

5 GASEIFICAÇÃO

5.1. Aspectos gerais

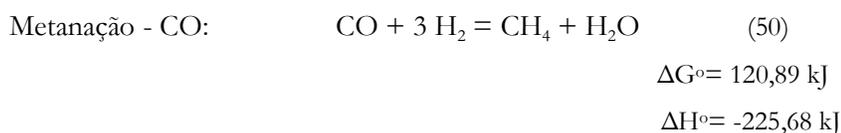
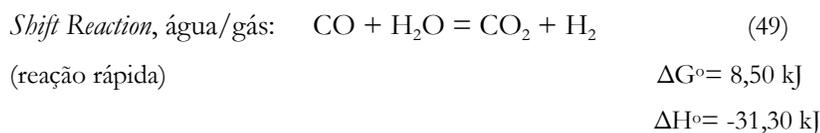
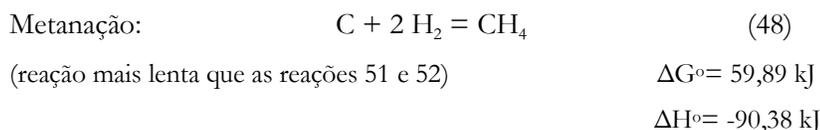
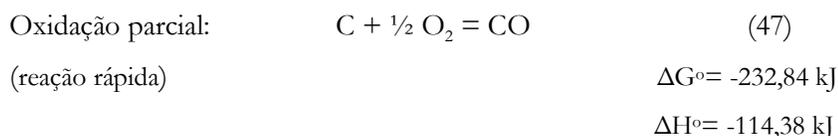
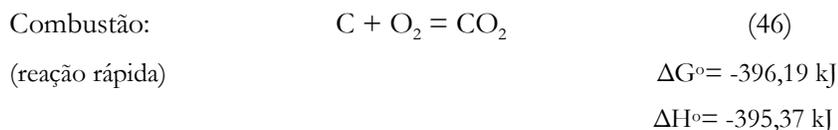
A gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que tenha carbono em sua composição) em um produto gasoso combustível (Gás de Síntese). Estes gases combustíveis contêm CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , H_2O , outros hidrocarbeto, gases inertes e diversos contaminantes (ex. particulados e alcatrões). Os sistemas de gaseificação operam de forma a limitar a oxidação completa do hidrogênio para água, e do monóxido de carbono para dióxido de carbono.

Os fatores que afetam o desempenho do sistema de gaseificação são: A razão de equivalência (ER), a temperatura e a vazão de aquecimento, o tipo de agente de gaseificação, pressão, tempo de residência, as propriedades da alimentação, catalisadores.

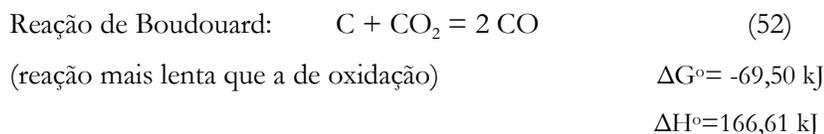
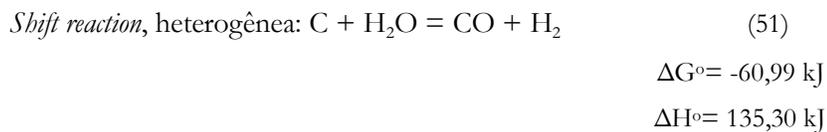
O processo de gaseificação ocorre em temperaturas elevadas, 500 – 1400°C e em pressões atmosféricas ou maiores. O oxidante usado pode ser ar, vapor de água, dióxido de carbono, oxigênio puro ou uma mistura destes gases. Segundo a literatura a faixa do poder calorífico do gás produzido depende do agente de gaseificação usado. Gaseificadores que usam ar como agente oxidante, produzem um gás combustível contendo concentrações relativamente elevadas de nitrogênio, o poder calorífico dos gases gerados no processo de gaseificação está na faixa de 4 – 6 MJ/m^3 . Os gaseificadores que usam oxigênio e vapor geram produtos gasosos contendo relativamente alta concentração de hidrogênio e CO , o poder calorífico destes gases está na faixa de 12 – 18 MJ/m^3 . Os gases combustíveis com baixo poder calorífico são usados diretamente em combustão ou em uma máquina para gerar energia, enquanto gases com poder calorífico meio/alto são usados como alimento para subsequente conversão em produtos químicos, principalmente metano e metanol. (Lucas, 2005)

As principais reações envolvidas durante o processo de gaseificação são listadas a seguir. Os dados da energia padrão de Gibbs e entalpia padrão foram calculados a 1100°C, empregando o software *HSC Chemistry 5.0*.

Reações exotérmicas

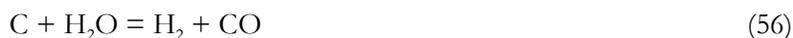
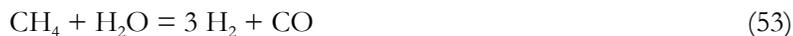


Reações endotérmicas



A reação (51) representa a reação de reforma de carbono ($C_xH_y + x H_2O = (x + y/2) H_2 + x CO$) a qual contribui para incrementar a concentração de H_2 e CO . A

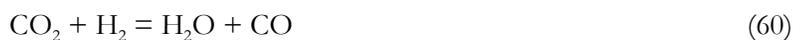
elevada produção de hidrogênio durante a gaseificação com vapor pode ser atribuída às seguintes reações químicas.



A reforma de carbono a seco também ocorre durante o processo de gaseificação e pode ser representada pela seguinte reação:



Outras reações químicas além da reação de Boudouard (52) quando o CO_2 é usado como meio gaseificador são apresentadas abaixo (Lucas, 2005; Prins, 2005; Holt, 2005; Kosky e Floess, 1980):



Atualmente, a alta demanda mundial por fontes de energia renovável é um dos principais motivadores do crescente emprego dos sistemas de gaseificação os quais sofreram uma forte queda depois da crise do petróleo. Este fenômeno se vê refletido no aumento da produção de gás de síntese de alta qualidade, mediante sistemas de gaseificação. O gás de síntese gerado tem uma ampla gama de aplicações, os quais são apresentados na Figura 19, que também apresenta os produtos gerados por os processos de pirólises e combustão. (Vick e Steiger, 2000; Belgiorno *et al.* 2003)

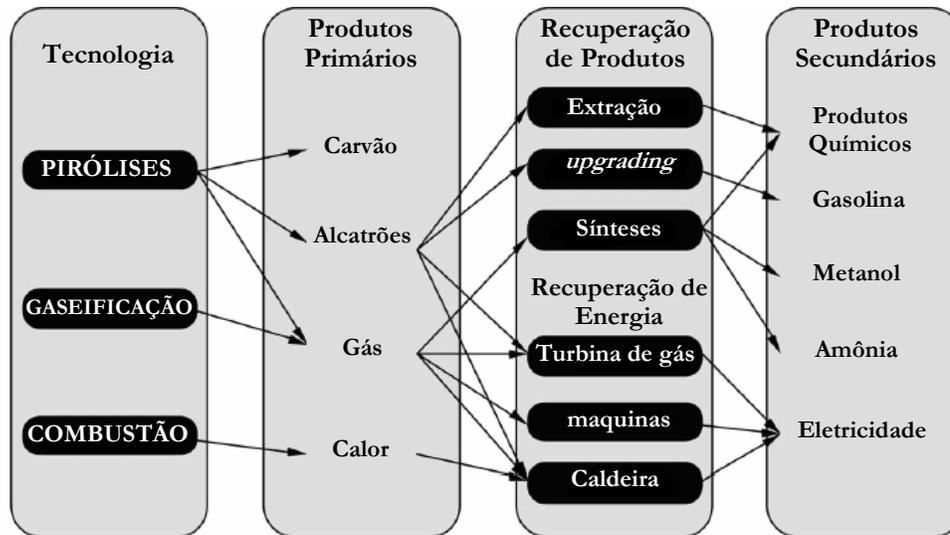


Figura 19. Processos de conversão térmica e os produtos gerados (Belgiorno *et al.*2003)

5.2. Gaseificador

O gaseificador é o reator no qual acontece a conversão termoquímica do material carbonáceo tratado. Existem três tipos principais de gaseificadores: (1) gaseificador de leito fixo, (2) gaseificador de leito fluidizado e (3) gaseificador indireto. As principais diferenças dos reatores de gaseificação de leito fixo e fluidizado são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Diferenças significantes entre gaseificadores de leito fixo e gaseificadores de leito fluidizado.

Gaseificador de leito fixo de contracorrente com reciclo de gás	Gaseificador de leito fluidizado
(-) Os finos na alimentação têm que ser aglomerados	(+) Não apresenta problemas com finos na alimentação
(-) Tamanho de partícula o mais uniformes possível.	(+) Ampla distribuição de tamanho de partícula
(+) Tamanhos de partículas muito grandes (acima de 100mm)	(+) Limitado tamanho de partícula (abaixo de 50mm)
(+) Gases praticamente livres de alcatrões	(-) Alcatrões (1gr/m ³): Altos teores de alcatrões nos gases
(+) Alta conversão de carvão (90 – 99%)	(-) Conversão de carvão na faixa de 90%.
(+) Descarga de escória líquida.	(-) Fusão das cinzas.
(-) Vantagens. (-) Desvantagens.	

5.2.1. Gaseificador de leito fixo

Os reatores de leito vertical são os mais comuns. Estes gaseificadores são subdivididos em *updraft* (contracorrente) e *downdraft* (co-corrente) (Belgiorno *et al.* 2003). Os gaseificadores de leito fixo são relativamente fáceis de projetar e de operar. São eficientes trabalhando com combustíveis de alta densidade e granulometria grosseira. São usados em plantas de energia de tamanho pequeno ou médio e para a recuperação energia térmica.

5.2.1.1. Gaseificador *updraft*

Nos gaseificadores tipo contracorrente o material sólido é alimentado pelo topo e o ar é introduzido pela parte inferior do reator; aqui o material sólido é convertido em gás combustível na medida em que este percorre a trajetória para a parte inferior do reator. Durante esta trajetória ocorre uma seqüência de reações, apresentadas em seguida, iniciando no topo: Secagem, pirólises, redução e combustão (oxidação). Na zona de combustão é onde se atinge a maior temperatura 1200°C (Belgiorno *et al.* 2003). As principais vantagens do gaseificador de contracorrente são a sua simplicidade, alta proporção de carvão a ser queimado, troca interna de calor (fazendo com que as temperaturas dos gases de saída sejam baixas), alta eficiência do equipamento e possibilidade de operar com diversos tipos de alimentação. Os principais inconvenientes são a possibilidade da aparição de *canalizações* no equipamento (que pode motivar *engaiolamento*, irrupção do oxigênio e situações explosivas perigosas), necessidade da instalação de grelhas de movimento automático e também apresentam problemas relacionados com a eliminação dos líquidos condensados, que contem alcatrões resultantes das operações de limpeza do gás. (FAO, 1986).

O desenho esquemático de um reator *updraft*, e seu perfil de temperatura estão apresentados na Figura 20.

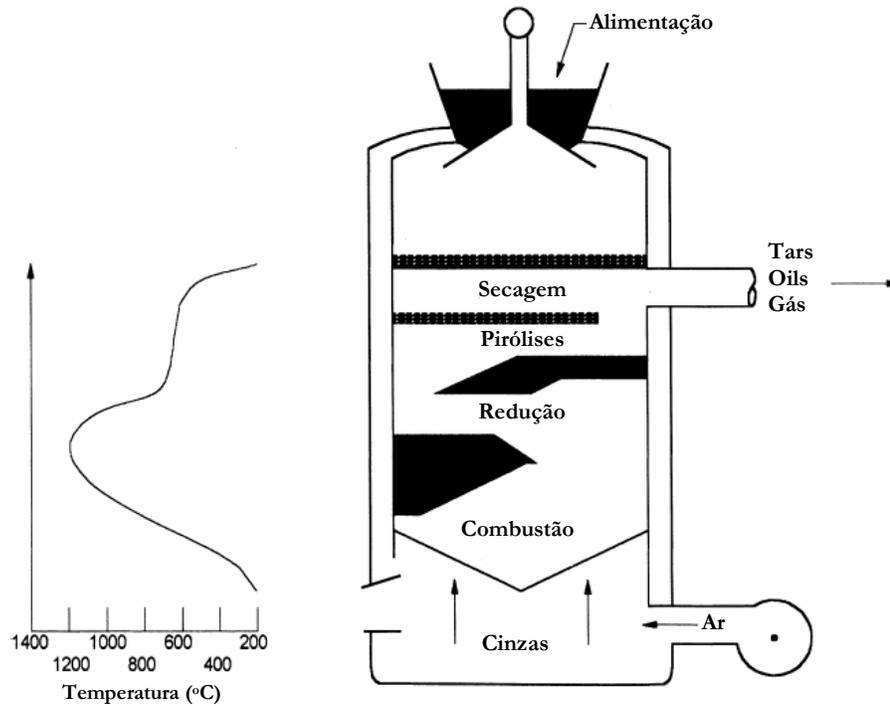


Figura 20. Gaseificador de contracorrente *up-draft* – Perfil de temperatura e zonas de reação (McKendry, 2002)

5.2.1.2. Gaseificador *downdraft*

Nos gaseificadores co-corrente, o material carbonoso é alimentado pelo topo e o ar é alimentado pela parte lateral do reator, acima da grelha, enquanto o gás combustível é retirado abaixo da grelha.

Os reatores *downdraft* consistem de quatro zonas de reação chamadas, secagem, pirólises, oxidação e redução (Midilli *et al.* 2001; Drogu *et al.* 2002; Jayah *et al.* 2003; Di Blasi, 2000; FAO, 1986; Klein, 2002; Belgiorno *et al.* 2003; McKendry, 2002), como é mostrado na Figura 21 e esquematicamente na Figura 22.

Na zona de secagem, o material desce através o gaseificador, a umidade é removida por evaporação usando o calor proveniente das zonas inferiores. A velocidade de secagem depende da área superficial do combustível (biomassa, carvão, etc.), da diferença de temperatura entre alimentação e os gases quentes e da velocidade de recirculação, e da umidade relativa dos gases, como também da

difusividade interna da umidade no combustível. A temperatura na zona de secagem está na faixa de 70 – 200°C.

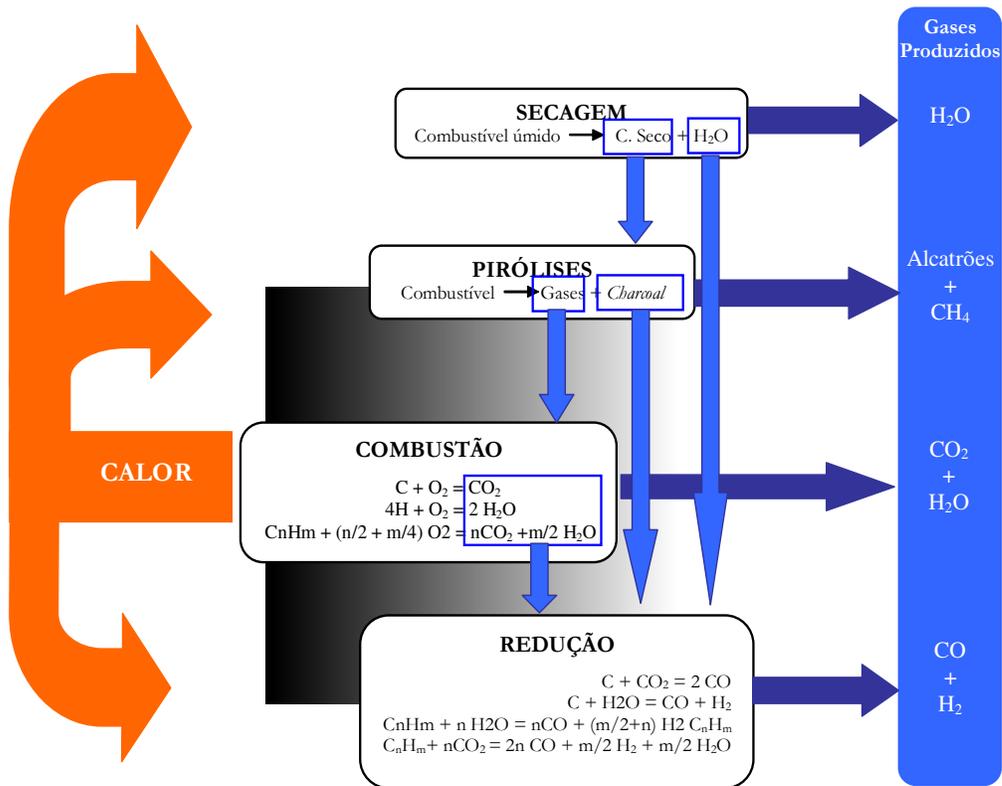


Figura 21. Estágios do processo de gaseificação.

Na zona de pirólises ocorre a degradação térmica irreversível do combustível que desce da zona de secagem, este fenômeno utiliza energia térmica gerada pela oxidação parcial dos produtos da pirólises. A temperatura nesta zona é de 350 – 600°C.

Na zona de oxidação, os produtos voláteis produzidos na zona de pirólises são parcialmente oxidados, estas são reações altamente exotérmicas, resultando em um rápido aumento da temperatura a mais de 1100°C na zona da garganta. O calor gerado nesta zona é utilizado na zona de secagem e pirólises. As reações de oxidação de voláteis são muito rápidas e o oxigênio é consumido antes que possa difundir-se na superfície do *char* (carvão pirolisado). A temperatura nesta zona é aproximadamente de 1000 – 1100°C.

Na zona de redução, o *char* é convertido em produto gasoso por reação com os gases quentes provenientes da zona de oxidação. (Midilli *et al.* 2001; Drogu *et al.* 2002).

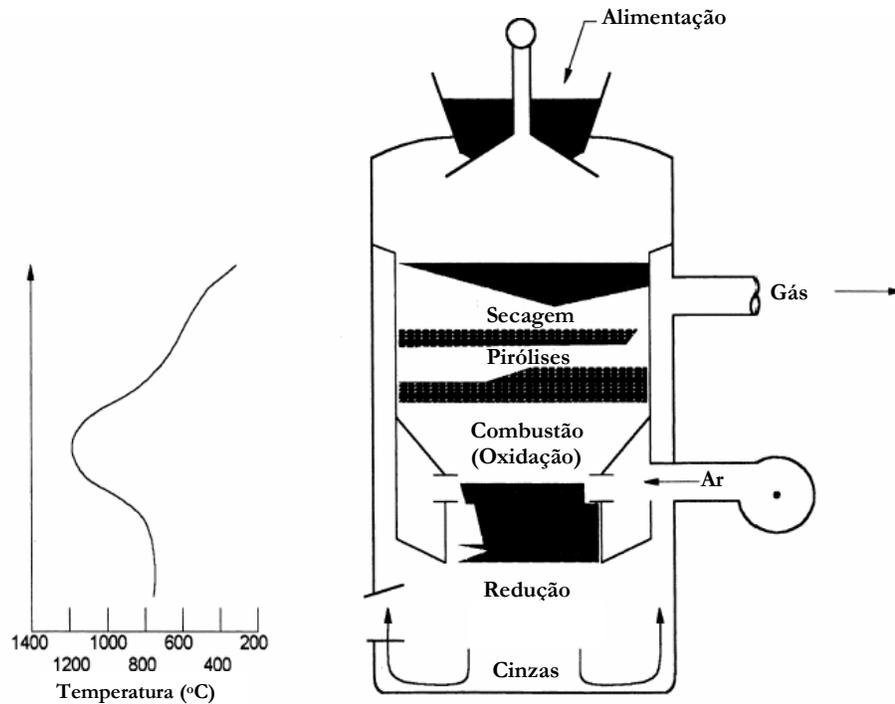


Figura 22. Gaseificador de co-corrente - *downdraft* (McKendry, 2002)

A principal vantagem deste tipo de reator está na possibilidade de produzir um gás livre de alcatrões, apropriado para ser usado em motores. Este tipo de gaseificador não sofre objeções ambientais como os reatores de contracorrente. Um inconveniente importante destes equipamentos é que o combustível sólido precisa ser briquetado antes de ser alimentado no reator, em particular, os materiais brandos e de baixa densidade ocasionam problemas na circulação e queda de pressão. Os gaseificadores de co-corrente também apresentam problemas com combustíveis com alto teor de cinzas (formação de escórias) (FAO, 1986; Klein, 2002).

O gás combustível produzido durante o processo de gaseificação em um reator co-corrente depende de diversos parâmetros operacionais, tais como condições de reação na zona de pirólises, temperatura, velocidade de aquecimento, teor de umidade no combustível, tamanho de partícula, composição da atmosfera no reator, pressão e tempo de residência do vapor. (Midilli *et al.* 2001)

O tamanho de partícula do combustível (biomassa, carvão, etc.) é um parâmetro importante, este prejudica a velocidade conversão do *char* e também a eficiência de conversão total (Midilli *et al.* 2001). Segundo Jayah *et al.* (2003) partículas grandes necessitam de zonas de gaseificação maiores para atingir a máxima conversão. Reatores com pequenas zonas de gaseificação precisam trabalhar com tamanho de partículas pequenas. A conversão do *char* consiste de dois processos chamados, conversão rápida e conversão lenta. A conversão rápida do *char* ocorre na entrada da zona de gaseificação devido à rápida velocidade de reação. O tamanho de partícula máximo recomendado para ser usado em um gaseificador *downdraft* é um oitavo do diâmetro da garganta do reator. (Drogu *et al.* 2002).

A razão ar/combustível tem efeito de vital importância na performance do gaseificador porque regula a velocidade de consumo do combustível. Drogu *et al.* (2002) reporta que a razão ótima ar/combustível para produzir gás combustível de alta qualidade, na gaseificação de biomassa, está em torno de 1,37 – 1,47 Nm³/kg para valores entre 4,02 – 4,70 Kg/h de alimentação úmida.

A umidade no material de alimentação é uma das principais características que afetam a composição do gás combustível, tem-se reportado que umidades superiores que 67% tornam o gás produzido muito pobre em poder calorífico. A eficiência de conversão decresce com o aumento da umidade no material combustível. Isto é devido ao fato que grandes quantidades de energia são consumidas na vaporização da água, o que posteriormente reduz a temperatura do gás. A diminuição da temperatura reduz a velocidade de reação e também a eficiência do processo. (Jayah *et al.* 2003)

A eficiência de conversão aumenta com o aumento na temperatura do ar (de ingresso) devido ao fato que o ar quente fornece entalpia adicional necessária para a reação (Jayah *et al.* 2003). Segundo Jayah *et al.* (2003) a perda de calor é um parâmetro que influencia na eficiência de conversão no processo de gasificação de biomassa. A eficiência de conversão decresce aproximadamente 11% por cada 5% de aumento na perda de calor. Embora o decréscimo na eficiência de conversão seja considerável devido à perda de calor, o custo associado em reduzir esta incrementa o uso de materiais de isolamento no gaseificador, isto deve de ser analisado sob o ponto de vista econômico para assegurar benefícios desejados.

5.2.2. Gaseificador de leito fluidizado

A gaseificação em leito fluidizado foi originalmente desenvolvida para resolver os problemas operacionais dos reatores de leito fixo, como alimentação com alto teor de cinzas e principalmente para incrementar a eficiência. A eficiência de um reator de leito fluidizado é aproximadamente cinco vezes maior que um reator de leito fixo, com um valor na faixa de $2000\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$. (Belgiorno *et al.* 2003)

Este tipo de gaseificador não apresenta zonas diferenciadas de reação como nos reatores de leito fixo. Os reatores de leito fluidizado têm um leito isotérmico que opera usualmente em temperaturas na faixa de $700\text{--}900^\circ\text{C}$. Os principais tipos de gaseificadores de leito fluidizado são: reator de leito borbulhante (*bubbling fluidised bed*) e reator de leito circulante (*circulating fluidised bed*) (Belgiorno *et al.* 2003; Klein, 2002).

Nos gaseificadores de leito fluidizado, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo ascendente de ar, criando condições favoráveis de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara da reação (Resende, 2003). Um reator de leito fluidizado pode ser descrito como um leito de partículas que ao se aumentar o fluxo de gás através dele faz com que este passe por fases sucessivas: leito fixo, leito fluidizado incipiente, leito fluidizado borbulhante e finalmente transporte pneumático das partículas. Está última fase é utilizada nos reatores de leito fluidizado circulante onde há elutrição (fenômeno de arraste de partículas finas) do leito e uma posterior coleta em separadores ciclônicos para reaproveitamento do material inerte. (Fernandez, 2004; Resende, 2003)

A fluidização promove um íntimo contato entre partículas e gases, assim como uma intensa circulação e mistura das partículas. Isso resulta em altas taxas de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme em todo o leito. (Fernandez, 2004)

As principais vantagens dos gaseificadores de leito fluidizado são flexibilidade quanto ao material na alimentação, devido ao fácil controle de temperatura pode ser mantido abaixo do ponto de fusão das cinzas e a capacidade de operar com materiais friáveis e de granulometria fina sem a necessidade de serem briquetados. As

desvantagens que apresenta este tipo de reator são temperaturas de operação limitada, alto teor de alcatrões no gás produzido devido às baixas temperaturas de operação (700-900°C), combustão incompleta do carvão. (FAO, 1986; Fernandez, 2004)