



UNICAMP

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO

Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

ÍNDICE DO CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	1-2
1.1 Tipos de gaseificadores	1-5
1.1.1 Gaseificadores contracorrente	1-7
1.1.2 Gaseificadores concorrentes	1-8
1.1.3 Gaseificadores de fluxo cruzado	1-10
1.1.4 Gaseificadores de leito fluidizado	1-10
2. GASEIFICADORES DE CARVÃO	2-14
2.1 Introdução	2-14
3. A GASEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL	3-18
3.1 Classificação e Tipos de Gaseificadores	3-20
Tabela 3.2 Classificação dos gaseificadores	3-20
3.2 Gaseificadores de leito móvel	3-20
3.3 Gaseificadores de leito arrastado	3-22
3.4 Gaseificadores de leito fluidizado	3-24
Figura 3.12 Processo Synthane	3-31
4. PROJETOS COMERCIAIS E DE PESQUISA DESENVOLVIDOS NA GASEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL	4-31

**Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez.
John Jairo Ramirez Behaine
DETF - FEM - UNICAMP**

1. Introdução

A partir da crise do petróleo de 1973, passou-se a prestar maior importância à biomassa como fonte energética e no mundo todo vários programas começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa. Segundo dados levantados pelo pesquisador britânico Hall [1] atualmente a biomassa representa cerca de 14 % da energia consumida no mundo, constituindo para os países em desenvolvimento uma fonte energética considerável, equivalente a cerca de 35 % do consumo energético total, em média, nesses países. Segundo o mesmo autor os programas considerados melhor sucedidos são:

- o Próalcool, no Brasil
- aproveitamento de biogás, na China
- coque vegetal, no Brasil
- florestas energéticas, nos EUA
- aproveitamento de madeira para fins energéticos, na Suécia
- aproveitamento de resíduos agrícolas, na Grã-Bretanha
- plantações de eucaliptos, na Etiópia
- aproveitamento do bagaço de cana, nas Ilhas Maurício.

Segundo o Boletim do Balanço Energético Nacional [2], no Brasil atualmente a biomassa representa cerca de 23,8 % do consumo de energia do país, o que equivale a 27 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) por ano. Desta fração, a lenha, que já representou 26,0 % do consumo total da energia do país em 1977, representa hoje 13,8 %, enquanto que os produtos da cana-de-açúcar, que representavam apenas 5,5 % em 1977, hoje representam 10,0 % do consumo total de energia. A figura 1.1 ilustra bem esta tendência de decréscimo acentuado na participação da lenha em contrapartida ao aumento acentuado dos produtos da cana-de-açúcar. Pode-se também notar uma tendência de queda ao longo do tempo na participação da biomassa. Estas tendências refletem uma modificação muito acentuada na estrutura geral do consumo de energia relacionada com a modernização do parque industrial brasileiro.

Como mostra a figura 1.2, a conversão energética da biomassa pode ser realizada através de diferentes processos: combustão (ou queima direta), gaseificação, pirólise, liquefação, fermentação e digestão anaeróbica [2].

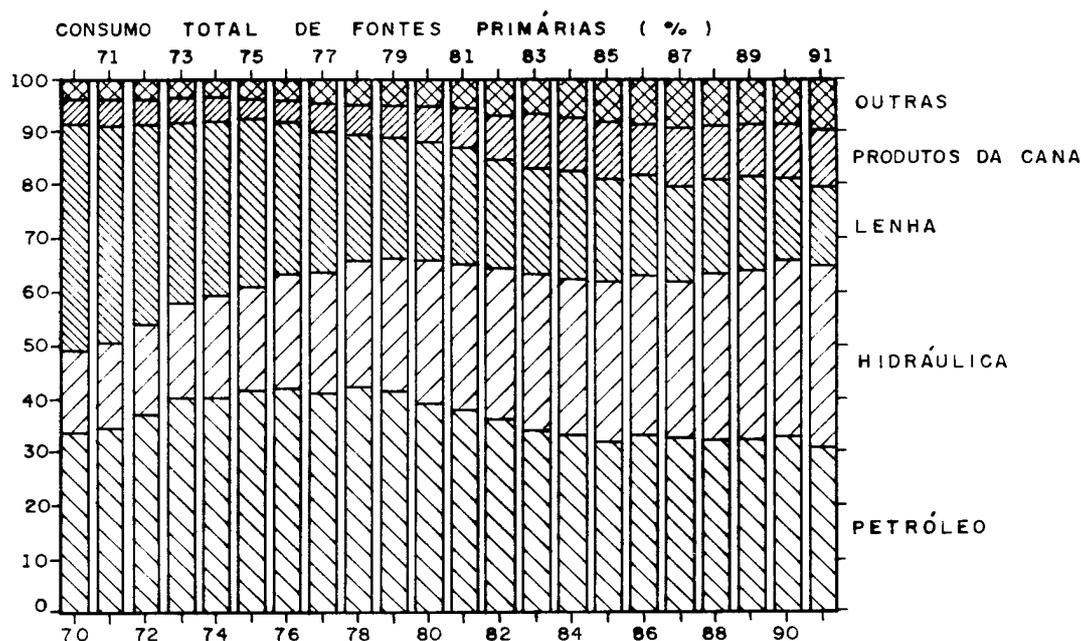


Figura 1.1 Consumo de fontes primárias de energia no Brasil.

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em um gás energético, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, tais como reatores de leito fixo e de leito fluidizado.

O gás produzido tem muitas aplicações práticas, desde a combustão em motores ou em turbinas para a geração de potência, energia elétrica, bombas de irrigação, para a geração direta de calor, ou para matéria prima na síntese química da amônia e do metano. Quando produzindo eletricidade, calor ou gás (também chamado de *gas producer*), deve competir com a combustão direta de biomassa, combustíveis fósseis e outros combustíveis alternativos [3].

A geração de potência a partir de combustíveis sólidos via gaseificação tem sido desenvolvida para pequenas plantas com gaseificadores de leito fixo acoplados a motores do ciclo Otto e projetos de larga escala pressurizados para carvão. Para biomassa ainda estão em desenvolvimento sistemas de leito fluidizado tanto atmosféricos como pressurizados. Atualmente existem pesquisas, em Chicago, de um processo de 3 MW de leito fluidizado pressurizado[4]. Na Itália pesquisa-se um sistema de gaseificação em leito fluidizado sem limpeza do gás, acoplado a uma caldeira com turbina de condensação e na Suécia de um sistema de gaseificação de madeira em leito fluidizado pressurizado de 2 MW.

As razões práticas para se decidir pela gaseificação de biomassa são numerosas e dependem muito das condições locais. A gaseificação de biomassa pode reduzir a dependência de regiões e países às flutuações nos preços dos combustíveis importados. Além disso existem muitas circunstâncias em que a gaseificação apresenta vantagens significativas sobre a queima direta da biomassa ou de combustíveis fósseis. Por exemplo, a geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada, sem a

necessidade de um ciclo a vapor, simplesmente pela queima do gás em um motor de combustão interna.

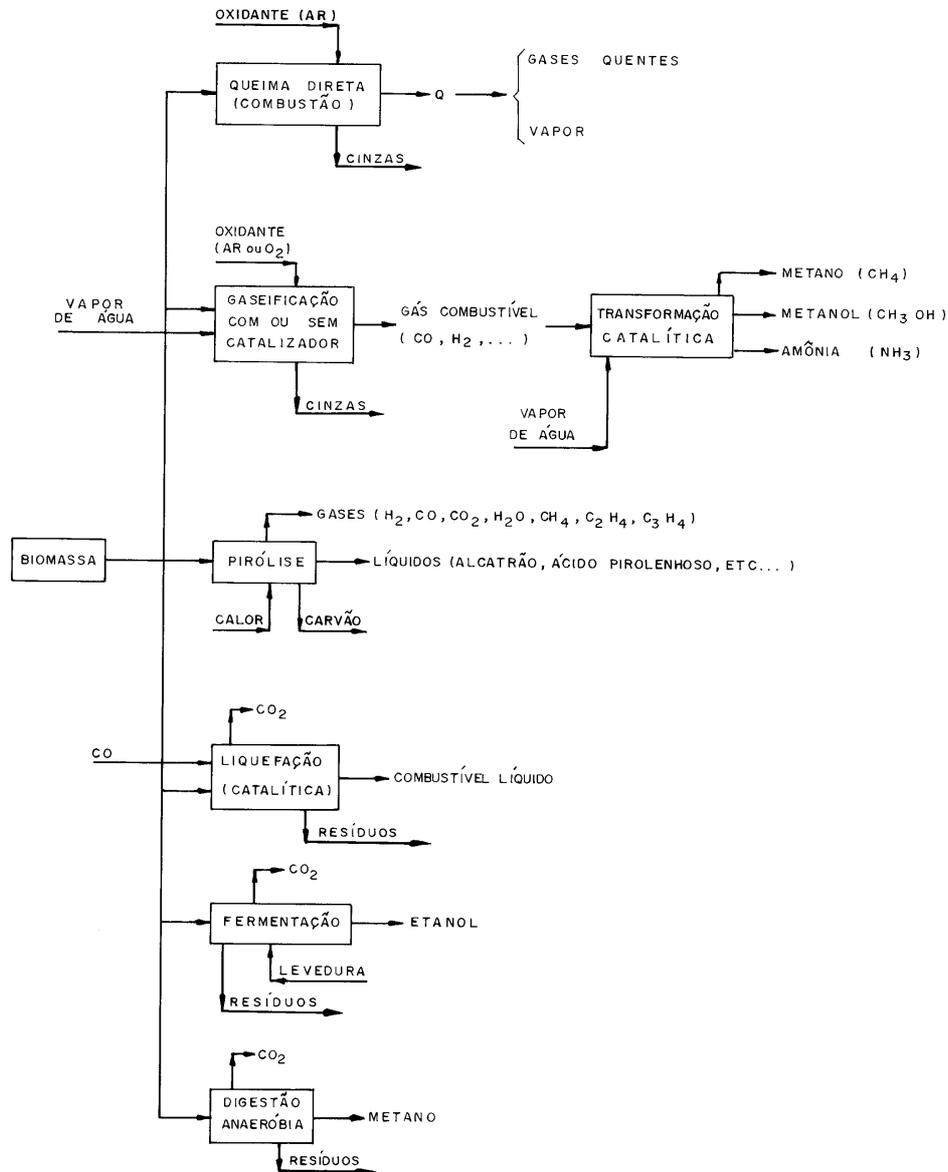


Figura 1.2 Processos de conversão energética da biomassa.

Futuro promissor poderão ter as plantas de cogeração a partir de gaseificação de biomassa, combinando ciclos de turbina a gás e gerador de vapor. Uma planta de 0,5 MW movida por resíduos de madeira gaseificada em leito fluidizado foi apresentada em Bruxelas [5,6] recentemente. A Studswik da Suécia tem pesquisado plantas de cogeração na faixa de 5 a 50 MW [7]. O Departamento de Energia dos E.U.A. tem pesquisado sistemas pressurizados [4]. Nas conclusões do *workshop* sobre gaseificação de biomassa para produção de eletricidade em Interlaken, 1992 [8] ressalta-se a necessidade de limpeza do gás para sua utilização em motores de combustão interna e turbinas a gás na geração de eletricidade. Tanto os reatores atmosféricos, como os pressurizados estão sendo desenvolvidos em vários centros de pesquisa do mundo [8].

A combustão do gás em fornos e fornalhas de geradores de vapor originalmente para combustíveis líquidos e gasosos derivados de petróleo pode ser realizada sem a necessidade de alterações dramáticas no equipamento [9].

Porém a gaseificação possui algumas desvantagens técnicas que devem ser levadas em consideração: a tecnologia é mais complicada que a queima direta e deve-se ter especial atenção com os aspectos de segurança, uma vez que o gás produzido é tóxico. Portanto a instalação dos gaseificadores deve ser feita de forma a evitar vazamentos e em locais bem ventilados. Deve-se considerar ainda a redução da eficiência do sistema de gaseificação, que ocorre devido à perda de calor e ao consumo de energia nos ventiladores [10].

Instalações de pequena escala tem uma má reputação por apresentarem falhas frequentes. A maioria dos problemas ocorrem no manuseio do combustível e na limpeza dos gases. A razão disto é devido ao fato que as instalações para gaseificação não são tratadas como sistemas integrados.

Do ponto de vista operacional, enquanto em instalações para queima direta a principal preocupação é a fornalha, em instalações de gaseificação trabalha-se com operações mais complexas, mesmo para instalações de pequeno porte [11]. Uma instalação de gaseificação é constituída por:

- pré-processamento: estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado;
- gaseificador, dotado de secção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás;
- tratamento do gás, com resfriamento e limpeza;
- sistema de controle, e
- tratamento dos resíduos, com disposição adequada.

1.1 Tipos de gaseificadores

Os gaseificadores podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores:

—*Poder calorífico do gás produzido:*

- gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm³
- gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³
- gás de alto poder calorífico: 10 a 40 MJ/Nm³

—*Tipo de agente gaseificador:*

- ar
- vapor de água
- oxigênio
- hidrogênio (hidrogaseificação)

—*Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação:*

- contrafluxo (contracorrente)
- fluxo direto (concorrente)
- fluxo cruzado

—leito fluidizado

—*Pressão de trabalho:*

—baixa pressão (atmosférica)

—pressurizados (até 2000 kPa)

—*Tipo e forma de biomassa:*

—resíduos agrícolas

—resíduos industriais

—resíduos sólidos urbanos (lixo)

—biomassa em natura

—biomassa peletizada

—biomassa pulverizada

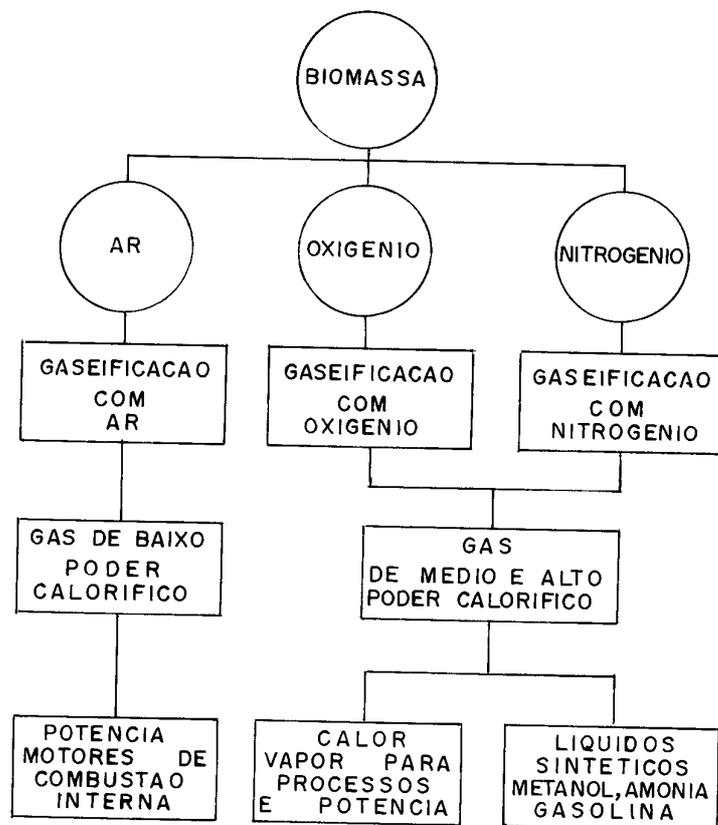


Figura 1.3 Esquema da influência do agente gaseificante no gás produzido.

Na figura 1.3 mostra-se esquematicamente a relação entre o agente gaseificador, os produtos dos respectivos processos e a sua possível aplicação. Como pode-se observar, a obtenção do gás de poder calorífico médio ou alto só é possível utilizando-se de vapor de água, oxigênio ou hidrogênio como agentes de gaseificação [12].

Um gaseificador ideal deverá ser capaz de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma larga variedade de combustíveis, de trabalhar eficientemente sem atenção constante, de responder rapidamente às alterações de carga, além de ser barato e durável. Na prática estes requisitos são mutuamente conflitantes,

determinando que para cada projeto individual se faça um estudo relacionado ao combustível utilizado e ao uso final particular.

1.1.1 Gaseificadores contracorrente

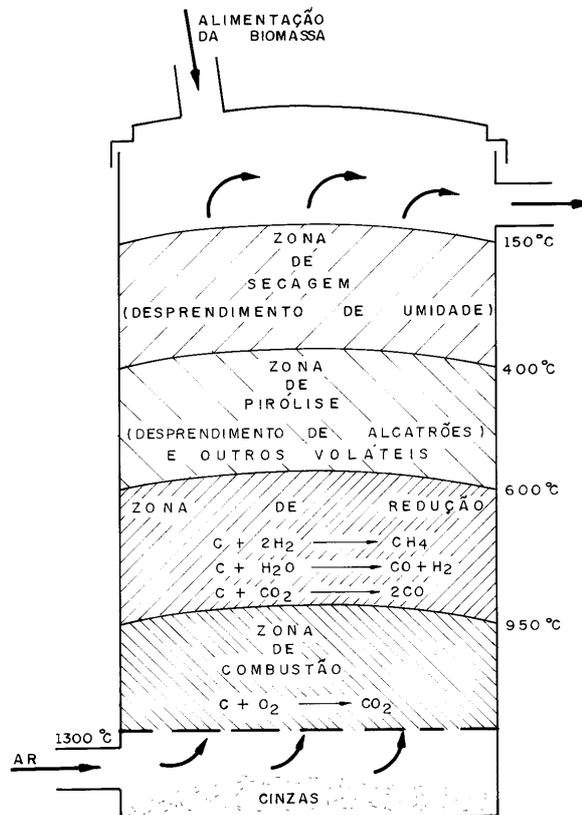


Figura 1.4 Gaseificador contracorrente.

O gaseificador mais simples é o de contracorrente, figura 1.4, onde a entrada de ar fica na parte de baixo do gaseificador, com o fluxo ascendente de gases, contrário ao fluxo de combustível que é introduzido pela parte superior e descende pela ação da força gravitacional conforme é consumido.

Os gaseificadores contracorrente tendem a ter uma eficiência térmica alta, pelo fato dos gases quentes provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga de combustível ao passar por ela. Tendo a simplicidade como principal característica, possui no entanto a desvantagem de produzir um gás extremamente impuro. Nenhum dos alcatrões e outros produtos de pirólise são craqueados na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para cima do gaseificador e podem causar incrustações nas tubulações. Alguns gaseificadores, particularmente de grande porte, possuem uma câmara na parte superior, acima do topo do combustível, a fim de reduzir a velocidade do gás e permitir a condensação de voláteis dentro do gaseificador.

O projeto da grelha é um elemento importante na maioria dos gaseificadores contracorrente, pois esta suporta diretamente a zona de combustão. A grelha deve ser

capaz de deixar as cinzas caírem sem uma perda excessiva de combustível, sendo comuns gaseificadores que utilizam grelhas rotativas e desenvolvidas para operar sob altas temperaturas (acima de 1300 °C), a fim de fundir as cinzas permitindo que os mesmos passem pela grelha [14].

Materiais refratários são utilizados para recobrir a zona de combustão, ou às vezes toda a câmara de gaseificação, tanto protegendo as partes metálicas como diminuindo perdas por troca de calor. A temperatura de saída dos gases é por volta de 400 °C.

Gaseificadores contracorrente podem ser construídos para utilização de uma larga variedade de combustíveis, como por exemplo resíduos municipais. Mas deve-se ressaltar o fato que o gás produzido normalmente contém grandes quantidades de alcatrões e voláteis o que impede sua utilização direta em motores de combustão interna e o restringe para usos onde é simplesmente queimado (aquecimento direto).

1.1.2 Gaseificadores concorrentes

De longe, os gaseificadores mais difundidos são os do tipo concorrente. Durante a II guerra mundial a maioria dos gaseificadores utilizados em veículos eram deste tipo assim como a maioria dos gaseificadores desenvolvidos para geração de potência mecânica [14].

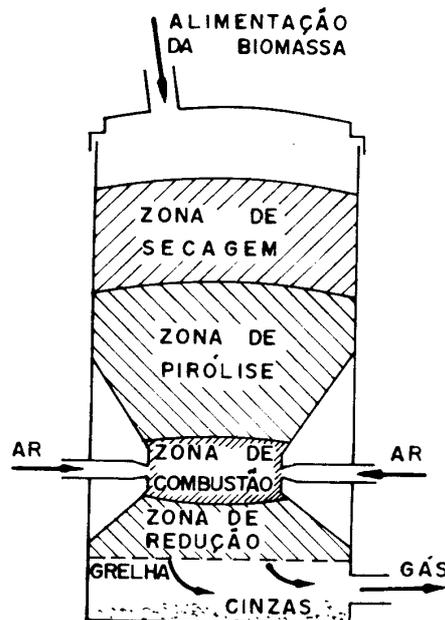


Figura 1.5 Gaseificador concorrente.

No gaseificador concorrente, figura 1.5 , as zonas de combustão e de redução estão posicionadas de forma oposta aos gaseificadores contracorrente. Com a alimentação de combustível pelo topo, a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível) passando pelas zonas de combustão e redução.

A característica essencial deste gaseificador é que ele é projetado de modo que os alcatrões e voláteis provenientes da zona de pirólise são direcionados a passar pela zona

de combustão onde, com condições de operação controladas, serão craqueados. Quando isto acontece, esses alcatrões serão convertidos em fase leve e coque e a mistura de gases na saída é relativamente livre de alcatrões. Sendo assim, o arranjo da zona de combustão é um elemento crítico nos gaseificadores concorrente. Se forem permitidas regiões de baixa temperatura nesta zona, as substâncias voláteis contaminantes poderão passar por ela sem que craqueiem, perdendo o propósito do projeto.

Em muitos casos, o diâmetro interno é reduzido na zona de combustão, criando uma garganta, geralmente feita de material cerâmico substituível. É na garganta que se posicionam os injetores de ar, arranjados a fim de distribuir o ar de forma mais uniforme possível. Em todos os arranjos o objetivo é garantir que seja atingida uma temperatura adequada em toda a seção, a fim de craquear todos os alcatrões que passam por ela. A temperatura é máxima nas entradas de ar e diminui rapidamente com a distância, isto significa que existe um limite prático para as distâncias entre as entradas e conseqüentemente para o diâmetro da garganta. Este fato pode ser encarado como um ponto crítico de projeto, pois limita a capacidade do gaseificador.

Por outro lado, como o gás é liberado diretamente da zona de redução tende a ter quantidades significativas de cinzas e fuligem, em contraste com o que acontece nos gaseificadores contracorrente onde estas partículas são filtradas quando o gás passa pelo combustível. A temperatura de saída dos gases também tende a ser maior, por volta de 700 °C, pois não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e secagem [14].

A produção de gás combustível livre de alcatrões e voláteis em um gaseificador concorrente requer cuidados especiais de desenvolvimento pois, além do projeto da garganta e do controle do fluxo de ar, estes são particularmente vulneráveis a problemas causados por combustíveis com alto teor de cinzas e variações no teor de umidade [19].

Uma variante deste gaseificador é o gaseificador de topo aberto [20,21,22] para biomassa polidispersa com entrada de ar pela parte superior a fim de se evitar altas temperaturas e conseqüente fusão das cinzas.

1.1.3 Gaseificadores de fluxo cruzado

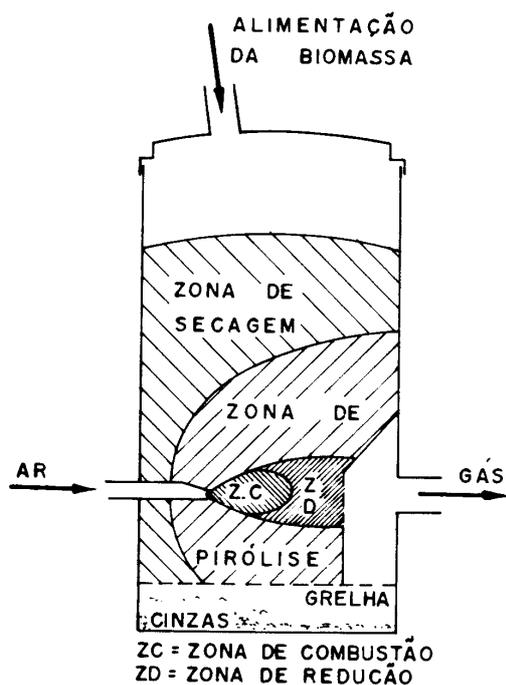


Figura 1.6 Gaseificador de fluxo cruzado.

Nos gaseificadores de fluxo cruzado o gás é retirado lateralmente da câmara de gaseificação na mesma altura do leito em que é injetado o ar. O injetor é normalmente arranjado de forma a injetar ar no centro da zona de combustão, figura 1.6. Se caracteriza por produzir um gás combustível com características intermediárias entre os gaseificadores contracorrente e concorrente.

A taxa de fornecimento de ar é consideravelmente maior que em outros tipos de gaseificadores, por este motivo cria-se uma zona de combustão de temperatura extremamente alta, com liberação de gases muito rápida. Ambas as zonas, de combustão e redução, são concentradas em um pequeno volume no centro do gaseificador, isto significa que materiais refratários para delimitar a região são dispensáveis [14].

As principais vantagens dos gaseificadores de fluxo cruzado são a rápida resposta à variações de carga, sua simplicidade de construção e seu peso reduzido. Por outro lado são muito sensíveis às variações na composição e umidade do combustível, sendo que para fins práticos quase sempre é requerido carvão vegetal limpo e seco.

1.1.4 Gaseificadores de leito fluidizado

Um gaseificador que possa converter resíduos de biomassa em um gás livre de alcatão com alta conversão de carvão e alta eficiência térmica é o objetivo procurado por muitos pesquisadores. Várias experiências levadas a cabo em todo o mundo mostram equipamentos promissores [23,24], no entanto ainda há muito que se pesquisar até a comercialização de um equipamento simples e eficiente.

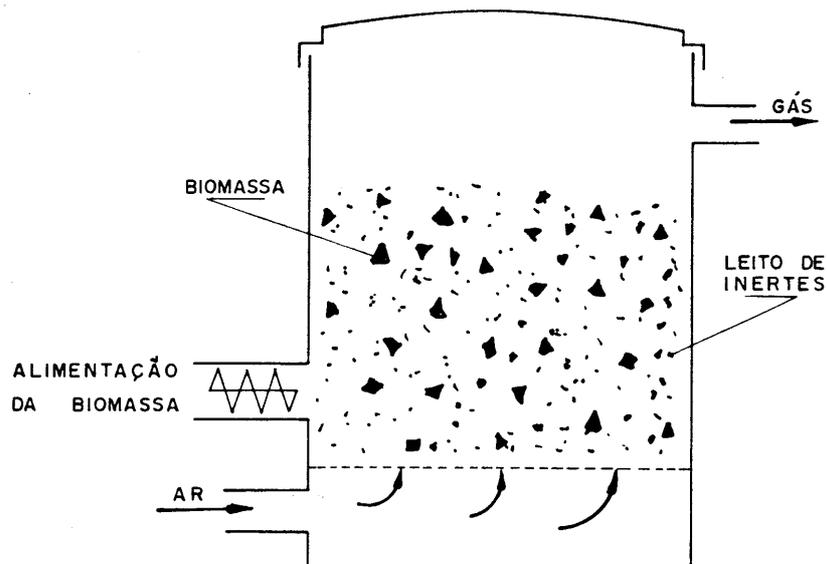


Figura 1.7 Gaseificador de leito fluidizado.

Nos gaseificadores de leito fluidizado, figura 1.7, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo de ar, criando melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação. Nestas condições a maioria dos voláteis estarão em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa.

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. O leito de partículas sólidas oferece resistência ao escoamento vertical do fluido que passa através dele. Se a velocidade de escoamento aumenta, incrementa-se também a força de arrasto exercida sobre as partículas, que tendem a se rearranjar, de modo a oferecer menor resistência ao escoamento, havendo, neste processo, a expansão do leito. Com novos aumentos na velocidade do fluido, a expansão continua e alcança um estágio onde as forças de arrasto são suficientes para suportar o peso das partículas do leito. Neste estado, chamado de fluidização incipiente, o sistema fluido/partículas se comporta como um fluido. A velocidade superficial do fluido nesse ponto é denominada velocidade mínima de fluidização U_{mf} . Até o início da fluidização, o leito é expandido mais ou menos uniformemente e logo após a fluidização incipiente formam-se bolhas de gás de fluidização responsáveis pela recirculação das partículas dentro do leito, gerando o regime de fluidização borbulhante. Se a velocidade superficial do fluido é elevada além do regime de surgimento de bolhas, o leito é levado a uma situação onde as partículas são arrastadas na corrente de gás e carregadas para fora do leito. Este fenômeno é chamado elutrição. Partículas menores são elutriadas a velocidades menores. Quando a velocidade é alta o suficiente para elutriar todas as partículas do leito, chegamos ao regime de transporte pneumático. A figura 1.8 ilustra as fases de fluidização em função da velocidade do gás.

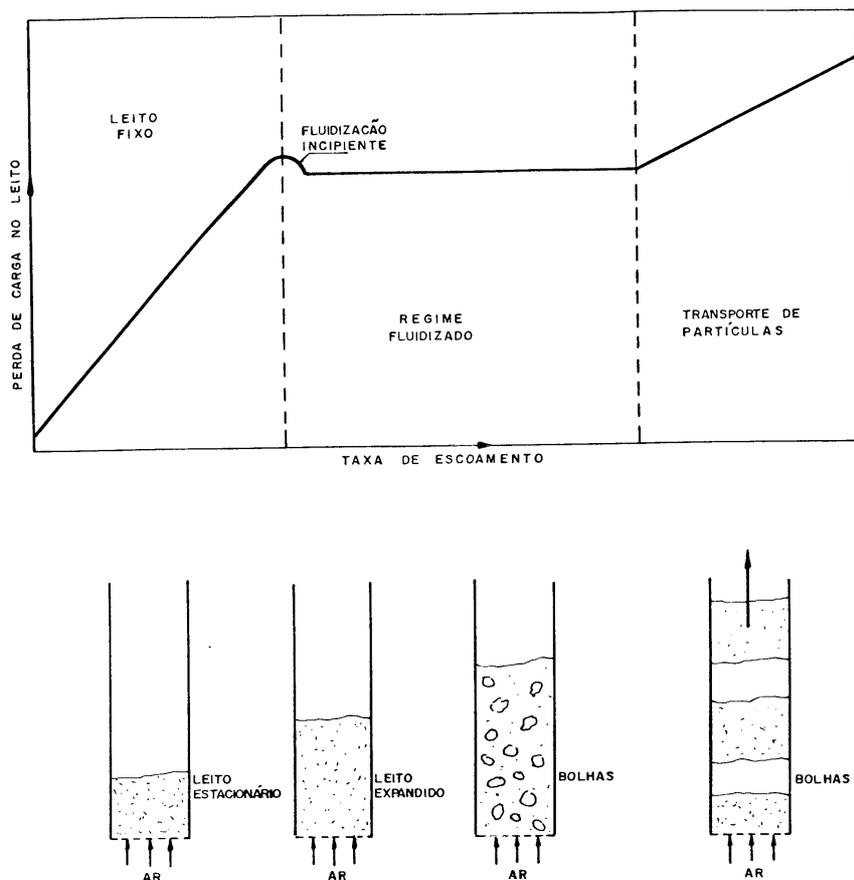


Figura 1.8 Fases de fluidização em função da velocidade do gás.

A condição de fluidização provoca um íntimo contato entre partículas e gases e promove uma circulação (mistura) vigorosa das partículas. As consequências disto são a alta taxa de velocidade de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme em todo o leito [24].

Duas fases podem ser identificadas numa secção transversal do leito: a emulsão e as bolhas. A emulsão contém as partículas sólidas com gás que percola através delas. O fluxo de gás na emulsão é limitado pela quantidade que permite a fluidização incipiente (velocidade mínima de fluidização). Qualquer quantidade maior de gás passa pelo leito na forma de bolhas. As bolhas são praticamente livres de partículas sólidas, mas com a passagem delas pelo leito, algumas partículas são arrastadas por elas, o que promove a grande mistura das partículas sólidas no leito [29].

O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar (GLP, carvão vegetal, etc.) e quando a temperatura for suficientemente alta o combustível é introduzido dando início ao processo de gaseificação.

Como a biomassa possui alta reatividade, um gaseificador de leito fluidizado pode operar a temperaturas relativamente mais baixas, mas neste caso, pelo fato dos alcatrões produzidos na pirólise não serem prontamente gaseificados, estarão presentes em maior quantidade no gás produzido. A presença do alcatrão pode ser interessante pois aumenta

um pouco o poder calorífico do gás e proporciona uma chama mais luminosa com melhor transferência de calor por radiação, por outro lado pode ser indesejável com tendência de se incrustar nas tubulações. A fim de produzir um gás limpo, totalmente livre de alcatrões, é necessária uma temperatura do leito entre 1100 °C e 1200 °C [26], entretanto bons resultados já aparecem a 900 °C. Alguns pesquisadores tem utilizado catalisadores [8] com resultados discutíveis.

Também por sua operação em temperaturas relativamente mais baixas que os gaseificadores de leito fixo [24,27], reduz significativamente os teores de enxofre e de material particulado, além de diminuir a formação de óxidos de nitrogênio [28].

A principal vantagem dos gaseificadores de leito fluidizado é o fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível.

Existem, por outro lado, problemas relacionados aos gaseificadores de leito fluidizado. Em contraste com gaseificadores de leito fixo os gaseificadores de leito fluidizado não apresentam resposta automática às mudanças de consumo do gás produzido. Nos gaseificadores de leito fixo há uma grande quantidade de combustível na câmara de reação, que permite, ao se aumentar o consumo, aumentar o fluxo de ar para dentro da câmara e conseqüentemente a produção de gás. No reator de leito fluidizado é necessário aumentar o fluxo de ar e o fluxo de combustível para dentro do leito a fim de se alterar a vazão de gás produzido, quando há alteração no consumo, havendo portanto necessidade de intervenção, com algum tipo de controlador, tornando o sistema de alimentação parte vital do equipamento. Além disto, o gás produzido tende a conter carbono não queimado, um pouco de alcatrão, assim como parte das cinzas contidas originalmente no combustível, que devem ser removidos por sistemas de limpeza. Van den Aarsen *et al.* [24] é o único autor a apresentar resultados de conteúdo de alcatrão em função da temperatura do leito, como pode ser visto na figura 1.9 .

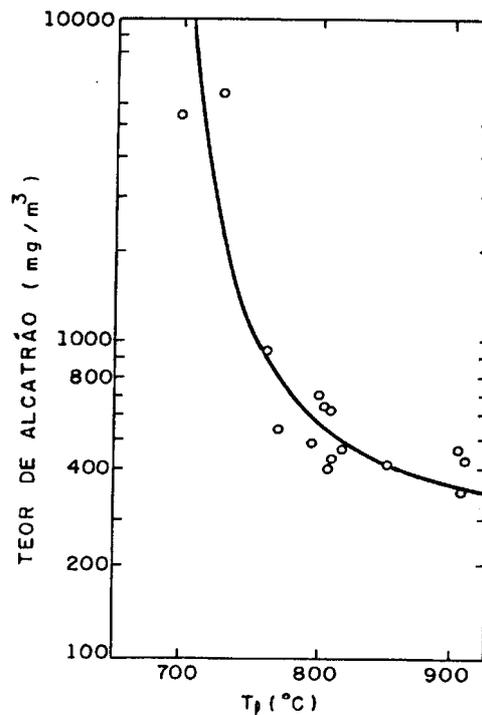


Figura 1.9 Teor de alcatrão no gás produzido em gaseificador de leito fluidizado.

No entanto, a gaseificação em leito fluidizado se apresenta bastante promissora. Este fato se deve principalmente à possibilidade de utilização de combustíveis como bagaço-de-cana, casca-de-arroz, etc, vantajosos pelos baixos preços de comercialização e disponibilidade. Provenientes de processos que necessitam de insumos energéticos (calor, eletricidade e energia mecânica), estes biocombustíveis são de difícil gaseificação por métodos tradicionais, devido às suas características de umidade, granulometria, baixa densidade, dentre outras.

2. Gaseificadores de carvão

2.1 Introdução

O carvão, cuja utilização na Alemanha foi intensificada durante a Segunda Guerra Mundial, já era matéria-prima para diversos processos industriais em anos anteriores. Segundo Toscani (1981), esses processos industriais, no entanto, requeriam muita manutenção, eram de difícil operação e termicamente ineficientes. Por isso, os países que possuíam petróleo e gás natural, davam preferência a essas matérias primas que, além de proporcionarem uma operação mais limpa, eram mais fáceis de manusear e mais econômicos que o carvão.

A utilização de petróleo como principal fonte geradora de energia intensificou-se após a Segunda Guerra Mundial, durante o grande crescimento industrial. Tal acontecimento fez com que o carvão perdesse boa parte de sua importância comercial e fosse restringido o seu uso principalmente na siderurgia. Com a crise energética mundial, surgida em 1973 devido à elevação brusca dos preços de petróleo e a perspectiva de um agravamento dessa situação, reavivou-se o interesse geral pela utilização do carvão como substituto do petróleo.

Atualmente, o carvão constitui ainda uma das maiores fontes de energia no mundo, sendo utilizado principalmente como combustível na produção de eletricidade e calor para uso industrial e, em menor escala, na manufatura do coque. De acordo com Mutanen (1993), o consumo mundial de carvão ocupa o segundo lugar em importância depois do petróleo, representando aproximadamente 24% do total das fontes energéticas primárias mais utilizadas, tal como mostra a figura 2.1.

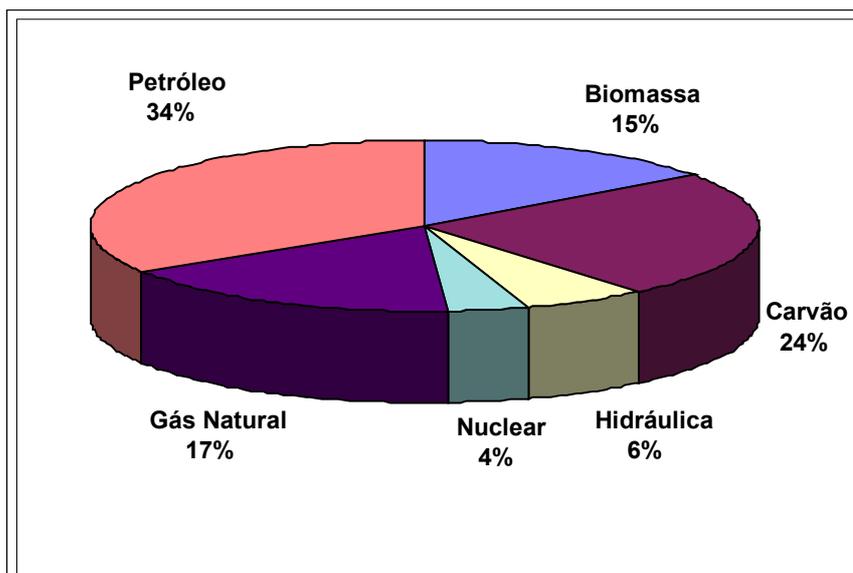


Figura 2.1. Consumo de energia primária por fonte no mundo. (Mutanen, 1993)

Segundo o Ministério de Minas e Energia (1998), o carvão mineral contribui com 38,4% do total dos recursos e reservas energéticas brasileiras medidas em toneladas equivalentes de petróleo, fato que o classifica nesse sentido, como a fonte de maior potencial energético. Apesar disso, a energia consumida pelo Brasil devido à utilização do carvão mineral não supera 5% do total das fontes energéticas primárias, sendo ainda aproveitada uma porcentagem muito menor na produção de eletricidade e de calor para consumo industrial.

De acordo com Turik e Furlanetto (1980), as principais reservas de carvões brasileiros estão localizadas na região Sul, sobretudo nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Os carvões gaúchos são do tipo sub-betuminoso, apresentando elevado teor de cinzas e médio a baixo teor de enxofre. Os carvões catarinenses são betuminosos, com alto teor de cinzas e de enxofre. São aglomerantes, o que lhes permite serem usados na produção de coque pelos processos clássicos.

O alto nível de impureza do carvão extraído nas maiores jazidas brasileiras é um dos fatores que contribui para minimizar sua utilização, pois isto implica em diversos problemas operacionais que incluem a poluição ambiental, onde em processos de aproveitamento energético, podem merecer apreciável atenção.

Nos Estados Unidos, segundo Longwell et al. (1995), o incremento antecipado a médio e longo prazo no preço do gás natural e do petróleo, com respeito ao carvão, promete incentivar os esforços na tarefa de obter carvões livres de cinzas e com baixos níveis de enxofre, bem como, combustível gasoso para uso doméstico mediante processos de transformação termoquímica apropriados. Devido à este aumento no preço do gás natural, a substituição de gás energético a partir do carvão poderia tornar-se economicamente viável, tendo em vista que, atuais tecnologias, como por exemplo, ciclos combinados de geração de potência e células de combustível, requerem obrigatoriamente a utilização de um combustível gasoso limpo. Além disso, o uso econômico de combustíveis gasosos e líquidos de baixo impacto ambiental poderá representar uma importante fonte de matéria-prima para a produção de numerosos compostos químicos de representativo valor comercial.

Nos países que formam a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), a consideração mais importante para o futuro aproveitamento

energético do carvão é fundamentalmente ambiental. Por isso, vários programas estão sendo desenvolvidos para promover "tecnologias mais limpas" do carvão que minimizem a relação custo-benefício, na procura de limitar a emissão de poluentes potencialmente perigosos, tais como compostos sulfurosos, nitrogenados e hidrocarbonetos não queimados, gerados durante a operação de plantas térmicas e/ou industriais.

Dentro deste esquema, a tecnologia da gaseificação em leito fluidizado constitui uma alternativa promissora no manejo racional do carvão mineral (figura 2.2). Definida como a produção de gás energético a partir da oxidação parcial de combustível sólido, mantido suspenso por escoamento ascendente de ar e/ou vapor de água a alta temperatura, a gaseificação apresenta diversas vantagens em relação à queima direta ou combustão. De acordo com Sánchez (1994) e Olivares (1996), estabelece-se, por exemplo, a conveniência de se ter em muitas situações combustível gasoso para distribuição e obtenção de uma chama de alta temperatura, estável e limpa. Da mesma forma, segundo Turik e Furnaletto (1980), a conversão a gás de carvão em leito fluidizado vem sendo desenvolvida com maior interesse em relação ao processo em leito fixo, devido, fundamentalmente, à operação isotérmica do reator na zona do leito, alta capacidade de processamento de gás combustível e conversão de carbono para tempos de residência mais reduzidos, operação e controle relativamente simples do reator, maior possibilidade de operação com diferentes tipos de combustíveis de diversas granulometrias e características físico-químicas.

O gás, produto da gaseificação, é constituído essencialmente por gases combustíveis (monóxido de carbono, hidrogênio e metano), dióxido de carbono, nitrogênio e vapor de água. Além desses elementos, podem estar presentes pequenas quantidades de outras substâncias, tais como alcatrão, material particulado e gases poluentes que variam em composição de acordo com as características próprias do processo e do combustível gaseificado. Em termos de qualidade do gás produzido, cabe ressaltar a importância de minimizar as impurezas contidas nele, que eventualmente, possam comprometer a integridade física de seres vivos ou a vida útil de equipamentos industriais altamente custosos, tais como turbinas a gás em Ciclos Combinados de Gaseificação Integrada (IGCC). Um esquema das etapas que constituem um processo de gaseificação de carvão é mostrado na figura 2.3.

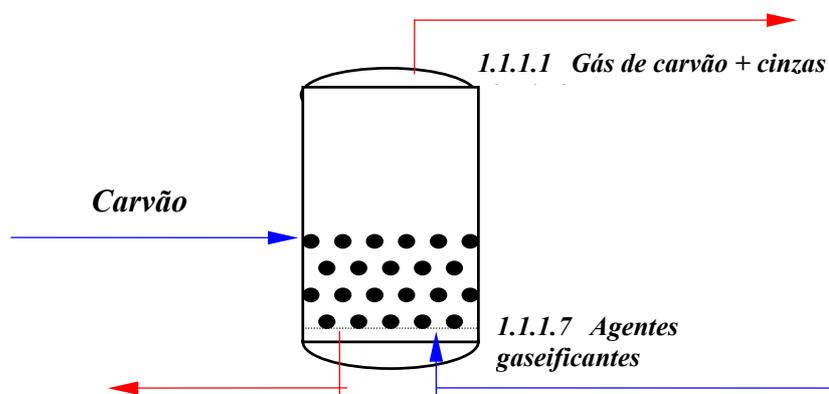


Figura 2.2. Reator de leito fluidizado para gaseificação de carvão.

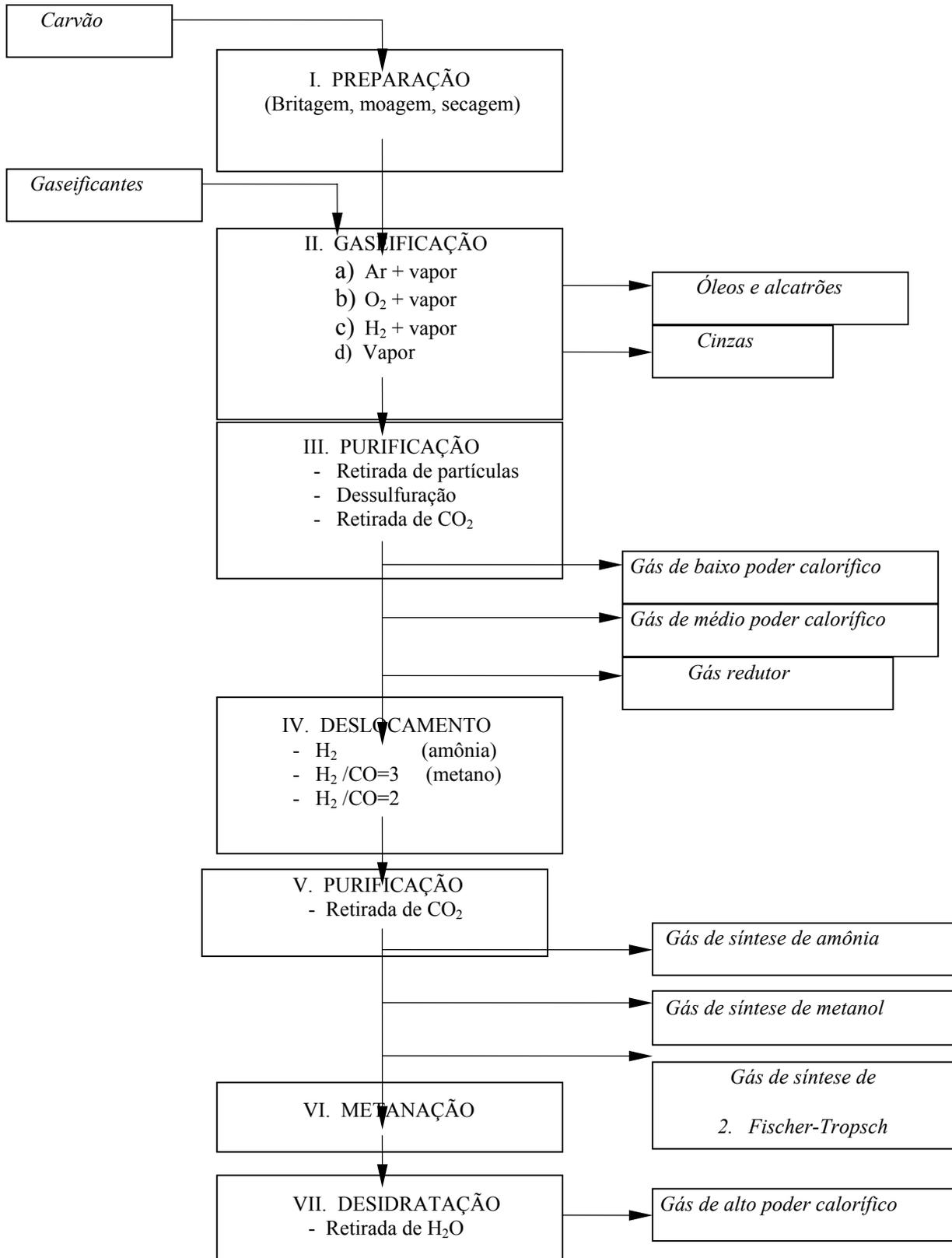


Figura 2.3. Etapas de um processo de gaseificação de carvão.

No caso específico da gaseificação de carvão mineral, visando a utilização do gás produto como combustível, o sulfeto de hidrogênio (H_2S), e em menor proporção, o oxissulfeto (COS), a amônia (NH_3) e o cianeto (HCN) constituem as principais impurezas gasosas. Neste sentido, a presença indesejável de substâncias sulfurosas no gás combustível constitui talvez o aspecto mais relevante, devido, principalmente, à formação de compostos altamente corrosivos e nocivos como o ácido sulfúrico (H_2SO_4), formados ao entrarem em contato o vapor de água com óxidos de enxofre gerados em processos de combustão subsequentes.

Muitos pesquisadores em trabalhos apresentados anteriormente têm encontrado soluções eficazes ao problema da presença de H_2S no gás de carvão mineral, apoiados fundamentalmente na utilização de substâncias absorventes a base de cálcio (calcários e dolomitas) e, mais recentemente, no emprego de diversos óxidos metálicos de caráter regenerável, testados com sucesso em reatores atmosféricos e pressurizados. Este aspecto deve ser considerado um importante incentivo para o aproveitamento energético dos carvões de médio ou alto teor de enxofre, onde no Brasil representam uma quantidade apreciável. Por tal motivo, é fundamental a ampliação da utilização do carvão brasileiro que, até então, restringe-se praticamente à geração de energia elétrica (termoeletricidade) e à obtenção de coque siderúrgico. A gaseificação do carvão é uma forma nobre de utilização deste recurso energético dada a amplitude das formas de utilização do gás gerado e conseqüentemente do carvão.

De acordo com Turik e Furlanetto (1980), pode-se considerar, como disponíveis para a gaseificação, os carvões brasileiros de Candiota, Charqueadas, Leão e o carvão-vapor de Santa Catarina. Uma análise dos processos comerciais de gaseificação disponíveis e das características dos carvões nacionais levou às seguintes conclusões: ou beneficia-se o carvão nacional, para adequá-lo às características dos processos disponíveis; ou desenvolvem-se processos adequados às características dos carvões brasileiros, possibilitando sua utilização sem beneficiamento prévio.

3. A Gaseificação de Carvão Mineral

A conversão de carvão mineral a combustível gasoso para posterior uso em lares, instalações industriais e/ou comerciais, tem sido praticada por mais de 200 anos. Até a década de 40, tal tipo de transformação constituiu-se em uma das maiores indústrias nos Estados Unidos e em países atualmente desenvolvidos. Durante a Segunda Guerra Mundial, a manufatura de combustíveis líquidos foi praticada pela Alemanha para fornecer combustível de uso militar, e neste contexto, avanços significativos foram feitos na tecnologia da gaseificação que significaram a base dos gaseificadores de hoje. O incremento na disponibilidade de gás natural e petróleo nos Estados Unidos e em outros países industrializados resultou na substituição de gás de carvão por gás natural e óleo combustível. A crise do petróleo em 1973 e predições da época de iminente escassez de gás natural provocaram na Europa e nos Estados Unidos o surgimento de programas governamentais e privados que visassem desenvolver sistemas de gaseificação, dirigidos principalmente para a geração de gás de síntese (SNG) a partir do carvão mineral. No entanto, quando o preço do petróleo e do gás caíram, o incentivo para a construção das plantas de produção de SNG foi eliminado, ficando em operação uma quantidade bem menor de gaseificadores que foram utilizados para a manufatura de metanol, amônia e diversos produtos químicos de alto valor comercial. A atual busca no

incremento da eficiência na produção de energia elétrica, e a ênfase na utilização de turbinas a gás, bem como de células combustíveis de alto rendimento têm criado um forte incentivo para desenvolver sistemas de gaseificação de elevada eficiência, especificamente projetados a fornecer combustível para a geração de eletricidade.

Para o caso específico de sistemas de potência para a produção de energia elétrica, a gaseificação pressurizada de carvão mineral começou a ter grande interesse a partir da última década com o desenvolvimento do Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada (IGCC). Este ciclo, segundo Longwell et al. (1995), oferece múltiplas vantagens: baixa emissão de poluentes em relação à energia contida no carvão, alta eficiência térmica e flexibilidade construtiva. Com relação a esta última característica, é possível adicionar gaseificadores a um ciclo simples de geração de potência elétrica que utilize gás natural, quando houver uma elevação do preço deste combustível ou quando o gás natural não estiver disponível. Atualmente, existem várias unidades deste tipo que utilizam gaseificadores de grande porte, construídos por firmas industriais como a LURGI, TEXACO e KROPP-KOPPERS, entre outras. As etapas básicas de um sistema IGCC foram resumidas a seguir, e um esquema dele, apresenta-se na figura 3.1.

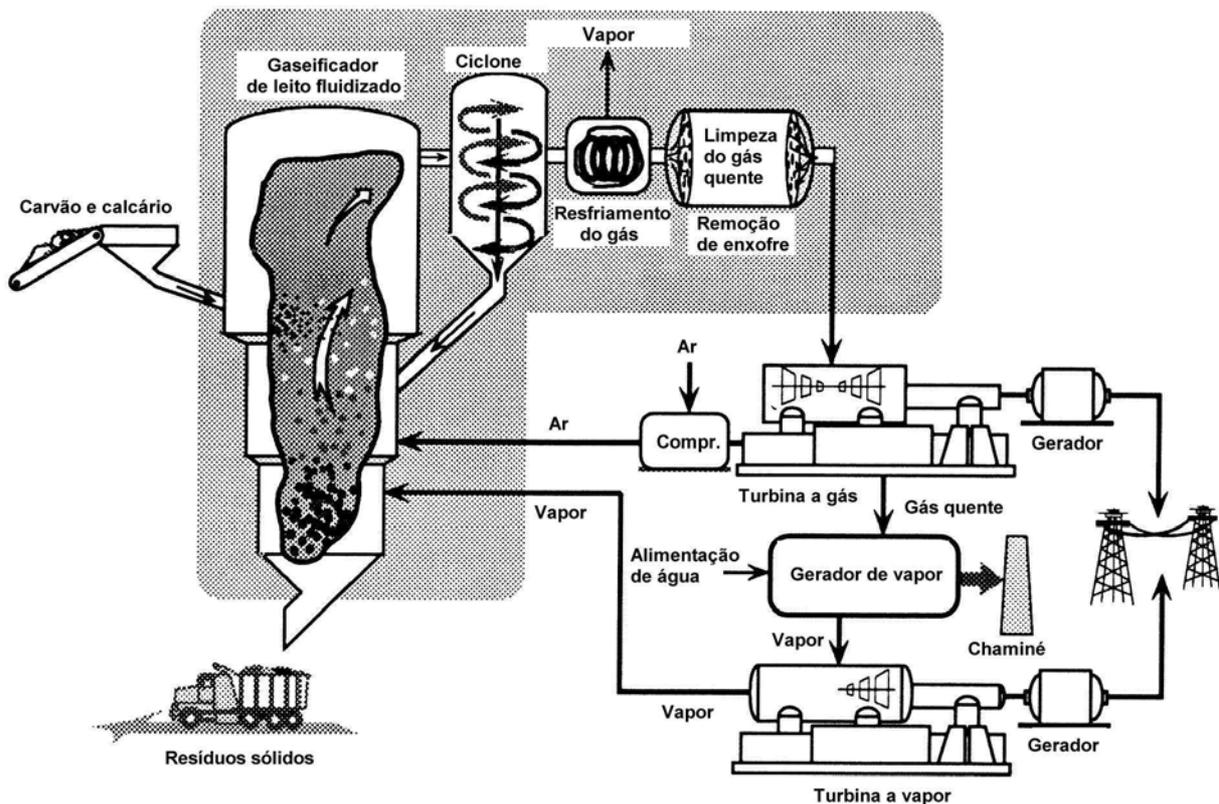


Figura 3.1 Esquema de um Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada. (U.S. Department of Energy, 1992).

- O combustível gasoso forma-se mediante a reação de carvão com vapor e ar (ou oxigênio) a alta temperatura;
- O gás é purificado;
- O gás limpo é queimado e os gases de combustão levados a uma turbina para gerar eletricidade;

- O calor residual dos gases é usado por uma caldeira para produzir vapor de água e ser dirigido a uma turbina convencional para gerar mais eletricidade.

3.1 Classificação e Tipos de Gaseificadores

Segundo Sánchez (1997), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com o poder calorífico do gás produzido, tipo de agente gaseificador, direção do movimento relativo dos sólidos e do agente gaseificante, pressão de trabalho e tipo de combustível. A tabela 3.2 detalha tal classificação.

De acordo com Longwell et al. (1995), a gaseificação de carvão mineral pode ser desenvolvida em três tipos de reatores principais: leito móvel, leito fluidizado e leito arrastado.

Tabela 3.2 Classificação dos gaseificadores

PARÂMETRO	CARACTERÍSTICA
Poder calorífico do gás produzido	<ul style="list-style-type: none"> • Gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm³ • Gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³ • Gás de alto poder calorífico: de 10 a 40 MJ/Nm³
Tipo de agente gaseificador	<ul style="list-style-type: none"> • Ar • Vapor de água • Oxigênio • Hidrogênio (Hidrogaseificação)
Direção do movimento relativo dos sólidos e do agente gaseificante	<ul style="list-style-type: none"> • Contrafluxo (Contracorrente) • Fluxo direto (Concorrente) • Fluxo cruzado • Leito fluidizado-arrastado
Pressão de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosféricos • Pressurizados (até 2000 kPa)
Tipo de combustível	<ul style="list-style-type: none"> • Combustível fóssil (Carvão, derivados do petróleo) • Combustível não fóssil (Biomassas)

3.2 Gaseificadores de leito móvel

No processo mais eficiente da gaseificação em leito móvel, o carvão desloca-se no sentido descendente em contracorrente ao fluxo de gás. Historicamente, os processos de leito móvel têm sido os mais usados nos sistemas de gaseificação, sendo o processo Lurgi o de maior importância nas suas versões em “cinza seca” e “cinza úmida” (figura 3.2) em reatores atmosféricos e pressurizados. Atualmente, gaseificadores comerciais deste tipo têm capacidade para processar carvão mineral na faixa de 800 a 1000 t/dia. Dentre os gaseificadores deste tipo, Kuo (1984) e Lee (1982) mencionam os seguintes:

- **Gaseificador Lurgi (Cinza seca):** Este é um dos reatores de leito móvel mais importantes. Trabalha acima da pressão atmosférica e está coberto por uma camisa

de água, a qual serve para produção de vapor e para o controle da temperatura do reator. O carvão é alimentado pelo topo do gaseificador, enquanto um mecanismo dosificador o coloca e o distribui na zona de reação. Este equipamento tem relativamente alta eficiência térmica por operar a média pressão e em contracorrente com o agente gaseificante. Porém, apresenta desvantagem pelo alto consumo de vapor, baixas quantidades de hidrogênio e monóxido de carbono presentes no gás produzido e por requerer um grande investimento na sua limpeza. O alto consumo de vapor é necessário para manter a temperatura das cinzas abaixo do seu ponto de fusão, as quais são retiradas pela parte inferior do equipamento.

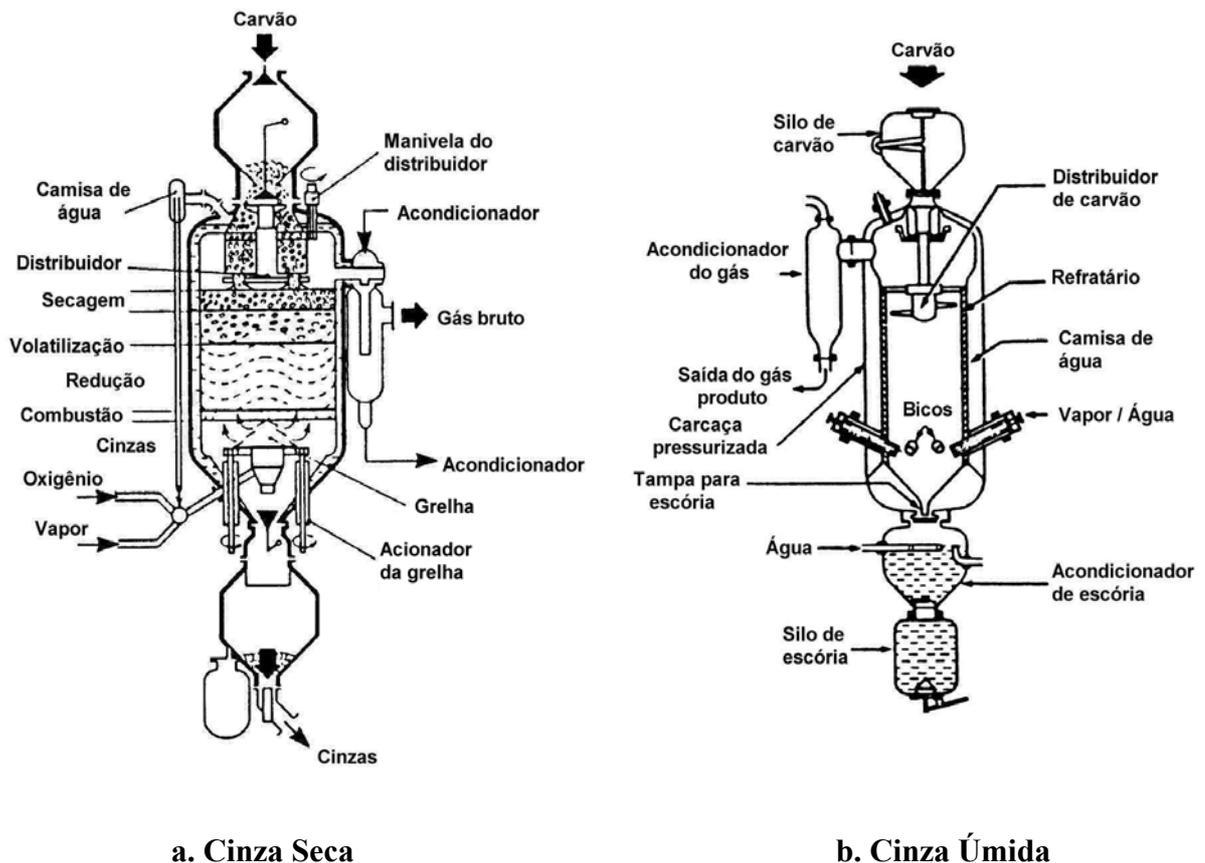


Figura 3.2 Gaseificadores Lurgi.

- **Gaseificador BGC-Lurgi (cinza úmida):** Este gaseificador funciona melhor que o anterior e, por empregar menores quantidades de vapor, a temperatura na zona de combustão poderá ser mais alta que o ponto de fusão das cinzas. Tem a vantagem de reduzir a necessidade de vapor e aumentar as porcentagens de hidrogênio e monóxido de carbono no gás produzido. Sua desvantagem está em requerer materiais refratários mais custosos. Ensaios experimentais foram feitos com este tipo de gaseificador pela Brithis Gas Corporation (BGC) e por seu centro de desenvolvimento na Escócia. A planta piloto empregou um reator de 2,8 m de diâmetro e 5,8 m de altura.
- **Gaseificador Ruhr 100:** Este é outra versão do reator Lurgi (cinza seca). Trabalha a altas pressões (5-7 MPa) e permite a retirada de gás produto livre de alcatrão a partir

da zona média do leito, com uma porcentagem maior de metano presente no gás combustível. Em 1980, foi construída na Alemanha uma planta piloto de 155 t/dia.

- **Gaseificador Woodall Duckham-Gas Integrale:** Este gaseificador foi desenvolvido na Itália e tem utilização relativamente baixa. O seu mecanismo geral é similar ao Lurgi (cinza seca), mas são feitas duas tomadas de gás produto no reator, uma tomada de gás “limpo” realizada depois da zona de gaseificação e antes da zona de volatilização do carvão, e uma tomada de gás bruto colocada no topo do leito fixo. Um esquema deste tipo de gaseificador é mostrado na figura 3.3.
- **Gaseificador Wellman-Galusha:** Este tipo de reator tem o maior número de unidades em operação. Existe em várias versões, com ar ou oxigênio como agentes gaseificantes, e com ou sem agitador. O tipo com agitador é muito similar ao Lurgi (cinza seca), exceto que seus sistemas de alimentação de carvão e remoção das cinzas operam para a condição de pressão atmosférica. Além disso, possui uma capacidade 25% maior que o tipo sem agitador para o mesmo tamanho de equipamento.

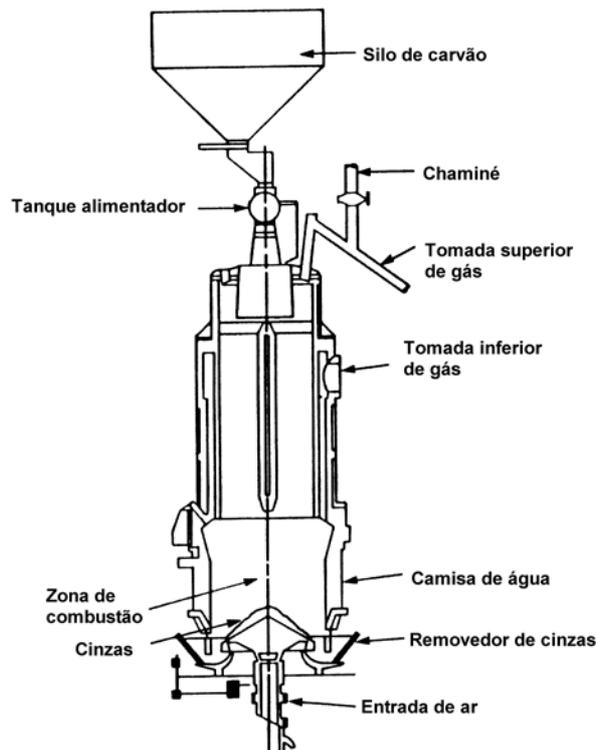


Figura 3.3 Gaseificador Woodall - Duckham

3.3 Gaseificadores de leito arrastado

Nos sistemas de leito arrastado, as partículas de carvão são injetadas junto com uma mistura de vapor de água e oxigênio (ou ar). Existe uma zona onde a maior parte da escória fundida é coletada. Os produtos que saem a alta temperatura requerem esfriamento prévio antes da limpeza do gás combustível, resultando em uma perda da eficiência térmica do sistema. Este tipo de gaseificação produz pouco metano, utiliza

um equipamento relativamente compacto e envolve curtos tempos de reação devido às altas temperaturas de operação (1040-1540°C). Normalmente estes gaseificadores são insensíveis à maioria das propriedades do carvão, tanto que, quase 80% do carvão pode ser pulverizado até uma granulometria abaixo de 200 mesh (44 µm). O sistema mais notável de gaseificação em leito arrastado é a unidade Texaco, de aplicação comercial durante a década passada para a produção de gás de síntese. Além do gaseificador Texaco, outros processos, tais como o Shell e o Destec foram tecnologias comerciais desenvolvidas inicialmente nos Estados Unidos. Embora estes processos tenham menor eficiência térmica do que os de leito fixo e fluidizado, o seu gás resultante apresenta baixas concentrações de alcatrão, hidrocarbonetos mais pesados do que o metano e compostos nitrogenados. Os processos Shell, Destec e Texaco podem operar 2000 t/dia. Devido ao seu comprovado rendimento, os gaseificadores de leito arrastado têm sido escolhidos para demonstrações em sistemas IGCC nos Estados Unidos e em alguns países da Europa. Entre os reatores deste tipo, Kuo (1984) descreve os seguintes:

- **Gaseificador Koopers-Totzek:** Comercialmente, este gaseificador é o mais importante dos reatores de leito arrastado em operação. Trabalha a pressão atmosférica e a uma maior temperatura que o resto dos gaseificadores. Existe em duas versões, de duas e quatro cabeças. O primeiro foi desenvolvido no ano 1951, funciona horizontalmente e tem forma elíptica, enquanto que o segundo foi construído em 1970 na Índia, apresentando melhor rendimento. Cada cabeça contém dois queimadores e o reator está coberto com uma camisa de água e material refratário. A remoção das cinzas fundidas é feita pelo centro do gaseificador. A figura 3.4 ilustra um reator Koppers-Totzek.

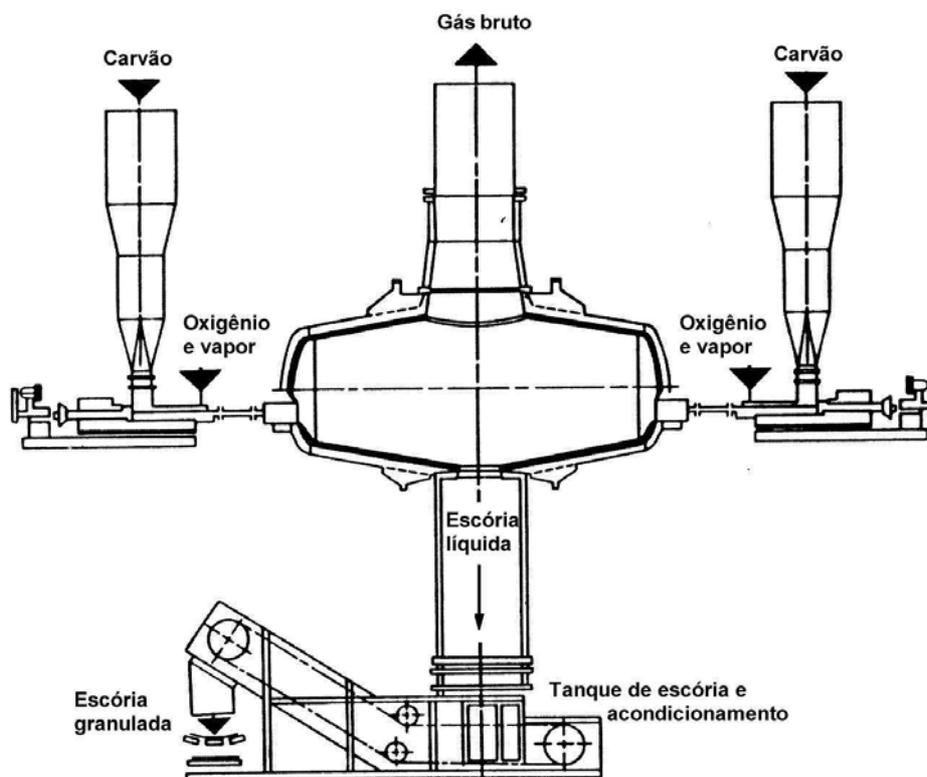


Figura 3.4 Gaseificador Koppers-Totzek

- **Gaseificador Otto-Rummel:** Este equipamento também funciona à pressão atmosférica e está dividido em três etapas. Na etapa inferior, seca-se e pulveriza-se o carvão que é injetado junto com o vapor e o oxigênio. Na etapa média, ocorrem as reações de gaseificação e na etapa superior, coleta-se e refrigera-se o gás produzido. Um reator em escala comercial deste tipo, de 1,8 m de diâmetro, foi instalado nos anos 60 na Alemanha, funcionando satisfatoriamente durante 18 meses.
- **Gaseificador Shell-Koppers:** Este reator é uma versão pressurizada do Koppers-Totzek com desenho muito similar, mas com uma maior eficiência térmica. Existem, atualmente, duas plantas com capacidade de 1000 t/dia, uma na Alemanha e outra na Holanda.
- **Gaseificador Texaco:** Foi desenvolvido nos Estados Unidos e consiste de um cilindro vertical pressurizado coberto com material refratário que trabalha preferivelmente resíduos misturados de carvões betuminosos com água. Em aplicações comerciais, produz gás de síntese para a manufatura de metanol e anidrido acético. Na Califórnia (E.U.A) existe uma planta com capacidade para processar 910 t/dia de combustível. A figura 3.5 mostra um esquema do processo com um reator deste tipo.

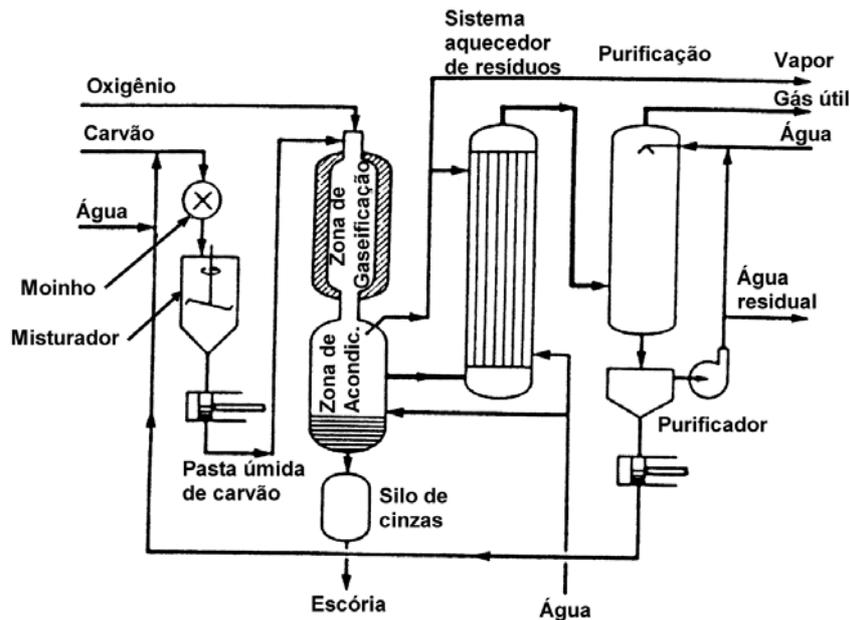


Figura 3.5 Esquema do processo Texaco.

3.4 Gaseificadores de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado oferecem um método atrativo para a produção de uma ampla variedade de produtos a partir do gás de carvão. Estes sistemas operam entre 760 e 1040°C, dependendo da reatividade do carvão alimentado e a temperatura de sinterização das cinzas. No caso de requerer a limpeza prévia do gás de carvão, o reator de leito fluidizado apresenta maior eficiência térmica do que o reator de leito arrastado, devido, essencialmente, ao fato de que no primeiro, a temperatura do gás

na saída do gaseificador ajusta-se melhor à temperatura requerida pelo sistema depurador, evitando-se portanto a utilização de processos adicionais no resfriamento do gás produto. Em relação aos gaseificadores de leito móvel, os de leito fluidizado apresentam maior taxa de processamento do carvão, característica que reduz custos de operação e o tamanho do equipamento. Diferentemente dos reatores de leito móvel, Sánchez (1997) estabeleceu que neste tipo de gaseificadores não é possível identificar fisicamente as fases de secagem, volatilização, combustão e redução, devido às partículas combustíveis sofrerem mudança permanente de posição dentro do leito mantido em suspensão. Segundo Olivares (1996), em instalações de grande porte visando a cogeração na produção de energia elétrica, quase todos os reatores utilizados são de leito fluidizado da primeira (simples ou borbulhantes) e segunda geração (circulantes), sendo estes últimos os de maior eficiência na conversão de carbono ($\approx 95\%$). Tal característica deve-se ao fato de que estes últimos garantem um tempo de residência mais prolongado para as partículas de combustível no leito.

Com a operação a temperaturas mais baixas e pressões altas, os gaseificadores de leito fluidizado conseguem produzir metano e gás de síntese requerendo menos oxigênio e proporcionando aumento na eficiência do sistema. Devido às baixas temperaturas, as cinzas de carvão necessitam de maior atenção antes de serem descartadas ao ambiente, por serem potencialmente contaminantes. Com os gaseificadores KRW (Kellogg-Rust-Westinghouse) e Tampella/U-Gás pode-se reduzir esse problema, devido à presença de uma seção especial de aglomeração das cinzas fundidas já neutralizadas. Dentro dos processos que utilizam gaseificadores de leito fluidizado, Gururajan (1992), Berkowitz (1994), Kuo (1984) e Lee (1982) destacam os seguintes:

- **Processo Winkler:** Fritz Winkler, no ano de 1926, na Alemanha, foi um dos primeiros a aplicar comercialmente a gaseificação de carvão mineral em leito fluidizado. O processo Winkler trabalha no regime de fluidização borbulhante à pressão atmosférica com partículas de carvão menor que $5000 \mu\text{m}$ de diâmetro, contendo entre 10 a 20% de umidade. As partículas são mantidas em estágio fluidizado por uma corrente ascendente de vapor de água, ar ou oxigênio. Com o aquecimento do reator, o carvão perde umidade e material volátil devido à decomposição térmica. Os voláteis e uma parte do coque formado entram em combustão produzindo calor, com o qual controlam-se as reações endotérmicas do coque remanescente com o vapor de água e dióxido de carbono. A temperatura é mantida abaixo da temperatura de aglomeração e fusão das cinzas mediante o controle da vazão de ar ou oxigênio. O gás quente produzido no gaseificador é depurado para sua utilização posterior. As cinzas são removidas pela base do equipamento, controlando-se também a altura do leito. A figura 3.6 ilustra um gaseificador deste tipo.

Um total de 16 plantas comerciais foram sendo instaladas na Europa e Ásia. Uma unidade deste tipo possui tipicamente diâmetro e altura de 6 e 23 m, respectivamente. Pode processar 700 t/dia de carvão usando ar ou 1000 t/dia utilizando oxigênio a pressão atmosférica. A esta pressão e empregando ar como agente gaseificante, a produção de gás com poder calorífico igual a $4,4 \text{ MJ/m}^3$ é de $3000 \text{ m}^3/\text{t}$ de carvão consumido.

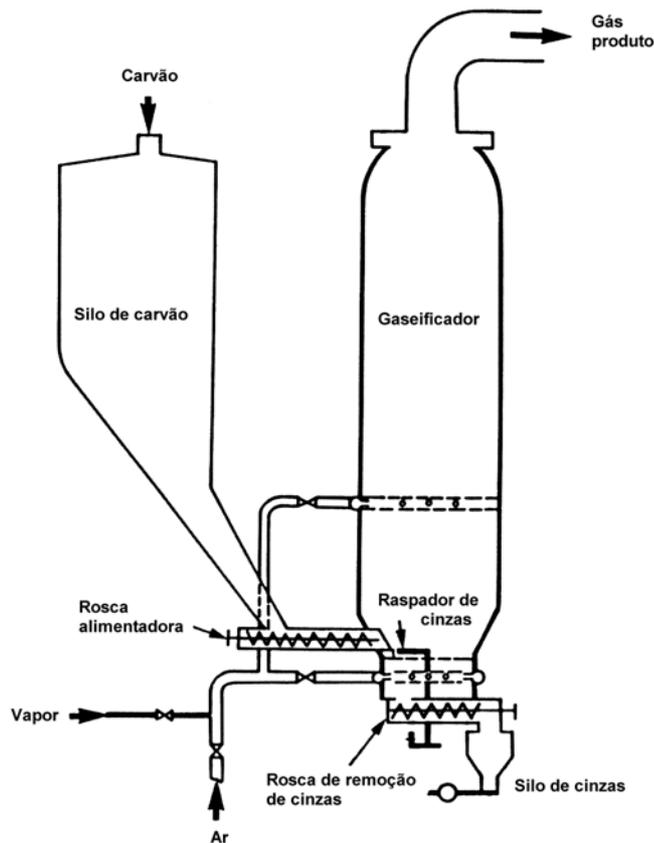


Figura 3.6 Gaseificador Winkler

Um inconveniente do processo Winkler é que a temperatura de operação deve ser mantida abaixo da temperatura de fusão das cinzas para evitar a perda da fluidização do leito, fato que leva à elutriação e à diminuição da eficiência de conversão. Portanto, este processo somente é apropriado para carvões que não sejam altamente reativos. Tal característica limitou sua aplicabilidade e, por tal motivo, atualmente tem sido substituído por outros sistemas. De acordo com Staeger (1976), a conversão de carbono neste processo está ao redor de 80% e o combustível deve cumprir os seguintes requisitos:

- A faixa granulométrica do carvão não deve ser demasiada grande, pois caso contrário não é possível a formação do leito fluidizado;
- O combustível não deve conter finos em demasia, pois estes atravessam o leito fluidizado, saindo do reator em estado não gaseificado;
- No leito fluidizado, o carvão não deve aglomerar-se ou desintegrar-se;
- O ponto de amolecimento da cinza deve ser superior à temperatura do leito fluidizado.

Os últimos desenvolvimentos do processo Winkler alcançam cerca de 80% de eficiência a frio.

- **Processo U-Gás:** Este sistema desenvolvido pelo Institute of Gas Technology (E.U.A), operado inicialmente em uma planta piloto de 24 t/dia, consiste de um reator circulante de uma etapa fluidizada que recebe carvão betuminoso para ser convertido em gás de síntese empregando a mistura oxigênio-vapor como agente

gaseificante. A placa distribuidora tem forma de cone invertido. O carvão alimentado é triturado a 7000 μm de diâmetro e mantido dentro do gaseificador durante 45 a 60 minutos. A velocidade de fluidização é da ordem de 0,6 a 1,0 m/s. A aglomeração das cinzas pela alta temperatura permite sua coleta no fundo do reator. Os finos são separados por três ciclones, um dos quais está posicionado dentro do gaseificador. Um esquema simplificado ilustra-se na figura 3.7.

Normalmente na geração industrial de combustível gasoso, o processo funciona a pressões inferiores a 0,69 MPa, enquanto que para ciclos de potência combinados de importância, trabalha a 2,07 MPa. Em Memphis (E.U.A), tem sido projetada uma planta com capacidade para processar 2870 t/dia de carvão betuminoso.

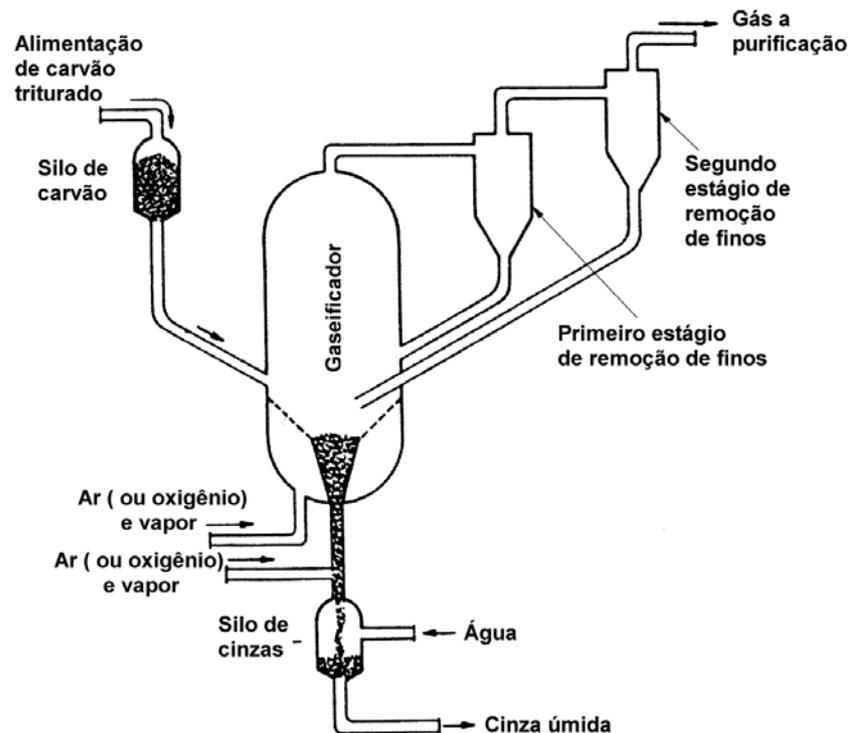


Figura 3.7. Esquema do processo U-Gás

Quando utiliza-se ar como agente gaseificante, obtém-se um gás com poder calorífico de 5,6 MJ/Nm³, e quando se emprega oxigênio, o valor ascende a 11,1 MJ/Nm³. A temperatura do leito é mantida abaixo da temperatura de fusão das cinzas, as quais antes de serem removidas, são aglomeradas em uma zona inferior do reator para submetê-las novamente a gaseificação, obtendo-se uma conversão de carbono de 98% sem requerer temperaturas muito altas, nem múltiplas etapas de fluidização.

- **Processo Westinghouse:** Este processo iniciou-se em 1972, na Pennsylvania (E.U.A). Nos aspectos principais é similar ao processo U-Gás, trabalha a pressões médias, sendo projetado essencialmente para a sua aplicação em ciclos combinados de potência. Inicialmente, o equipamento utilizado consistiu de dois reatores cilíndricos, um deles, dessulfurizador/volatilizador e o outro, combustor/gaseificador. Mais recentemente, o processo Westinghouse foi modificado, empregando uma só unidade como geradora do gás combustível. Neste

sistema, o carvão é triturado e alimentado junto com finos recirculados na zona de combustão do gaseificador, usando gás produto como meio de transporte. Tal mistura previne a aglomeração do carvão fresco quando este passa por sua fase plástica. As cinzas são removidas por aglomeração. O gás produto elutria finos do leito a altas temperaturas, os quais são coletados em um ciclone e resfriados a 425°C durante a troca de calor com um gerador de vapor de água. Diferente do U-Gás, os finos coletados no ciclone são gaseificados com CO_2 em um reator auxiliar, antes de serem novamente levados ao reator principal. Existem duas plantas funcionando nos Estados Unidos, uma com capacidade de 110 t/dia e outra de 1200 t/dia. Na figura 3.8 mostra-se um esquema de uma planta utilizando o processo Westinghouse.

- **Processo COGAS:** Este sistema foi desenvolvido para gaseificar e queimar carvão coqueificado empregando dois reatores. Um deles fluidiza e gaseifica com vapor, do qual sai gás de síntese, e o outro, fluidiza a 1950°C e queima com ar os finos de coque coletados do reator-gaseificador para aproveitar o calor fornecido pela combustão. Caracteriza-se por trabalhar a baixas pressões (0,35 MPa) e com múltiplas etapas de fluidização.

Foram realizados testes com planta piloto na Inglaterra e com planta para demonstração em Illinois (E.U.A). Esta última foi construída para processar 2300 t/dia de carvão betuminoso, com a qual conseguiu-se obter 1800 barris de óleo, 400 barris de nafta e 679600 m^3 de gás de síntese. Na figura 3.9 ilustra-se um reator COGAS.

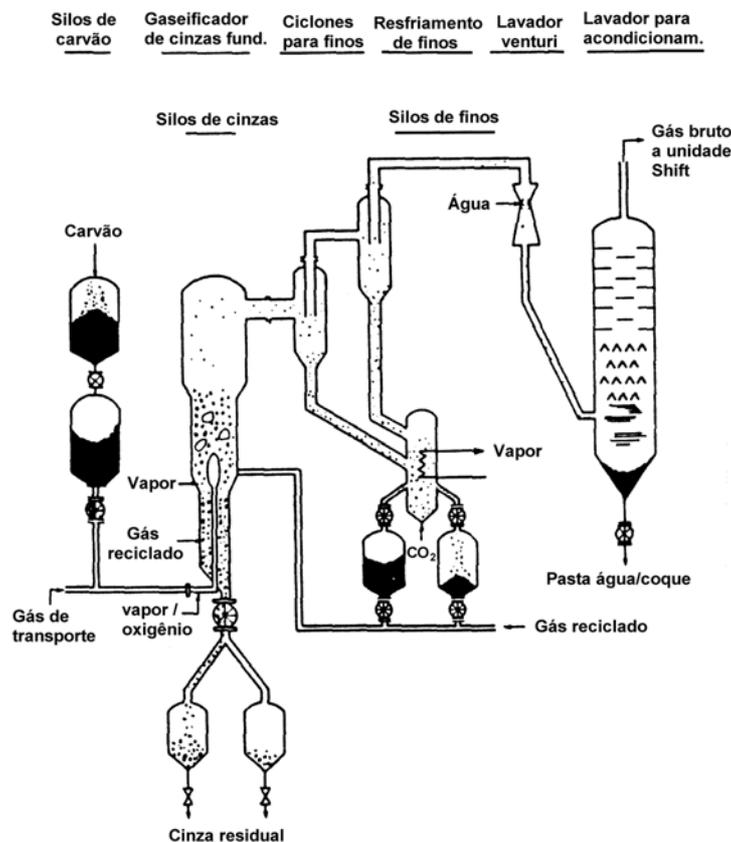


Figura 3.8 Processo Westinghouse

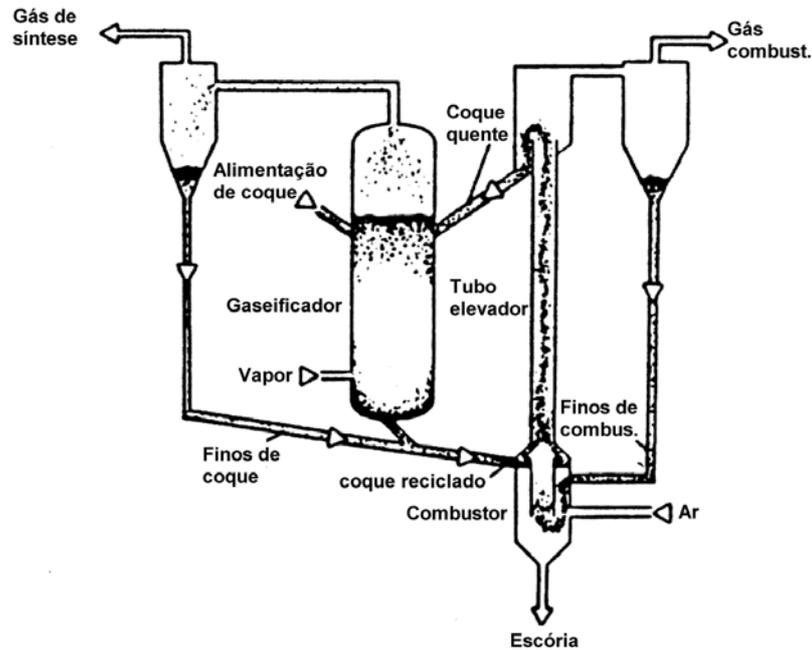


Figura 3.9 Processo COGAS

- Processo HYGAS:** Este processo funciona com quatro etapas de fluidização e é essencialmente um hidrogaseificador. O carvão alimentado é misturado com um óleo leve e bombeado ao gaseificador, passando a um secador no topo do equipamento que vaporiza o óleo para ser parte do gás produto. Na etapa seguinte, o carvão é hidrogaseificado rapidamente sem permitir a formação de alcatrão ou líquidos. As duas últimas etapas são utilizadas para a formação de metano e a gaseificação com oxigênio-vapor, da qual sai um gás rico em hidrogênio para a fase de hidrogaseificação ocorrida na parte superior. Este processo é um dos sistemas de gaseificação com maior eficiência global, e pode ser empregado para processar com sucesso carvões linhitos, betuminosos e sub-betuminosos. Em Chicago (E.U.A), tem sido testada uma planta piloto de 80 t/dia. Na figura 3.10 mostra-se um processo deste tipo.

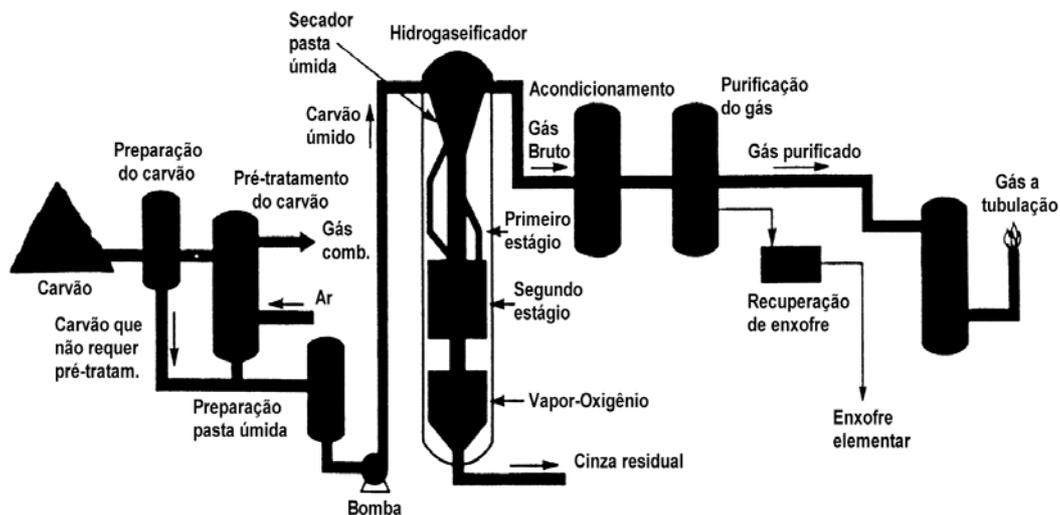


Figura 3.10 Processo HYGAS

- Processo CO_2 -Acceptor:** Foi desenvolvido para gaseificar carvões linhitos e sub-bituminosos e funciona a uma pressão de 1,03 MPa. Emprega um escoamento circulante de dolomita calcinada ($MgO.CaO$), produzida em um regenerador para ser alimentada ao gaseificador, o qual é fluidizado só com vapor. O calor, liberado pela reação química da dolomita com o CO_2 formado no gaseificador, fornece a energia requerida para as reações endotérmicas de gaseificação que vão gerar o gás de síntese. O regenerador de dolomita é igualmente um sistema fluidizado que desenvolve reações de combustão com ar para processar a dolomita residual na saída do gaseificador. Na literatura não encontrou-se informação sobre plantas em operação com este processo. Na figura 3.11 ilustra-se um processo CO_2 -Acceptor.

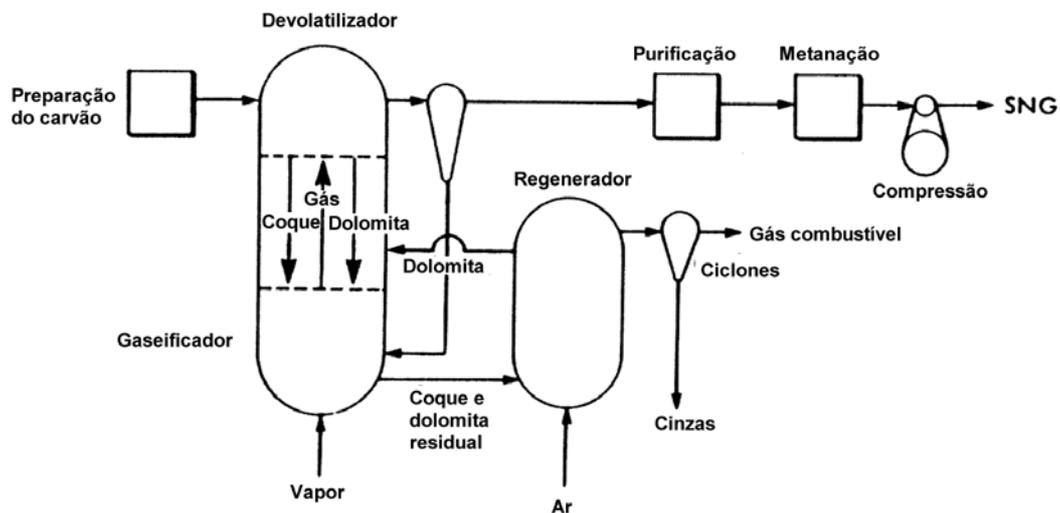


Figura 3.11 Processo CO_2 -Acceptor

- Processo *Synthane*:** Este processo, desenvolvido nos Estados Unidos, utiliza uma etapa de fluidização para produzir gás com alto teor de metano (≈ 22 a 23%) a pressões acima de 6,9 MPa. Caracteriza-se pela baixa conversão de carbono (65 a 80%), devido ao processo envolver adicionalmente a combustão do carvão parcialmente gaseificado com propósitos de aproveitamento de calor em plantas térmicas. Quando o carvão é alimentado pelo topo, pode-se obter alcatrão ou óleos indesejáveis, caso que não acontece ao alimentar-se o combustível por baixo. Na Pennsylvania (E.U.A), existe uma planta piloto com capacidade de 70 t/dia. Na figura 3.12 mostra-se um esquema deste processo.
- Processo *HTW (High Temperature Winkler)*:** Este processo foi desenvolvido na Alemanha nas últimas duas décadas. Trabalha a uma pressão de 1,1 MPa e a uma temperatura de aproximadamente $1097^\circ C$. Neste caso, a eficiência de conversão do carvão é maior em relação à versão padrão, devido fundamentalmente, pela recirculação dos finos desde o ciclone e pela injeção de oxigênio na parte livre superior do gaseificador (freeboard), onde reagem as partículas arrastadas.

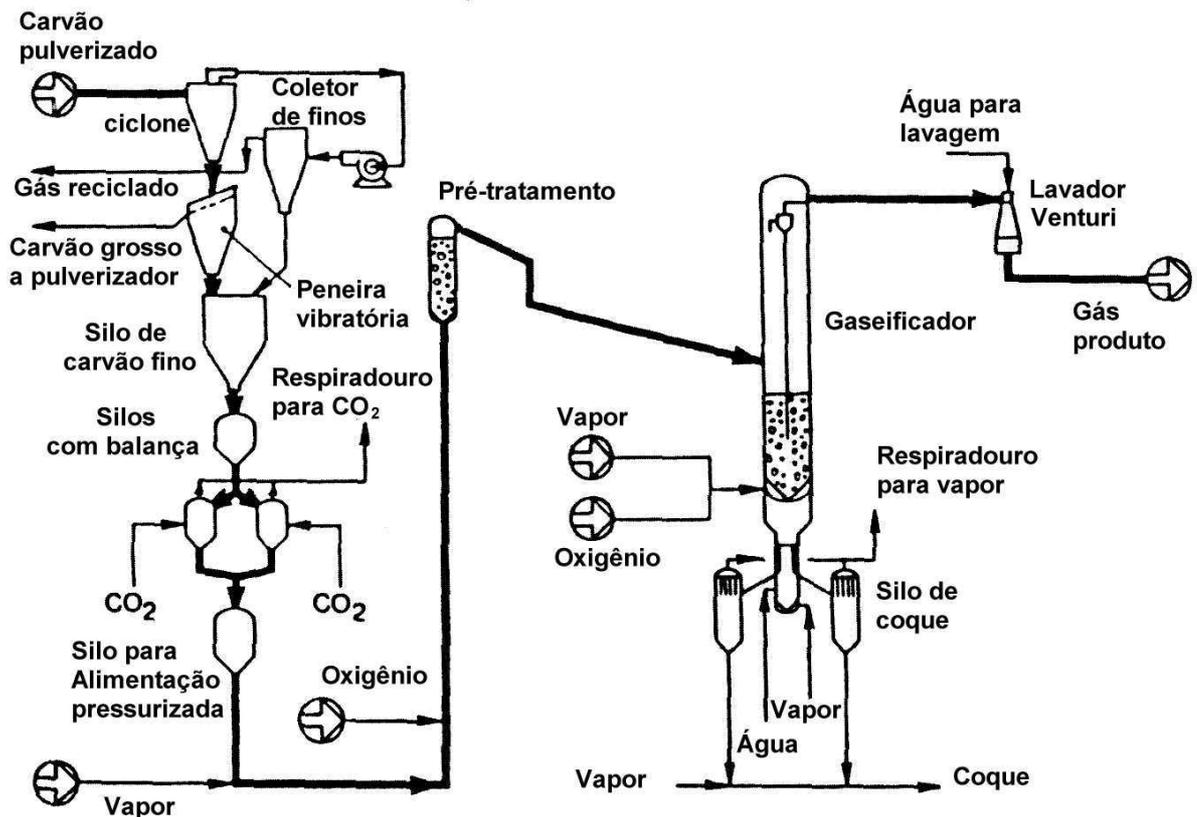


Figura 3.12 Processo Synthane

4. Projetos Comerciais e de Pesquisa Desenvolvidos na Gaseificação de Carvão Mineral

A partir do surgimento da tecnologia de gaseificação do carvão mineral na segunda metade do século vinte, inúmeros projetos com fins comerciais ou de pesquisa, desenvolvidos em institutos ou universidades, têm sido implementados. Kuo (1984) e Longwell et al. (1995) apresentaram resultados operacionais de alguns gaseificadores comerciais de leito fixo, leito fluidizado e leito arrastado. Na tabela 3.3 compara-se estes sistemas. Nos últimos 15 anos, os gaseificadores de leito fluidizado, testados com sucesso, apresentaram entre eles características operacionais evidentemente diferentes de acordo com a finalidade ou aplicabilidade. A tabela 3.4 ilustra tais características.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (1992) apresentou alguns projetos em desenvolvimento sobre gaseificação de carvão mineral em leito fluidizado. Um desses projetos é a construção de um sistema (IGCC) envolvendo o processo U-Gás pressurizado, com o qual pode-se gerar 107 MW de potência elétrica. Neste sistema utiliza-se ar e vapor como agentes gaseificantes, bem como adsorvente a base de cálcio e titanato de zinco para a remoção de 90% do enxofre produzido na operação. O equipamento emprega carvão betuminoso a uma taxa nominal de 430 t/dia obtendo-se, como resultado, gás de baixo poder calorífico.

Segundo Longwell et al. (1995), depois do ano 2000, na Europa, tem-se planejado a construção de um processo Winkler circulante de alta temperatura com capacidade para gerar 300 MW de potência elétrica.

Tabela 3.3 Comparação de características operacionais entre alguns gaseificadores comerciais de leito fixo, fluidizado e arrastado (Kuo, 1984).

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO	GASEIFICADOR			
	Lurgy (fixo)	Koppers-Totzek (arrastado)	Otto-Rummel (arrastado)	Winkler (fluidizado)
<ul style="list-style-type: none"> Tamanho do carvão (μm) Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) Pressão (MPa) 	3000-50000 980-1370 2,5-3,2	80% < 74 1930 0,1	< 1000 1480-1700 0,1	< 9500 815-980 0,1
<ul style="list-style-type: none"> Tipo de carvão Composição do gás ⁽²⁾ <ul style="list-style-type: none"> H₂ CO CO₂ CH₄ C₂⁺ N₂ H₂S + COS NH₃ Oxigênio (kg/kg-carvão) Vapor (kg/kg-carvão) 	Wyoming 38,8 18,8 29,6 11,3 0,6 0,3 0,1 0,5 0,354 1,49	TVA ⁽¹⁾ 34,2 53,1 10,0 --- --- 1,2 1,5 --- 0,942 0,415	Betuminoso 30,7 53,6 14,0 0,5 --- 0,7 0,5 --- 1,0 0,4	Linhito alemão 38,4 35,3 21,9 1,8 --- 1,1 1,5 --- 0,755 0,645
Conversão de carbono (%)	99	96	99	N.A.
Eficiência a frio (%)	80	71,3	72	74,7

⁽¹⁾ Tennessee Valley

⁽²⁾ %Volume em base seca

Neogi et al. (1986) pesquisaram a gaseificação a pressão atmosférica, utilizando somente vapor como meio fluidizante. Misturaram as partículas de carvão betuminoso com areia e calcário para evitar problemas de aglomeração. Os autores obtiveram resultados de concentração de gás produto em função da temperatura do reator, na faixa de 600 a 800 $^{\circ}\text{C}$, sendo comparados com um modelo teórico de gaseificação. Com temperatura perto de 800 $^{\circ}\text{C}$ a composição volumétrica do gás foi 16% de CO, 21% de CO₂, 60% de H₂ e 3% de CH₄. Utilizaram um reator com diâmetro interno de 0,1 m, carvão como sólido particulado com diâmetro de partícula de 297 μm . Os sólidos foram fluidizados e gaseificados a uma velocidade superficial na faixa de 0,14 a 0,16 m/s, à temperatura média do leito. A análise do gás produzido foi realizado por cromatografia, com período de amostragem de 11 minutos. A conversão de carbono obtida foi de 80%.

No trabalho apresentado por Weimer e Clough (1981), desenvolveu-se um modelo para gaseificação atmosférica com mistura de oxigênio-vapor. Os autores observaram que a conversão de carbono, a temperatura do leito e a relação CO/H₂ aumentaram com o incremento do fluxo de gás fluidizante.

Tabela 3.4 Características de operação de alguns gaseificadores de leito fluidizado (Longwell et al., 1995).

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO	GASEIFICADORES					
	HTW	CO ₂ -Acepptor	COGAS	HYGAS	Synthane	U-Gás
• Tamanho do carvão (μm)	N.A.	150-2400	< 3000	< 1700	< 840	<6400
• Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	1100	815	870	1010	980	980-1040
• Pressão (MPa)	1,1	1,1	0,2-0,4	7-10	7,0	0,1-0,6
• Tipo de carvão	Linhito Alemão	Linhito	Illinois #6	Montana	Western	West Kentucky
• Composição do gás (% Vol. Base seca)						
H ₂	35,3	58,8	57,9	30,8	24,6	38,4
CO	51,9	15,5	31,2	26,2	13,6	23,6
CO ₂	8,9	9,1	6,6	24,3	43,6	32,1
CH ₄	3,2	13,7	4,0	16,7	15,2	5,0
C ₂ ⁺	0,0	---	---	1,3	1,9	0,0
N ₂	0,7	2,9	0,3	0,1	0,2	0,4
H ₂ S + COS	0,1	---	---	0,2	0,3	0,5
NH ₃	0,0	---	---	0,4	0,6	0,0
• Oxigênio (kg/kg-carvão)	0,53	0,0	N.A.	0,253	0,351	N.A.
• Vapor (kg/kg-carvão)	0,24	1,1	N.A.	1,05	0,750	N.A.
Conversão de carbono (%)	95	96	99	N.A.	65-80	97
Eficiência a frio (%)	N.A.	71,3	N.A.	88,3	79,5	N.A.

Watkinson et al. (1987) fizeram um estudo da gaseificação de carvão betuminoso e sub-betuminoso, empregando misturas oxigênio/vapor e ar/vapor como gás reagente num reator de 0,3 m de diâmetro. O combustível foi alimentado a uma taxa de 50 kg/h de forma contínua, com o qual obtiveram resultados na conversão de carbono de 80% a temperaturas de leito acima de 800°C. Neste sentido, tanto a gaseificação com oxigênio, quanto com ar, apresentaram resultados similares. A composição do gás obtido em base seca foi de 36,5% para H₂, 32% para CO, 27% para CO₂ e 4,5 % para CH₄.

No trabalho apresentado por Tsuji & Uemaki (1994), no Japão, foi reportado um rendimento a frio de 62 a 78% e uma conversão de carbono de 75 a 97% para um gaseificador a jorro (Jet-Spouted Bed). O reator funcionou a pressão atmosférica e a temperaturas acima que 1150°C, utilizando oxigênio e vapor como agentes gaseificantes. O gás produto teve de 36 a 41% de hidrogênio e 30 a 43% de monóxido de carbono. Neste gaseificador construído em escala de laboratório, foi empregado carvão sub-betuminoso a uma taxa de alimentação entre 5 e 10,5 kg/h.

Na Índia, Chatterjee et al. (1995) realizaram ensaios experimentais num gaseificador atmosférico, empregando ar e vapor a velocidades de fluidização entre 0,5 e 1,0 m/s, com o propósito de transformar carvão de alto teor de cinzas em gás combustível. O pré-aquecimento do leito fluidizado foi feito utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP), com o qual atingiu-se uma temperatura de 700°C. O poder calorífico do gás obtido esteve ao redor de 4 MJ/Nm³ e a conversão de carbono perto de 80%, concordando com trabalhos anteriores similares. Os autores verificaram que o teor de CO, o poder calorífico do gás e a temperatura do leito fluidizado aumentaram com o incremento da quantidade de oxigênio fornecida ao reator e apresentaram efeito contrário quando elevou-se a taxa de vapor. Eles observaram valores similares quando

compararam os resultados obtidos na composição do gás produto com os registrados por Neogi et al. (1986).

De acordo com Wen (1974), um reator de leito fluidizado com 0,38m de diâmetro interno para a gaseificação de carvão mineral foi empregado pela West Virginia University (E.U.A), com o qual produziu-se gás de baixo poder calorífico. O equipamento operou a temperaturas entre 760 e 1038°C, e a uma altura de leito fluidizado de 1,22 m. O material inerte (areia, com diâmetro médio de partícula de 635µm) foi fluidizado a 0,46 m/s. A composição média do gás produzido (%volume seco) foi de 46,9% de H₂, 11,7% de CO₂, 16,6% de CH₄, 21,7% de CO; o seu poder calorífico esteve ao redor de 1,8 MJ/Nm³.

No caso do Brasil, não se tem informação sobre plantas comerciais de gaseificação de carvão mineral em leito fluidizado atualmente em operação. Estudos realizados pela Companhia Energética do Estado de São Paulo (1986), decidiram optar pela tecnologia de leito fixo e leito arrastado no projeto do complexo de gaseificação da Baixada Santista. A seleção feita indicou a implementação dos processos Lurgy, Koppers-Totzek e Texaco como os mais adequados à matéria-prima selecionada.

No estado do Rio Grande do Sul, a Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, segundo Turik e Furlanetto (1980), desenvolveu há quase 20 anos o projeto CIVOGÁS, no qual foi construído um gaseificador em leito fluidizado para processar carvões com alto teor de cinzas (≈50% base seca) e poder calorífico ao redor de 13 MJ/kg, a uma taxa de alimentação entre 500 e 1000 kg/h. O diagrama de bloco do processo apresenta-se na figura 3.13.

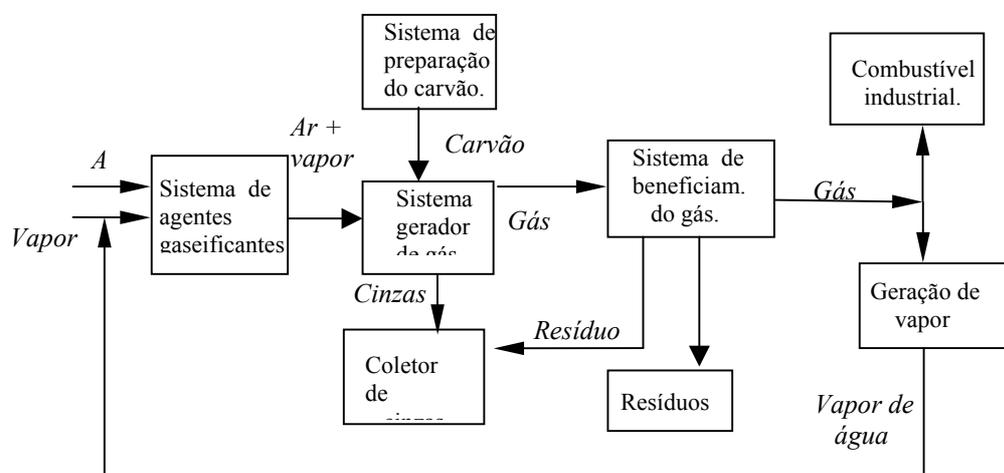


Figura 3.13 Diagrama de bloco - Projeto CIVOGÁS.

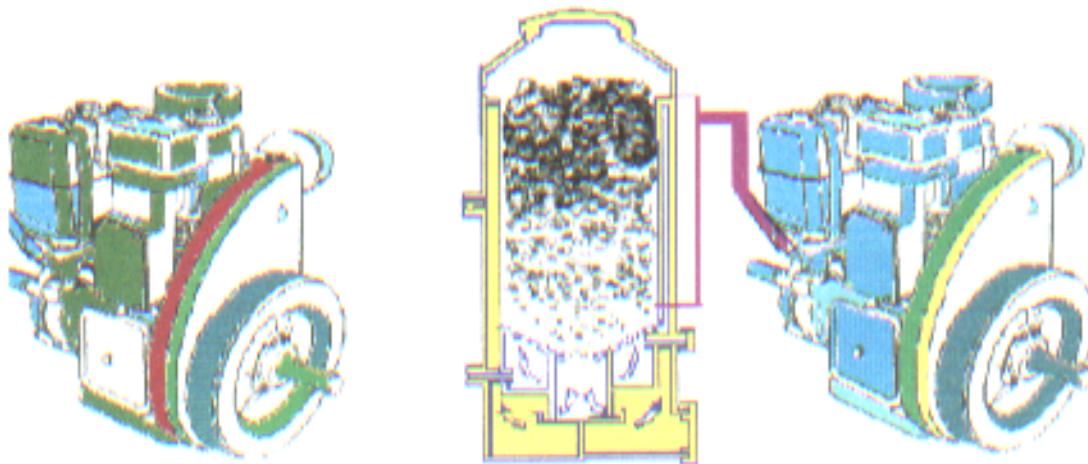
Além disso, no Brasil, o processo de gaseificação em leito fluidizado para carvão mineral praticamente só é pesquisado em universidades e alguns institutos, desenvolvendo-se primordialmente no campo da conversão de biomassa, devido ao oferecimento de melhores alternativas para o país. Ainda não há equipamento comercial.

Biomass Gasification

Technology and Utilisation

Troubles with Gasification System

Gasification is quite complex and sensitive process. There exists high level of disagreement about gasification among engineers, researchers, and manufacturers. Many manufacturers claim that their unit can be operated on all kinds of biomass. But it is quite questionable fact as physical and chemical properties varies fuel to fuel.



Liquid fuel drive engine

Operation is easy, trouble free and convenient on part of operator

Producer gas drive engine

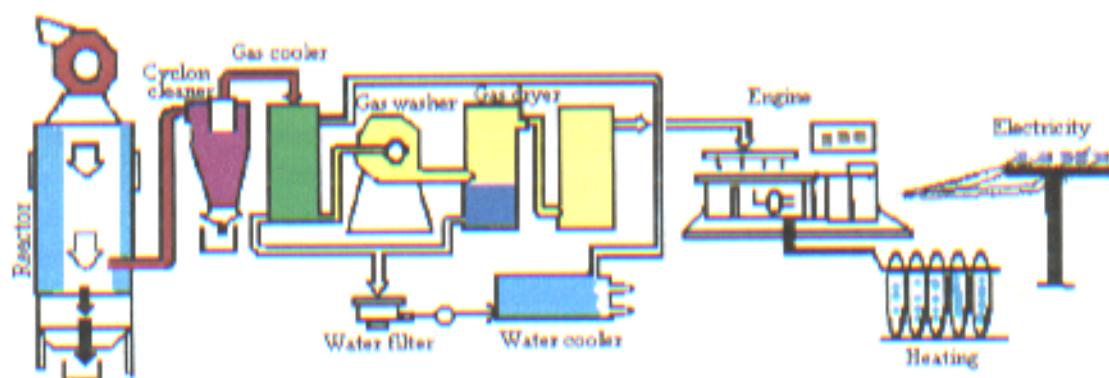
Operation of producer gas drive engine is not convenient

Operation of diesel or gasoline engine is simple. Engine starts immediately and there is no trouble within the run. Handling of liquid fuel is also easy task. Anybody expecting something similar will be disappointed with operation of gasifier. It requires atleast half an hour or more to start the system. Fuel is bulky and frequent refuelling is often required for continuous running of the system. Handling residues such as ash, tarry condensates is time consuming and dirty work. Driving with producer gas fueled vehicles requires much more and frequent attention than gasoline or diesel fueled vehicles

Getting the producer gas is not difficult, but obtaining in the proper state is the challenging task. Gasoline and diesel have quite homogenous property. The physical and chemical properties of producer gas such as energy content, gas composition and impurities vary time to time. All the gasifiers have fairly strict requirements for fuel size, moisture and ash content. Inadequate fuel preparation is an important cause of technical problems with gasifiers.

Gasifier is too often thought of as simple device that can generate a combustible gas from any biomass fuel. A hundred years of research has clearly shown that key to successful gasification is gasifier specifically designed for a particular type of fuel. Those interested in this technology must remember that it requires hard work and tolerance. Although technology is inconvenient, it is economical at many places and may lead to self-reliance in fuel crisis.

Biomass Gasification Technology and Utilisation



Biomass gasification, a century old technology, is viewed today as an alternative to conventional fuel. In gasification process, wood, charcoal and other biomass materials are gasified to produce so called 'producer gas' for power or electricity generation. Gasification system basically consists of a gasifier unit, purification system and energy converters - burner or engine. This internet documentation will give you an insight into gasification technology.

[Overview of gasification technology](#) [Energetic use of biomass for gasification](#) [Gasification for energy supply](#) [Gasification history and development](#) [Gasification process](#) [Producer gas and it's constituents](#) [Hazards with producer gas](#) [Different gas producers \(Gasifiers\)](#) [Impact of fuel quality and properties](#) [Suitability of some biomass fuels](#) [Running IC engines with producer gas](#) [Conditioning of producer gas](#) [Troubles with gasification system](#) [Literatures on gasification](#)

Biomass Gasification Technology and Utilisation

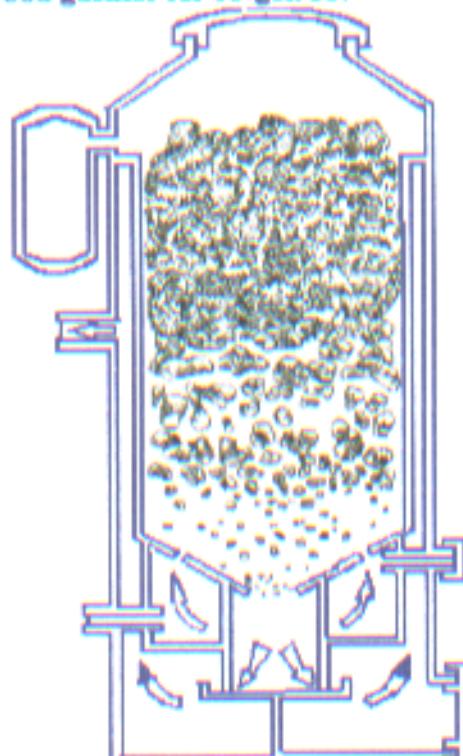
Overview of Gasification Technology

Gasification is a century old technology, which flourished quite well before and during the second world war. The technology disappeared soon after the second world war, when liquid fuel became easily available. The interests in the gasification technology has undergone many ups and downs in running century. Today, because of increased fuel prices and environmental concern, there is renewed interest in this century old technology. Gasification has become more modern and quite sophisticated technology.

The advantage of this technology is decentralized energy conversion system which operates economically even for small scale .A gas producer is a simple device consisting of usually cylindrical container with space for fuel, air inlet, gas exit and grate. It can be made of fire bricks, steel or concrete and oil barrels. The design of gasifier depends upon type of fuel



Wood gasifier for co-gen set



used and whether gasifier is portable or stationary. Gasifier alone itself is of little use. The complete gasification system consists of gasification unit (gasifier), purification unit and energy converter - burners or internal combustion engine.



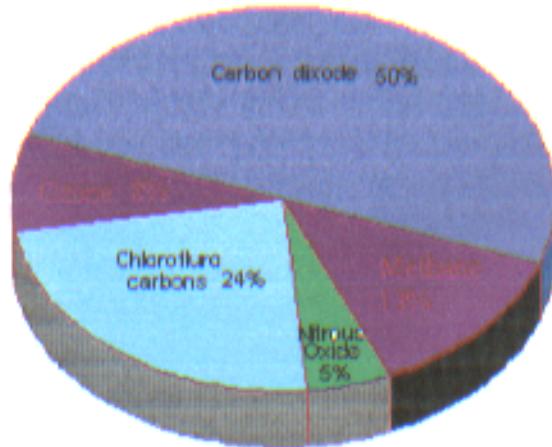
Gasification is basically a thermochemical process which converts biomass materials into gaseous component. The results of gasification is the producer gas, containing carbon monoxide, hydrogen, methane and some other inert gases. Mixed with air, the producer gas can be used in gasoline or diesel engine with little modifications.

Based on the design of gasifiers and type of fuels used, there exists different kinds of gasifiers. Portable gasifiers are mostly used for running vehicles. Stationary gasifiers combined with engines are widely used in rural areas of developing countries for many purpose including generation of electricity and running irrigation pumps. Technologies such biomass gasification which allow utilization of biomass fuel are of great importance. Theoretically, almost all kinds of biomass with moisture content of 5-30% can be gasified, however, not every biomass fuel can lead to the successful gasification. Most of the development work is carried out with common fuels such as coal, charcoal and wood. It was recognized that fuel properties such as surface, size, shape as well as moisture content, volatile matter and carbon content influence gasification.

The key to a successful design of gasifier is to understand the properties and thermal behaviour of the fuel as fed to the gasifier. Operation of gasification system demands knowledgeable and skilled operator. Those interested in this technology must remember that it requires hard work and tolerance. Compared to conventional system such as liquid fuel run engines, biomass gasification technology is inconvenient. But it is economical at many places and may lead to self-reliance in the crucial time of fuel crisis.



Biomass as Gasification Fuel

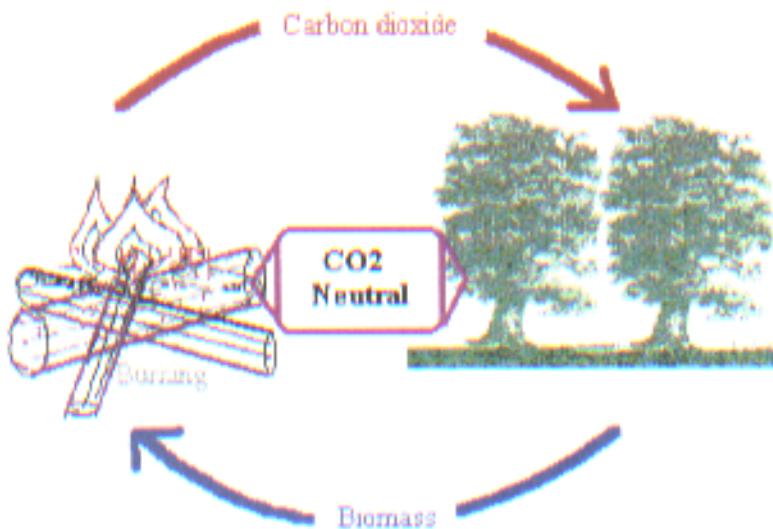


Emission of greenhouse gases (1990)

Great environmental concern is expressed over the release of CO_2 from the burning of fossil fuels. When fossil fuels are burnt, carbon from fuels react with oxygen from air and produce CO_2 . This is the reason for steady increasing CO_2 content of atmosphere. Carbon dioxide contributes to 50% of green house effect.

One of the remedies to limit the rising content of CO_2 in the atmosphere is energetic use of biomass fuel. Biomass is basically an organic material, which includes wood, crop residues,

solid waste, animal wastes, sewage, and waste from food processing. Biomass is made up of mainly carbon and hydrogen.



When biomass is burnt, CO_2 is released in the atmosphere. Released CO_2 is absorbed by growing plants during the photosynthesis, keeping CO_2 content in the atmosphere same. Biomass gasification is one of the technologies of energetic use of biomass.

Theoretically, any biomass material with moisture content

of 5-30% can be gasified as the basic composition of carbon, hydrogen and oxygen is same. This means that agricultural wastes such as cotton stalks, saw dust, nutshells, coconut husks, rice husks and forestry residues - bark, branches and trunk can be used for gasification.



Office of Power Systems Product Management

Product Line: Pulverized Coal Combustion

Mission Statement: To develop very clean, efficient, affordable electric power generating system technologies, based on coal firing, for application to new plants and to improve existing plants.

Goals:

Low Emission Boiler Systems (LEBS)

- The goal is to develop by 2000, LEBS that meet or exceed the following performance targets:

<u>Emissions</u>	<u>lb/million Btu</u>
SO ₂	0.1
No _x	0.1
particulate matter	0.01

Efficiency

42-48% total station, net, based on fuel HHV

Cost of Electricity

less than current coal-fired plant designed to meet New Source Performance Standards

High Performance Power Systems (HIPPS)

- The goal is to develop by 2005, HIPPS that meet or exceed the following performance targets:

<u>Emissions</u>	<u>lb/million Btu</u>
SO ₂	0.06
No _x	0.06
particulate matter	0.003

Efficiency

47-50% total station, net, based on fuel HHV (Advanced HIPPS will deliver 55% efficiency by 2010)

Cost of Electricity

10% less than current coal-fired plant designed to meet New Source Performance Standards

Benefits: Coal is, by far, the world's most plentiful fossil energy resource. In the U.S., coal constitutes over 75% of our proven fossil energy reserves and is used to generate slightly over half of our electricity. Most of the world's coal-fired power plants and over 80% of U.S. plants utilize a technology called pulverized coal combustion

(PCC). [Most of the remaining U.S. coal-fired plants utilize a technology very similar to PCC called cyclone firing.] First employed in the 1920s, PCC is still the overwhelming choice today because it is simple and well suited to large electric power generating plants. To be sure, improvements in PCC technology have been made in order to make coal-fired plants cleaner and to meet environmental requirements. However, the tremendous investment in PCC technology (over 250 GW in the U.S. alone), its proven performance and reliability, and its high potential for further improvement are major strengths that are likely to keep PCC the preeminent technology for coal-fired power generation for some time into the future.

Part of DOE's mission is to foster the development and deployment of advanced, clean, affordable, fossil-based power systems that use coal. The PCC Product Line will accelerate the development and deployment of state-of-the-art PCC-based technologies and help to ensure that U.S. businesses and citizens continue to enjoy clean, low-cost, reliable electricity.

Summary: The pulverized coal combustion (PCC) product line is defined as all research, development, and demonstration projects and other activities related to those technologies and systems for power generation that are based on the *direct* combustion of coal, exclusive of systems in which combustion occurs primarily in fluidized beds. Included are advanced technologies and systems for both new plants and for improving existing plants. The scope of the PCC product line extends to the application and *integration* of plant subsystems, e.g. environmental controls (particularly low-NO_x combustion) and power producing components, into new and existing power systems.

The key projects in the PCC product line are currently Low Emission Boiler Systems (LEBS) and High Performance Power Systems (HIPPS).

LEBS is a highly advanced power plant that capitalizes on the experience base of power generators and the existing industry support structure by focusing on technologies that are not very unlike those already in use. LEBS is designed using an integrated systems approach to derive maximum benefit from advances in low-NO_x combustion, flue gas cleanup, and power cycle technology. Three industry teams are developing different types of LEBS. The teams are led by ABB Combustion Engineering Inc., Babcock & Wilcox Company, and DB Riley Inc. Each team includes a "user" advisory panel consisting of representatives from electric utilities, non-utility generators, research institutes, etc., that provides input to the project from a technology user perspective.

The LEBS program comprises four phases. Phase I, completed in September 1994, included technical and economic evaluations of candidate plant subsystems in order to determine the technologies to be used, a systems analysis of the entire power plant, and the preliminary design of a commercial-scale 400 MWe LEBS plant. In Phase II, the industry teams conducted experimental testing at scales of up to 100 million Btu/h (10 MWe) and continued engineering analysis and modeling. Phase III, now nearing completion, will produce site-specific designs for proof-of-concept (POC) facilities, ranging in size from 10 MWe to 70 MWe. An evaluation of all three projects will be conducted at the conclusion of Phase III in July 1997. DOE will determine which team(s) continues into Phase IV, the detailed design, construction, and operation of the POC facility(ies).

HIPPS is based on the indirectly fired gas turbine combined cycle and uses technology even more advanced than LEBS to achieve even higher efficiency and lower emissions. In an indirectly fired cycle the products of coal combustion do not contact the gas turbine. Indirectly fired cycles have an inherently high thermal efficiency; furthermore, since combustion gases do not flow into the gas turbine, cleaning of combustion gases at high temperatures is not necessary.

Two industry teams are developing different versions of HIPPS. The teams are led by Foster Wheeler Development Company and United Technologies Research Center. Phase I, which began in 1992, focused on the analysis of various configurations of indirectly fired cycles and on technical assessments of alternative plant subsystems and components, including performance requirements, developmental status, design

options, complexity and reliability, and capital and operating costs. Phase I also included preliminary R&D and the preparation of designs for HIPPS commercial plants approximately 300 MWe in size. Phase II, now underway, involves the development and testing of plant subsystems, refinement and updating of the HIPPS commercial plant design, and the site selection and engineering design of a HIPPS prototype plant. At the completion of Phase II, DOE will evaluate both projects and expects to select one team to continue into Phase III, the detailed design, construction, and operation of a HIPPS prototype plant.

Product Manager:

Dr. Lawrence A. Ruth
U.S. Department of Energy
Federal Energy Technology Center
626 Cochran Mill Road
P.O. Box 10940
Pittsburgh, PA 15236-0940
Phone: (412) 386-4461
Fax: (412) 386-5917
E-Mail: ruth@fetc.doe.gov

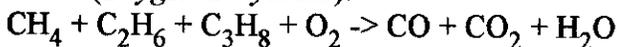
[Return to top of page](#)

Last Update: 06/13/00

[\[../../footer.html\]](#)

AEHA:NS**Allergy & Environmental
Health Association****Composition of Natural Gas, percent by volume:****Methane (CH₄): 98.90%****Ethane (C₂H₆): 00.16%****Propane (C₃H₈): 0.02%****Nitrogen (N₂): 0.87%****Carbon dioxide (CO₂): 00.02%****Oxygen (O₂): 00.02%****AEHA:NS****Allergy & Environmental
Health Association****Combustion Reaction Details:**

Combining *Methane, Ethane, Propane, and Oxygen* produces: *Carbon Monoxide, Carbon Dioxide, and Water (Oxygen Dihydrate)*.



This is the primary reaction. It is an exothermic combustion reaction (it produces heat), Carbon Monoxide is only formed in trace quantities (less than 1 ppm). The Water vapour, which sounds fairly harmless, actually often carries particles of soot from burnt dust, or foreign materials in the Natural Gas into the air. As such it can be a problem, it can be dealt with through the usage of an ionizer, which would attract all the droplets to its surface, getting them out of the air, but would also tend to increase the amount of Carbon Monoxide produced.

AEHA:NS**Allergy & Environmental
Health Association**

Combining *Nitrogen and Oxygen* produces *Nitrogen Dioxide, Nitrogen Trioxide* and related compounds.



This is a secondary reaction, it is an endothermic combination reaction (it requires an outside energy source to take place, it is not self sustaining). The products are all usually referred to as Nitrogen Oxide (NO_x). Nitrogen Dioxide is particularly dangerous since when combined with water it produces Nitric Acid (NO₂ + H₂O → H₂NO₃) Since human lungs contain a considerable amount of moisture, inhaling Nitrogen Oxide is considered to be extremely dangerous..

This reaction is actually independent of the Nitrogen in the natural gas itself, since there is an ample supply of Nitrogen in ordinary air. The reaction will take place wherever conditions permit (it requires an appropriate energy source to sustain the reaction, heat or ultra-violet light are both effective).

AEHA:NS**Allergy & Environmental
Health Association**

The combustion can also include small quantities of many other chemicals, including chlorine from PVC piping. For more details see our [Medical Environmental Study](#), or [Gascape Publications](#)

AEHA:NS**Allergy & Environmental
Health Association**

[Site Map](#), [Back to the Natural Gas Health Issues homepage](#), [More Information on AEHA](#), [How can I help?](#)



ARBRE Energy Ltd. 7th Floor, West Riding House,
67 Albion Street, Leeds, LS1 5AA, UK

[HOME](#) | [ENVIRONMENT](#) | [MEDIA SERVICE](#) | [TECHNOLOGY](#) | [SALIX](#)

From willow to watts . . .

A new generating plant for 'Green' electricity is being built in Yorkshire. **The first commercial plant of its type in Europe**, it will produce enough electricity for 18,000 people from clean and sustainable wood fuel sources.

- Yorkshire Water is leading this renewable energy development with two other European companies under the name of ARBRE Energy- ARable Biomass Renewable Energy.

The other partners are:

- [TPS of Sweden](#), developers of gasification technology to be employed in the plant.
- [The Royal Schelde](#) Group of the Netherlands who will construct and operate the plant.

This project represents a significant step towards increasing the use of renewable energy sources in Europe- a key element in the strategy for reducing greenhouse gases. In recognition of this it has attracted the support of two programmes that promote renewable energy.

- The UK Government's Non Fossil Fuel Obligation (NFFO)
- The [THERMIE Programme](#) of the European Commission



Artist view of the ARBRE-site

[Continue reading about the project ->](#)

[Participating Companies->](#)



Clean Energy for the Future

[HOME](#) | [ENVIRONMENT](#) | [MEDIA SERVICE](#) | [TECHNOLOGY](#) | [SALIX](#)

The ARBRE plant will generate 10 MW of electricity from wood chips provided from forest and coppice sources. **State of the art technology** will be used to generate electricity - the wood is converted into a gas which fuels a high efficiency combined cycle generating process. Wood fuels are clean, renewable and can be produced in a sustainable manner. They are **carbon dioxide neutral**, because the carbon dioxide released when the fuel is used is equal to the carbon dioxide taken up during growth. As wood is a natural material free from harmful chemicals, its use as a fuel in this way poses no threat to the environment.

The fuel sources are:

- **Short Rotation Coppice** - Short rotation coppice consists primarily of densely planted willow shrubs harvested on a three year cycle. The root stock is left in the ground and after each harvest new shoots emerge, as in a traditional coppice
- **Forestry Sources** - materials derived from forest and woodland management.

Energy crops offer an exciting new commercial opportunity for farmers and growers. Short rotation coppice production allows diversification of land usage and offers **substantial environmental benefits** compared to intensive arable farming. These include reduced use of agrochemicals and greater ecological and landscape diversity.

ARBRE is bringing the benefits that can be gained from the sustainable use of wood fuels one step closer.



The gasification process utilises advanced technology to produce electricity.



[Growing Salix - a commercial opportunity](#)

[Participating Companies](#)—>

<— [Back](#)

Subject: Re: GAS-L: CO2 emissions not GW

Date: Tue, 4 Nov 1997 16:17:01 -0500

From: JPhillips@mmt.com (Jeff Phillips)

Reply-To: gasification@crest.org

To: bioenergy@crest.org, DMcilveenw@aol.com

CC: gasification@crest.org

David,

Here are some dry answers to your questions about where the US gets its energy (Data source: U.S. DOE Energy Information Agency www.eia.doe.gov):

Change in U.S. Energy Consumption 1995 to 1996

	absolute change (quads)	relative change (%)
Total	+2.871	+3.2
Renewables	+0.546	+8.0
Fossil	+2.354	+3.0
Nukes	-0.009	0.0

Breakdown of the Fossil Energy Consumption is

Petroleum	+1.054	+3.0
Natural Gas	+0.424	+1.9
Coal	+0.903	+4.5

The increase in petroleum consumption was met by an increase of oil imports of 1.24 quads (quadrillion BTUs). Domestic oil production fell slightly as it has every year since 1985 (when oil prices crashed).

Total fossil fuel consumption in 1990 was 71.955 quads. In 1996 it was 79.292 quads. So, we will have to decrease fossil fuel consumption by almost 10% between now and 2017 to meet the stated target. A decrease of 13% was accomplished between 1979 and 1983. The key to the 79-83 drop was, of course, higher oil prices and the worst US economic recession since the Great Depression of the 1930's. "Ah, those were the days."

Incidentally, the US does indeed have "some" coal. So much so that the price is relatively insensitive to demand (if price would go up, hundreds of mines could open back up overnight). Thus rising oil prices would cause coal consumption to go up (as it did between '79 and '83).

Jeff Phillips
Molten Metal Technology

Reply Separator

Subject: GAS-L: CO2 emissions not GW
Author: DMcilveenw@aol.com at Internet
Date: 11/4/97 1:39 AM

I guess my question on 24th October sparked off the current, increasingly acrimonious discussion on GW.

I would ask you to look again at the question:

