapor).

Saleh et al (2005) realizam uma pesquisa sobre possíveis fluidos de trabalho para o ciclo Rankine orgânico. As substâncias estudadas são em sua maioria, fluidos refrigerantes. O estudo é feito para ciclos subcríticos e supercríticos e as eficiências para cada fluido são calculadas. As maiores eficiências foram encontradas para o n-hexano (13%) para o ciclo subcrítico e para o R290 (7,39%) para o ciclo supercrítico.

Vijayaraghavam e Gaswami (2005) investigam a possibilidade de inserção de um estágio de destilação térmica (similar ao do ciclo Kalina) em um ciclo Rankine combinado com um ciclo de refrigeração por absorção. O objetivo é maximizar o aproveitamento dos recursos energéticos. O ciclo é proposto para aplicação em fontes de calor de baixa temperatura (solar, geotérmica, resíduos industriais), tendo como propósito principal a geração de energia. O estudo baseia-se na análise de Segunda Lei para estudar as modificações na configuração do ciclo e realizar a comparação com o ciclo básico. Um aumento significativo de 25% na eficiência do ciclo foi obtido com a nova configuração.

Bassily (2002), alega que a utilização de vapor saturado no pré-aquecimento da água de alimentação de caldeira pode elevar a eficiência do ciclo em até 2,5%. O sistema considera um ciclo Rankine com reaquecimento em que o vapor superaquecido de extração para pré-aquecimento troca calor com o vapor saturado para reaquecimento. O vapor para pré-aquecimento deixa o trocador na condição de saturação e troca calor agora com a água de alimentação da caldeira. Segundo o autor, com menores diferenças de temperatura entre a água de alimentação e o vapor de pré-aquecimento, a irreversibilidade do ciclo diminui e menores vazões de extração de vapor podem ser utilizadas ocasionando uma quantidade maior de vapor disponível para expansão na turbina.

Neto (2001) desenvolve uma análise de viabilidade técnico-econômica para uma planta de cogeração utilizando etanol gaseificado proveniente do bagaço de cana como combustível. O processo de gaseificação do etanol é apresentado como o grande desafio tecnológico para a viabilização de sistemas de cogeração utilizando o bagaço de cana como insumo.

Assim como os trabalhos descritos acima, esta dissertação busca ampliar o conhecimento no âmbito da análise de sistemas térmicos apresentando uma nova possibilidade de configuração do ciclo Rankine com ganhos na geração de energia elétrica e na eficiência global do ciclo.

O presente trabalho desenvolve um estudo comparativo, baseado na Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, entre uma tecnologia conhecida e amplamente dominada e uma nova alternativa de regeneração para ciclos Rankine. Com isso pretende trazer à luz esta nova tecnologia e discutir as suas vantagens e

desvantagens em relação ao ciclo tradicional.

## 1.5.

### **Organização do Trabalho**

No capítulo 2 são descritos os dois tipos de ciclo Rankine, objetos de estudo deste trabalho. O capítulo 3 apresenta o modelo matemático utilizado na comparação entre os dois sistemas. O capítulo 4 mostra a metodologia de simulação utilizada e a sua aplicação para cada alternativa de configuração. No capítulo 5 são apresentados os resultados da comparação. Por fim, o capítulo 6 comenta os resultados obtidos e apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.