

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO DE
POTÊNCIA A VAPOR COM CARVÃO PULVERIZADO

por

Renan André Costenaro

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2011

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO DE
POTÊNCIA A VAPOR COM CARVÃO PULVERIZADO

por

Renan André Costenaro

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio Tadeu Van Der Lan

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Sérgio Frey

Porto Alegre, dezembro de 2011.

COSTENARO, R. A. **Cálculo de parâmetros de desempenho de uma instalação de geração de potência a vapor com carvão pulverizado**. 2011. 10 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho trata do cálculo de parâmetros de desempenho de uma instalação de geração de potência elétrica por ciclo de vapor. Esta instalação está localizada na cidade de Charqueadas (RS) e usa carvão mineral pulverizado como combustível. Foram calculados a eficiência térmica, a taxa de calor (*heat rate*) e a razão de trabalho reversa (*bwr*). A metodologia de coleta de medições e processamento de dados foi desenvolvida em conformidade com as recomendações da *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. Para processamento dos dados e tratamento das incertezas de medição foi usado o *software EES (Engineering Equation Solver)*. Foram obtidos os resultados de eficiência termodinâmica líquida de 29%, taxa de calor de 11521 Btu/kWh e razão de trabalho reversa de 1,4%.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência termodinâmica, ASME PTC 46, ciclo Rankine, planta de potência

COSTENARO, R. A. **Calculation of performance parameters of a pulverized coal steam power plant**. 2011. 10 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This work presents a calculation of performance parameters of a steam power plant. This plant is located in Charqueadas (RS) and uses pulverized coal as fuel. There was calculated the thermal efficiency, the heat rate and back work rate. The methodology for data acquiring and processing was developed in accordance with the recommendations of the American Society of Mechanical Engineers (ASME). For data processing and treatment of measurement uncertainty was used the software EES (Engineering Equation Solver). There was obtained the results of 29% to the liquid thermal efficiency, 11521 Btu/kWh to the heat rate and 1,4 % to the back work rate.

KEYWORDS: thermal efficiency, ASME PTC 46, Rankine cycle, power plant

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Revisão bibliográfica	1
1.2. Objetivos.....	2
2. FUNDAMENTOS.....	2
2.1. Ciclo Rankine.....	2
2.2. Parâmetros de desempenho segundo ASME PTC 46	2
2.3. Metodologia de avaliação	3
2.4. Preparação e execução dos testes.....	4
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E DO MODELO.....	4
3.1. Apresentação da instalação analisada.....	4
3.2. Modelo proposto	6
3.3. Erros e incertezas envolvidos no processo	6
3.4. Uso de recursos computacionais	6
4. RESULTADOS E ANÁLISES	7
4.1. Resultados	7
5. CONCLUSÃO	9
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	10
7. ANEXO I	11
8. ANEXO II	11

1. INTRODUÇÃO

O cenário econômico brasileiro dos últimos anos, e suas projeções para os próximos anos, indicam crescimento acelerado na produção e consumo de bens e serviços. O consumo de energia elétrica segue a mesma direção crescente, e os estudos mais recentes indicam aumento médio na demanda de 4,8% por ano até 2020 (MME, 2011).

Para suprir esta necessidade e garantir o suprimento de energia em níveis crescentes, de forma confiável e com baixo custo, tem-se investido fundamentalmente em dois aspectos importantes da matriz energética. O primeiro ponto é o aumento constante da potência instalada, sobretudo com investimentos de grande porte na construção de usinas hidrelétricas, sendo que vários destes empreendimentos estão em andamento. O segundo aspecto é o aumento da eficiência da matriz já existente, tanto na geração quanto na transmissão de energia. Embora este tipo de investimento tenha um retorno quantitativamente menor com relação ao primeiro item, este retorno é mais rápido, mais garantido, e com menor custo financeiro (MME, 2011).

Neste contexto, torna-se relevante executar trabalhos com a finalidade de levantar subsídios técnicos e assim melhor direcionar os investimentos. Estes trabalhos têm ainda mais relevância quando se trata de instalações que usam combustíveis fósseis na alimentação. Considerando que este tipo de combustível tem suprimento limitado e potencial poluente, seu consumo deve ser racionalizado, sendo relevante direcionar os esforços a aumentar a eficiência deste tipo de empreendimento. É relativamente comum encontrar em uso instalações antigas que, devido à defasagem tecnológica, apresentam baixa eficiência na geração, e em cujas seriam necessários investimentos relativamente pequenos para trazer retornos atraentes.

O objeto de trabalho deste estudo é um destes empreendimentos. Uma usina termelétrica alimentada por carvão mineral pulverizado. Deseja-se visando obter um diagnóstico a partir do qual se possa implementar medidas que visem o aumento da sua eficiência.

1.1. Revisão bibliográfica

O uso das normas da Associação Americana de Engenharia Mecânica (ASME - www.asme.org) é muito difundido na comunidade técnica, que segue a metodologia proposta pela Associação para estimar as eficiências de ciclos de potência completos e de seus componentes principais.

Vieira e Alegre (2011) analisaram a Usina Termelétrica de Figueira foi conduzida neste trabalho, objetivando avaliar a sua real condição operativa. A análise termoeconômica, incluindo análise exérgica, foi precedida por estudos preparativos apoiados na norma ASME PTC 46 (1996). Essas análises permitiram identificar, localizar e quantificar as principais fontes de ineficiência, assim como o cálculo dos custos exérgicos e econômicos dos fluxos internos da planta.

Braga et al (2009) apresentaram uma metodologia para cálculo e monitoramento contínuo da eficiência de uma usina termelétrica, baseada mais uma vez na normas ASME para cálculo de eficiência de termelétricas e balanços energéticos de entrada e saída de volumes de controle de subsistemas como gerador de vapor, turbina, gerador, condensador e ejetores. Modelos matemáticos e procedimentos metodológicos para o cálculo de eficiências de uma termelétrica e respectivas subunidades foram implementados em um programa aplicativo denominado Sistema Especializado para Cálculo de Eficiência (SECE), integrável a sistemas supervisórios. O SECE foi testado e encontra-se em operação na Usina Termelétrica do Barreiro (UTB), da CEMIG.

Lueska (2007) apresenta uma metodologia simplificada para determinação da eficiência global de uma planta de geração de potência, tendo como base, novamente as normas técnicas ASME.

1.2. Objetivos

Deseja-se, ao final deste trabalho, obter os indicadores de desempenho mais básicos da instalação estudada: rendimento do ciclo térmico, taxa de calor e razão de trabalho reversa. Serão seguidos os procedimentos recomendados pelas normas técnicas ASME, que apresentam as diretrizes que devem ser seguidas neste tipo de medição. Estes dados poderão, futuramente, servir como base para elaboração de estudos mais detalhados, para obter indicadores mais detalhados, bem como desempenho de cada componente da instalação.

2. FUNDAMENTOS

2.1. Ciclo Rankine

A instalação estudada no presente trabalho opera segundo o ciclo de Rankine. Trata-se de um ciclo fechado em que o fluido de trabalho, geralmente água, passa por basicamente quatro componentes fundamentais: gerador de vapor, turbina, condensador e bomba. Dentro deste ciclo o fluido passa por sucessivas operações de compressão e expansão, aquecimento e resfriamento, vaporização e condensação, a fim de transformar energia térmica que entra no sistema em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica na saída do sistema. A Figura 2.1 ilustra os componentes do ciclo de Rankine e o diagrama de temperatura-entropia para este ciclo.

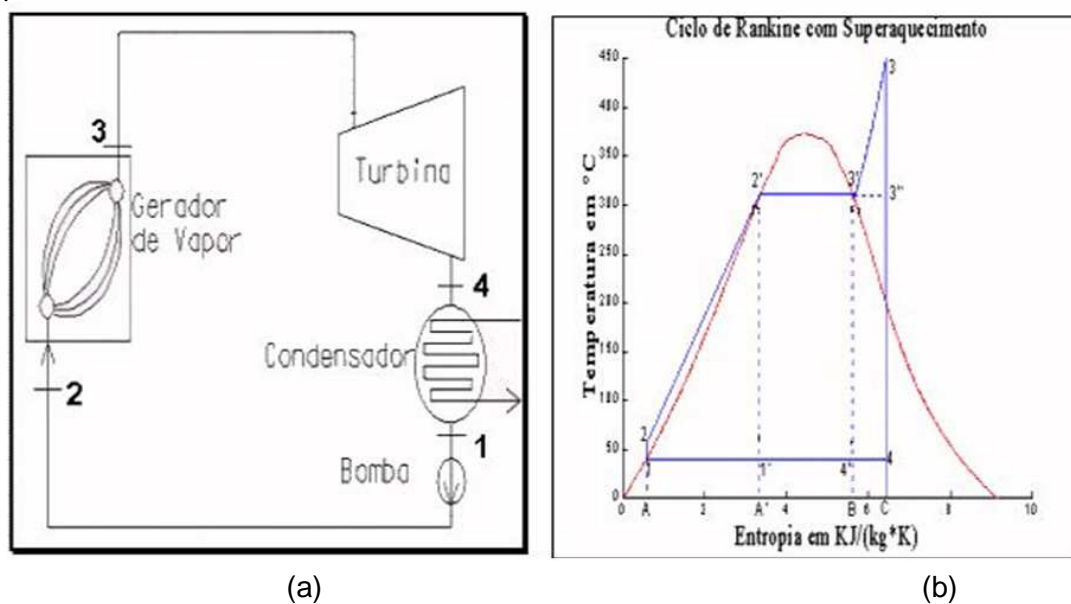


Figura 2.1 – (a) Diagrama esquemático de um ciclo de Rankine com os quatro componentes básicos; (b) Diagrama temperatura-entropia para um ciclo de Rankine com superaquecimento. (Paz, 2002)

As plantas de potência reais que operam segundo um ciclo de Rankine normalmente são mais complexas, envolvendo outros componentes, tais como o desaerador, colocado entre a turbina e a bomba principal, novas bombas de condensado, e regeneradores de calor, que podem ser distribuídos tanto no circuito de baixa pressão (entre o condensador e a bomba principal) como de alta pressão (posterior à bomba principal)

2.2. Parâmetros de desempenho segundo ASME PTC 46

A eficiência térmica, ou rendimento térmico do ciclo mede o percentual através do qual a energia fornecida ao fluido de trabalho passando através do gerador de vapor é convertida

em trabalho líquido disponível. O trabalho bruto é o convertido na turbina, e o líquido é obtido a partir daquele, descontando as demandas da bomba. Desta forma é um número adimensional, compreendido entre zero e um, ou entre 0% e 100%. Para um ciclo de geração de energia elétrica, o rendimento, η , pode ser expresso através da equação que segue:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}} \quad (2.1)$$

onde $\dot{W}_{turbina}$ é a potência elétrica gerada no gerador ligado à turbina, em watts, \dot{W}_{bomba} é a potência consumida na bomba de compressão, em watts e \dot{Q} é taxa com que o calor é fornecido ao fluido, também em watts.

De forma auxiliar, é comum expressar, na literatura técnica internacional, a qualidade do uso da energia pelo termo em inglês *heat rate*, HR , que pode ser traduzido para como taxa de calor. Ele é, de fato, o inverso da eficiência dada na equação anterior. Na proposta original desta equação, a taxa de transferência de calor \dot{Q} é dada em Btu/hora e a potência elétrica em kW. Assim, a relação para HR pode ser dada na forma de uma razão de energias, como segue

$$HR = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}} \quad (2.2)$$

mas as unidades das grandezas envolvidas passam a ser Btu para o calor entregue em 1 hora e kWh para o trabalho mecânico convertido.

Outro parâmetro usado para caracterizar uma instalação é a razão de trabalho reversa, *bwr* (do inglês *back work ratio*) definida como sendo a parcela de potência demandada pela bomba de compressão sobre potência bruta gerada convertida na turbina. É uma característica importante visto que uma grande parcela da potência gerada no ciclo é consumida nos próprios equipamentos, sendo as bombas as maiores consumidoras. Pode ser definida pela equação

$$bwr = \frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{W}_{turbina}} \quad (2.3)$$

No presente trabalho, empregou-se a potência elétrica produzida na turbina como dado para o termo $\dot{W}_{turbina}$ da equação anterior.

2.3. Metodologia de avaliação

ASME PTC-46 descreve os procedimentos padronizados a serem adotados na seleção de instrumentos de medição, calibração destes e uso correto durante a medição. Inclui instruções detalhadas para medição das grandezas que serão usadas nos cálculos:

- temperatura, pressão e vazão de fluido de trabalho;
- consumo de combustível, consumo de ar para combustão e vazão de gases de exaustão;
- temperaturas e vazão de fluido de água de refrigeração e potência consumida nos equipamentos de refrigeração;
- potência elétrica gerada nos geradores, perdas de potência pelo uso de transformadores e potência total gerada ao longo de um período (quilowatts-hora) e

- potência consumida pelos equipamentos da instalação, como bombas, transportadores e moinhos.

Também são especificados os equipamentos adequados para processamento e armazenagem dos dados durante a aquisição. Recomenda-se o uso, sempre que possível, de sistemas eletrônicos automatizados de coleta, sendo aceita a utilização do sistema preexistente de controle e operação da planta, observando, contudo que este deve ser devidamente calibrado antes dos testes. Inmetro, 1995, e ASME PTC-19 fornecem orientações sobre tratamento de incertezas de medição.

2.4. Preparação e execução dos testes

As especificações recomendadas pela ASME PTC 46 determinam números mínimos de medições que devem ser feitas durante os testes, bem como os tempos mínimos de duração deles, a fim de reduzir o efeito dos erros de medição aleatórios. Devem ser realizadas no mínimo 30 coletas de cada conjunto de dados durante o período de teste. O tempo total de teste deve ser de, no mínimo, 2 horas, devendo as aquisições de dados ser bem distribuídas ao longo deste tempo. Antes do início das coletas deve ser respeitado um tempo mínimo de estabilização de 1 hora da instalação.

Após a coleta dos dados, estes devem ser revisados para determinar se são coerentes com o esperado e, se dentro de algum período durante o teste, houve algum desvio dos valores acima do que pode ser considerado tolerável. Se constatada alguma ocorrência deste tipo, estes dados devem ser descartados, bem como os dados referentes aos 10 minutos subsequentes ao retorno às condições normais, considerado como tempo de reestabilização. Esta análise pode, portanto, causar a eliminação de partes dos dados constantes no conjunto inicial proveniente da coleta. Dentre os dados restantes, considerados válidos, deve-se selecionar um conjunto que seja proveniente de uma coleta contínua de, no mínimo, 2 horas.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E DO MODELO

3.1. Apresentação da instalação analisada

A instalação que é objeto deste estudo é a Usina Termelétrica de Charqueadas, da Tractebel Energia, localizada em Charqueadas, RS. A usina utiliza carvão mineral pulverizado como combustível, e sua capacidade instalada é de 72 MW. A figura a seguir mostra esquematicamente o circuito termohidráulico da usina.

O conjunto da UTCH é bastante peculiar, pois possui 4 repetições do ciclo de potência completo. Para interliga-los, foi instalado um coletor/distribuidor de vapor entre a descarga dos geradores de vapor e a admissão das turbinas. Esse dispositivo permite a operação dos 4 ciclos de forma interligada, deixando a opção de que os mesmos funcionem independentemente ou interligados. Para exemplificar, o gerador de vapor 1 pode enviar sua descarga diretamente para a turbina de seu ciclo termohidráulico, a turbina 1, ou misturá-lo ao coletor/distribuidor, que poderá selecionar qual ou quais turbinas atender.

Os testes realizados no presente trabalho serão executados tendo como base esta configuração de funcionamento, em que todo o vapor gerado pelos geradores de vapor é direcionado para o coletor, e dali distribuído para as turbinas, pois esse é o modo de operação mais utilizado, devido à versatilidade que proporciona durante a operação.

Os valores típicos de operação da Usina são apresentados na Tabela 3.1

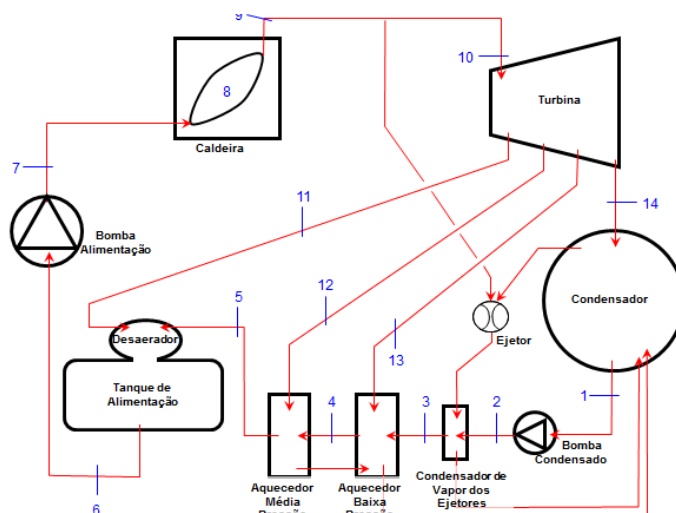


Figura 3.1- Diagrama esquemático da usina UTCH.

Tabela 3.1 – Valores de referência para operação da UTCH, relativos à Figura 3.1

Trecho	Descrição	Saída do Trecho		
		Pressão	Temperatura	
1-2	Bomba de Condensado	0,78 MPa (8 kgf/cm ²)	40 °C	
2-3	Condensador de Vapor dos Ejetores (CVE)		50 °C	
3-4	Aquecedor de Baixa Pressão (BP)		80 °C	
4-5	Aquecedor de Média Pressão (MP)		145 °C	
5-6	Tanque de Alimentação	0,56 MPa (5,7 kgf/cm ²)	155 °C	
6-7	Bomba de Alimentação	7,85 MPa (80 kgf/cm ²)	160 °C	
7-8	Gerador de vapor (tambor)	6,28 MPa (64 kgf/cm ²)	279 °C	
8-9	Caldeira (SH)	5,88 MPa (60 kgf/cm ²)	480 °C	
9-10	Entrada da Turbina	5,69 MPa (58 kgf/cm ²)	475 °C	
10-11	Turbina	1ª Extração	0,88 MPa (9 kgf/cm ²)	325 °C
11-12		2ª Extração	0,26 MPa (2,7 kgf/cm ²)	255 °C
12-13		3ª Extração	- 0,04 MPa (- 0,4 kgf/cm ²)	135 °C
13-14		Descarga		50 °C
14-1	Condensador	- 0,09 MPa (- 0,94 kgf/cm ²)	36 °C	

3.2. Modelo proposto

O sistema é tratado como um único volume de controle, englobando os 4 ciclos como se fosse um único conjunto. Nele, as energias que transitam no conjunto completo são o resultado do somatório das energias de cada ciclo individual. Desta forma, a potência total produzida na instalação, para fins de cálculo de desempenho, é a soma das potências geradas em cada uma das turbinas consideradas, e a energia térmica fornecida é a soma de todas as energias fornecidas em cada gerador de vapor.

A potência obtida do gerador ligado à turbina é medida diretamente pela instrumentação instalada neste equipamento, em operação na Usina. A potência térmica fornecida ao fluido durante sua passagem pelo gerador de vapor é obtida pelo balanço de energia neste componente, dado por \dot{Q} , em kW

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica, em kg/s e h_2 e h_1 são as entalpias específicas do fluido na saída e na entrada, respectivamente, em kJ/kg. Os valores das entalpias são obtidos a partir das temperaturas e pressões em cada ponto, observando que o fluido entra como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido. Estes podem ser obtidos a partir das formulações estabelecidas pela IAPWS-IF97, ou ainda das publicações da ASME (ASME International Steam Tables for Industrial Use).

O uso do coletor/distribuidor de vapor permite obter dezenas de combinações de ligação entre os 4 geradores de vapor e as 4 turbinas. Para o ensaio realizado no presente trabalho, foi selecionada uma configuração de uso em que 2 geradores de vapor e 2 turbinas estão em funcionamento em conjunto, por ser a essa a situação de operação mais comum da Usina.

3.3. Erros e incertezas envolvidos no processo

Os valores de incerteza de medição associadas a cada instrumento serão obtidos junto à documentação fornecida por seus fabricantes. Nos casos em que não for possível obtê-la, foram atribuídos valores típicos de incerteza, de acordo com cada tipo de instrumento utilizado. Para tratar corretamente a propagação das incertezas dos valores de entrada, ao longo dos cálculos, e sua influencia no resultado final, foi usado o programa computacional EES (Engineering Equation Solver – www.fchart.com), que tem uma rotina específica para esse fim.

Para atenuar os efeitos de erros aleatórios de medição, serão realizadas 30 medições de cada conjunto de dados, distribuídas dentro de um tempo mínimo de 2 horas, de acordo com o recomendado pela norma ASME PTC-46.

3.4. Uso de recursos computacionais

Para facilitar a execução dos cálculos foi implementada uma rotina computacional usando o software EES, em sua versão completa para uso acadêmico. Este programa possui internamente as formulações da IAPWS para acesso às propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho. Também realiza automaticamente o tratamento das incertezas dos dados usados nos cálculos, fornecendo as incertezas dos resultados finais. Seu uso também proporciona agilidade à medida que pode trabalhar com qualquer unidade de medida, fazendo internamente as transformações de unidade para obter resultados finais coerentes.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Resultados

Após a definição da metodologia de coleta de dados, foram testados os equipamentos de coleta e armazenagem de dados. Vários dados eram apenas observados no sistema supervisor, e foi implementada a alteração do mesmo para que permitisse sua armazenagem em memória de massa. A seguir foram feitas as coletas efetivamente válidas. A Tabela 4.1 apresenta os valores médios das grandezas medidas na operação da UTCH, resultado da coleta de dados ao longo de 2,5 horas, com o total de 30 conjuntos de dados.

Tabela 4.1 – Valores médios de medição da instalação na configuração de funcionamento selecionada para ensaio.

Local da coleta		Grandeza medida	Valor médio medido
Gerador de vapor nº 1	Entrada	Temperatura	159 °C
		Pressão manométrica	11,57 MPa (118 kgf/cm ²)
	Saída	Temperatura	481 °C
		Pressão manométrica	5,91 MPa (61 kgf/cm ²)
		Vazão	62,5 ton/hora
Gerador de vapor nº 3	Entrada	Temperatura	158 °C
		Pressão manométrica	7,65 MPa (78 kgf/cm ²)
	Saída	Temperatura	483 °C
		Pressão manométrica	5,88 MPa (60 kgf/cm ²)
		Vazão	59,3 ton/hora
Turbina nº 1		Potência	12,4 MW
Turbina nº 3		Potência	12,3 MW
Bomba de compressão nº 1		Potência demandada	175,2 kW
Bomba de compressão nº 3		Potência demandada	162,6 kW

Os valores de operação dos geradores de vapor 1 e 3 concordam entre si em sua maior parte. As descargas de vapor estão em estados muito próximos, o que pode ser verificado pelos valores de pressão, temperatura. As vazões são um pouco diferentes, mas o coletor/distribuidor se encarrega de enviar às turbinas uma alimentação média para ambas. As potências das turbinas são muito próximas, em razão do exposto anteriormente, indicando também que tem desempenhos semelhantes. O dado que destoa nessa tabela é a pressão de alimentação da água, que depende de bombas diferentes ou mesmo da perda de carga de cada gerador de vapor.

Os 30 conjuntos de dados coletados foram usados para o cálculo da eficiência de conversão do ciclo, de seu *heat rate* e da razão de trabalho reversa. Seus valores médios estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores dos principais parâmetros de análise do ciclo calculados com o conjunto de 30 dados experimentais

Parâmetro	Valor obtido
Eficiência térmica (Equação 2.1)	$0,29 \pm 0,0145$ ou $29\% \pm 1,45\%$
<i>Heat rate</i> ou Taxa de calor (Equação 2.2)	11521 ± 576 Btu/kWh
Razão de trabalho reversa (Equação 2.3)	$0,014 \pm 0,0003$ ou $1,4\% \pm 0,03\%$

O valor médio obtido para a eficiência da planta é próximo ao encontrado em estudos preliminares anteriormente realizados pela empresa proprietária da Usina, informado pela operação da TRACTEBEL. Contudo, pode-se afirmar que a instalação apresenta uma eficiência pouco expressiva, se comparada com outras instalações que operam em situações semelhantes. A Figura 4.1 apresenta valores típicos de eficiência de instalações de geração de potência a vapor.

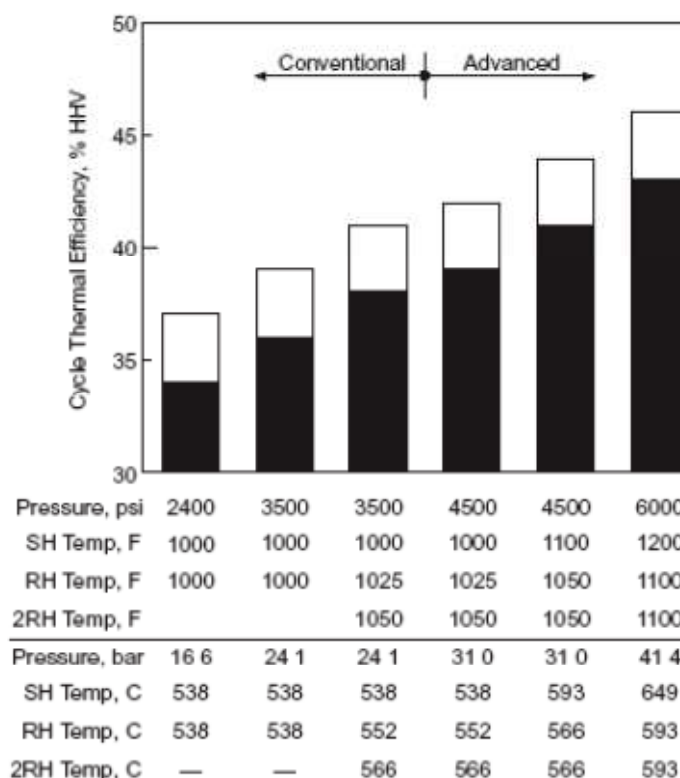


Figura 4.1 – Valores típicos de eficiência, como função da temperatura e pressão de operação, para instalações de geração de potência a vapor (fonte: NPC, 2007, pág. 4).

Para instalações como a estudada, que operam sob baixa pressão (até 2400 psi), a eficiência típica é de 30% a 34%. A eficiência de $29\% \pm 1,45\%$ calculada pela Usina tem valor nominal inferior ao menor valor da faixa típica, mesmo que sua incerteza de medição colabore para que o valor seja considerado dentro da faixa.

O valor de 11521 Btu/kWh é superior aos 11040 Btu/kWh encontrados como médios para as usinas térmicas a carvão pulverizado americanas (SL-009597, 2009). Entretanto, a mesma fonte adverte que o valor pode ser significativamente maior quando se consideram plantas que operem em situações intermitentes ou fora do ponto de projeto (*off design*).

A razão de trabalho reversa *bwr* indica que há condições de obter-se maior eficiência do sistema, pois se admitem valores mais baixos para esse parâmetro (Moran e Shapiro, 2008).

5. CONCLUSÃO

Os parâmetros de rendimento, taxa de calor e razão de trabalho reversa são capazes de indicar a qualidade de operação de uma planta de potência como a estudada. Como resultado geral, obteve-se eficiência de 29%, taxa de calor ou *heat rate* de 11521 Btu/kWh e razão de trabalho reversa *bwr* de 1,4%. Comparando-se esses valores aos dados de literatura, conclui-se que a usina analisada tem desempenho apenas razoável, situando-se nos limites inferiores das faixas desejadas de operação. Os resultados obtidos podem ser vistos como confiáveis pois seguem a norma internacional ASME PTC 46, aceita como padrão de procedimento para ensaios de plantas de potência.

O uso de programas computacionais foi fundamental nas etapas de aquisição e processamento de dados, uma vez que agilizou estas operações e reduziu a probabilidade de ocorrência de erros humanos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a obtenção de indicadores de desempenho mais amplos, envolvendo outros elementos da instalação. Pode-se ainda analisar os efeitos dos fatores ambientais sobre a eficiência do ciclo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME PTC 46. "**Performance Test Codes on Overall Power Plant – PTC 46**", American Society of Mechanical Engineers, 1996.

ASME PTC PM. "**Performance monitoring guidelines form steam power plants – PTC PM**". American Society of Mechanical Engineers, 1993.

ASME. "**Test Uncertainty - PTC 19.1**". American Society of Mechanical Engineers, 2005.

Braga C.M.P., Braga A. R., Miranda M.F., Jota, F. G., Webber Eustáquio Pereira de Aguiar, W. P. E. P. "**Sistema Especializado para Cálculo de Eficiência**", Revista Pesquisa & Desenvolvimento da ANEEL, 2009

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro); Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); International Organization for Standardization (ISO) "**Guia para expressão da incerteza de medição**", ABNT, 3ª Ed., 2003.

Lueska, C. "**Development and application of an approach to assess the global thermal efficiency of a thermal electric power plant**". ABCM, 2007.

MME. "**Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2011-2020)**." Empresa de Pesquisa Energética, 2011.

Moran, M. J., Shapiro, H. N. "**Princípios de termodinâmica para engenharia**", LTC, 2008.

NPC. "**Electric Generation Efficiency – Study Topic Papers**", National Petroleum Council, 2007.

Van Wylen, G. J., Sonntag, Borgnakke, C., "**Fundamentos da Termodinâmica Clássica**", Edgard Blücher, 1995.

Vieira P.A. e Alegre J.A.V., Análise Exergética Aplicada à Usina Termelétrica de Figueira, Espaço Energia - <http://www.espacoenergia.com.br/> (acesso setembro 2011)

SL-009597, Coal-fired power plant heat rate reductions - final report, project 12301-001, (www.sargentlundy.com, acesso nov/2011), 2009

7. ANEXO I

Type of Plant	Stabilization
Gas fired boiler	1 hr
Oil fired boiler	1 hr
Pulverized coal-fired boiler	1 hr
Fluidized bed combustor	24 hr [1]
Simple cycle with heat recovery	1 hr
Combined cycle	1 hr
Reciprocating engines	1 hr
Stoker and cyclone	4 hr

Anexo I – Tabela de tempos típicos de estabilização pré-teste (Fonte: ASME PTC 46, Table 3.3)

8. ANEXO II

Type of Plant	Test Run
Gas fired boiler	2 hr
Oil fired boiler	2 hr
Pulverized coal-fired boiler	2 hr
Fluidized bed combustor	4 hr
Simple cycle with heat recovery	1 hr
Combined cycle	1 hr
Stoker and cyclone	4 hr

Anexo II – Tabela de tempos mínimos de duração de testes recomendados (Fonte: ASME PTC 46, Table 3.4)