

Proposta de Repotenciamento em Sistemas de Geração de Potência na Indústria Siderúrgica Brasileira¹

Marcelo Modesto¹

Sílvia Nebra²

Tsutomo Morimoto³

Resumo:

O uso racional da energia em todos os setores produtivos no Brasil tornou-se de primeira necessidade, principalmente após o racionamento energético no ano de 2001. Este trabalho tem como proposta avaliar uma proposta de repotenciamento para o sistema de geração de potência proposto para a Companhia Siderúrgica de Tubarão. O atual sistema é baseado no ciclo Rankine que utiliza gases siderúrgicos do processo de produção de aço, gás de alto forno (BFG) e gás de coqueria (COG) produzindo potência elétrica e eventualmente vapor para processo. A proposta apresentada baseia-se na utilização de um ciclo combinado, composto de duas turbinas a gás, duas caldeiras de recuperação e uma turbina a vapor. O combustível usado na turbina a gás é o gás de alto forno (BFG) e ainda uma queima suplementar na caldeira de recuperação utilizando-se o gás de coqueria (COG). A proposta é comparada em relação a potência produzida, eficiência consumo de água no condensador e possibilidade da venda do excedente de energia elétrica.

Palavras-Chave: Repotenciamento, sistemas de potência, indústria siderúrgica.

1. Introdução

Em 2002, o parque gerador da CST era constituído de três plantas de geração de potência baseadas no ciclo Rankine regenerativo. Dois conjuntos caldeira-turbina a vapor operam com uma pressão de 87 bar e temperatura de 510°C e vazão de vapor de 263 ton/h gerando 68MW, estes conjuntos operam desde 1983, e uma terceira planta operando a 100 bar de pressão e temperatura de 540°C e vazão de vapor de 241 ton/h, produzindo 75 MW. Parte da potência produzida nas duas primeiras plantas é utilizada para prover ar soprado para um dos altos fornos da CST num total de 36MW, assim a potência líquida produzida alcança 175 MW. Os combustíveis utilizados nas caldeiras são o GAF (gás de alto forno) e o GCO (gás de coqueria), gases residuais do processo de produção de aço

O repotenciamento aqui proposto visa atingir três metas:

a) **melhoria no aproveitamento dos combustíveis disponíveis:** os gases combustíveis numa usina siderúrgica constituem uma fonte de energia disponível que caso não seja utilizada deve ser descartada ao meio ambiente. Esse descarte implica no aumento da poluição, efeito estufa e custos ambientais que oneram o custo do produto final.

b) **aumento da oferta de energia elétrica:** o uso de tecnologias atuais na geração termoelétrica permite atingir eficiência acima de 48%. Esses sistemas permitem aumentar substancialmente a geração de energia elétrica e também a

produção de vapor para processo. Dessa forma, permite a CST manter sua auto-suficiência durante vários anos, sem a necessidade de aumentar a capacidade atualmente instalada.

c) **possibilidade de venda do excedente (regulação de mercado):** a crise energética de 2001 alertou para o problema da escassez da energia elétrica. Disponibilizar energia elétrica para a rede torna-se, portanto mais uma fonte de receita para a CST. Somando ainda o fato de que esta se localiza no Espírito Santo, estado que possui déficit na geração.

2. Demanda energética suprida pela planta de potência

Uma usina siderúrgica integrada como a CST consome energia elétrica nas mais variadas formas. Pontes rolantes, correias transportadoras, compressores de ar, plantas de produção de oxigênio, argônio, entre outros são alguns exemplos de consumidores dentro da usina. A CST possui capacidade de produzir 4,65 milhões de toneladas de aço. A demanda de energia elétrica alcança 195 MW, possuindo uma capacidade instalada de 220 MW, gerando um excedente de cerca de 25 MW, referentes a valores de out/ 2001.

Os gases combustíveis gerados no processo de redução no alto forno (GAF) e na fabricação de coque (GCO) são os principais combustíveis usados na usina.

O GCO possui um alto valor do PCI (poder calorífico inferior) e é empregado na própria produção de coque e para alimentar fornos de reaquecimento em vários processos ao longo da cadeia de produção do aço, além de também ser empregado na geração de potência.

O GAF tem baixo valor do PCI, é gerado em grandes quantidades e é usado no próprio alto forno para aquecimento e na geração de potência.

A partir de informações da CST a disponibilizada de gases combustíveis para geração de potência é de 230 kg/s de GAF e de 2,30 kg/s de GCO. Considerando-se o PCI do GAF de 2530 kJ/kg e do GCO 42000 kJ/kg.

3. Sistema de ciclo combinado

Esta proposta de repotenciamento é baseada na adoção de um sistema de ciclo combinado para geração de potência e ocasionalmente vapor para processo. O ciclo combinado é composto por dois ciclos de potências distintos: um ciclo de turbina a gás e um ciclo a vapor, constituído de uma caldeira de recuperação e de uma turbina a vapor.

A configuração adotada para o sistema é mostrada na Figura 1. Segundo Gomes (2001) na literatura são adotadas normalmente configurações do tipo 2-2-1 (duas turbinas a gás, duas caldeiras de recuperação e uma turbina a vapor). Esta solução foi adotada em função do consumo de combustível de cada turbina e da disponibilidade, dos combustíveis.

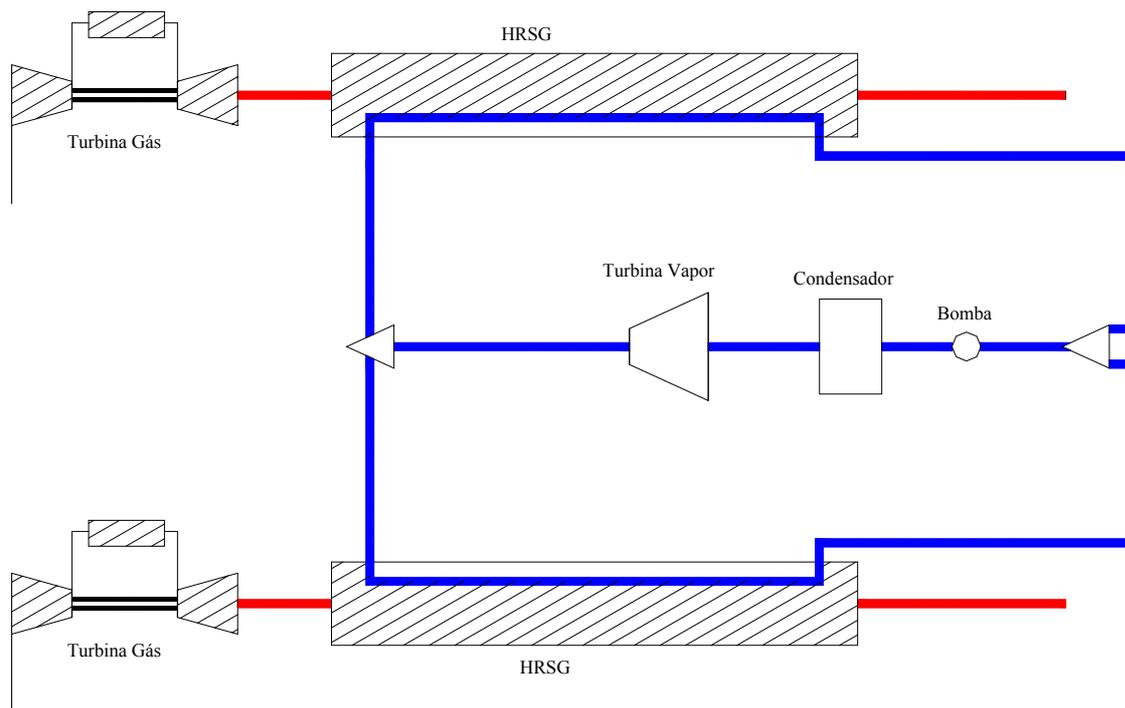


Figura 1 Configuração para o sistema de ciclo combinado

As turbinas a gás são supridas pelo GAF enquanto as caldeiras de recuperação são alimentadas pelos gases de escape das turbinas e estão projetadas para operarem com queima suplementar de GCO, visando o aproveitamento deste quando disponível. O gás de coqueria devido a presença de enxofre e outros elementos corrosivos, não é recomendado para ser utilizado na queima em turbina a gás.

3.1 Turbina a gás

O sistema de turbina a gás proposto é baseado no equipamento do fabricante ALSTOM modelo GT11N2. Esta turbina é resultado da experiência deste fabricante em construir sistemas que operam com gás de alto forno durante os anos 50 e 60, como reportado por Pfenninger (1977), Mukherjee (1995) e Mukherjee (2000).

A justificativa do uso deste modelo de turbina nesta proposta de repotenciamento deve-se ao fato de ser uma tecnologia já utilizada, portanto viável, e a existência de pelo menos uma planta de potência operando com este modelo, especificamente na usina siderúrgica de Baoshan, nas proximidades de Xangai na China, Steel Tehnology (2002). Outra possibilidade seria utilizar a turbina do fabricante Mitsubishi, modelo MW701D, instalada na usina siderúrgica da Hoogovens Steel em Ijmond Holanda, Power Technology (2002).

O modelo GT11N2 é projetado para operar usando gás natural, óleo pesado e também com gases siderúrgicos, no caso GAF. A principal diferença deste modelo é o uso de uma câmara de combustão em forma de silo. Este tipo de câmara é usado quando o gás a ser queimado tem baixo poder calorífico de modo que a vazão de

gás é muito maior quando comparado ao caso do combustível ser gás natural ou óleo.

Em relação a outros modelos da Alstom e mesmo outros fabricantes, a GT11N2 é um modelo “conservador”. Seja pela razão de pressão de 15,5:1 e pela temperatura de entrada na turbina de 1050°C, outros modelos de turbina a gás possuem estes parâmetros muito mais elevados, caso da GT26, com razão de pressão de 32:1 e temperatura na entrada da turbina de 1255°C, Alstom Power(2003), ou por exemplo os modelos MS7001H e MS 90001H da General Electric com temperatura de entrada de 1400°C¹.

O uso do gás de alto forno nestes sistemas demanda o uso de um compressor, para equalizar a pressão do gás com a pressão do ar na saída do compressor da turbina. A simulação feita pelo software Gate Cycle®(2003). O conjunto é dividido em duas partes: o compressor de GAF e a turbina a gás. O GAF oriundo do alto forno é comprimido e injetado na câmara de combustão, sendo queimado com ar vindo do compressor de ar, produzindo gases quentes a alta temperatura, sendo estes expandidos na turbina de potência, acionando um gerador e produzindo potência elétrica.

A Tabela 1 mostra uma comparação entre a simulação feita entre os modelos de turbina a gás utilizando gás natural e GAF.

Tabela 1 Características dos modelos utilizando-se gás natural e GAF

	Gás natural (PCI = 47,4 MJ/kg)	GAF (PCI = 2,53 MJ/kg)
Vazão de ar (kg/s)	368,00	260,00
Vazão de combustível (kg/s)	6,95	115,00
Vazão de gases (kg/s)	374,95	375,00
Razão de pressão	15,5	5,84
Temp de entrada na turbina	1050,00	905,00
Temp de saída da turbina	530,00	540,00
Potência líquida (MW)	115,00	84,50
Eficiência de 1º Lei (%)	33,88	28,93

As principais modificações, na operação da turbina a gás com a utilização do GAF como combustível, são:

- **Aumento da vazão de combustível:** devido ao menor valor do PCI do GAF;
- **Diminuição do fluxo de ar no compressor da turbina:** de modo a manter-se a vazão de gases de escape constante;
- **Diminuição da razão de pressão:** ao assumir a eficiência isentrópica do compressor constante, a diminuição do fluxo de ar demanda numa diminuição da razão de pressão, como ilustrado na Figura 2, representativa de um mapa de compressor com os pontos de operação para gás natural (GN) e GAF, de modo a evitar um ponto de operação que atinja a linha de *surge*;

¹

http://www.gepower.com/dhtml/corporate/en_us/assets/gasturbines_heavy/prod/ms7001h_9001h/performance.jsp

- **Diminuição da potência líquida e da eficiência:** a utilização do GAF diminui a temperatura atingida na saída da câmara de combustão, a menor razão de pressão atingida no compressor, levam a uma diminuição da potência produzida, o que diminui também a eficiência.

A Figura 3 mostra o arranjo turbina a gás – sistema de compressão de GAF, utilizado na simulação do sistema proposto para o repotenciamento. A tabela 2 mostra as potências produzidas no sistema de turbina a gás.

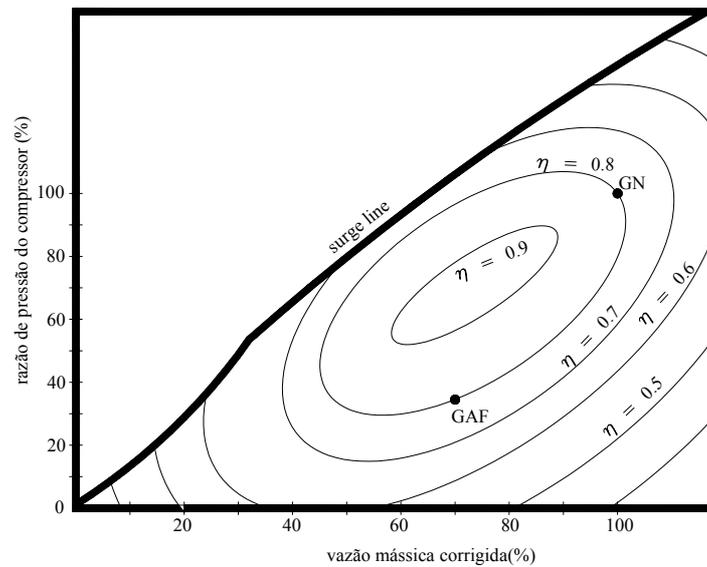


Figura 2 Mapa de compressor - pontos de operação com gás natural e GAF.

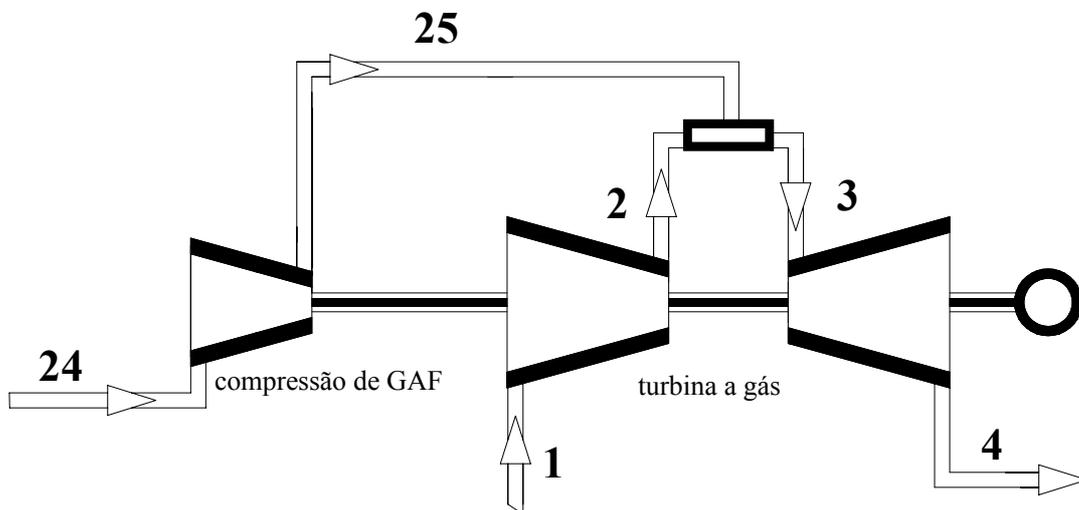


Figura 3 Sistema de turbina a gás proposto.

Tabela 2 Potência do Sistema de Turbina a Gás e Compressão de GAF.

Equipamento	Potência (MW)
Compressor de GAF	22,43
Compressor de ar	55,04
Turbina a Gás	161,99
Potência Líquida	84,52

3.2 Caldeira de Recuperação

O uso de uma caldeira de recuperação permite o aproveitamento do calor contido nos gases de escape de turbinas a gás através da geração de vapor. O vapor gerado pode ser usado em processos industriais, aquecimento distrital e geração de energia através de turbinas a vapor.

Uma simulação através do software Gate Cycle® (2003) é feita considerando-se um sistema de turbina a gás produzindo uma quantidade fixa de gases de escape. O vapor gerado na caldeira é empregado na geração de potência em uma turbina a vapor. A simulação permite comparar a quantidade de vapor gerado e a potência produzida pelo ciclo combinado proposto e o atual da CST.

A Fig. 4 mostra o layout para a caldeira de recuperação com um único nível de pressão com o sistema de turbina a gás incorporado.

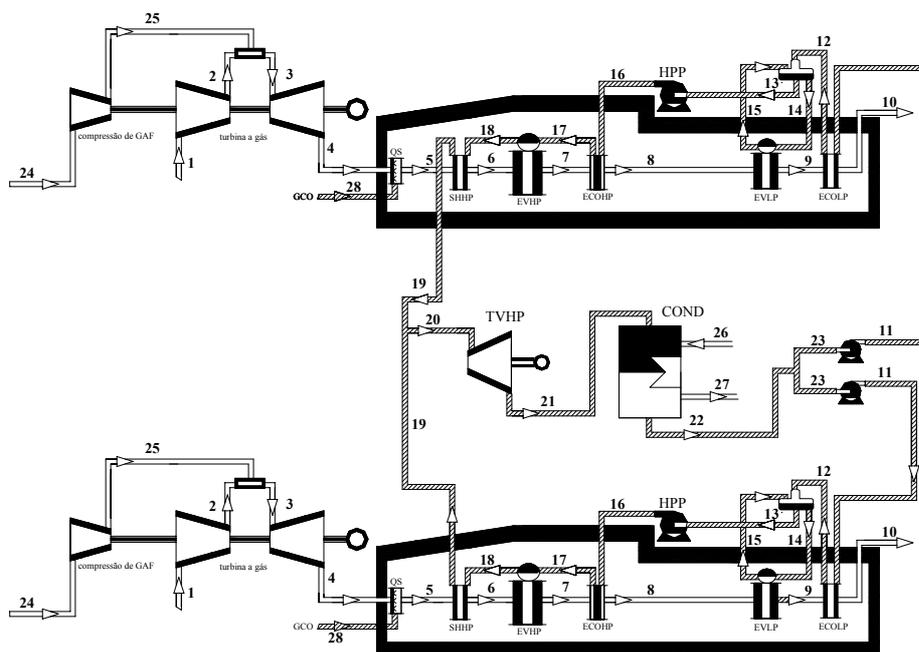


Figura 4 Ciclo Combinado

O sistema de caldeira de recuperação proposto opera através da energia contida nos gases quentes na saída da turbina a gás. O gás passa por um conjunto de trocadores de calor que produzem vapor a alta pressão e temperatura. Existe a possibilidade de se fazer uma queima suplementar no queimador acoplado logo na entrada da caldeira.

Este queimador opera com gás de coqueria, o que permite aumentar a temperatura dos gases, aumentando a geração de vapor e a potência produzida na turbina a vapor. O sistema opera com um desaerador integrado, ou seja, o vapor de alta temperatura a ser empregado no desaerador é gerado pelos gases quentes na caldeira de recuperação. Isso possibilita um aumento na potência gerada, pois se evita o uso de extrações na turbina a vapor.

O sistema foi simulado para determinar a produção de vapor e a potência gerada entre outros parâmetros. A tabela 3 mostra estes parâmetros.

Tabela 3 Principais Características do sistema de ciclo combinado

Área Superficial (m ²)	120508
Consumo de água no condensador (kg/s)	11412
Produção de Vapor (kg/s)	60,14
Potência consumida pelas bombas (MW)	2,14
Potência Total – ciclo vapor (MW)	141,84
Potência Líquida do Ciclo (MW)	308,74
Eficiência de 1º Lei (%)	44,46

4 Comparação entre o ciclo combinado e o sistema atual.

O atual sistema de geração de potência instalado na CST possui capacidade de geração de 193 MW, considerando uma geração de 100 MW nas plantas 1 e 2, 75 MW na planta 3 e mais 18 MW na turbina de topo instalada na saída do alto forno. A demanda estimada da usina toda é de 165 MW possibilitando um excedente de produção de 28 MW. ²

A figura 6.5 apresenta uma comparação entre o sistema atual e o proposto. O aumento na geração de potência atinge 60% em relação ao sistema atual.

Em função do consumo da usina o aumento do excedente na geração com o sistema proposto atinge 513%, uma representação é mostrada na Figura 6.

A comparação do consumo de água do condensador entre os sistemas é mostrada na Figura 7. Comparando-se o sistema atual tem-se um aumento de 0,58%.

A eficiência de 1º Lei dos sistemas é mostrada na Figura 8. O sistema atual trabalha com eficiências em torno de 30 a 35%, Modesto et al (2002) enquanto o sistema proposto atinge uma eficiência de 1ºLei acima de 44,5%.

² Dados referentes ao ano de 2002 (CST)

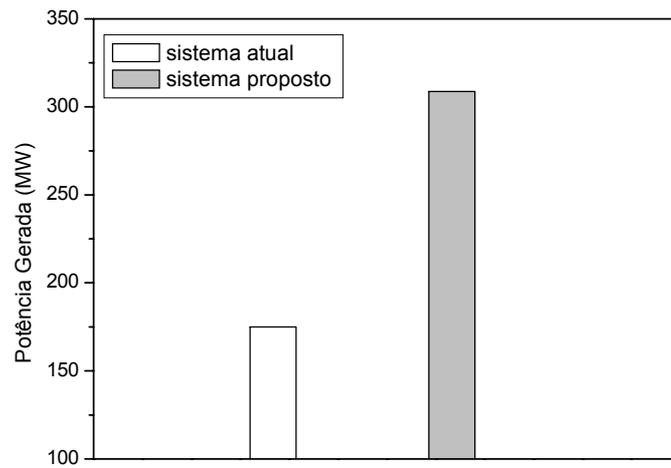


Figura 5 Potência gerada pelos sistemas de geração de potência.

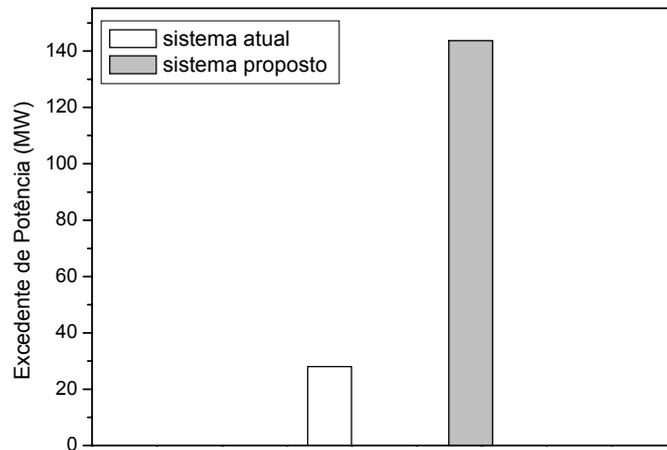


Figura 6 Excedente de potência gerada pelos sistemas de geração de potência.

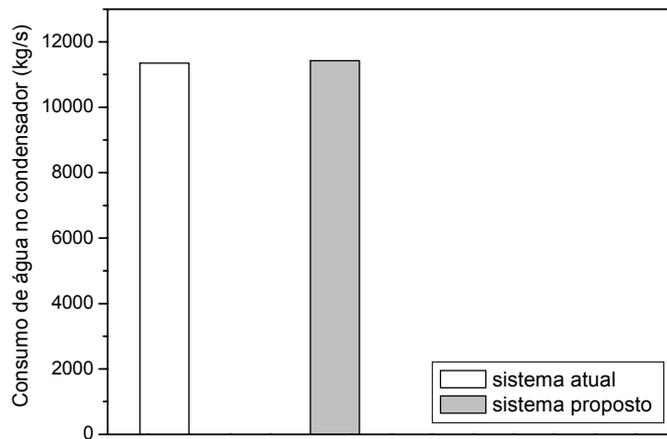


Figura 7 Consumo de água no condensador pelos sistemas de geração de potência.

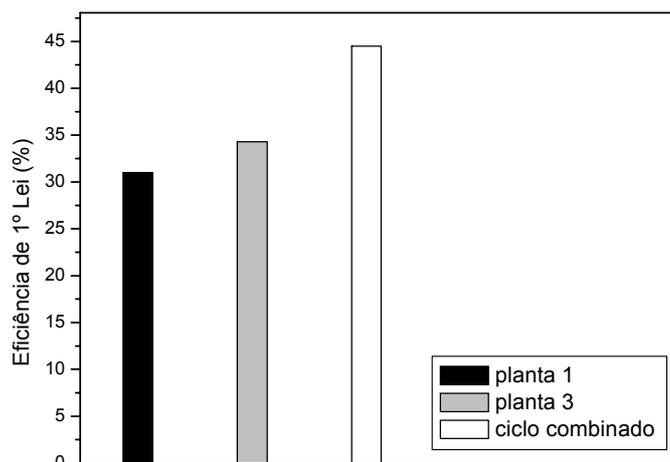


Figura 8 Eficiência de 1º Lei dos sistemas de geração de potência.

5 Conclusões

O sistema proposto aqui permite aumentar significativamente, tanto a produção de potência quanto a eficiência. Permite uma grande flexibilidade operacional tanto em termos de produção de energia, quanto também na possibilidade da produção de vapor. O custo de investimento de um ciclo combinado é de 500 US\$/kW³ instalado contra cerca de 800 US\$/kW⁴ instalado de ciclos a vapor convencionais, portanto a possibilidade de utilizar esses tipos de sistema é vantajosa.

O sistema de ciclo combinado com um único nível de pressão pode ser substancialmente melhorado com a adoção de caldeiras de recuperação com dois ou três níveis de pressão. Esta configuração de ciclo combinado permite aumentar o aproveitamento dos gases de escape das turbinas a gás, atingindo eficiências mais altas, assim como maiores níveis de geração de potência, porém com um custo de investimento um pouco mais elevado.

Outras análises para avaliação destes sistemas como a exergética e termoeconômica também podem ser encontradas em Modesto et al (2004).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e também à Companhia Siderúrgica Tubarão (CST) e especialmente ao Eng. José Leal Neto

³ Rees (2003)

⁴ Leal Neto (2002)

Referências

Gomes, C.M., 2001, “Análise Termodinâmica, Exergética e Termoeconômica de uma Instalação Termoelétrica em Ciclo Combinado com Cogeração de Vapor”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 155p.

Mukherjee, D.K., 1995, “*Experience with Unconventional Gas Turbine Fuels*”, ABB Review 9, pp. 29-37

Mukherjee, D.K., 2000, “*Use of Unconventional Fuels in Gas Turbine*”, Proceedings of ASME TURBOEXPO 2000, May 8-11,2000, Munich Germany, GT-637

Pfenninger, H., 1977, “*Experience with Gas Turbine Fired with Blast Furnace Gas*”, Brown Boveri, Review 64, pp. 74-86

Steel Technology, 2002, “*Baoshan Cold Rolled Steel Sheet Plant, China*”, <http://www.steel-technology.com/projects/baoshan/index.html> acessado em 28/02/2002 às 18:10 hs

Power Technology, 2002, “*Ijmond Power Plant, Netherlands*”, <http://www.power-technology.com/projects/ijmond/>, acessado em 08 de agosto de 2002 às 15:32hs

Alstom Power, 2003, “GT24 and GT26 Gas Turbines - 188MW and 281MW”, <http://www.power.alstom.com/servlet/ContentServer?pagename=OpenMarket/Xcelerate/View&infile=futuretense.ini&c=Page&cid=978628276564>, acessado em 25 de agosto de 2003 às 20:14hs.

GATE CYCLE, 2003, *Gate Cycle Analysis Program Version 5.51*, GE Enter Software.

Modesto, M., Nebra, S.A., Leal, J., Rosado, A.B. e Morimoto, T., 2002, “*Exergetic Analysis in a Power Generation System Using Blast Furnace Gas and Coke Oven Gas.*” Proceeding of ECOS 2002 – International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, July 3-5, Berlin, Germany, 2002., pp.1377-1384

Leal Neto, J., “*Estimativa de custo de equipamentos*” (comunicação pessoal). Mensagem recebida por marcelom@fem.unicamp.br, em 02 de junho de 2002.

Rees, D., “*Cost Estimative to HRSG*”(comunicação pessoal). Mensagem recebida por marcelom@fem.unicamp.br, em 05 de junho de 2003.