


LEME

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. 01 |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 2 de 20 |

| RE V | DATA | DESCRIÇÃO | EXECU ÇÃO | VERIFI CAÇÃO | APROV AÇÃO |
|---------|------|-----------|--------------|-----------------|---------------|
| | | | | | |

Este documento é propriedade da LEME, não podendo ser copiado, reproduzido, nem fornecido a terceiros sem sua prévia e expressa autorização.

| | | | |
|---|--|-------------------------------------|------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 3 de 20 |

1 INTRODUÇÃO

O presente documento tem como objetivo apresentar a metodologia e as premissas adotadas para a elaboração do balanço energético, para o cálculo dos fluxos energéticos que ingressam e deixam da caldeira e o rendimento líquido da caldeira que constitui a Usina Termelétrica Pampa Sul.

Também será apresentado o fluxograma térmico de geração de vapor e energia elétrica para cada etapa do processo. Em cada etapa será indicado as propriedades termodinâmicas que atravessam o volume de controle.

2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DA CALDEIRA

A caldeira empregada na UTE Pampa Sul será do tipo leito fluidizado circulante – CFB (sigla inglesa para *Circulating Fluidized Bed*), com pressão de operação subcrítica, circulação natural, com único tambor de vapor e passe único de reaquecimento.

A tecnologia de combustão em leito fluidizado utiliza o princípio de fluidização do leito com ar, no qual partículas de combustível e calcário são injetadas no interior de uma câmara de combustão. As partículas são suspensas em uma corrente de ar ascendente (ar primário) injetado na parte inferior da fornalha por meio de bocais distribuidores. Um segundo fluxo de ar, denominado de ar secundário, é injetado mais acima pelas paredes laterais da fornalha, com o intuito de fornecer a quantidade necessária de oxigênio para garantir a combustão completa do combustível e a captura do SO_x. Como a velocidade do fluxo de ar dentro da fornalha é elevada, as partículas finas arrastadas pelo ar de combustão são capturadas por ciclones para então serem reconduzidas para a fornalha.

2.1 Componentes principais de caldeiras

Os principais componentes que compõe a caldeira *CFB* e que influenciam no balanço energético são:

- Transportador helicoidal para remoção do leito inerte: A cinza de fundo gerada no processo de queima e dessulfurização dos gases será removida da câmara de combustão de forma contínua por meio de um duto de descarga, até atingir os transportadores helicoidais resfriados a água devido a elevada temperatura do leito. A energia térmica removida da cinza de fundo será transferida para o ciclo térmico, melhorando a eficiência global da planta;

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 4 de 20 |

- Câmara de combustão: compreende o local onde se desenvolve a queima do combustível e a captura do SOx dos gases, sendo composta por paredes de feixes de tubos para a evaporação da água do ciclo térmico, fundo com pequenos tubos verticais e uniformemente distribuídos para a injeção do ar de fluidização (ar primário) e bocais de injeção de ar para garantir a queima (ar secundário);
- Superaquecedores: consiste de um ou mais feixes tubulares destinados a superaquecer o vapor gerado na tubulação antes de seguir para a turbina alta;
- Reaquecedor: consiste de um ou mais feixes tubulares destinados a reaquecer o vapor de saída da turbina de alta pressão para que possa ser utilizado pela turbina de média;
- Economizador: consiste de um ou mais feixes tubulares instalados após os superaquecedores/reaquecedores destinados a pré aquecer a água de alimentação da caldeira, melhorando a eficiência e minimizando o choque térmico entre a água de alimentação e a água contida no tambor;
- Pré aquecedor de ar (regenerador): trocador de calor de placas destinado a recuperar a energia térmica residual dos gases de combustão para aquecer o fluxo de ar primário e o fluxo de ar secundário;

3 CONSIDERAÇÕES E PREMISSAS


As seguintes considerações foram feitas para o cálculo energético:

- A caldeira será analisada como um volume de controle em regime permanente;
- Os efeitos da energia cinética e potencial serão desprezados;
- Estados termodinâmicos das entradas e saídas serão aqueles informados pelo fabricante;
- O ar e os gases de combustão serão considerados como gases ideais;
- Temperatura de referencia ambiente igual 20 °C.

4 METODOLOGIA

A metodologia para determinar a eficiência da caldeira consistiu em traçar um volume de controle em torno dos limites da caldeira e identificar os principais fluxos de massa que atravessam a fronteira deste volume.

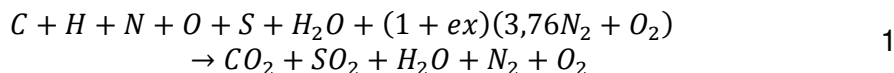
Em seguida os fluxos de energia que contribuem com a energia disponível na câmara de combustão, que são empregados no processo produtivo de energia elétrica e aqueles que são perdidos para o ambiente (denominados simplesmente de perdas) são calculados.

| | | | |
|---|--|-------------------------------------|------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 5 de 20 |

Por fim, um balanço de massa e energia é estabelecido para contabilizar as perdas associadas ao arrefecimento da caldeira devido a troca térmica com o ambiente.

4.1 Energia disponível na caldeira

Conhecendo-se a composição do combustível (Tabela 1) e com base na estequiometria da reação, consegue-se calcular o ar necessário para a queima do combustível. A quantidade de ar que fornece o oxigênio teoricamente suficiente para a combustão completa do combustível é denominada de “ar teórico” ou “ar estequiométrico”. Na prática, é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico, sendo necessário recorrer a um percentual seguro de excesso de ar para evitar a combustão incompleta. A equação genérica (não balanceada) que representa a reação de combustão do carvão é mostrada na equação 1.



A energia disponível na caldeira será determinada pela soma da energia de dessulfurização com o produto da vazão mássica de combustível, $\dot{m}_{carvão}$, e seu poder calorífico, PCI , conforme indicado pela equação 2.

$$\dot{Q}_{disponível} = \dot{Q}_{combustível} + \dot{Q}_{gen,dess} = \dot{m}_{carvão} \cdot PCI + \dot{Q}_{gen,dess} \quad 2$$


onde $\dot{m}_{carvão}$ indica a vazão mássica de carvão dada em kg/s, PCI o poder calorífico inferior do carvão e $\dot{Q}_{gen,dess}$ a energia liberada pela reação de dessulfurização.

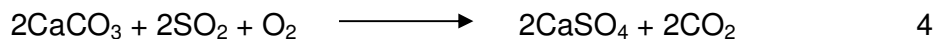
4.1.1 Energia da reação de dessulfurização

A energia térmica liberada pela reação de dessulfurização será determinada com base no balanço das entalpias de formação dos compostos envolvidos na reação. Os valores das entalpias de formação estão tabelados e podem ser encontradas em bibliografias de termo-química.

$$\dot{Q}_{gen,dess} = \sum \Delta H^{\circ}_{Produto} - \sum \Delta H^{\circ}_{Reagente} \quad 3$$

O equacionamento básico que envolve a reação química do seqüestro de SOx pode ser escrita como:

| | | | |
|---|--|--|-------------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 6 de 20 |



4.2 Perda de energia devido a combustão parcial

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 a energia decorrente da quantidade de combustível que não foi queimado (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; e excesso de ar.

A energia perdida decorrente dos incombustos é determinada pelo produto da vazão mássica de incombustos e o poder calorífico do carbono, conforme demonstrado pela equação 5.

$$\dot{Q}_{\text{perda, incombustos}} = \dot{m}_{\text{incombustos}} \cdot PCI_{\text{carbono}} \quad 5$$

4.3 Perda de energia pelas cinzas

O processo de queima e dessulfurização geram resíduos constituídos basicamente por cinza e gesso que devem ser removidos de maneira contínua do fundo da fornalha (cinza pesada) e dos gases de exaustão (cinza leve).

A cinza pesada encontra-se a uma temperatura próxima a temperatura do leito (cerca de 850°C) e deve ser resfriada antes de ser estocada. A cinza leve está na mesma temperatura dos gases de combustão (cerca de 135°C conforme informado pelo fabricante), sendo extraída após o aquecedor regenerativo de ar no precipitador eletrostático e filtro de mangas.

Para o cálculo da perda de energia térmica devido as cinzas utiliza-se a equação 6 para a cinza pesada e equação 7 para a cinza leve.

$$\dot{Q}_{\text{Perda, Cinza pesada}} = \dot{m}_{\text{Cinza pesada}} \cdot C_{P, \text{cinza pesada}} (T_{\text{Cinza pesada}} - T_{\text{amb}}) \quad 6$$

$$\dot{Q}_{\text{Perda, Cinza leve}} = \dot{m}_{\text{Cinza leve}} \cdot C_{P, \text{cinza leve}} (T_{\text{Cinza leve}} - T_{\text{amb}}) \quad 7$$

Onde \dot{m} é a vazão de cinza (conforme índice) dada em kg/s, C_p o calor específico dado em kJ/kg°C, T_{Cinza} e T_{amb} a temperaturas da cinza (conforme índice) e de referência do ambiente dadas em °C, respectivamente.

| | | | | | |
|---------|-------------------------------------|--|-------------|-----------------------|------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 7 de 20 |

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 de referência do ambiente.

4.4 Perda de energia pelos gases de combustão

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 ambiente e pode ser calculada pela equação 8.

$$\dot{Q}_{Perda,gases\ comb} = \dot{m}_{gases\ comb} \cdot C_{p,gases\ comb} (T_{gases\ comb} - T_{amb}) \quad 8$$

onde \dot{m} é a vazão dos gases de combustão dada em kg/s, C_p o calor específico dado em kJ/kg°C, $T_{gases\ comb}$ e T_{amb} a temperaturas dos gases de combustão (na saída da caldeira após aquecedor regenerativo de ar) e de referência do ambiente dadas em °C, respectivamente.

4.5 Perda de energia pelas purgas da caldeira

O processo de evaporação da água que ocorre no interior das paredes d'água e tubulão da caldeira provoca a formação e acúmulo de sólidos que são prejudiciais por causarem corrosão e incrustações nas paredes internas dos tubos de vapor.

Para controlar a concentração destes contaminantes é necessário realizar purgas freqüentes da água da caldeira. Da mesma maneira que as cinzas e os gases de combustão, as purgas carregam consigo uma quantidade de energia térmica quando são descartadas. Para o cálculo destas perdas pode-se utilizar a equação 9.

$$\dot{Q}_{Perda,purgas} = \dot{m}_{purgas} \cdot (h_{purgas} - h_{ref\ amb}) \quad 9$$

onde \dot{m} é a vazão das purgas dada em kg/s e h a entalpia dada em kJ/kg. O índice $ref\ amb$ indica que a propriedade é tomada na condição de referência de ambiente.

4.6 Energia útil

O processo de geração de vapor tem por objetivo produzir vapor a partir da água de alimentação para ser utilizado na geração de energia elétrica em turbinas de alta,

| | | | | | |
|---------|-------------------------------------|--|-------------|-----------------------|------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 8 de 20 |

média e baixa pressão. A energia térmica consumida nas turbinas é denominada de energia útil e é calculada pela equação 10.

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{Q}_{\text{vapor principal}} + \dot{Q}_{\text{vapor reaquecido}} - \dot{Q}_{\text{água alimentação}} \quad 10$$

$$\dot{Q}_{\text{vapor principal}} = \dot{m}_{\text{vapor principal}} \cdot (h_{\text{vapor principal}} - h_{\text{ref amb}}) \quad 10a$$

$$\dot{Q}_{\text{vapor reaquecido}} = \dot{m}_{\text{vapor reaquecido}} \cdot (h_{\text{vapor reaquecido quente}} - h_{\text{vapor reaquecido frio}}) \quad 10b$$

$$\dot{Q}_{\text{água alimentação}} = \dot{m}_{\text{água alimentação}} \cdot (h_{\text{água alimentação}} - h_{\text{ref amb}}) \quad 10c$$

onde \dot{m} é a vazão dada em kg/s e h a entalpia dada em kJ/kg, conforme índices indicados.

4.7 Perda de energia para o ambiente

As perdas de energia térmica para o ambiente devem-se 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).

Um balanço de massa e energia é elaborado para quantificar as perdas de energia que ocorrem pelo arrefecimento da caldeira, com a transferência de energia térmica dos dispositivos da caldeira para o ambiente.

O conceito geral de balanço representa um procedimento de análise de um sistema, físico ou não, em termos de uma propriedade selecionada. No presente estudo as propriedades avaliadas serão a massa e a energia para os diferentes componentes envolvidos no balanço energético (água, cinza, ar, gases de combustão).

A análise será baseada no estudo dos mecanismos de fluxo e de geração. Os termos de fluxo representam as quantidades de massa e energia que são traçadas entre sistema e sua vizinhanças; no que segue, quantidades recebidas pelo sistema devem ser representadas por números positivos e quantidades cedidas pelo sistema devem ser representadas por números negativos. Os termos de geração representam as quantidades de massa e energia de cada componente que são criadas e/ou destruídas no interior do sistema; similarmente ao caso anterior, quantidades criadas e destruídas devem ser representadas, respectivamente, por números positivos e negativos.

| | | | | | |
|---------|-------------------------------------|--|-------------|-----------------------|------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 9 de 20 |

O instrumento básico do procedimento de análise em questão é a equação de balanço aplicada para um volume de controle, a qual expressa formalmente a relação entre as quantidades acima definidas e pode ser representada pela seguinte forma:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad 11$$


$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \\ = \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) + \sum \dot{Q}_{geração} \end{aligned} \quad 12$$

O balanço de energia será desenvolvido e aplicado do ponto de vista macroscópico (global sobre a caldeira). De acordo com o princípio de conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica), a energia é indestrutível, e a quantidade de energia total que entra no sistema deve ser igual à que sai do sistema mais qualquer acúmulo dentro do sistema. Quando a energia é gerada ou consumida dentro do sistema (o que ocorre nos processos com reações químicas), ela deve ser considerada no balanço global.

4.8 Rendimento da caldeira

O rendimento térmico da caldeira mede o percentual pelo qual a energia disponível na câmara de combustão (fornecida pelo combustível \pm energia liberada/consumida pela reação de seqüestro de SOx) é transformada em energia térmica útil capaz de gerar trabalho nas turbinas. O cálculo da eficiência global da caldeira pode ser realizado por duas maneiras:

- i. Método Indireto que consiste no cálculo da eficiência a partir da contabilização das principais perdas existentes em uma caldeira
 - perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo;
 - perdas por radiação e convecção;
 - perdas por purga;
 - perdas associadas à combustão ineficiente.
- ii. Método Direto que consiste na contabilização dos fluxos energéticos de entrada e saída. Embora seja um método simples, este método não fornece

| | | | |
|---|--|--|--------------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 10 de 20 |

informações sobre as principais perdas do sistema.

Como neste estudo o objetivo é apresentar o valor teórico do rendimento da caldeira, o método direto será adotado para o cálculo do rendimento, sendo definido pela equação 13.

$$\eta_{caldeira} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{disponível}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil de vapor}}}{(\dot{Q}_{\text{combustível}} + \dot{Q}_{\text{gen,dess}})} \quad 13$$

Como a reação de captura de SO_x que ocorre no interior da câmara de combustão é exotérmica, a sua componente energética será adicionada a parcela da energia liberada pela queima do combustível para compor o termo da energia disponível.

4.9 Resolução do equacionamento

Como a modelagem do balanço energético produz um grande conjunto de equações, a sua resolução é facilitada pelo emprego de ferramentas computacionais. Para o presente estudo foi utilizado o software EES que mostra-se muito eficaz para a resolução de conjuntos de equações além de possuir uma extensa biblioteca embutida com várias funções matemáticas e propriedades termodinâmicas para centenas de substâncias.

5 DADOS DE ENTRADA

O cálculo do balanço energético foi realizado considerando os dados de entrada apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do carvão mineral

| Componente | Concentração mássica (%) base úmida* |
|------------------|--------------------------------------|
| Carbono | 27,3 |
| Hidrogênio | 1,9 |
| Nitrogênio | 0,4 |
| Oxigênio | 6,6 |
| Enxofre | 1,5 |
| H ₂ O | 16 |
| Cinzas | 46,2 |

| | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | REV. |
| | | | | FOLHA 11 de 20 |

* Valores informados pela Tractebel (*Technical Specification Table 3 – Coal database*)

Tabela 2 – Dados de entrada no balanço de massa.

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--|--------------------|-----------|
| Vazão mássica de carvão** | t/h | 320,3 |
| PCI** | kJ/kg | 9.988 |
| Taxa de incombustos* | % | 1,0 |
| Vazão mássica de calcário | t/h | 16,2 |
| Taxa de reação do calcário inserido | % | 85 |
| Vapor superaquecido* | | |
| Fluxo | t/h | 1045 |
| Temperatura | °C | 538 |
| Pressão | MPa | 16,67 |
| Vapor reaquecido frio* | | |
| Fluxo | t/h | 872 |
| Temperatura | °C | 320 |
| Pressão | MPa | 3,58 |
| Vapor reaquecido quente* | | |
| Fluxo | t/h | 872 |
| Temperatura | °C | 358 |
| Pressão | MPa | 3,22 |
| Água de alimentação da caldeira* | | |
| Fluxo | t/h | 1045 |
| Temperatura | °C | 274 |
| Pressão | MPa | 16,6 |
| Vazão dos gases de exaustão | Nm ³ /h | 1.391.939 |
| Temperatura da câmara de combustão | °C | 850 |
| Temperatura de referência ambiente | °C | 20 |
| Temperatura de saída dos gases de combustão* | °C | 135 |
| Temperatura de saída da cinza pesada* | °C | 340 |

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 12 de 20 |

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--------------------------------------|---------|----------|
| Pressão do ar primário | kPa (g) | 24,8 |
| Pressão do ar secundário | kPa (g) | 17,7 |
| ΔH° CaCO ₃ | kJ/mol | - 1207 |
| ΔH° SO ₂ | kJ/mol | - 297,09 |
| ΔH° CaSO ₄ | kJ/mol | - 1434,5 |
| ΔH° CO ₂ | kJ/mol | - 393,5 |

* Valores informados pelo fabricante.

** Valores informados pela Tractebel (PCI – *Technical Specification Table 3 – Coal database* e *Vazão mássica de carvão* conforme email recebido em 18/12/2014).

6 BALANÇO ENERGÉTICO E RESULTADOS

O cálculo do balanço energético foi realizado traçando-se um volume de controle em torno da caldeira (linha tracejada), delimitando as entradas e saídas para cada fluxos de massa (Figura 1) e aplicando-se as equações definidas no item anterior deste documento.

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 13 de 20 |

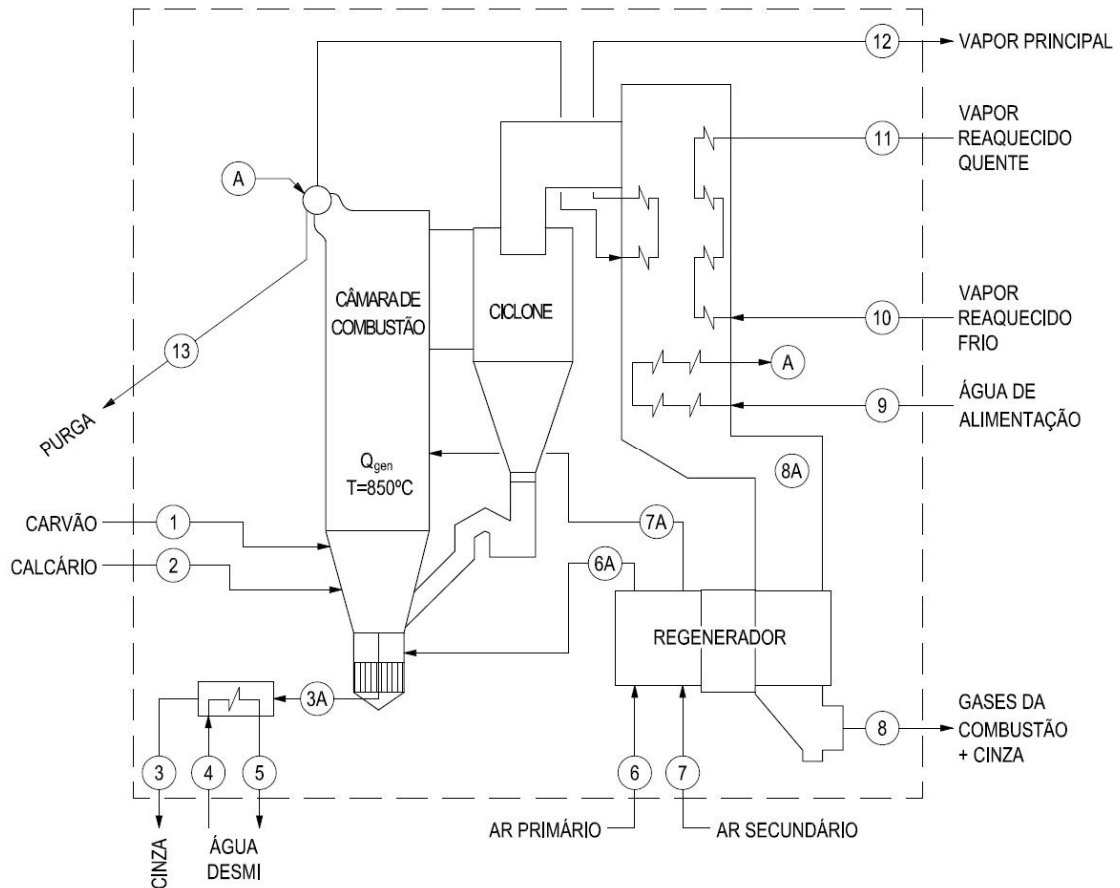


Figura 1 - Volume de controle traçado na fronteira da caldeira.

O conjunto de equações geradas pela aplicação das equações definidas previamente foi inserido de forma sistêmica no *software EES* para resolução e obtenção dos valores dos fluxos de energia útil, energia perdida, eficiência. O desenvolvimento do cálculo pode ser visto no Anexo II.

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4.

| | | | |
|---------|--|-------------|-----------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | REV. | FOLHA 14 de 20 |

Tabela 3 – Características termodinâmicas dos fluxos que cruzam o volume de controle.

| Fluxo | Componente | Vazão mássica | Temperatura | Pressão | Entalpia | Vazão volumétrica |
|-------|--------------------------|---------------|-------------|---------|----------|-------------------|
| | | kg/s | °C | Mpa | kJ/kg | Nm³/h |
| 1 | Carvão | 88,97 | 20 | | | |
| 2 | Calcário | 4,5 | 20 | | | |
| 3 | Cinza pesada | 41,67 | 340 | | | |
| 4 | Condensado | 143,3 | 36 | 0,756 | 151,4 | |
| 5 | Condensado | 143,3 | 65,8 | 0,756 | 276 | |
| 6 | Ar primário | 198,1 | 20 | 0,0248 | 293,6 | 551749 |
| 7 | Ar secundário | 242,2 | 20 | 0,077 | 293,5 | 674359 |
| 8 | Gases de comb/cinza leve | 532,5 | 135 | 0,09733 | 409,6 | 1391000 |
| 9 | Água de alimentação | 293,4 | 274,5 | 16,67 | 1204 | |
| 10 | Vapor reaq frio | 242,2 | 320 | 3,58 | 3027 | |
| 11 | Vapor reaq quente | 242,2 | 538 | 3,22 | 3540 | |
| 12 | Vapor superaquecido | 290,5 | 538 | 16,67 | 3397 | |
| 13 | Purga | 2,905 | 350,7 | 16,67 | 1676 | |

Tabela 4 – Balanço de energia térmica no volume de controle da caldeira.

| Energia | kW | % |
|--|--------|--------|
| Liberada pelo carvão | 888599 | - |
| Liberada pela reação de dessulfurização | 12378 | - |
| Disponível na câmara de combustão | 900977 | 100,00 |
| Útil | 758168 | 84,15% |
| Residual dos gases de escape | 64693 | 7,20% |
| Residual do fluxo de água da purga da caldeira | 4626 | 0,50% |
| Recuperada da escória (cinza pesada) | 17850 | 2,00% |
| Residual da escória (cinza pesada) | 11200 | 1,25% |
| Residual dos incombustos | 23542 | 2,60% |
| Dissipada no arrefecimento da caldeira | 20899 | 2,30% |

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 15 de 20 |

O rendimento da caldeira é obtido pela aplicação da equação 13 e pode ser visto na Tabela 4 pelo resultado da razão entre a energia útil e energia disponível na câmara de combustão, que tem como resultado 84,15%.

7 FLUXOGRAMA TÉRMICO

O fluxograma térmico da UTE Pampa Sul é apresentado no Anexo I deste documento. A energia térmica liberada pela queima do carvão será utilizada para produzir vapor superaquecido na caldeira. O vapor superaquecido é então conduzido à turbina de alta, onde por meio da sua expansão é gerada energia mecânica. Ao sair da turbina de alta o vapor segue para a caldeira onde é reaquecido pelos gases de combustão nos reaquecedores.

O vapor, agora reaquecido, é direcionado para a turbina de média, onde ocorre a expansão do vapor para a geração de energia mecânica. Ao sair da turbina de média, o vapor segue para a turbina de baixa para completar a expansão e produzir mais trabalho mecânico.


A energia mecânica produzida nas três turbinas é convertida em energia elétrica em um gerador.

O vapor, ao final da expansão, é então descarregado em um condensador de superfície para promover a condensação do vapor, utilizando como fonte fria a água de circulação proveniente de uma torre de resfriamento. O condensador transforma o vapor em condensado, recuperando a água de alimentação para incorporá-la ao início de um novo ciclo água-vapor. Esta mudança de estado (gasoso para o líquido) provoca o vácuo, consequência normal de uma mudança de estado deste tipo, que é um fator importante para análise da eficiência do conjunto turbina de baixa pressão/condensador.

A água condensada no poço quente é bombeada até o desaerador, através dos pré-aquecedores de baixa pressão de forma a melhorar a eficiência do ciclo. Os pré-aquecedores operam como trocadores de calor de contato transferindo o calor do vapor, proveniente dos pontos de extração da turbina de baixa, para o condensado.

No desaerador é injetado vapor proveniente do ponto de extração turbina de média para auxiliar na remoção de gases dissolvidos que entram no ciclo e são arrastados pelo condensado.

A água extraída do desaerador será transferida, através das bombas de alimentação para o tambor da caldeira. Da mesma forma, para melhorar a eficiência do ciclo

| | | | |
|---|--|--|--------------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 16 de 20 |

térmico, a água de alimentação passa por trocadores de calor de alta pressão e pelo economizador antes de ser descarregada no tambor da caldeira. Os pré-aquecedores operam como trocadores de calor de contato transferindo o calor do vapor proveniente dos pontos de extração das turbinas de alta e média para a água de alimentação.

8 METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DO *HEAT RATE* DA PLANTA DE GERAÇÃO

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 do consumo interno da planta. 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 pela equação 14.

$$\eta_{planta} = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{consumo\ interno}}{(\dot{Q}_{combustível} + \dot{Q}_{gen,dess})} \quad 14$$


Onde $\dot{W}_{turbina}$ é a potência elétrica gerada no gerador, $\dot{W}_{consumo\ interno}$ é a potência consumida pelos equipamentos elétricos instalados na planta como bombas, ventiladores, britadores, correias transportadoras sistemas de supervisão e controle etc, e $\dot{Q}_{combustível}$ é a potência disponível na caldeira fornecida pelo carvão. Todos os termos da equação 14 são expressos na unidade MW.

De forma auxiliar, é comum expressar, na literatura técnica internacional, a qualidade do uso da energia pelo termo em inglês *heat rate* (HR), definida pela equação 15.

$$HR = \frac{\dot{Q}_{combustível} + \dot{Q}_{gen,dess}}{(\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{consumo\ interno})} \quad 15$$

O *heat rate* é de fato o inverso da eficiência definido pela equação 14, entretanto é geralmente expresso em kJ/KW.h.

A ASME PTC-46 descreve os procedimentos padronizados a serem adotados na seleção de instrumentos de medição, calibração e uso correto durante a medição,

| | | | |
|---|--|--|--------------------------|
|  | | UTE PAMPA SUL S.A. | |
| LEME | | | |
| CLIENTE USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | FOLHA 17 de 20 |

incluindo instruções detalhadas para a medição das grandezas que serão usadas nos cálculos:

- temperatura, pressão e vazão de fluido de trabalho;
- consumo de combustível, consumo de calcário na câmara de combustão, 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;
- potência consumida pelos equipamentos da instalação, como bombas, transportadores e moinhos etc;
- condições ambientes durante a realização dos testes;

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. Inmetro, 1995, e ASME PTC-19 fornecem orientações sobre tratamento de incertezas de medição que deverão ser seguidos.

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, 4 horas (ASME PTC 46 Table 3.4), 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 24 hora da instalação ou após 1 hora da estabilização das reações de dessulfurização ser atingida (ASME PTC 46 Table 3.3).

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 subseqüentes 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

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 18 de 20 |

válidos, deve-se selecionar um conjunto que seja proveniente de uma coleta contínua de, no mínimo, 2 horas.

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANÇO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 19 de 20 |

Anexo I - Fluxograma Térmico da UTE Pampa Sul

LEME

| | | | | | |
|---------|--|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| CLIENTE | USINA TERMELÉTRICA PAMPA SUL S.A. | | CLIENTE Nº. | PS3-MD-LM-02-M00-001 | |
| PROJETO | PROJETO BÁSICO AMBIENTAL | | LEME Nº. | P.006851-MD-M20-LE001 | REV. |
| TÍTULO | ESTUDO PRÉVIO DO BALANCO ENERGÉTICO | | | | FOLHA 20 de 20 |

Anexo II – Sistema de Equacionamento do Balanço Energético da Caldeira