

IOANNES PAULUS BOHN TESSARO

ESTUDO INICIAL DA ADAPTAÇÃO DE UMA USINA TERMOELÉTRICA  
PARA COMBUSTÃO DE HIDROGÊNIO

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.

Orientadores: Prof. Dr. Volnei Borges

Porto Alegre  
2009



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ESTUDO INICIAL DA ADAPTAÇÃO DE UMA USINA TERMOELÉTRICA PARA  
COMBUSTÃO DE HIDROGÊNIO**

**IOANNES PAULUS BOHN TESSARO**

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-  
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

***BANCA EXAMINADORA:***

**Prof. Dr. Paulo O. Beyer  
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. José R. S. Zabadal  
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. Sérgio L. Frey  
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre  
2009**

de modo especial, a quem possa interessar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família,  
a todos os colegas que me ajudaram de uma forma ou outra,  
a todos meus amigos,  
e ao prof. Dr. Volnei o qual foi de grande auxílio.

Empty your mind, be formless, shapeless, like water. If you put water into a cup, it becomes the cup. You put water into a bottle and it becomes the bottle. You put it in a teapot and it becomes the teapot. Now, water can flow or it can crash. Be water my friend.

*Bruce Lee*

TESSARO, I. P. B. **Estudo Inicial da Adaptação de uma Usina Termoelétrica para Combustão de Hidrogênio**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta o estudo para a adaptação de uma usina termoelétrica a carvão pulverizado para a utilização de hidrogênio como combustível. São apresentadas as metodologias de cálculo das eficiências da caldeira, do ciclo térmico e da unidade, além da nova configuração sugerida para o ciclo adaptado. Nesta nova configuração o hidrogênio reage com oxigênio puro e o vapor resultante incorpora o fluido de trabalho do sistema. O ciclo não apresenta reaquecimento e possui aquecedores de baixa e média pressão. Para o cálculo das eficiências foram desconsiderados todos os consumos de energia externos ao ciclo, tais como produção, transporte e beneficiamento do combustível, o que pode gerar uma falsa idéia de ganho. Para os sistemas propostos as eficiências encontradas foram de 25,7% para o sistema original e 30,85% para o ciclo adaptado, o que representa um aumento de cerca de 5%. Alguns parâmetros foram explorados gerando variações de eficiências iguais entre os sistemas. Conclui-se também que a utilização de hidrogênio diminui a poluição, a quantidade de equipamentos e manutenção da planta, desde que a sua produção seja a partir de energias limpas.

**PALAVRAS-CHAVES:** Sistemas térmicos, Ciclo de potência, Geração de vapor, Utilização de hidrogênio, Eficiência de caldeira.

TESSARO, I. P. B. **Initial Study of the Adaptation of a Thermoelectric Plant for Hydrogen Combustion**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

#### **ABSTRACT**

This paper presents the study for the adaptation of a pulverized coal power plant for the use of hydrogen as fuel. It describes the methodologies for calculating the boiler, heat cycle and unit efficiencies, and the new configuration suggested for the adjusted cycle. In this new configuration the hydrogen reacts with pure oxygen and the resulting steam enters on the working fluid of the system. The cycle has not reheat and has low and medium pressure heaters. To calculate the efficiencies were not considered any consumption of external power cycle, such as generation, transmission and processing of fuel, which can generate a false sense of gain. For the systems proposed efficiencies found were 25.7% for the original system and 30.85% for the adjusted cycle, which represents an increase of about 5%. Some parameters were explored generating efficiencies variations equal between systems. It also appears that the use of hydrogen reduces the pollution, the amount of equipment and plant maintenance, since its production is by clean energy.

**KEYWORDS:** Thermal systems, Cycle power, Steam generation, Use of hydrogen, Boiler efficiency.

TESSARO, I. P. B. **Studio Iniziale Dell'adattamento di una Centrale Termoelettrica per La Combustione di Idrogeno.** 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## SOMMARIO

Questo articolo presenta lo studio per l'adattamento di una centrale termoelettrica a carbone polverizzato per l'uso dell'idrogeno come combustibile. Esso descrive le metodologie per il calcolo del rendimento della caldaia, del ciclo termico e dell'umidità, e la nuova configurazione suggerita per il ciclo corretto. In questa nuova configurazione l'idrogeno reagisce con l'ossigeno puro e il vapore risultanti entra nel fluido di lavoro del sistema. Il ciclo non torna ha riscaldamento e ha riscaldatori di bassa e media pressione. Per calcolare la efficienza sono considerate tutti consumi di energia esterno al ciclo, come la generazione, trasmissione e il trattamento del combustibile, che può generare un falso senso di produzione. Per i sistemi proposti sono stati trovati efficienze 25,7% per il sistema originale e 30,85% per il ciclo corretto, che rappresenta un aumento di circa di 5%. Alcuni parametri sono stati esplorati, generando efficienze variazioni parità tra i sistemi. Sembra inoltre che l'uso dell'idrogeno riduce l'inquinamento, la quantità di attrezzature e la manutenzione degli impianti, in quanto la sua produzione è da energia pulita.

PAROLE CHIAVE: Impianti termici, Ciclo della potenza, Generazione di vapore, Utilizzo di idrogeno, Rendimento delle caldaie.



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
<b>3.1. Cálculo de eficiência de caldeira.....</b>	<b>2</b>
<b>3.1.1. Eficiência de combustão.....</b>	<b>2</b>
<b>3.1.2. Perda pelos gases de exaustão.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.3. Perda pelas cinzas.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.4. Perda de calor para o ambiente.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1.5. Perdas não mensuráveis.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Cálculo de eficiência de ciclo térmico.....</b>	<b>5</b>
<b>3.3. Cálculo de eficiência da unidade.....</b>	<b>5</b>
4. CICLO DE POTÊNCIA DA USINA.....	6
<b>4.1. Configuração original.....</b>	<b>6</b>
<b>4.2. Proposta de alterações para combustão de hidrogênio.....</b>	<b>9</b>
<b>4.3. Comparações entre os sistemas.....</b>	<b>11</b>
5. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS.....	15
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	15

## 1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o elemento químico de maior abundância no universo, porém na sua forma elementar é muito raro na Terra. Seu uso como um vetor de energia está sendo cada vez mais estudado como alternativa aos combustíveis fósseis que poluem o meio ambiente, pois a sua produção, dependente de outras fontes de energia, pode ser a partir de fontes renováveis e limpas.

Basicamente o hidrogênio pode ser obtido através de hidrocarbonetos, através de reforma de metano ou na gaseificação de carvão, porém, nenhum destes processos está livre de gerar emissões de dióxido de carbono. Outra fonte de hidrogênio é a água que pode ser decomposta biologicamente, através de energia térmica ou ainda pode liberar hidrogênio em processos de eletrólise, os quais atualmente consomem muita energia.

Dentre as utilizações energéticas já na sua forma pura destaca-se a produção de energia elétrica através de células de combustível ou através da combustão em ciclos de potência. Este último é o foco do presente trabalho que apresenta uma proposta de adaptação para um ciclo de potência de uma usina termoeletrica que utiliza carvão mineral como combustível principal. O ciclo contém quatro estágios de turbina, um aquecedor de baixa e outro de média pressão e não possui reaquecimento. As equações que regem o comportamento do sistema foram equacionadas em programa comercial, onde diversos parâmetros de entrada foram avaliados para obter as respostas dos dois sistemas. Com estas respostas espera-se chegar a uma comparação quantitativa e qualitativa entre o sistema original e o sistema adaptado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos e propostas de utilização e produção de hidrogênio podem ser encontrados na literatura. Enquanto alguns autores se preocupam apenas com eficiências de processos do final do ciclo da economia do hidrogênio, outros buscam avaliar todas as etapas para validar a eficácia global do ciclo. Segundo BOSSEL [2006] a utilização da eletricidade diretamente é mais viável econômico e energeticamente do que a produção, transporte/armazenamento e utilização de hidrogênio, conforme a Figura 2.1 abaixo.

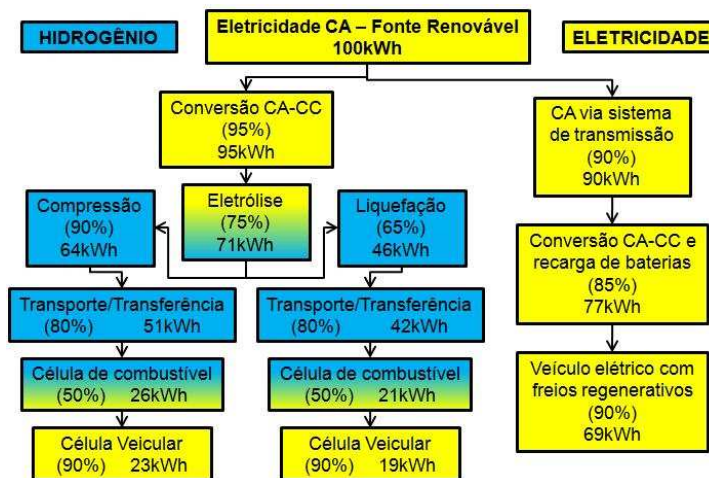


Figura 2.1 – Comparação entre a utilização de hidrogênio e de eletricidade diretamente. (adaptado de: BOSSEL, 2006)

Como pode ser visualizado, se utilizarmos a eletricidade diretamente teremos uma eficiência global de 69%, visto que dos 100 kWh que temos de entrada apenas 69 kWh são utilizados no veículo elétrico. Porém para o hidrogênio, com os processos propostos, utilizando-se a eletrólise da água com uma eficiência do processo de 75%, chega-se ao final da cadeia com apenas 23 kWh para o caso de hidrogênio pressurizado e 19 kWh para o caso de hidrogênio liquefeito.

Ainda segundo o autor, o hidrogênio possui uma menor concentração energética por volume frente a outros combustíveis, porém possui uma maior densidade energética relativa ao peso. A Figura 2.2 a seguir mostra uma comparação entre o poder calorífico por volume para diferentes combustíveis.

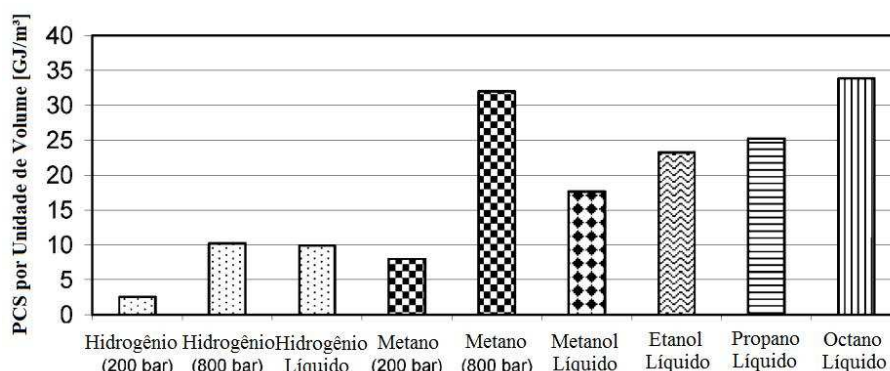


Figura 2.2 – Poder calorífico superior por unidade de volume de diferentes combustíveis. (adaptado de: BOSSEL, 2006)

Nota-se que o hidrogênio apresenta a menor concentração de energia por volume entre os combustíveis. Nota-se também a proximidade entre os valores para o hidrogênio líquido e hidrogênio comprimido a 800 bar, visto que o processo de liquefação consome maior energia, conforme a Fig. 2.1, podemos concluir que a melhor opção é a utilização de hidrogênio comprimido a 800 bar. Segundo o autor, para comparação entre diferentes combustíveis utiliza-se sempre o PCS (poder calorífico superior) por ser mais apropriado que o conceito de PCI (poder calorífico inferior).

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Cálculo de eficiência de caldeira

A seguir está descrita a metodologia utilizada para o cálculo de eficiência de uma caldeira a carvão pulverizado da usina que foi utilizada como referência. A metodologia apresentada segue recomendações da norma americana ASME PTC-4.1 para combustíveis sólidos.

##### 3.1.1. Eficiência de combustão

O primeiro tópico a se tratar de eficiência de uma caldeira está na eficiência do processo de combustão em si, trata-se basicamente de calcular-se a quantidade de combustível que não foi queimado chegando-se ao valor da taxa de incombusto. Dentre as variáveis que influenciam nessa taxa estão: características do combustível (teor de cinzas, teor de voláteis, quantidade de finos); projeto e tipo de caldeira; condições da combustão; granulometria do combustível (combustível sólido); e excesso de ar. No caso de uma usina a carvão pulverizado o in-

combusto ( $\xi_{inc}$ , em kg de incombusto por kg de carvão) pode ser medido nas cinzas leves e pesadas e calculado com o uso da equação 3.1.

$$\xi_{inc} = \frac{\xi_{czP}}{1 - \xi_{czP}} X_{czP} + \frac{\xi_{czL}}{1 - \xi_{czL}} X_{czL} \quad (3.1)$$

onde  $\xi$  é a proporção mássica de incombusto, em kg de incombusto por kg de cinza,  $X$  é a proporção mássica de cinzas, em kg de cinzas por kg de cinzas, e os subíndices  $czP$  e  $czL$  representam respectivamente cinza pesada e cinza leve. A seguir, usa-se o valor do poder calorífico inferior na base seca ( $PCI_{bs}$ ) do carvão, pois acredita-se que toda a umidade presente no carvão evaporou e foi arrastada com os gases de combustão. Chega-se então a perda de energia pelo incombusto  $L_{INC}$ , em proporção energética, representada pela equação 3.2 e a eficiência de combustão  $\eta_{comb}$  é calculada pela equação 3.3.

$$L_{inc} = \frac{\xi_{inc} PCI_{bs}}{PCI_{bu}} \quad (3.2)$$

$$\eta_{comb} = 1 - L_{INC} \quad (3.3)$$

onde  $PCI_{bu}$  é o poder calorífico inferior na base úmida em kJ/kg,  $PCI_{bs}$  é o poder calorífico inferior na base seca em kJ/kg. Também é necessário o cálculo da massa teórica de ar  $m_{Tar}$ , calculada em kg de ar por kg de carvão através da equação 3.4. Este valor representa a quantidade de massa de ar necessária para reagir com todos os elementos do carvão. Esse valor é considerado teórico, pois é necessário um excesso de ar para garantir o contato de todos os elementos com o oxigênio presente no ar.

$$m_{Tar} = 11,51 \times \%C + 4,31 \times \%S + 34,28 \left( \%H - \frac{\%O}{7,937} \right) \quad (3.4)$$

onde é necessária a análise elementar do carvão, para se ter o valor da proporção mássica de cada elemento, sendo  $\%C$  a proporção de carbono,  $\%S$  a proporção de enxofre,  $\%H$  a proporção de hidrogênio e  $\%O$  a proporção de oxigênio. A equação 3.5 permite o cálculo da massa real de ar  $m_{Rar}$ , em kg de ar por kg de carvão, que entra na caldeira com base no valor do excesso de ar utilizado pelo controle operacional da usina.

$$m_{Rar} = m_{Tar} (1 + Exc_{ar}) \quad (3.5)$$

onde  $Exc_{ar}$  é a proporção de ar excedente. Outra maneira de calcular o excesso de ar é pela quantidade de oxigênio nos gases de combustão que deixam a caldeira, esta quantidade pode ser medida e comparada com tabelas achadas na literatura.

Outro valor importante a ser calculado é a massa teórica de gases  $m_{Tg}$ , em kg de gases por kg de carvão, este valor nos dá a idéia da quantidade de gases de combustão formados pela combustão completa do carvão em presença da quantidade de massa de ar teórico. Este valor é calculado pela equação 3.6 com o uso da análise elementar na base úmida.

$$m_{Tg} = 3,664 \times \%C + 8,397 \times \%H + w_c + 0,7865 m_{Tar} + \%N \quad (3.6)$$

onde  $\%N$  representa a quantidade de nitrogênio presente no combustível. Com este valor é possível então calcular a massa real de gases de combustão  $m_{Rg}$ , em kg de gases por kg de carvão com a equação 3.7.

$$m_{Rg} = m_{Tg} + m_{Tar} (1 + Exc_{ar}) \quad (3.7)$$

Esses valores serão utilizados para a estimação do cálculo de eficiência da caldeira pelo método das perdas.

### 3.1.2. Perda pelos gases de exaustão

O ar que entra na caldeira reage durante os processos de combustão gerando gases que passam pelos trocadores de calor transferindo energia para a água e vapor. Esses gases deixam a caldeira após o aquecedor regenerativo de ar, carregando consigo energia que não pôde ser aproveitada. Essa energia que é perdida ao meio ambiente, representada por  $L_{GS}$ , em proporção energética, pode ser calculada através da equação 3.8 que se refere apenas aos gases secos, desconsiderando a umidade do vapor d'água presente nos gases.

$$L_{GS} = m_{Rg} Cp_{gs} (T_{gss} - T_{ra}) \quad (3.8)$$

onde  $Cp_{gs}$  é o calor específico dos gases na saída da caldeira (após aquecedor regenerativo de ar), em kJ/kg°C,  $T_{gss}$  é a temperatura dos gases na saída da caldeira, em °C, e  $T_{ra}$  é a temperatura de referência do ambiente (igual à temperatura de admissão do ventilador forçado), em °C.

### 3.1.3. Perda pelas cinzas

Da mesma forma que os gases de combustão carregam energia consigo ao sair da caldeira, as cinzas também levam parte da energia adquirida na combustão. Para o cálculo desta perda utilizam-se as equações 3.9, para a perda pela cinza leve  $L_{czL}$ , e 3.10 para a perda pela cinza pesada  $L_{czP}$ , ambas em proporção energética. A soma das duas nos dá o valor total da perda pelas cinzas  $L_{CZ}$ .

$$L_{czL} = X_{czL} \times \%Cz \times Cp_{czL} (T_{gss} - T_{ra}) \quad (3.9)$$

$$L_{czP} = X_{czP} \times \%Cz \times Cp_{czP} (T_{cc} - T_{ra}) \quad (3.10)$$

onde  $\%Cz$  é a proporção de cinzas por kg de carvão, conforme análise elementar,  $Cp$  é o calor específico da cinza (conforme subíndice), em kJ/kg°C, e  $T_{cc}$  é a temperatura do interior da câmara de combustão, em °C. Por serem as condições de operação pré-estabelecidas e praticamente constantes, pode-se dizer que as perdas não variam muito, dependendo mais de variações da temperatura do ambiente externo.

### 3.1.4. Perda de calor para o ambiente

Essas perdas se devem à transferência de calor causada pela diferença de temperaturas entre a parede externa da caldeira e o ar ambiente (convecção) e entre as paredes da caldeira e da vizinhança (radiação).

Geralmente o valor desta perda é padronizado em uma taxa percentual em função da carga operada, ou seja, ao invés de se realizarem várias medições e cálculos, que estão cheios de incertezas e simplificações, adota-se um valor fixo. Os próprios fabricantes de caldeiras fornecem este valor com base no isolamento utilizado e na carga em operação.

### 3.1.5. Perdas não mensuráveis

São as perdas que não podem ser medidas, ou são inviáveis pela quantidade de medições e valores muito baixos de perda, com incertezas altas. Essas perdas ocorrem, por exemplo, devidas aos rejeitos dos moinhos, evaporação, selo d'água, vazamentos, etc.. Segundo a norma Asme PTC 4.1, adota-se o valor de 0,6% do poder calorífico para essas perdas.

## 3.2. Cálculo de eficiência de ciclo térmico

O cálculo de eficiência do ciclo térmico é baseado na norma americana ASME PTC 6. A eficiência bruta do ciclo  $\eta_{CT_B}$  é dada pela equação 3.11.

$$\eta_{CT_B} = \frac{\dot{W}_B}{\dot{Q}_{CT}} \quad (3.11)$$

onde  $\dot{W}_B$  é a potência bruta (turbina) retirada do ciclo, em kW, e  $\dot{Q}_{CT}$  é a taxa de calor líquida inserida no ciclo térmico, em kW e calculada pela equação 3.12.

$$\dot{Q}_{CT} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s \quad (3.12)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão de água/vapor, em kg/s,  $h$  é a entalpia específica da água / vapor, em kJ/kg, e os subíndices  $e$  e  $s$  representam respectivamente entrada e saída do volume de controle "ciclo térmico". A eficiência líquida do ciclo  $\eta_{CT_L}$  pode ser calculada pela equação 3.13.

$$\eta_{CT_L} = \frac{\dot{W}_L}{\dot{Q}_{CT}} \quad (3.13)$$

onde  $\dot{W}_L$  é a potência líquida (turbina menos bombas) retirada do ciclo, em kW. Costuma-se utilizar como trabalho líquido o valor da potência elétrica gerada pelo ciclo por ser de mensuração mais fácil.

## 3.3. Cálculo de eficiência da unidade

A eficiência da unidade  $\eta_U$  é dada pela equação 3.14.

$$\eta_U = \eta_{CA} \times \eta_{CT} \quad (3.14)$$

onde  $\eta_{CA}$  é a eficiência da caldeira, e  $\eta_{CT}$  é a eficiência do ciclo térmico. A eficiência da unidade, ou do sistema, pode ser calculada diretamente a partir da vazão de combustível, o que não se aplica usualmente em combustíveis sólidos devido à dificuldade de mensuração. Sabendo-se a quantidade de combustível, sabe-se a quantidade de energia introduzida ao sistema e sabendo-se a quantidade de energia gerada podemos dividir a energia útil pela energia total consumida.

## 4. CICLO DE POTÊNCIA DA USINA

### 4.1. Configuração original

Por tratar-se de uma proposta de adaptação para utilização de hidrogênio em um sistema já existente utilizou-se como referência uma usina antiga que utiliza como combustível principal o carvão fóssil pulverizado e como combustível auxiliar óleo pesado. O ciclo termodinâmico não possui reaquecimento, porém existem recuperadores de calor de baixa e média pressão. A Figura 4.1 mostra um esquema geral da usina.

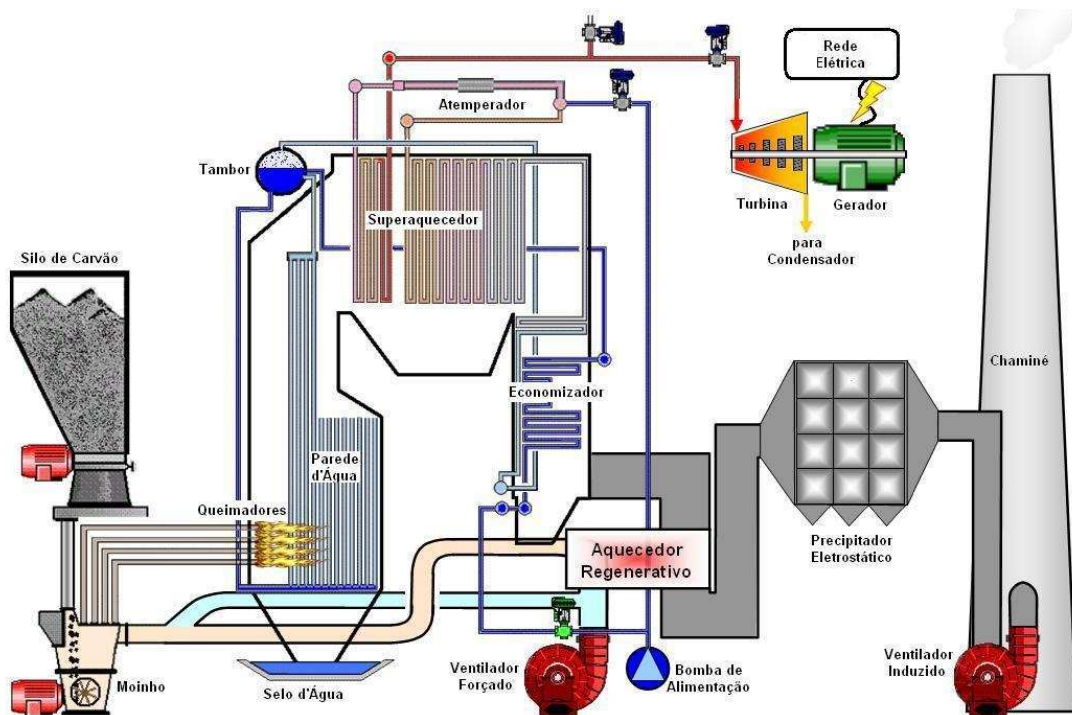


Figura 4.1: Esquema da usina

O carvão permanece alocado nos silos de onde, através de alimentadores controlados por variação de frequência, é dosado e jogado nos moinhos que o pulverizam até um tamanho de grão de cerca de  $74 \mu\text{m}$ . Impulsionado pela corrente de ar o carvão sai dos moinhos passando através do classificador estático e deste segue para os queimadores da caldeira onde ocorre o processo de combustão. Resultante da queima do carvão tem-se a formação de gases de combustão e cinzas que podem ser divididas em dois tipos: cinzas pesadas e cinzas leves. As cinzas pesadas são retiradas no fundo da caldeira por meio do selo d'água e as cinzas leves são arrastadas pelos gases de combustão e capturadas pelo precipitador eletrostático.

A usina utiliza ventiladores de tiragem induzida e forçada, de modo que haja depressão no interior da caldeira. O ar é admitido pelo ventilador forçado de onde se divide em dois ramos de distribuição, um deles, segue para o aquecedor de ar regenerativo que promove a transferência de calor entre os gases de combustão que estão deixando a caldeira e o ar que está sendo admitido. Após o aquecedor, o ar quente segue para os moinhos (ar primário), e para o interior da caldeira (ar secundário). A linha de ar frio é utilizada para regulação da temperatura do ar que entra nos moinhos, proporcionando o controle da temperatura da mistura ar/carvão pulverizado na saída dos mesmos.

A caldeira possui tubos verticais e tambor para separação da fase líquida do vapor, saindo do tambor o vapor passa pelo superaquecedor aonde chega à temperatura de 480 °C e segue pra o ciclo térmico que funciona conforme a Fig. 4.2.

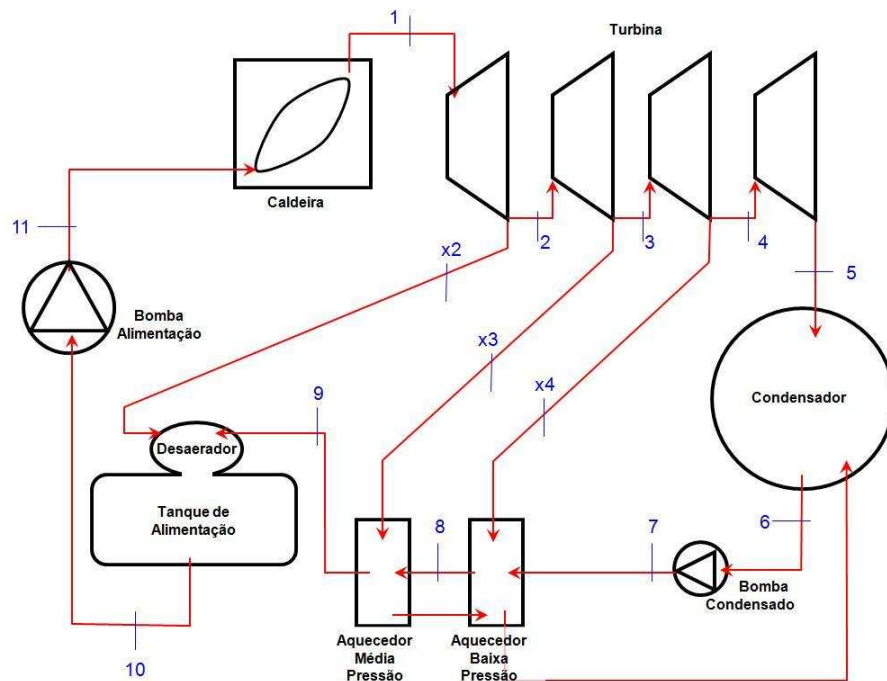


Figura 4.2: Esquema do Ciclo Térmico

Do tanque de alimentação (9-10) a água desmineralizada é impulsionada pela bomba de alimentação (10-11) para o interior da caldeira (11-1), passando primeiramente pelo economizador onde há o recebimento de calor dos gases de combustão que estão deixando a caldeira. Do economizador a água chega até o tambor, responsável por separar a água líquida do vapor saturado, ali também existe um canal de descida para a parede d'água a fim de promover a circulação natural. O vapor saturado segue para trocadores de calor chamados superaquecedores, ali o vapor é superaquecido e segue para a turbina (1-5) onde entrega sua energia às pás e ao eixo da mesma. Diretamente ligada à turbina tem-se o condensador (5-6) onde o vapor torna-se líquido novamente, resfriado pela água bruta do rio, e é novamente circulado pelo circuito do ciclo térmico passando por bombas de condensado (6-7) e recuperadores de calor (7-8 e 8-9) chegando novamente ao tanque de alimentação. Algumas extrações de água e ou vapor são feitas durante todo o processo, devido à presença de contaminantes na água, por isso há um consumo constante de água injetado no processo. As linhas representadas por x2, x3 e x4 representam as respectivas extrações de vapor da turbina.



O diagrama de temperatura por entropia, TxS, pode ser visualizado na Figura 4.3, acompanhada da Tabela 4.1, onde encontram-se alguns dos principais parâmetros nominais do ciclo.

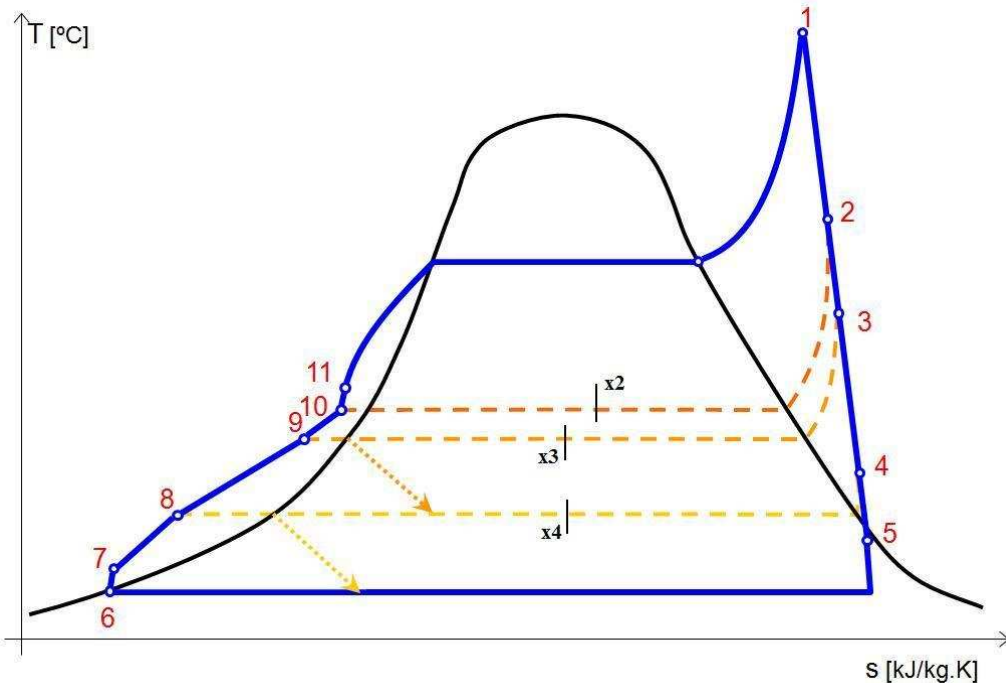


Figura 4.3: Digrama Temperatura x Entropia do ciclo térmico

Tabela 4.1: Parâmetros nominais

Trecho	Descrição	Saída do Trecho	
		Pressão (abs)	Temperatura
11-1	Caldeira (SH)	6000 kPa	480 °C
1-2	Turbina	1ª Extração	1000 kPa
2-3		2ª Extração	360 kPa
3-4		3ª Extração	60 kPa
4-5		Descarga	50 °C
5-6	Condensador	6 kPa	36 °C
6-7	Bomba de Condensado	900 kPa	40 °C
7-8	Aquecedor de Baixa Pressão (BP)		80 °C
8-9	Aquecedor de Média Pressão (MP)		145 °C
9-10	Tanque de Alimentação	660 kPa	155 °C
10-11	Bomba de Alimentação	8000 kPa	160 °C

Nota-se aqui a simplicidade do ciclo que não apresenta reaquecimento, e possui valores de temperatura e pressão baixos se comparado a usinas de projetos atuais. Os valores de pressão em vermelho na tabela são os que estão abaixo da pressão atmosférica. Para os cálculos, as perdas de calor e de pressão ao longo do circuito da usina foram consideradas conforme a tabela. O carvão utilizado na usina possui em média 10700 kJ/kg de poder calorífico inferior,

que foi o valor utilizado nos cálculos baseado no cálculo de eficiência da caldeira utilizado como referência.

A Tabela 4.2 a seguir, mostra os resultados para os testes de eficiência da usina em questão utilizando a metodologia apresentada no item 3.1.

Tabela 4.2: Perdas da caldeira

<b>PERDA</b>	incombusto	calor nos gases	calor sensível nas cinzas	calor para o ambiente	não mensuráveis
<b>VALOR</b>	4,38%	11,05%	1,74%	2,61%	0,60%
<b>TOTAL</b>					<b>20,38%</b>
<b>Eficiência da Caldeira</b>					<b>79,62%</b>

Foram considerados ainda: vazão mássica de 1 kg/s, eficiência da caldeira de 80%, eficiência das bombas de 60% e eficiência do conjunto turbina/gerador elétrico de 70%. Para o ciclo original chegou-se a uma potência total líquida de 860,9 kW e uma eficiência de 25,7% com um consumo de 313 g/s de carvão mineral e de 1127 kg/s de ar teórico.

#### 4.2. Proposta de alterações para combustão de hidrogênio

A troca do combustível de carvão para hidrogênio requer algumas alterações no ciclo. A caldeira deixa de ser uma câmara de combustão com troca de calor através de tubos e passa a ser um combustor onde acontece a mistura do hidrogênio e oxigênio com a água de alimentação. Como a combustão de hidrogênio gera vapor d'água, os gases de combustão somados da água de alimentação que evapora passam a ser o próprio vapor superaquecido que segue para o ciclo térmico. A grande vantagem é, que se avaliada a eficiência da caldeira, haverá apenas perdas de calor para o ambiente, além de não haver formação de óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ) e não haver a presença de enxofre nos gases de combustão, possibilitando fazer trocas de calor até chegar-se em temperaturas mais baixas, aproveitando ao máximo a energia disponibilizada e não danificando equipamentos.

Como hidrogênio e oxigênio estão sendo adicionados à massa de água que está circulando pelo ciclo, faz-se necessária a retirada de massa em algum ponto do ciclo. Como já visto anteriormente, esta retirada é usual em ciclos convencionais por motivos de contaminação da água desmineralizada, para efeito dos cálculos essa saída de massa do ciclo se dará após o condensador, conforme a Fig. 4.4.

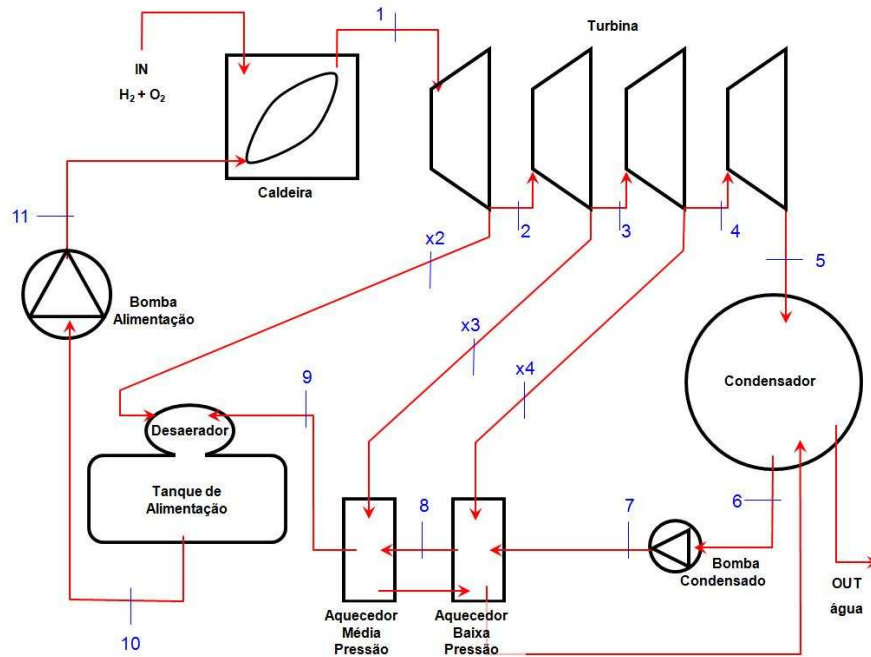


Figura 4.4: Esquema do ciclo térmico adaptado à combustão de hidrogênio

Nota-se a inclusão da entrada das massas de  $H_2$  e  $O_2$  na caldeira, e a retirada de água no condensador. O cálculo do consumo de hidrogênio se deu conforme a Figura 4.5.

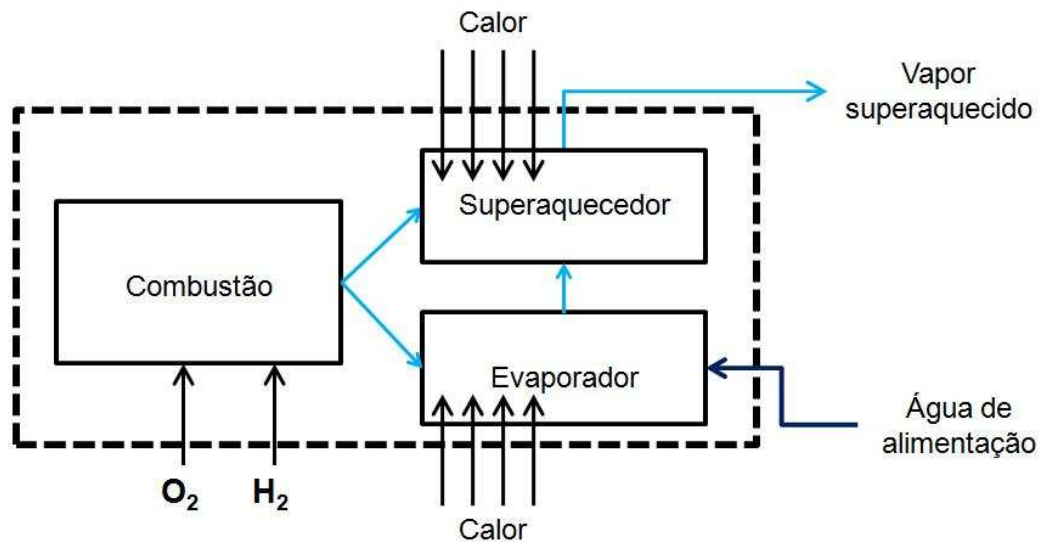


Figura 4.5: Volume de controle da caldeira adaptada

O volume de controle (linha tracejada) foi dividido em três câmaras, a primeira (esquerda) é onde ocorre a combustão do hidrogênio ( $H_2$ ) com o oxigênio ( $O_2$ ) a temperatura ambiente, como resultado tem-se água a temperatura ambiente, foi considerado como água, pois o calor gerado pela reação será adicionado somente na câmara seguinte. Nas câmaras seguintes (direita) têm-se o evaporador onde temos entrada da água de alimentação, do vapor da combustão e do calor gerado pela reação. O vapor saturado deixa o evaporador e entra em uma segunda área de superaquecimento, onde novamente recebe calor e vapor da combustão elevando o fluido de trabalho ao estado de vapor superaquecido que segue então para o ciclo

térmico. A potência necessária para transformar a mistura em vapor superaquecido  $\dot{Q}_{comb}$  em kW, é calculada pelas seguintes equações.

$$\dot{Q}_{comb}\eta_{CA} = \dot{m}_{11}(h_1 - h_{11}) + \dot{m}_{IN}(h_1 - h_0) \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{H_2} PCI_{H_2} \quad (4.2)$$

onde  $\eta_{CA}$  é o rendimento da caldeira, como já visto,  $\dot{m}$  é a vazão mássica em kg/s,  $h$  é a entalpia em kJ/kg, os subíndices 1, 11 e IN referenciam ao sistema conforme a Fig.4.4, o subíndice 0 referencia a um estado nas condições normais de pressão e temperatura (1atm, 25°C),  $PCI_{H_2}$  é o valor do poder calorífico inferior do hidrogênio que tem valor de 119930 kJ/kg e  $\dot{m}_{H_2}$  é a vazão mássica de hidrogênio, em kg/s, que se relaciona com as vazões da reação  $\dot{m}_{IN}$  e de oxigênio  $\dot{m}_{O_2}$  em kg/s, através das seguintes relações.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{2\dot{m}_{IN}}{10} \quad (4.3)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{8\dot{m}_{IN}}{10} \quad (4.4)$$

Todos os parâmetros de cálculo foram mantidos conforme o ciclo original, exceto a eficiência da caldeira que passou a ser 97%, pois foram consideradas apenas perdas para o ambiente e as perdas não mensuráveis, conforme metodologia do item 3.1, visto que não há geração de cinzas, incombusto e os gases de combustão passam a incorporar o fluido de trabalho. Para o ciclo proposto nesta configuração chegou-se a uma potência líquida de 872,2 kW e uma eficiência de 30,9%, com um consumo de 23,63 g/s de hidrogênio e de 94,53 g/s de oxigênio.

### 4.3. Comparações entre os sistemas

Como já visto, para o ciclo que utiliza hidrogênio houve um aumento na eficiência em cerca de 5%. A Tabela 4.3 a seguir, demonstra a comparação de alguns parâmetros entre os dois sistemas.

Tabela 4.3: Comparação entre os ciclos

	Potência das bombas [kW]	Potência líquida [kW]	Eficiência da caldeira	Eficiência líquida do ciclo	Consumo de combustível [g/kgÁgua/s]	Consumo de ar/O2 teórico [g/kgÁgua/s]
Ciclo Original	14,77	860,9	80%	25,70%	313,0 (carvão)	1.127 (ar)
Ciclo com H2	13,1	874,3	97%	30,85%	23,63 (H2)	94,53 (O2)

Nota-se que para a mesma vazão tem-se um aumento da eficiência, devido isto principalmente ao aumento de rendimento da caldeira, que passou de 80% no ciclo original para 97% no ciclo com hidrogênio. Nota-se também que devido à retirada de massa no condensador, as bombas para o ciclo com hidrogênio têm uma potência total menor e isto reflete na potência líquida gerada pela usina. Outra vantagem do ciclo a hidrogênio é que as quantidades de combustível e oxigênio necessárias para o seu funcionamento são muito menores se com-

paradas às quantidades de carvão e ar necessárias no ciclo original. Isto remete à utilização de menos equipamentos, equipamentos menores e mais simples, diminuindo custos operacionais e energéticos. Tanto para as vazões de ar quanto para a vazão de oxigênio foram consideradas o consumo de massa teórica necessária à reação completa acontecer.

Os principais parâmetros do ciclo foram explorados a fim de observar as respostas dos sistemas, as figuras a seguir contêm uma comparação gráfica destas diferentes alterações de parâmetros. Para a variação da pressão do vapor superaquecido segue as Figuras 4.6, referente à eficiência do ciclo, e 4.7, referente ao consumo de combustível/reagente.

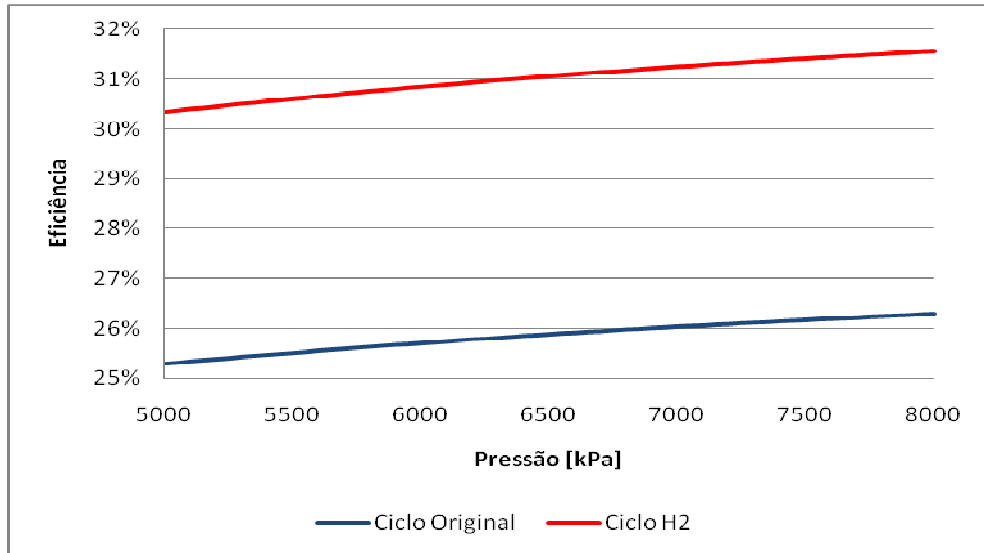


Figura 4.6: Eficiência do ciclo x Pressão do vapor superaquecido

Como esperado ao aumentar a pressão do vapor superaquecido, a eficiência é aumentada, nota-se que esse aumento é igual para os dois ciclos sendo a diferença entre as eficiências constante.

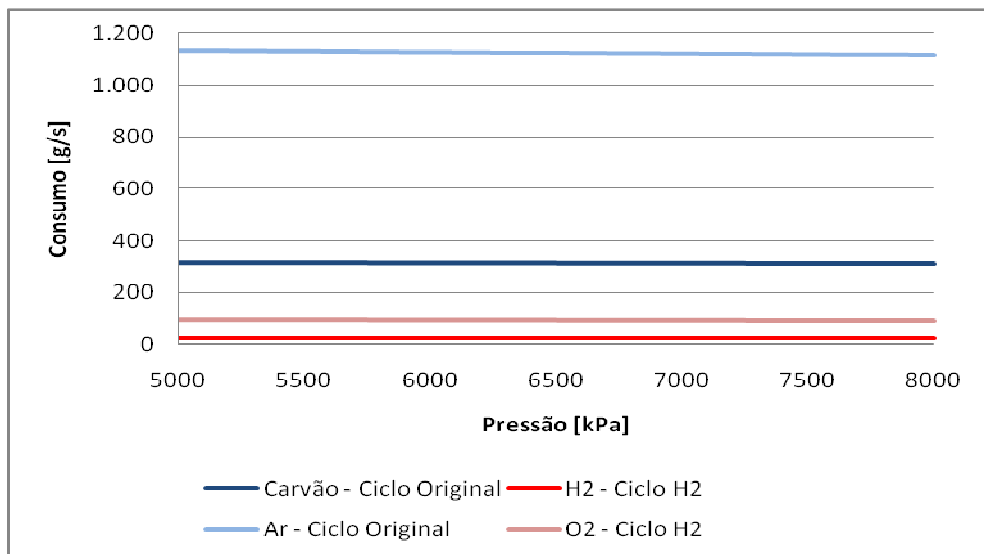


Figura 4.7: Consumo x Pressão do vapor superaquecido

Nota-se por este gráfico que o consumo de combustíveis e reagentes é praticamente constante para a variação de pressão estudada. Nota-se também a grande diferença de vazão mássica entre o ciclo adaptado à combustão de hidrogênio e o ciclo original, isto representa um menor consumo de equipamentos auxiliares, menor espaço físico para os mesmos e menos manutenção da usina.

A seguir, nas figuras 4.8 e 4.9, podemos observar as respostas de eficiência e consumo para a variação da temperatura do vapor superaquecido.

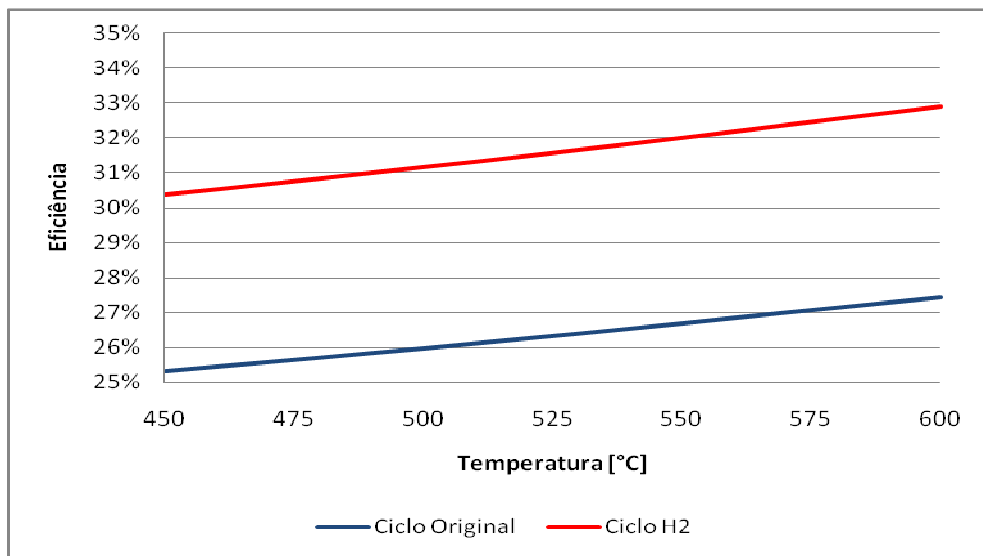


Figura 4.8: Eficiência do ciclo x Temperatura do vapor superaquecido

Novamente a eficiência dos dois ciclos aumenta de maneira igual, sendo a diferença entre as eficiências praticamente constante para a variação de temperatura do vapor superaquecido.

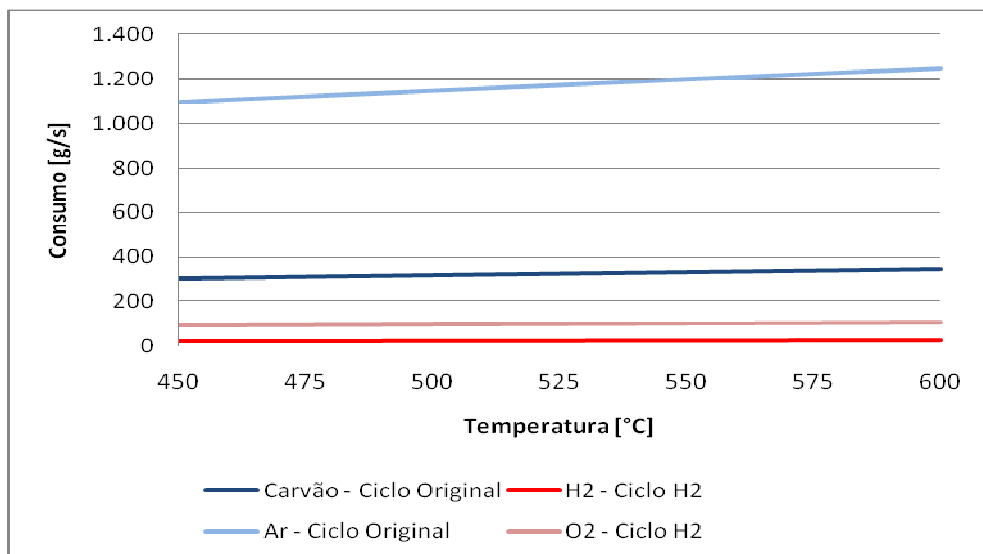


Figura 4.9: Consumo x Temperatura do vapor superaquecido

Nota-se aqui que com o aumento da temperatura do vapor superaquecido as vazões mássicas de carvão e ar, no ciclo original, aumentam mais do que as vazões de hidrogênio e

oxigênio do ciclo adaptado, as quais permanecem praticamente constantes. Isto se deve ao alto poder calorífico do hidrogênio e a combustão direta com oxigênio que com pouco acréscimo de massa adiciona muita energia.

A última variação estudada foi a variação da eficiência do conjunto turbina/gerador elétrico, pois o mesmo tem um valor baixo para padrões atuais, mas por se tratar de um dado real não foi alterado no equacionamento padrão dos ciclos.

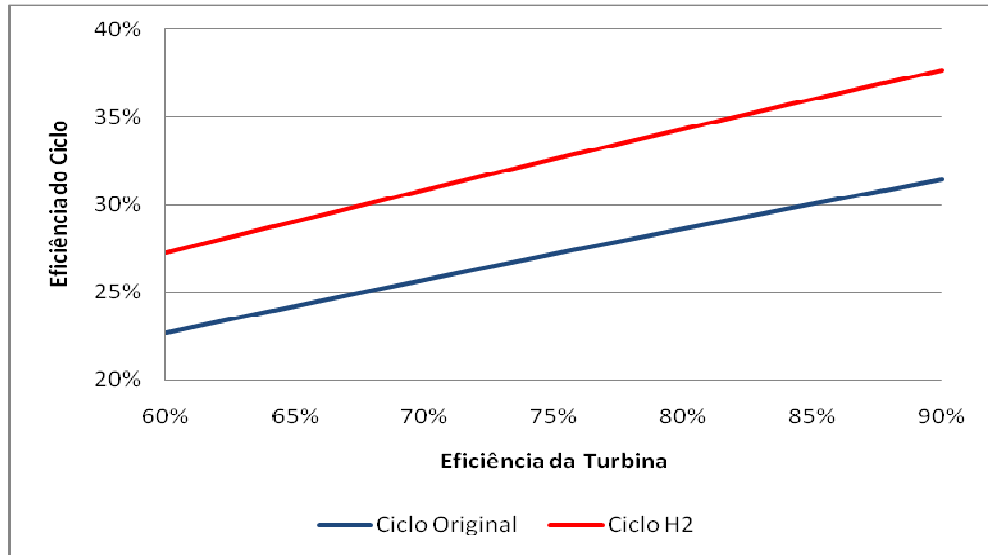


Figura 4.10: Eficiência do ciclo x Eficiência do conjunto turbina/gerador

Como esperado para eficiências mais altas do conjunto turbina/gerador, a eficiência do ciclo aumenta muito, porém nota-se que para o ciclo adaptado à combustão de hidrogênio este aumento é maior do que no ciclo original, isto pode ser bem visualizado pela inclinação das linhas vermelha (ciclo adaptado) que é maior que da linha azul (ciclo original).

Para todos os casos o ciclo adaptado mostrou-se mais eficiente que o ciclo original, porém vale lembrar que o consumo energético extra-ciclo para a produção de hidrogênio e oxigênio é muito alta. Porém não foram avaliadas as quantidades de energia envolvidas para a produção do carvão e dos equipamentos auxiliares necessários para a sua combustão na usina termoeletrica com o ciclo original. A eficiência global poderia ser avaliada para efeito de comparações somente se todos estes dados fossem levantados.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo serviu para mostrar que a adaptação de uma usina termoeletrica à combustão de hidrogênio aumenta sua eficiência. Para o caso estudado esta eficiência foi da ordem de 5%. Porém cabe também fazer-se um estudo mais detalhado da energia consumida fora do ciclo, ou seja, a energia gasta para a produção dos combustíveis e reagentes, seja ele hidrogênio e oxigênio ou carvão. Também devem ser inclusos os consumos energéticos dos equipamentos auxiliares para o funcionamento dos ciclos.

As variações dos parâmetros não mostraram diferenças de aumento de eficiência e vazões mássicas, exceto para o caso da variação da eficiência do conjunto turbina/gerador, que no caso do ciclo adaptado houve um aumento maior de eficiência.

A continuidade do estudo deve focar no melhoramento do ciclo adaptado, aumentando os parâmetros nominais do ciclo de acordo com a tecnologia atual. Um melhor detalhamento

do combustor de hidrogênio deve ser feito e principalmente a inclusão de reaquecimento de vapor no ciclo.

Apesar do consumo da produção de hidrogênio ser alto com as tecnologias atuais, é possível melhorar os estudos do ciclo e as tecnologias a fim de viabilizar o uso de hidrogênio que pode ser útil para o aproveitamento de energias alternativas que não têm produção constante, como no caso da energia eólica que depende da velocidade do vento. A grande vantagem da utilização do hidrogênio está nessa combinação que inibe a geração de poluentes, tais como CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Outra vantagem está na ausência de enxofre nos gases de combustão, possibilitando um maior aproveitamento da energia disponível e ma vida útil maior dos equipamentos, além da diminuição da poluição que ocasionam chuvas ácidas.

## REFERÊNCIAS

ASME PTC 4-1998 - **Fired Steam Generators** [Revision of ASME PTC 4.1-1964(R1991)]

ASME PTC 6-1996 - **Performance Tests Code 6 on Steam Turbines** (Revision of ASME PTC 6-1976)

BOSSEL, U.; **Does a Hydrogen Economy Make Sense?**, Proceedings of IEEE, 2009

TESSARO, I. P. B.; **Relatório de Estágio Supervisionado II**, Porto Alegre: DE-MEC/UFRGS, 2008

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

GILL, A. B.; **Power Plant Performance**, Butterworths, 1st edition , 1984.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C.; **Steam – Its Generation and Use**, The Babcock & Wilcox Company, 41st edition, 2005.

MORAN, M.; SHAPIRO, H. N.; **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, LTC, 4ª edição, 2002.

SINGER, JOSEPH G. P. E.; **Combustion Fossil Power**, Combustion Engineering, Inc., 4th edition, 1991.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.; **Fundamentos da Termodinâmica**, John Wiley & Sons, Inc., Tradução da 6ª edição, 2003.