

## SECAGEM DE MINÉRIOS E GERAÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO UTILIZANDO COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO DA OUTOKUMPU

Paulo Cesar da Conceição, Tapio Laukkanen

### 1. Introdução

Por não dispor de recursos energéticos tradicionais como petróleo, carvão mineral e potencial hidroelétrico de grande porte, a Finlândia, há mais de três décadas, empenhou-se em intensa pesquisa na busca de alternativas energéticas dos recursos disponíveis no seu território. Dentre as alternativas então estudadas destacaram-se a turfa, madeira, resíduos vegetais, xistos, etc. A preocupação constante de buscar a máxima eficiência das alternativas energéticas, possibilitou, por exemplo, o desenvolvimento de processos como o "flash smelting" da Outokumpu, mundialmente utilizado para a produção de cobre, níquel, enxofre e recentemente chumbo, onde o calor liberado na oxidação dos componentes, como o ferro e enxofre, possibilitam a fusão do metal de interesse, até com a eliminação total do óleo combustível.

Quando na década de 70 a crise do petróleo forçou em todo o mundo o desenvolvimento de processos e equipamentos a preços competitivos para substituição do petróleo, a Finlândia já se encontrava em fase de utilização de algumas alternativas energéticas em diversos processos industriais. Hoje, a tecnologia finlandesa de utilização de combustíveis sólidos já se encontra um passo adiante de outras tecnologias, com equipamentos e processos capazes de substituir técnica e economicamente os derivados de petróleo, os quais já vem sendo aplicados industrialmente há mais de uma década.

A Outokumpu iniciou em 1972, em sua planta hidrometalúrgica de Kokkola, os estudos para adoção de combustíveis sólidos locais no processo de geração de eletricidade e vapor para processo. Devido à sua longa experiência na operação de reatores de leito fluidizado na ustulação de minérios sulfetados, características dos diferentes combustíveis sólidos disponíveis e particularidades típicas do processo de leito fluidizado que favorecem a combustão, este processo foi selecionado como base para o desenvolvimento de equipamentos a serem utilizados em diferentes aplicações industriais e comunitárias.

Dois reatores de leito fluidizado de 25 MW t cada, 36 t/h vapor, 500°C e 60 Kg/cm<sup>2</sup> iniciaram operação experimental em 1975 na planta de Kokkola, utilizando como combustíveis turfa, cavacos de madeira, raízes, cascas de madeira e

outros resíduos vegetais. Em 1977, os reatores entraram em operação normal.

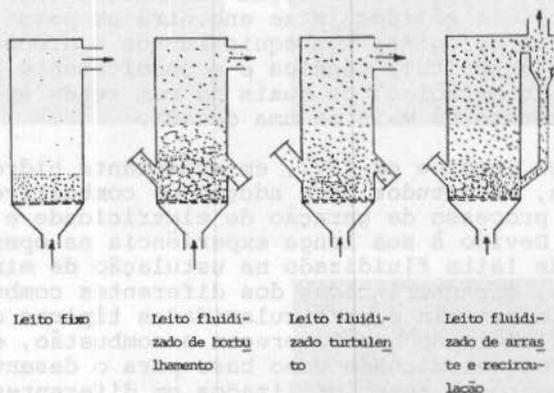
A partir de 1978, quando este sistema passou a ser comercializado, diversas instalações foram projetadas e construídas pela Outokumpu nas áreas de secagem, geração de vapor para processos, eletricidade e aquecimento urbano, com capacidades variando de 7 MW t a 50 MW t.

## 2. Princípios da Tecnologia de Leito Fluidizado

A combustão em leito fluidizado significa a queima de um combustível com o auxílio de um material sólido inerte. Materiais granulares como areia, a própria cinza do combustível ou no caso de secagem, o próprio material a secar, podem ser usados como material sólido inerte.

A areia é alimentada sobre uma grelha perfurada. Quando o ar é soprado através da grelha, o material do leito se expande e comporta-se como um líquido em ebulição, se a velocidade de vazão do ar é adequadamente alta. Dependendo da velocidade de vazão do ar, o leito fluidizado comporta-se de diferentes formas como pode ser observado na figura 1.

Figura 1.



A areia é aquecida através de um queimador de partida, podendo ser utilizado óleo, álcool, querosene, etc. Quando o combustível é alimentado no reator é imediatamente misturado com o material quente do leito; a água do combustível é vaporizada e superaquecida; as partículas do combustível seco alcançam a temperatura de ignição e queimam no ar fluído através do leito. A queima do combustível é completada acima do leito (voláteis e partículas finas do combustível através do ar secundário).

### 3. Propriedades do Leito Fluidizado

- A intensa agitação do meio fluidizado faz com que os coeficientes de troca de massa e energia (intenso contato gás/sólidos) sejam bem mais elevados que em condições convencionais de queima, resultando em uma alta eficiência de combustão a baixas temperaturas. Eficiências acima de 99% tem sido obtidas na combustão de turfa, madeira e outros resíduos carbonosos, e acima de 96% com carvão mineral.
- A temperatura de combustão é facilmente regulável. Este total controle da combustão permite prevenir a fusão das cinzas do combustível e regular a temperatura adequada para os processos industriais.
- A distribuição de temperatura é homogênea em todas as seções transversais do leito.
- Devido ao efeito coeficiente de transferência de calor e capacidade de estocar calor no leito, permite a utilização de combustíveis com os mais variados teores de umidade, sem causar transtornos na mesma extensão que nos métodos convencionais. Esta propriedade permite também que parte da energia térmica possa ser recuperada com o auxílio de elementos de resfriamento no leito, possibilitando, no caso de geração de vapor, o menor dimensionamento da caldeira.
- O alto coeficiente de transferência de massa torna possível remover o enxofre dos gases de combustão pela adição de calcário ou dolomita no leito. Caso típico para o carvão brasileiro.
- A baixa temperatura de combustão reduz o conteúdo de NOx nos gases.
- Diferentes combustíveis podem ser queimados na mesma unidade. Esta propriedade assume nos dias atuais

importância estratégica e econômica fundamental.

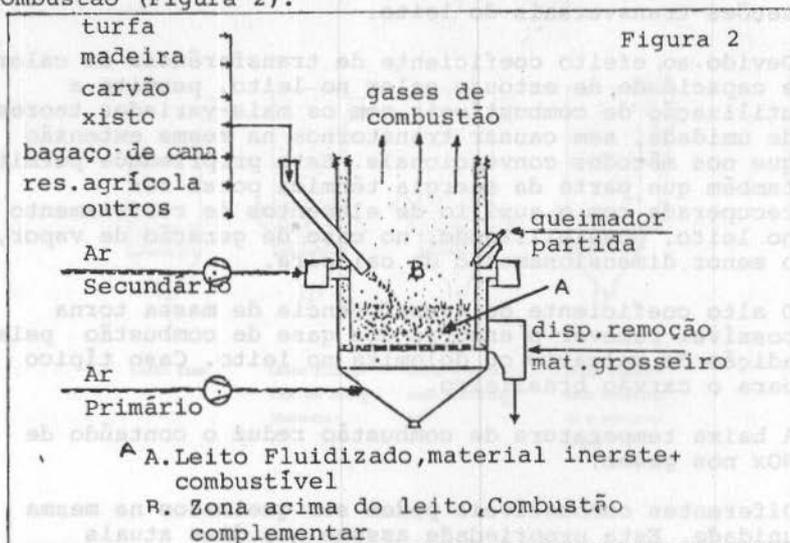
- Devido à alta taxa térmica de grelha (kcal/m<sup>2</sup>h de grelha) o reator de leito fluidizado requer uma pequena área para instalação.
- Flexibilidade operacional. O reator pode ser operado com até 25% de sua capacidade nominal apenas com combustível sólido.

#### 4. Descrição do Reator de Leito Fluidizado Outokumpu

O combustível e areia são alimentados de seus respectivos silos na mesma rosca ou correia transportadora de velocidade variável. Ambos são conduzidos ao interior do reator através de uma válvula rotativa e calha de alimentação.

O reator de leito fluidizado consiste numa câmara de combustão cilíndrica com uma grelha na sua parte inferior. A câmara de combustão é construída em aço carbono e revestida internamente com material refratário.

O ar primário é soprado através da grelha, promovendo a fluidização do material do leito. A partida do reator é realizada com auxílio de um queimador de partida, que é desligado tão logo o combustível sólido inicie sua combustão (Figura 2).



O combustível sólido inicia sua combustão dentro do leito fluidizado e esta é completada na parte superior do leito, principalmente de voláteis e partículas finas do combustível, onde é soprado o ar secundário.

Partículas grosseiras ( pedras, metais, etc.) que prejudicam a fluidização e areia podem ser removidas do leito através de um dispositivo localizado na altura da grelha, sem interrupção da operação.

No caso de geração de vapor e/ou eletricidade dentro da concepção de um sistema compacto, a câmara de radiação da caldeira (fornalha) está acoplada ao reator, como se fôsse uma única unidade de maneira a permitir uma troca térmica mais eficiente (Figura 4).

No caso de secagem, onde o objetivo é a geração de determinado volume de gases quentes à uma temperatura pré selecionada, o reator tem altura maior, de modo a se obter uma combustão completa dentro do corpo do reator. Os gases de combustão são conduzidos ao sistema de secagem, seja ele forno rotativo, "flash dryer", leito fluidizado ou qualquer outro. O ar de diluição, para controle de temperatura é alimentado na parte superior do reator ou externamente ao mesmo (Figura 4).

O nível de instrumentação é simples e efetivo, consistindo dos dispositivos normais de controle de combustão, (medidores de temperatura, pressão, vazão e analisador de oxigênio). A faixa de controle pode variar de 40 a 100%.

Diferentes combustíveis sólidos podem ser utilizados no reator de leito fluidizado Outokumpu, tais como: turfa (fresada, extrudada, peletizada, etc.), madeira (cavacos, serragem, cascas, raízes, etc.), diferentes qualidades de carvão mineral (alto teor de cinzas e enxofre), xisto, bagaço de cana, resíduos agrícolas, etc.

No caso de combustíveis com alto teor de cinzas, normalmente não é necessária a adição de areia.

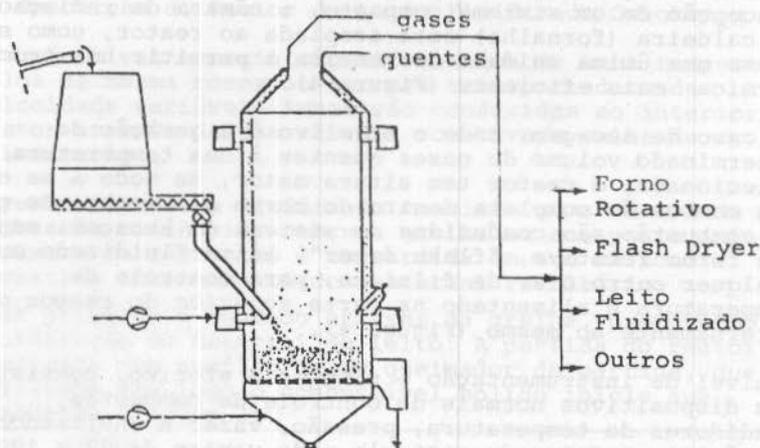
## 5. Aplicações do Reator de Leito Fluidizado Outokumpu

As seguintes aplicações foram desenvolvidas pela Outokumpu, para substituir o uso de derivados de petróleo, estando hoje em operação em diversas unidades industriais.

### 5.1. Geração de Gás Quente para Secagem/Calcinação

O reator de leito fluidizado como gerador de gases quentes, assegura a substituição completa dos derivados de petróleo na secagem por combustíveis sólidos locais de forma econômica, eficiente e segura, podendo também ser adaptado aos sistemas de secagem existentes, devido à pequena área requerida para sua instalação e altas capacidades térmicas por unidade.

Figura 3.



Gerador de gases quentes com reator de leito fluidizado para secagem

No caso de utilização de combustíveis com alto teor de cinzas, um ciclone pode ser utilizado na saída dos gases do reator, de forma a reduzir ao mínimo as partículas sólidas (cinzas) que seguem com os gases da combustão, porém, na maioria dos casos, em nada afetam o produto a secar, pois a quantidade é desprezível, comparada com o volume de material secado.

O reator de leito fluidizado Outokumpu pode operar com temperatura de gases até  $1150^{\circ}\text{C}$ , mantendo-a praticamente constante dentro da faixa especificada. Sua capacidade térmica atinge até 45.000.000 kcal/h em uma única unidade.

Apresentamos a seguir alguns dados, que podem ser comparados aos sistemas convencionais, tomando por base

uma unidade de geração de gás quente de 15.000.000 kcal/h de capacidade, utilizando cavacos de madeira como combustível. Os seguintes parâmetros são adotados:

- Cavacos de Madeira:
  - . dimensões: menor que 50 mm (inclui serragem, folhas, etc.)
  - . umidade : ~ 35%
  - . poder calorífico: ~ 2.500 kcal/kg
  - . densidade aparente: ~250 kg/m<sup>3</sup>
  - . preço médio/ton (35% umidade): 25,55 USD/ton (varia conforme a região)
  - . temp.gases quentes: 700°C
  - . eficiência combustão reator OK: 97% min.
- Óleo Combustível:
  - . preço: 205 USD/ton
  - . poder calorífico: 9.800 kcal/kg
  - . eficiência combustão: 97% min.
- Custo da Giga-caloria em relação ao combustível:
  - . reator Outokumpu: 10,54 USD/Gcal
  - . óleo BPF: 21,57 USD/Gcal

Para a mesma capacidade, o custo da Giga-caloria gerado com óleo BPF é cerca de 2,1 vezes maior que o da madeira. A economia anual resultante (8.000 h/ano de operação):

- óleo: 2.587.920 USD
- madeira: 1.267.418 USD
- economia: 1.323.501 USD/ano, o que representa uma alternativa economicamente viável, com um retorno de investimento em prazo bastante reduzido.
- Custo de perda de eficiência de combustão na queima de madeira.

Diversos sistemas alternativos utilizando combustíveis sólidos são hoje disponíveis, apresentando eficiências de combustão geralmente entre 60-80%. Conforme apresentado na Tabela I, um sistema altamente eficiente como o da Outokumpu, acima de 97%, representaria uma economia anual em termos de consumo de combustível significativa. Normalmente apenas o valor desta economia é maior que o diferencial de investimento, quando comparado à sistemas convencionais e pouco eficientes.

Outras vantagens econômicas como redução da área de reflorestamento obrigatória por lei, não necessidade de tratamento de efluentes adicionais ao contrário de outros sistemas alternativos, baixo custo de beneficiamento da madeira, não sendo necessário sua secagem e/ou pulverização.

Tabela I

EFICIÊNCIA COMBUSTÃO (%)	CONSUMO DE MADEIRA/II (KG)	CONSUMO ADICIONAL/H (KG)	CONSUMO ADICIONAL/ANO (T)	CUSTO CONSUMO ADICIONAL/ANO (USD)
97	6186	BASE	-	-
96	6250	64	512	13.082
95	6316	130	1.040	26.572
90	6667	481	3.840	98.316
85	7059	873	6.984	178.441
80	7500	1.314	10.512	268.582
75	8000	1.814	14.512	370.702
70	8571	2.385	19.000	487.494
65	9231	3.045	24.360	622.398
60	10000	3.813	30.504	779.377

O consumo de combustível durante a operação varia de acordo com a necessidade energética do processo de secagem, representando outra economia adicional em relação a outros sistemas.

O reator também permite respostas rápidas às variações de carga. A experiência prática tem mostrado que tanto para aumentar ou diminuir a sua carga térmica, a resposta tem sido na razão de 10% de carga/min.

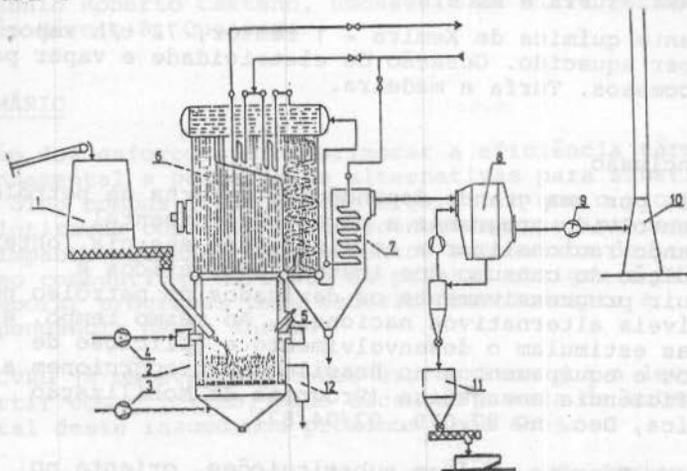
A confiabilidade operacional do sistema Outokumpu é seu ponto fundamental, pois este equipamento é projetado para operações contínuas em longas campanhas, dispensando totalmente paradas para limpeza e manutenções temporárias (não existem partes móveis no reator).

É importante salientar que apesar da instrumentação básica do sistema Outokumpu ser relativamente simples, com fácil operação e manutenção, é disponível no mercado nacional e projetada para permitir um alto grau de controle.

## 5.2. Geração de vapor para processos e/ou eletricidade ou aquecimento urbano

Nestas aplicações, o reator é idêntico ao processo de secagem, apenas incorporando uma caldeira na sua parte superior que complementa o reator, conforme Figura 4.

Figura 4



USINA DE GERAÇÃO DE VAPOR COM COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO (250MW, 10kg/s vapor)

As mesmas propriedades e vantagens da combustão em leito fluidizado descritas nos parágrafos anteriores são aqui aplicadas, pois o sistema é idêntico, sendo os gases quentes dirigidos à caldeira.

Dependendo da granulação, poder calorífico e teor de umidade do combustível, pode-se remover calor do leito, através de elementos de resfriamento, produzindo vapor diretamente e consequentemente, reduzindo o dimensionamento da caldeira.

A eficiência térmica global do sistema com reator de leito fluidizado Outokumpu, incluindo a eficiência da caldeira, situa-se normalmente entre 85 a 89%, conforme o projeto. A capacidade unitária de sistemas hoje em operação alcança até 100 t/h de vapor.

## 6. Referências Operacionais

Dentre as instalações com reatores de leito fluidizado Outokumpu, hoje em operação, citamos:

- 6.1. Usina de Zinco de Kokkola - 2 reatores, cap. unitária 40 t/h vapor, 500°C, 60 bar. Combustíveis: turfa, madeira, carvão mineral, xisto. Geração vapor de eletricidade e vapor para processo
- 6.2. Usina de briquetes de turfa - Ilomantsi - reator para geração de gases quentes para secagem mineral. Cap.: 7 MWt. Turfa e madeira.
- 6.3. Planta química de Kemira - 1 reator, 72 t/h vapor super aquecido. Geração de eletricidade e vapor para processos. Turfa e madeira.

## 7. Conclusão

O Brasil, por sua grande dependência externa de petróleo, tem desenvolvido programas a nível governamental, objetivando racionalizar a utilização de energia, obtendo a diminuição do consumo dos insumos energéticos e substituir progressivamente os derivados do petróleo por combustíveis alternativos nacionais. Ao mesmo tempo, estes programas estimulam o desenvolvimento e aplicação de processos e equipamentos no Brasil, que proporcionem a maior eficiência energética (Programa de Mobilização Energética, Dec. nº 87.079, 02/04/82).

Este mesmo Decreto no item substituições, orienta no sentido de suprimir as cotas de fornecimento de derivados de petróleo em todos os casos em que seja comprovada a possibilidade de uso de alternativo energético. Fato que já vem ocorrendo tanto na área de secagem /calcinação quanto na geração de vapor de processos.

O reator de leito fluidizado, objeto do presente trabalho, vem ao encontro dos diversos interesses brasileiros, quer sejam eles a nível governamental ou empresarial, pois é uma alternativa técnica e economicamente viável e de características anti-poluentes. Estes equipamentos estão sendo fabricados no Brasil, constituindo-se em uma solução atraente para os problemas energéticos da indústria mineiro metalúrgica nacional.

## 8. Referências

- Know-how for Biomass and Peat Energy Development, Tapio Laukkanen, Outokumpu Oy, Finland, 1981.
- Finn Energy'79 - Peat Coking and Fluidized Bed Combustion of Peat, T.Laukkanen, J.Hanni, Outokumpu Oy
- Report on Energy Use of Peat - United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy, 1981.