



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102013014042-2 A2

(22) Data do Depósito: 06/06/2013

(43) Data da Publicação: 10/02/2016

(RPI 2353)



* B R 1 0 2 0 1 3 0 1 4 0 4 2 A

(54) Título: SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E LÍQUIDOS EM CÂMARA COMPACTA

(51) Int. Cl.: F23C 6/04

(73) Titular(es): VOTORANTIM METAIS S/A, DYNAMIS ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA

(72) Inventor(es): RODRIGO ALBERTO MOREIRA GOMES, LUIZ FELIPE DE PINHO

(74) Procurador(es): ARIBONI, FABBRI & SCHMIDT SOCIEDADE DE ADVOGADOS

(57) Resumo: Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta. A presente invenção trata de sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta. Dentre estes pode-se citar especialmente o processo de redução metálica e de calcinação de minérios. O sistema de gaseificação de combustíveis sólidos em câmara compacta que compreende: a) câmara de combustão (1) consistindo de: carcaça interna (4) revestida de material refratário (19), apresentando diversos furos injetores (21) de ar primário, uma ou mais lanças de injeção tangencial de água (11), uma ou mais lanças de injeção tangencial de combustível sólido (22) junto à parede da pré-câmara da carcaça externa (5), bocal de queimador auxiliar (25) e ponto de conexão do piloto (24); (b) carro de suporte e translação (2); (c) sistema de suprimento de ar (3); (d) soprador de ar de transporte de combustível sólido (13); (e) sistema de dosagem de sólidos (12); (f) tubulações de ar de transporte e ar primário (7); (g) cavalete de medição e controle de combustível auxiliar (óleo e gás natural) (18).

Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta.

Campo de aplicação:

A presente invenção trata de sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta. Esta invenção tem o objetivo de permitir a queima parcial de combustíveis sólidos e líquidos, com um nível de eficiência tal que possibilite refinar a geração de gases redutores/combustíveis, obtidos em câmaras de combustão convencionais, visando a utilização deste equipamento em alguns processos em que a qualidade dos gases produzidos tem impacto decisivo sobre o produto. Dentre estes se pode citar especialmente o processo de redução metálica e de calcinação de minérios.

Estado da técnica:

O estado da técnica indica muitas invenções que tratam de câmaras de combustão de combustíveis sólidos ou líquidos, ou ainda de suas misturas, particularmente de carvão. Podemos citar os seguintes documentos: WO2011030501, CN101915420, WO2009130857, EP2182288, JP2005331219, JP10274405, CN2279363, JP9133323, JP8285231, DE4329236, JP62190314, JP62087710, JP62080413 e CN201382441.

Os especialistas em combustão utilizam uma série de conceitos para projetar os equipamentos de queima. Esses conceitos englobam tanto o estudo dos fenômenos físicos (trocas térmicas e de massas, fluxos de calor e entalpia, dinâmica dos fluidos, etc.) e das reações químicas que ocorrem, como também os índices de combustão (números adimensionais), para comparação de diferentes equipamentos / dispositivos.

Como esta invenção refere-se a uma melhoria em câmara de combustão, são apresentadas a seguir, de forma bastante resumida, as reações químicas mais importantes para a combustão parcial de carbono, bem como os números adimensionais de queima que serão utilizados para explicar as vantagens obtidas pelas melhorias desenvolvidas.

Reações Químicas Heterogêneas – Combustão Parcial (Subestequiométrica)



Algumas considerações sobre as reações heterogêneas (sólido / gás) apresentadas acima devem ser feitas. A primeira diz respeito à cinética química das reações em altas temperaturas (acima de 700°C). A Reação 1 é aquela que apresenta a maior cinética, ou seja, rapidamente todo o oxigênio injetado na câmara será consumido e o restante do carbono introduzido, para que seja convertido em gases redutores, deverá ser oxidado ou por vapor d'água (H₂O) ou pelo próprio gás carbônico

(CO₂) gerado na queima com oxigênio. Entre as reações 2 e 3, a de maior cinética química é a Reação 2. Portanto, uma primeira conclusão que se pode chegar é a de que, em câmaras subestequiométricas (com falta de ar, ou seja, com falta de oxigênio), a presença de vapor d'água tem grande importância, uma vez que o vapor substitui o oxigênio na reação com o carbono.

Uma segunda consideração diz respeito à Reação 1, quanto a quantidade gerada de CO e de CO₂. Ou seja, esta consideração diz respeito ao coeficiente "a".

Com base em experimentos, sabe-se que o valor do coeficiente "a" deverá obedecer a seguinte equação:

$$\frac{2-2a}{2a-1} = 2500 \exp(-6240/T)$$

Ou seja, quanto maior a temperatura menor será o valor de "a". Com temperaturas bastante elevadas, o valor de "a" tenderá a 0,5 e então, observando novamente a Reação 1, pode-se perceber que neste caso haverá apenas a formação de CO. Portanto, uma conclusão que se tira desta análise, é a de que para maximizar a geração de CO, há a necessidade de se obter elevadas temperaturas no interior da câmara. Ou seja, atinge-se a gaseificação completa do combustível sólido com a máxima produção de CO e mínimo suprimento de oxidante.

Temperatura de Chama

A temperatura de um processo de combustão varia em função de diversos fatores:

- Combustível:
 - Poder Calorífico;
 - Umidade;
 - Teor de Cinzas
- Oxidante:
 - Concentração de oxigênio (se é ar, com teor de 21% de oxigênio, se é enriquecido, com teores mais elevados de oxigênio, ou se é uma corrente gasosa com teor de oxigênio abaixo do patamar de 21% do ar);
 - Temperatura do oxidante (se é pré-aquecido ou não);
 - Umidade;
 - Fator ar/combustível

Para o entendimento dos melhoramentos propostos segundo a invenção, é importante ter em mente a relação da temperatura com o fator ar/combustível, indicado nos livros de combustão pela letra grega "λ" (lambda). A Figura 12 em anexo, apresenta esta relação entre temperatura de chama e excesso de ar para diversas substâncias químicas como: isooctano, metano, nitrometano, metanol,

querosene e amônia, sendo que na abcissa está indicado o excesso de ar (λ) e na ordenada a temperatura adiabática de chama (em graus Kelvin).

Índices de Queima

5 Como citado anteriormente, os especialistas em combustão utilizam uma série de números adimensionais para a comparação de desempenho de equipamentos e dispositivos. A presente invenção têm impacto principalmente sobre um índice de queima: o Swirl Number.

10 O Swirl Number é um adimensional que representa a relação entre os fluxos injetados tangencialmente na pré-câmara de combustão e aqueles injetados com componentes meramente axiais. Essa relação é feita somando-se os momentos das quantidades de movimento tangencial de cada fluxo, dividindo-se pela soma das quantidades de movimento axial de cada fluxo, esses últimos multiplicados pelo raio da pré-câmara. Como a existência de rotação em um jato pode promover recirculações internas e externas a esse jato (ver figura 13 em anexo), as recirculações
15 podem ser utilizadas para intensificar a mistura do jato com o meio que o circunda.

Na Figura 13 em anexo: "a" representa a velocidade tangencial (rotacional); "p" representa a pressão estática; "b" representa a velocidade axial do fluxo nas sessões transversais 1, 2 e 3; "e" representa a velocidade no eixo do jato.

20 Fica claro, portanto, que o aumento (ou diminuição) de rotações em uma câmara de combustão tem forte impacto sobre o processo de queima. E mais, que aumentando as rotações dos fluxos injetados (e, conseqüentemente, elevando o Swirl Number) acarretará um processo de queima mais intenso. De maneira inversa, uma redução das rotações dos fluxos injetados (ou seja, baixando o Swirl
25 Number) representará uma queima menos intensa.

Nesta câmara os gases redutores são gerados por meio da combustão parcial (subestequiométrica, ou seja, com falta de ar) dos combustíveis líquidos e/ou sólidos introduzidos nessa câmara. O fato de se queimar parcialmente o combustível injetado, atribui a essa câmara uma importante característica: de ser
30 compacta. Ou seja, nessa câmara atingem-se valores bastante elevados de carga térmica / volume útil, considerando a carga térmica como o produto do fluxo de combustível injetado pelo seu poder calorífico. Isto porque nem toda a energia do combustível é liberada no interior da câmara, uma vez que a queima é apenas parcial.

Esse processo de combustão (subestequiométrica) traz
35 diversos desafios aos projetistas, podendo citar:

- Estabilidade da queima. A câmara de combustão em condições subestequiométricas tem uma tendência de esfriar e apagar;
- Qualidade dos gases gerados. Para que os gases gerados tenham a

capacidade de reduzir o produto alimentado no forno, estes precisam apresentar uma concentração mínima de gases redutores (CO – monóxido de carbono e H₂ – hidrogênio);

• Controle da temperatura do processo. Apesar de a estabilidade da queima ser uma dificuldade para a continuidade do processo, uma vez atingido esse objetivo (de estabilidade) um segundo desafio deve ser superado. A câmara opera de forma estável em um patamar elevado de temperatura (de cerca de 1.500°C), bastante acima do aceitável para a utilização de materiais comuns. O uso de materiais especiais é uma alternativa para superar esse desafio, porém isso torna os equipamentos (seja a própria câmara, como também o forno ao qual esta será acoplada) um tanto quanto caros. Por esta razão fizeram-se necessárias alternativas para controlar a temperatura dos gases gerados.

O pedido de patente BRPI 0406727-4 refere-se a um método e a um aparelho por meio dos quais uma combustão sem chama pode ser precipitada e mantida dentro da câmara de combustão essencialmente oval de um aparelho aquecedor/queimador integrado. A invenção fornece uma entrada de ar e uma fonte de combustível em combinação com gás residual de recirculação dentro da câmara de combustão do aparelho para precipitar e manter uma combustão sem chama dos gases combinados ao longo, e dentro, de um limite estreitamente definido. O ar é introduzido na câmara de combustão oval através de uma entrada de ar. O gás combustível é combinado com gases residuais de recirculação com aquecimento continuado do gás residual de recirculação, do ar introduzido ou de ambos, o gás residual e o ar, até que a temperatura na interface limite entre o ar e o gás combustível inertizado exceda uma temperatura de auto-ignição dos componentes da interface limite. Uma corrente de gás combustível sem uma porção de chama é combinada com o gás residual de recirculação, e então deixada difundir com a corrente de ar em uma medida suficiente para manter a combustão sem chama e a temperatura operacional da câmara entre 815,6°C e 1.037,8°C. A configuração essencialmente oval do aquecedor/queimador integrado permite aumentadas taxas de massa e circulação além daquelas possíveis com aquecedores da técnica contemporânea, e, como consequência disto, fornece uma combustão uniforme, completa e de resfriamento, resultando em baixas emissões de NO_x.

Entretanto a mencionada câmara não permite a queima de combustíveis sólidos e nem possui característica geométrica compacta em relação a capacidade térmica do sistema a ponto de possibilitar sua montagem horizontal e mobilidade por carro de translação.

Já o pedido de patente número BRPI1000417-3 diz respeito à câmara de combustão que foi utilizada como base para a presente invenção. Apesar de essa câmara apresentar bons resultados quando utilizada para diversas finalidades, ela

pode receber alguns dispositivos com o intuito de refinar a qualidade dos gases produzidos e, assim torná-la mais adequada para muitas outras finalidades, como por exemplo, a geração de gases redutores para o processo de redução metálica, ou então a geração de gases combustíveis para a calcinação de minérios.

5 A presente invenção representa um aperfeiçoamento da invenção registrada no INPI sob o número BRPI1000417-3, o qual trata de câmara de combustão que compreende uma carcaça interna (4), revestida internamente com material refratário (18), uma carcaça externa (5), montada em torno da carcaça interna (4) configurando uma camisa (17) com passagem de tubos transversais inclinados (6).

10 As modificações tiveram a finalidade de melhorar a queima parcial de combustíveis sólidos e, assim, refinar a geração de gases redutores/combustíveis visando a utilização deste equipamento em alguns processos em que a qualidade dos gases produzidos tem impacto decisivo sobre o produto.

15 Há casos inclusive, como por exemplo, em secadores, onde as modificações propostas nesta invenção passam praticamente despercebidas e, então, a utilização da câmara anterior (segundo documento BR PI 1000417-3), pode ser mais vantajosa devido ao menor custo de aquisição do equipamento. No entanto, em muitos outros processos, como por exemplo, o de redução metálica, uma maior qualidade dos gases gerados tem impacto determinante sobre a qualidade do metal produzido.

20 De maneira análoga à invenção da BRPI 1000417-3, os combustíveis sólidos empregados na presente invenção, poderão ser utilizados tanto como a única fonte de energia (operação a 100% combustível sólido), ou em associação com outros combustíveis líquidos e gasosos (queima mista). Ou seja, não é necessário o combustível auxiliar para a manutenção de estabilidade de chama.

25 A atratividade da utilização de sólidos pulverizados em substituição a combustíveis líquidos e gasosos está principalmente no preço bastante mais baixo dos combustíveis sólidos quando comparados com os dos líquidos e dos gasosos. Por esta razão, processos em que os custos com combustíveis são importantes, a substituição de combustíveis líquidos e gasosos por sólidos torna-se bastante atrativo.

30 **Objetivos e vantagens da invenção:**

35 As melhorias alcançadas com a invenção conduziram a um aumento de qualidade na composição dos gases gerados, elevando assim os teores de CO – monóxido de carbono e H₂ – hidrogênio nos gases, bem como elevaram a eficiência de conversão (aumentando a quantidade de gases gerados por unidade de massa de combustível injetado). Essas melhorias passam praticamente imperceptíveis em alguns processos, como por exemplo secagem, onde a geração de gases tem a única finalidade de suprir uma carga térmica determinada.

A câmara apresentada nesta descrição possibilita a utilização de diversos combustíveis sólidos, desde os mais nobres como biomassas, com elevado teor de material volátil, até os menos nobres, com reduzido teor de voláteis, tais como coque de petróleo e coque de carvão mineral.

5 Breve descrição das figuras:

O presente pedido será explicado em detalhes com o auxílio das figuras em anexo abaixo relacionadas:

- A figura 1 apresenta o fluxograma do sistema proposto. Pode-se ter uma ideia geral do sistema de queima para combustíveis sólidos;
- 10 - A figura 2 apresenta uma vista do arranjo físico do sistema proposto, indicando o posicionamento dos equipamentos;
- A figura 3 apresenta uma segunda vista do arranjo físico do sistema proposto;
- A figura 4 mostra uma vista em perspectiva da câmara de combustão, observando a mesma da extremidade de saída dos gases gerados;
- 15 - A figura 5 apresenta uma vista em perspectiva da câmara de combustão, observando a mesma da porção traseira;
- A figura 6 mostra uma vista lateral da câmara de combustão montada sobre o respectivo carro;
- A figura 7 mostra um corte transversal da câmara de combustão na seção de injeção de combustível sólido. Pode-se observar nesse desenho ainda a lança de injeção de combustível sólido (22);
- 20 - A figura 8 apresenta um corte longitudinal da câmara de combustão evidenciando os furos previstos no revestimento refratário para injeção de ar primário (21).
- A figura 9 mostra uma vista traseira da câmara de combustão montada sobre o respectivo carro, evidenciando o queimador auxiliar (10), o bocal para introdução do queimador piloto (24) e do visor (23);
- 25 - A figura 10 apresenta um corte transversal da câmara de combustão na seção de injeção de vapor. Pode-se observar nesse desenho ainda a lança de injeção de vapor (11).
- 30 - A figura 11 apresenta o mesmo corte da figura 10, onde se pode observar a lança de injeção de água, com o seu bico de nebulização (26) fixado em sua extremidade.
- A Figura 12 apresenta um gráfico ilustrativo para diversas substâncias químicas de suas temperaturas de chama adiabática em função de suas respectivas relações de equivalência.
- 35 - A Figura 13 apresenta uma ilustração da relação entre movimentos de rotação e translação de um jato injetado na pré-câmara de combustão.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DA INVENÇÃO:

Foi desenvolvido um sistema de gaseificação de

combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta que compreende:

a) câmara de combustão (1) consistindo de: carcaça interna (4) revestida de material refratário (19), apresentando diversos furos injetores (21) de ar primário, uma ou mais lanças de injeção tangencial de água (11), uma ou mais lanças de injeção tangencial de combustível sólido (22) junto à parede da pré-câmara da carcaça externa (5), bocal de queimador auxiliar (25) e ponto de conexão do piloto (24);

(b) carro de suporte e translação (2);

(c) sistema de suprimento de ar (3);

(d) soprador de ar de transporte de combustível sólido (13);

(e) sistema de dosagem de sólidos (12);

(f) tubulações de ar de transporte e ar primário (7);

(g) cavalete de medição e controle de combustível auxiliar (óleo e gás natural) (18).

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO:

A Figura 1 em anexo representa a câmara de combustão compacta (1). A invenção, descrita a seguir, teve como objetivo modificar e melhorar a queima parcial de combustíveis sólidos (14) e líquidos (16) (e conseqüentemente a geração de gases combustíveis/redutores) em processos cuja qualidade ou composição dos gases produzidos tem impacto determinante sobre a qualidade do produto. Dentre os principais combustíveis a serem utilizados pode-se citar:

- Sólidos:

- Coque de petróleo;

- Carvão mineral;

- Carvão vegetal;

- Moinha de carvão vegetal;

- Biomassas (bagaço de cana, pó de serra, madeira, etc.)

- Líquidos:

- Leves: diesel

- Pesados: óleos ultraviscosos 1A, 2A, 7A

A atratividade da utilização de sólidos pulverizados em substituição a combustíveis líquidos e gasosos está principalmente no preço bastante mais baixo dos combustíveis sólidos quando comparados com os dos líquidos e dos gasosos. Por esta razão, processos em que os custos com combustíveis são importantes, a substituição de combustíveis líquidos e gasosos por sólidos torna-se bastante atrativo. Dentre os principais processos, pode-se citar:

- Secadores Rotativos, em Leito Fluidizado, tipo Rapid Dryer, etc.

- Calcinadores Rotativos, Verticais, etc.

- Fornos Rotativos, Verticais, etc.

O início da queima de sólidos ser precedido pelo aquecimento da câmara com um combustível auxiliar que pode ser líquido (óleo diesel, óleo 1A, 2A, etc), ou gasoso (gás natural, GLP isto é Gás Liquefeito de Petróleo, etc), ou ainda conter suas misturas. Após o pré-aquecimento da câmara, poderá ser iniciada a injeção de combustíveis sólidos, uma vez que a partir de uma determinada temperatura o processo torna-se autossustentável não necessitando, portanto, de combustível auxiliar para assegurar a estabilidade de queima.

Aspectos Gerais

Uma visão geral do sistema de queima para combustíveis sólidos (14) pode ser obtida na figura 1 – Fluxograma de Engenharia. Nele é possível observar os principais equipamentos e instrumentos que compõem, juntamente com a câmara de combustão (1), o sistema de queima.

As figuras 2 e 3 apresentam o arranjo físico básico do sistema proposto e indica as interligações entre os diversos equipamentos. Dentre os principais componentes do sistema pode-se citar:

- Câmara de combustão (1);
- Carro de suporte e translação (2);
- Sistema de Suprimento de Ar Primário (3);
- Soprador de ar de transporte de combustível sólido (13);
- Sistema de dosagem de sólidos (12);
- Tubulações de ar de transporte e ar primário (7);
- Cavalete de medição e controle de combustível auxiliar (óleo e gás natural) (18);
- Sistema de injeção de vapor ou água (15);
- Lança de injeção de vapor d'água ou água nebulizada (11).

25 Câmara de Combustão (1)

As figuras 4 e 5 em anexo, mostram o conjunto da câmara de combustão (1) e seu carro de suporte e translação (2).

Esta câmara de combustão (1) é responsável por permitir a ignição do combustível sólido (14) injetado e pela geração de gases combustíveis (ou redutores, dependendo da utilização posterior) na extremidade de saída. Para tanto, a principal característica dessa câmara é seu elevado Swirl Number e turbulência, bem como uma temperatura interna acima de 1.200 °C, preferencialmente acima dos 1.300°C e mais preferencialmente acima de 1.500°C.

A câmara é composta por:

- 35 - uma carcaça interna (4) construída com chapas de aço inoxidável ou aço carbono, revestida internamente com material ou tijolos refratários (19). Diversos furos ao longo do eixo da câmara (21), executados no revestimento refratário, promoverão a injeção tangencial do ar primário. Devido a sua geometria, a câmara (1) retém, através de

um mecanismo de ciclonagem (centrifugação), as partículas de combustível sólido (14) nela introduzidas e permitirá a reação de oxidação parcial desse combustível. À saída da câmara, gases produzidos escoarão pela boca de descarga coaxial à câmara (1);

5 - uma ou mais lanças de injeção de água (no estado líquido ou vapor) (11), posicionada próxima à seção de descarga de gases da câmara (1), deve ser utilizada para ajustar tanto a qualidade dos gases gerados como também a temperatura desses gases.

10 - uma ou mais lanças de injeção de combustível sólido (22) que se dá tangencialmente e no mesmo sentido de rotação dos injetores de ar primário através de um bocal próprio;

- uma carcaça externa (5) construída com chapas de aço que, uma vez montada em torno da carcaça interna (4), constitui uma camisa de ar que propicia o resfriamento da carcaça interna (4) e um preaquecimento do ar primário (20) usado na centrifugação das partículas de combustível sólido (14).

15 - bocal do queimador auxiliar (25): conexão para encaixe do queimador auxiliar para gás ou óleo (10), a ser utilizado no preaquecimento da câmara;

- ponto de conexão do piloto (24): destinado à introdução de uma lança a gás a ser utilizada no acendimento do queimador auxiliar (10) (também a gás, ou a óleo);

- visor (23).

20 Injetores de ar de combustão (21)

Os furos injetores de ar de combustão fazem parte do conjunto denominado "Câmara de Combustão". No entanto, devido a sua importância nessa invenção, será descrito em separado. Os injetores de ar primário serão furos no revestimento refratário (19) (ver figura 8, os furos indicados pelo número 21) e permitem a injeção tangencial do ar primário (20) na parte cilíndrica da câmara (1).

25 Esses furos (21) com diâmetro dimensionado especificamente para a condição de combustão subestequiométrica, possibilitarão elevadas velocidades de injeção. Os furos para injeção de ar serão realizados ao longo de todo o comprimento da câmara, de forma a evitar que no trecho final desta a rotação seja perdida. Além disso, os furos serão executados tangencialmente, para que promovam uma elevada rotação no interior da câmara de combustão, fazendo com que o tempo de residência das partículas sólidas seja bastante elevado (as partículas serão centrifugadas, permanecendo próximas da periferia enquanto serão consumidas), permitindo desta forma, que a queima parcial e a geração de gases (reduzidos ou combustíveis) sejam bastante eficientes.

35 Injeção de combustível sólido (22)

De forma análoga aos injetores de ar primário, a injeção do combustível sólido também faz parte do conjunto "Câmara de Combustão".

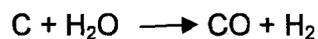
Essa injeção de combustível sólido (22) se dá tangencialmente e no mesmo sentido de rotação dos injetores de ar primário através de um bocal próprio (ver figura 7). Diferentemente da câmara do documento BRPI 1000417-3, na presente invenção, essa injeção de combustível sólido se dá por um ou mais furos no revestimento refratário (19) do cilindro interno (4). Ou seja, o fluxo de combustível sólido é injetado tangencialmente junto à parede da pré-câmara, enquanto que na invenção anterior (BRPI 1000417-3), essa injeção se dava em uma seção mais central, próxima à linha de centro da câmara (ainda que também de forma tangencial), em uma voluta externa ao queimador auxiliar (10). Os resultados realizados em uma Planta de Testes indicaram que em algumas situações essa configuração permite obter uma eficiência de conversão mais elevada, aumentando a concentração dos gases combustíveis (ou redutores): CO e H₂. Essa maior eficiência de combustão (quando em comparação com a versão original) pode ser explicada pelos elevados valores de Swirl Number, atingidos por esta câmara modificada. Ou seja, nesta configuração, a injeção do fluxo de combustível sólido (22) junto à parede da câmara interna (ver nas figuras 7 e 8, detalhe da lança de injeção de combustível sólido (22) e o novo furo no revestimento refratário para injeção de sólido), aumenta significativamente o raio de rotação desse fluxo, passando de um pequeno raio junto ao eixo da pré-câmara, para aproximadamente o raio interno da pré-câmara. O aumento do raio de giro do fluxo de combustível sólido eleva significativamente o Swirl Number da câmara.

A injeção de combustível sólido é feita por meio de uma lança de injeção de combustíveis sólidos (22). Essa lança é fixada ao cilindro externo da câmara (5), de forma tangencial a esse cilindro, conferindo uma rotação ao combustível injetado pela mesma. Axialmente, essa lança deve ficar o mais próximo possível do tampo traseiro da câmara (tampo que abriga o queimador auxiliar, o visor e o bocal para introdução piloto), de maneira a aproveitar ao máximo o comprimento da câmara. A lança deve ter um comprimento tal que possibilite a injeção de combustível sólido diretamente no interior da câmara. Ou seja, a lança é montada introduzindo a mesma pelo furo realizado na chapa metálica do cilindro externo (5), passando pela câmara de ar primário (camisa de ar formada pelos cilindros (5) e (4)), ainda pelo cilindro interno (4) e por fim pelo furo no revestimento refratário. O posicionamento da lança deverá ser ajustado de forma que sua extremidade (mais interna na câmara) fique faceada com o diâmetro interno do revestimento refratário. Essa injeção com um grande raio de giração do fluxo de combustível sólido eleva significativamente o Swirl Number da câmara, contribuindo para aumentar a eficiência da gaseificação.

Sistema de Injeção de Água

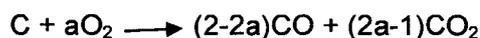
Como a câmara de combustão, objeto deste pedido de patente, teve como premissa principal uma grande flexibilidade operacional, ela poderá

ser utilizada para gerar gases a partir de combustíveis com elevada concentração de carbono e baixa concentração de hidrogênio (elevada relação Carbono/Hidrogênio, ou seja, combustíveis mais pesados e, conseqüentemente, mais baratos), como o coque de petróleo, por exemplo. Por esta razão, ela conta com um importante dispositivo para possibilitar a elevação da geração de H₂ (gás muito importante em processos de redução) e assim refinar um pouco mais a qualidade dos gases produzidos. Trata-se da injeção de água (seja no estado vapor como líquido) no interior da pré-câmara. Esse dispositivo não existe na patente original e representa uma importante modificação, uma vez que as concentrações de CO e H₂ obtidas na Planta de Testes, jamais seriam atingidas com a câmara da invenção anterior. Ou seja, para combustíveis pesados (elevada relação C/H), a reação de gaseificação ou Reação 2:



para que ela possa ocorrer, necessita de uma quantidade de vapor d'água que não é gerada apenas pela queima da parcela volátil do combustível sólido utilizado (de baixo teor de hidrogênio). Há a necessidade, então, de se complementar com uma injeção externa de água (vapor). Esta é a primeira finalidade da injeção de água: ajustar a composição dos gases gerados ao processo ao qual eles se destinam.

No entanto, a injeção de água na câmara tem uma segunda finalidade: controlar a temperatura do processo. Apesar de a estabilidade da queima ser uma dificuldade para a continuidade do processo, uma vez atingido esse objetivo (de estabilidade) um segundo desafio deve ser superado. A câmara opera de forma estável em um patamar elevado de temperatura (certamente acima de 1.500°C). A reação de gaseificação, Reação 1:



terá maior produção de CO (importante gás para processo de redução metálica, como também para calcinação de minérios), quanto maior for a temperatura da câmara. O uso de materiais especiais seria uma alternativa para superar esse desafio, não fosse o custo que isso representaria aos equipamentos (seja à própria câmara, como principalmente ao equipamento, por exemplo, um forno ao qual a câmara estivesse acoplada). Por esta razão, a água passou também a ser utilizada para limitar a temperatura dos gases gerados.

De forma análoga à injeção de combustível sólido, a água (no estado vapor ou líquido) também é injetada por meio de uma lança (ver figura 10; número 11). Da mesma forma que a lança de combustível sólido, a lança de água fica fixada ao cilindro externo e possibilita que a água seja injetada diretamente no interior da câmara de combustão e de forma tangencial ao cilindro interno. A diferença dessa lança para a de combustível sólido está na sua posição axial. Enquanto a primeira deve ficar o

mais perto possível do tampo traseiro, a lança de água deve ser posicionada no trecho final da câmara, próxima ao bocal de descarga de gases. Isto porque é nessa região que se localiza a maior temperatura interna dos gases gerados e, portanto, é nessa área que a injeção de água tem a maior eficiência, seja para a reação com partículas de carbono (gerando CO e H₂, conforme a reação 2), seja para a redução da temperatura dos gases gerados. Caso a injeção seja de vapor d'água, a lança atravessa o revestimento refratário e não necessita nenhum dispositivo em sua extremidade. Ou seja, a lança de vapor tem sua extremidade aberta para o interior da câmara. Já se for utilizada água no estado líquido, a lança de injeção tem um bico de nebulização em sua extremidade, que gerará uma nuvem de gotas para o interior da câmara. A lança de injeção de água (11) pode estar posicionada próxima à seção de descarga de gases da câmara (1).

Carro de Suporte e Translação

Devido ao fato de esta câmara ser bastante compacta, ela pode ser montada horizontalmente e instalada sobre um carro de suporte e translação, o que facilita enormemente as atividades de manutenção seja da própria câmara, como também do equipamento (por exemplo, um forno) ao qual ela estiver acoplada. O carro de suporte (2) será composto de uma estrutura metálica, que poderá ser feita de tubos ou perfis metálicos e contará com quatro rodas livres que permitirão a remoção da câmara em qualquer direção.

Sistema de Transporte Pneumático de Coque

Uma vez dosado o combustível sólido pulverizado (14) proveniente do silo de armazenamento (8) é introduzido em uma linha de transporte pneumático que o leva em direção à câmara de combustão (1).

A introdução desse pó (14) no circuito de ar pressurizado é feita ou por um sistema de dosagem (12) ou mais simplesmente, por uma bomba de sólidos ou mesmo um reductor.

Um soprador tipo "Roots" deve ser implantado para suprir o ar de transporte. Esse soprador é designado por (13) no fluxograma da instalação (figura 1).

Sistema de Suprimento de Ar Primário de Ajuste (3)

Com o objetivo de obter condições adequadas de combustão do combustível sólido, deve-se instalar uma máquina para suprimento de ar primário (20), por exemplo, um ventilador (3) e uma tubulação de ar primário (7), conforme indicado nas figuras 2 e 3.

A pressão requerida para esse ar poderá chegar a 100 mbar efetivos.

Esse ventilador (3) (ou outra máquina de fluxo capaz de suprir a vazão necessária na pressão desejada), deve permitir que a vazão de ar primário

seja variada em função da quantidade de combustível injetada na câmara. No fluxograma apresentado (ver figura 1), essa variação é proporcionada pelo inversor de frequência (17) que alimenta o motor de acionamento do ventilador de ar primário (3). Esse recurso se faz necessário, uma vez que a relação ar/combustível deve ser mantida, de forma a não alterar a qualidade dos gases gerados. Além de não alterar a composição química dos gases, a manutenção da relação ar/combustível tem um segundo propósito: manter a temperatura interna da câmara. A temperatura de um processo de combustão varia em função da relação ar/combustível. Como não se quer que essa temperatura baixe demasiadamente, uma vez que tanto a geração de CO, como a eficiência de conversão podem ser fortemente impactados, nem tampouco que essa temperatura suba demasiadamente, pelo fato de poder danificar a própria câmara, a relação ar/combustível deve ser mantida.

A seguir alguns exemplos ilustrativos da invenção, não devendo contudo serem tomados para efeitos restritivos do escopo da invenção.

15 **Exemplos**

A invenção apresentada nesse descritivo passou por uma bateria de testes que possibilitaram a evolução do equipamento. Ou seja, nos testes foram desenvolvidos dispositivos que possibilitaram otimizar a geração de gases redutores/combustíveis.

20 O primeiro exemplo apresentado a seguir descreve a câmara em uma fase inicial do desenvolvimento. Já o segundo exemplo apresenta os testes realizados com a câmara já com suas características geométricas finais. Além disso, em uma das condições testadas nesse segundo exemplo, foram verificados os impactos da utilização de oxigênio (ar enriquecido com oxigênio) na eficiência da câmara e na composição dos gases gerados.

25 As câmaras foram testadas em uma Planta Piloto construída exclusivamente para esta finalidade.

Exemplo 1

30 Foi feito um primeiro ensaio com uma câmara de características diferentes daquela que, ao final do período de testes, se mostrou a mais eficiente:

- Menor diâmetro interno da câmara;
- Injeção de combustível sólido pela porção externa do queimador de óleo (menor raio de giro do fluxo de ar de transporte + combustível sólido);
- Furos de injeção de ar primário de maiores dimensões, ou seja, menores pressões de ar primário.

Para o início dos testes, havia sempre a necessidade de pré-aquecer a câmara, até um valor mínimo de 800°C, quando se iniciava a injeção de

coque de petróleo. Este pré-aquecimento era feito com óleo combustível tipo 1A. Para o acendimento do queimador de óleo utilizava-se um maçarico oxi-acetileno. Um visor, existente na tampa traseira da pré-câmara, permitia verificar tanto o acendimento do queimador de óleo, como também a cor da chama, importante característica para saber se a combustão estava oxidante ou redutora. Durante o aquecimento, utilizou-se sempre uma combustão oxidante (com excesso de ar da ordem de 15%) de forma a se evitar a geração de fuligem (em temperaturas baixas, uma combustão com falta de ar, redutora, geraria uma grande quantidade de fuligem na chaminé).

A planta de teste contava com um tanque de armazenamento de óleo, dotado de uma serpentina a vapor. Esta serpentina mantinha o óleo armazenado a uma temperatura de cerca de 90°C. Uma bomba era responsável pelo suprimento de óleo ao queimador da câmara. Porém, antes de ser alimentado à lança de nebulização de óleo do queimador, o óleo combustível tinha sua temperatura elevada até 120°C em um aquecedor elétrico. O fluxo de óleo era indicado em um medidor de vazão do tipo *Coriollis* e o controle do fluxo de óleo era feito aumentando ou reduzindo a velocidade do motor de acionamento da bomba, atuando-se em um inversor de frequência. A lança de nebulização utilizava fluido auxiliar que podia ser escolhido: vapor d'água ou ar comprimido.

Uma vez atingida a temperatura de 800°C, dava-se início à injeção de coque de petróleo. Inicialmente, utilizava-se um fluxo mínimo de 50 kg/h sendo gradativamente elevado até um patamar máximo de 150 kg/h. O ajuste da quantidade de coque de petróleo injetada na pré-câmara era feito por meio de um dosador gravimétrico do tipo *loss-in-weight*, instalado abaixo de um silo de armazenamento de coque. Ficava-se aguardando a temperatura atingir o patamar normal de operação, na faixa de 1.400°C a 1.600°C para então, dar início aos testes.

Ainda antes de se iniciar a coleta de gases, ajustava-se a condição do teste:

- A Potência Efetiva – foram testadas potências desde 0,7 MW até 2,0 MW;
- O Excesso de Ar (Ar/Ar Estequiométrico) – nos primeiros testes foram avaliadas taxas de excesso de ar de cerca de 45% a ;
- O percentual de substituição de óleo por coque de petróleo – os testes iniciais buscaram verificar se seria possível chegar a 100% de substituição de óleo por coque, desta forma foram testadas diversas condições de operação, desde 100% óleo (situação atual, sem a utilização de coque), até 100% coque (situação ideal, porém que se mostrou pouco promissora face os resultados de eficiência).

Com todos os parâmetros ajustados para aquela condição

determinada (de excesso de ar, potência, etc.), dava-se início à coleta de gases. Havia duas coletas:

- Uma coleta contínua de gases que alimentava um analisador de gases. Nessa análise determinavam-se os teores de O₂, CO, CO₂ e H₂; presentes nos gases gerados na pré-câmara;
- Coletas pontuais de material particulado (em sua grande maioria carbono), por meio de uma sonda isocinética. O material coletado nesses momentos era então enviado ao laboratório para determinação da massa coletada e do teor de carbono presente nesse material.

Para cada condição fazia-se um (às vezes dois ou até três) períodos de coleta de material que durava, cada um, cerca de 10 minutos. Algumas vezes as coletas eram repetidas, seja para dar mais segurança aos resultados de uma condição de maior interesse, seja porque a coleta não havia sido satisfatória. Durante os 10 minutos da coleta de material particulado, eram registradas as concentrações de O₂, CO, CO₂ e H₂ indicadas pelo analisador. Desta forma, era possível comparar a concentração dos gases combustíveis (CO e H₂) gerados em cada condição, bem como, com um tratamento matemático posterior, era possível calcular também a eficiência da geração de gases redutores em cada condição.

A tabela 1 a seguir apresenta os resultados obtidos para os gases produzidos nessa câmara para diversas condições de teste:

Condição	% Óleo Efetiva	% Coque	Potência Efetiva	Ar/Ar Esteq.	Eficiência de Conversão do Carbono	CO + H ₂	T gases
			MW	λ	%	%	°C
4	0,00	100,00	0,70	73,00	96,90	14,10	1626
1	0,00	100,00	1,64	60,20	75,00	11,40	1668
6	12,10	87,90	1,66	48,00	73,90	16,80	1496
3	26,10	73,90	1,71	57,90	78,70	15,00	1566
3A	24,00	76,00	1,67	47,80	78,20	18,50	1491
5	36,20	63,80	1,69	58,90	85,40	16,70	1570
5A	36,20	63,80	1,69	45,90	81,70	20,60	1500
8	47,30	52,70	1,69	48,30	86,80	22,70	1412
5B	58,40	41,60	1,69	47,50	85,80	25,70	1457
5BR	58,40	41,60	1,69	48,50	87,90	24,70	1402
7	100,00	0,00	2,02	60,70	97,00	24,50	1462
2	100,00	0,00	1,06	63,00	96,70	22,80	1426

TABELA 1

Exemplo 2

Foi feito uma nova bateria de testes com uma câmara redimensionada (já com as características geométricas finais). O procedimento foi mantido o mesmo do exemplo anterior, porém na pré-câmara e na instalação foram alterados alguns pontos que visaram eliminar as deficiências identificadas nos primeiros ensaios:

- Maior diâmetro da câmara, o que reduziu a velocidade dos gases em seu

interior e contribuiu para o aumento da eficiência de conversão do carbono do combustível em CO;

- Injeção de combustível sólido na superfície externa da câmara, aumentando significativamente o raio de giro do fluxo de ar de transporte + combustível sólido, contribuindo para elevar o Swirl Number;
- Foram reduzidos os números de furos de injeção de ar primário, bem como foram diminuídos os seus diâmetros. Ou seja, a injeção de ar primário passou a ser feito em maiores pressões o que contribuiu para a elevação da Turbulência interna, bem como do Swirl Number;
- Uma das condições (condição 5) diz respeito a uma verificação do impacto do enriquecimento do ar primário com oxigênio.

A tabela 2 a seguir apresenta os resultados obtidos para os gases produzidos nessa nova versão da câmara em diversas condições de teste:

Condição	% Óleo Efetiva	% Coque	Potência Efetiva MW	Ar/Ar Esteq. λ	Eficiência de Conversão do Carbono %	CO + H ₂ %
1	0,00	100,00	1,88	46,00	75,00	14,90
4	0,00	100,00	1,88	46,50	96,90	17,30
6	12,10	87,90	1,89	47,00	73,90	18,60
2	100,00	0,00	1,90	46,80	96,70	21,10
3	26,10	73,90	1,90	46,30	78,70	23,50
5 (Enriquecido)	36,20	63,80	1,88	46,20	85,40	24,20

15

TABELA 2

Reivindicações

1. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta, **caracterizado** por compreender:

- 5 a) câmara de combustão (1) consistindo de: carcaça interna (4) revestida de material refratário (19), apresentando diversos furos injetores (21) de ar primário, uma ou mais lanças de injeção tangencial de água (11), uma ou mais lanças de injeção tangencial de combustível sólido (22) junto à parede da pré-câmara da carcaça externa (5), bocal de queimador auxiliar (25) e ponto de conexão do piloto (24);
- 10 (b) carro de suporte e translação (2);
 (c) sistema de suprimento de ar (3);
 (d) soprador de ar de transporte de combustível sólido (13);
 (e) sistema de dosagem de sólidos (12);
 (f) tubulações de ar de transporte e ar primário (7);
 (g) cavalete de medição e controle de combustível auxiliar
- 15 (óleo e gás natural) (18).

2. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de entre os principais combustíveis a serem utilizados poder-se citar: coque de petróleo, carvão mineral, carvão vegetal; moinha de carvão vegetal e biomassas (bagaço de cana, pó de serra, madeira, etc).

20

3. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o início da queima de sólidos ser precedido pelo aquecimento da câmara com um combustível auxiliar que pode ser líquido (óleo diesel, óleos pesados ultraviscosos do tipo 1A, 2A, etc), ou gasoso (gás natural, GLP, etc), ou ainda conter suas misturas.

25

4. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de após o pré-aquecimento da câmara, poderá ser iniciada a injeção de combustíveis sólidos, uma vez que a partir de uma determinada temperatura o processo torna-se autossustentável não necessitando, portanto, de combustível auxiliar para assegurar a estabilidade de queima.

30

5. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de esta câmara de combustão (1) ser responsável por permitir a ignição do combustível sólido (14) injetado e pela geração de gases combustíveis (ou redutores, dependendo da utilização posterior) na extremidade de saída, apresentando para isso elevado Swirl Number e turbulência, bem como uma temperatura interna acima de 1.200 °C, preferencialmente acima dos 1.300°C e mais preferencialmente acima dos 1.500°C.

35

6. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato da lança de injeção de água (11) poder injetar água no estado líquido ou de vapor, ou Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1 caracterizado pelo fato da lança de injeção de água (11) poder apresentar um bico de nebulização em sua extremidade.

7. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de compreender um ponto de conexão do piloto (24) destinado à introdução de uma lança a gás ou a óleo, a ser utilizada no acendimento do queimador auxiliar (10).

8. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato da lança de injeção de combustível sólido (22) ficar situada o mais próximo possível do tampo traseiro da câmara (1).

9. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicações 1 ou 9, **caracterizado** pelo fato de a lança de injeção de combustível sólido (22) ter seu posicionamento ajustado de tal forma que sua extremidade interna fique faceada com o diâmetro interno do revestimento refratário.

10. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato da injeção de combustível sólido ocorrer no sentido de rotação dos injetores de ar primário através de um bocal próprio.

11. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato da lança de água / vapor (10) estar posicionada no trecho final da câmara (1), próximo ao bocal de descarga de gases.

12. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicações 1 e 12, **caracterizado** pelo fato da lança de injeção de água (11) estar posicionada próxima à seção de descarga de gases da câmara (1).

13. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato da câmara ser compacta, podendo ser montada horizontalmente e instalada sobre um carro Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1 caracterizado pelo fato do sistema poder compreender um sistema pneumático de transporte de coque.

14. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e

líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato compreender a instalação de uma máquina para suprimento de ar primário (20), como por exemplo ventilador (3) e tubulação de ar primário (7).

5 15. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicações 1 ou 16, caracterizado pelo fato da pressão requerida poder chegar a 100 mbar efetivos.

10 16. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato da vazão de ar primário ser variada em função da quantidade de combustível injetada na câmara (1).

17. Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta segundo reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato do sistema poder ser adaptado para aplicações em secadores rotativos, em leito fluidizado, tipo Rapid Dryer, calcinadores rotativos, verticais, fornos rotativos, fornos verticais, etc.

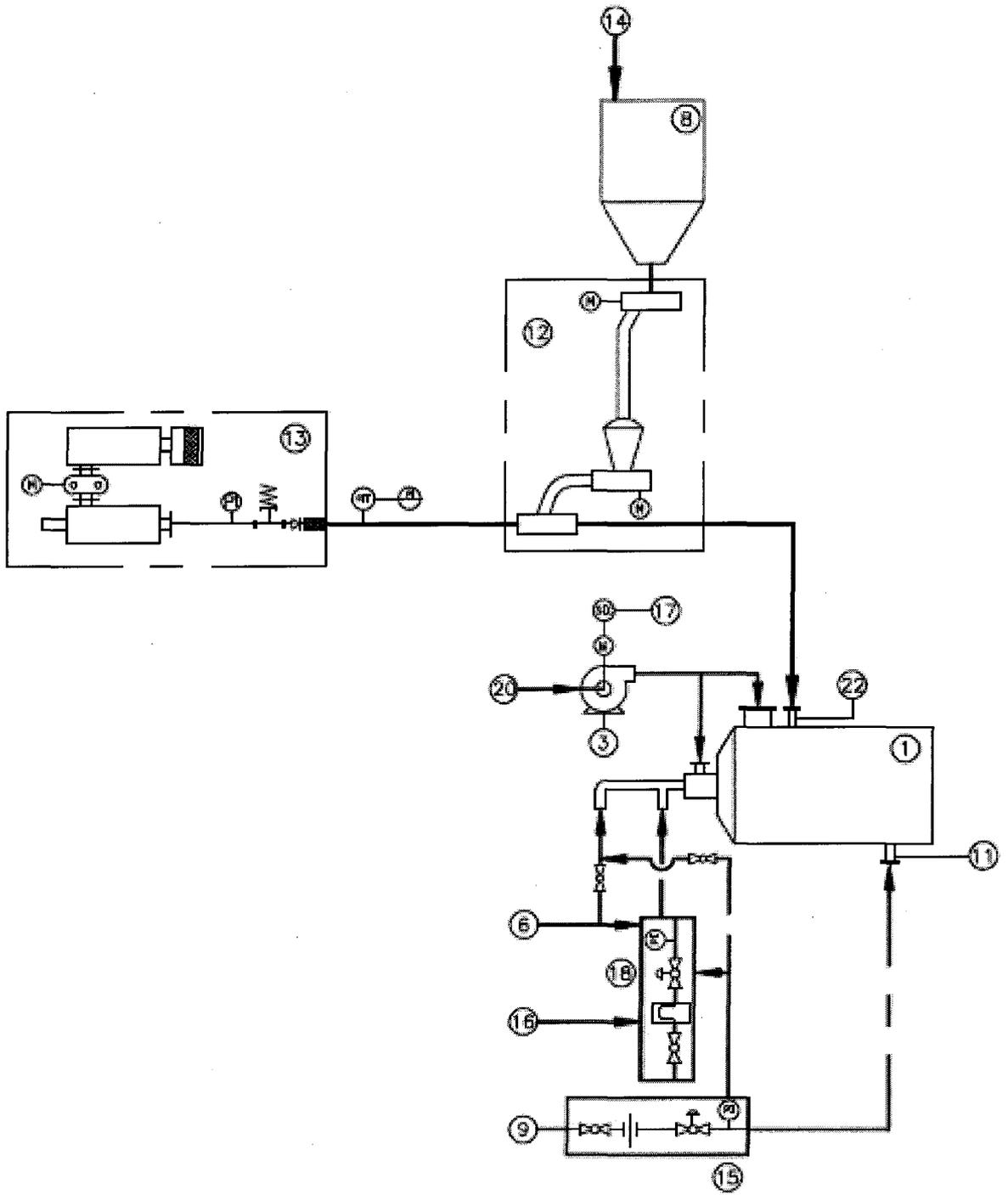


FIGURA 1

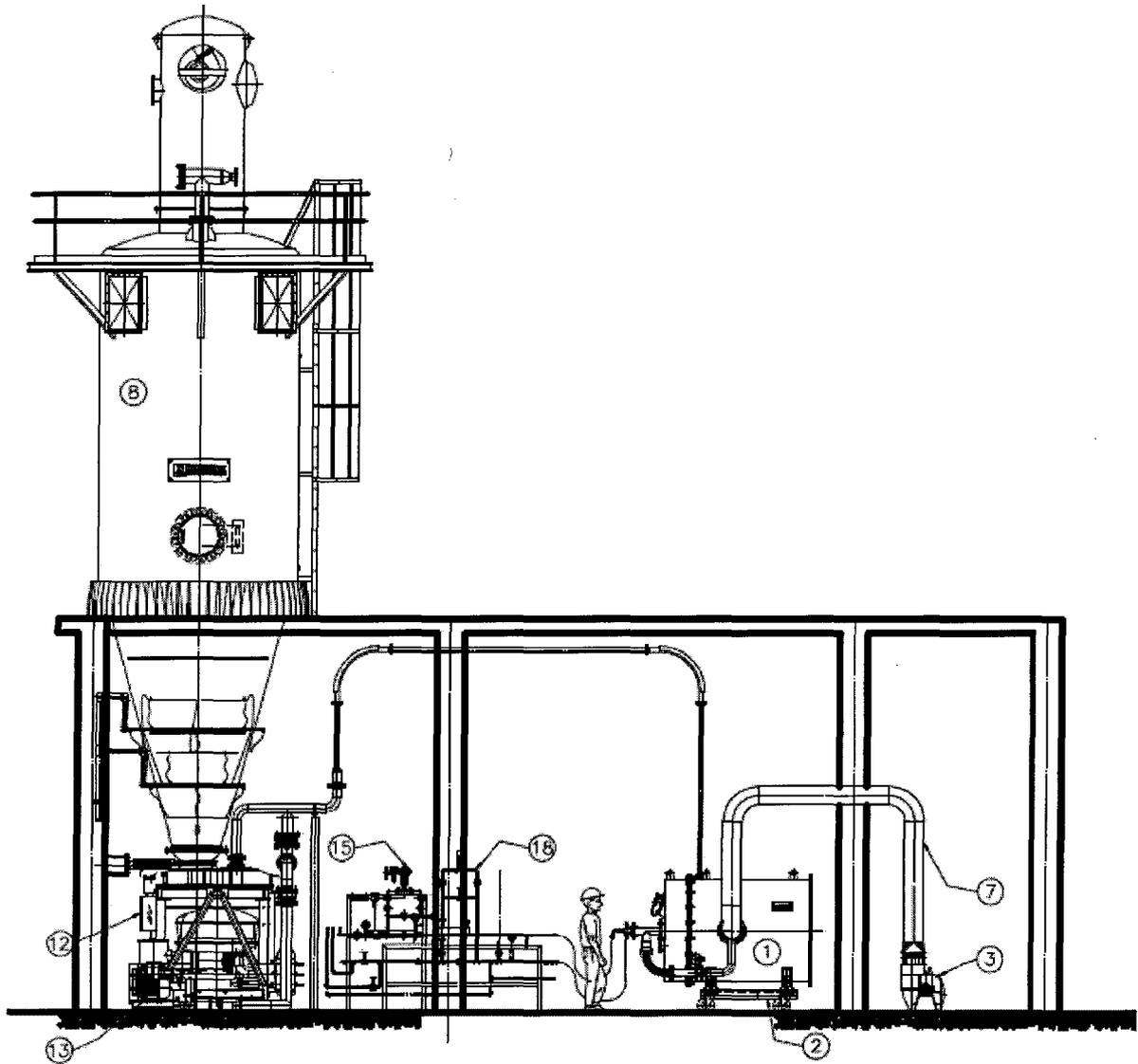


FIGURA 2

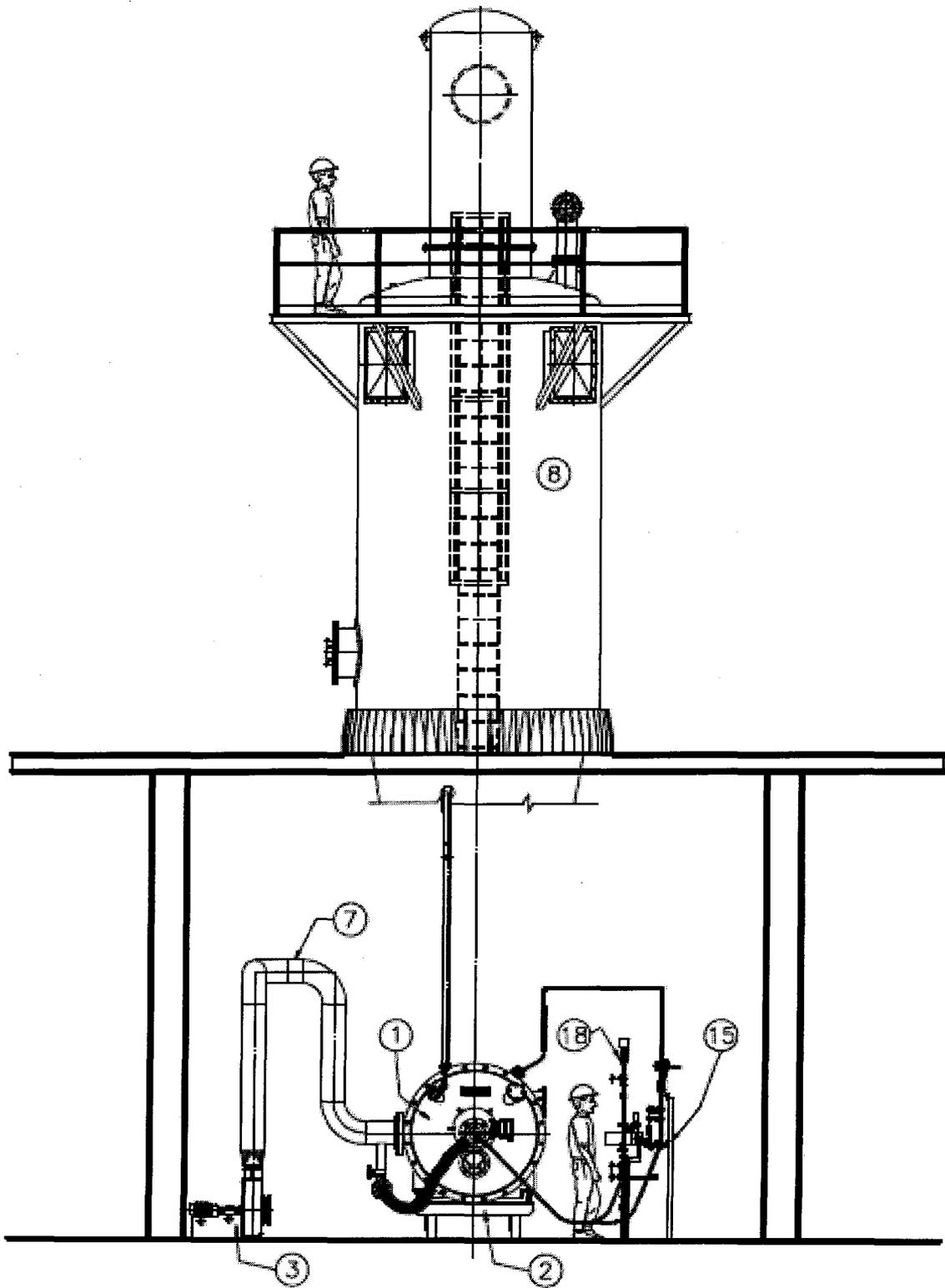


FIGURA 3

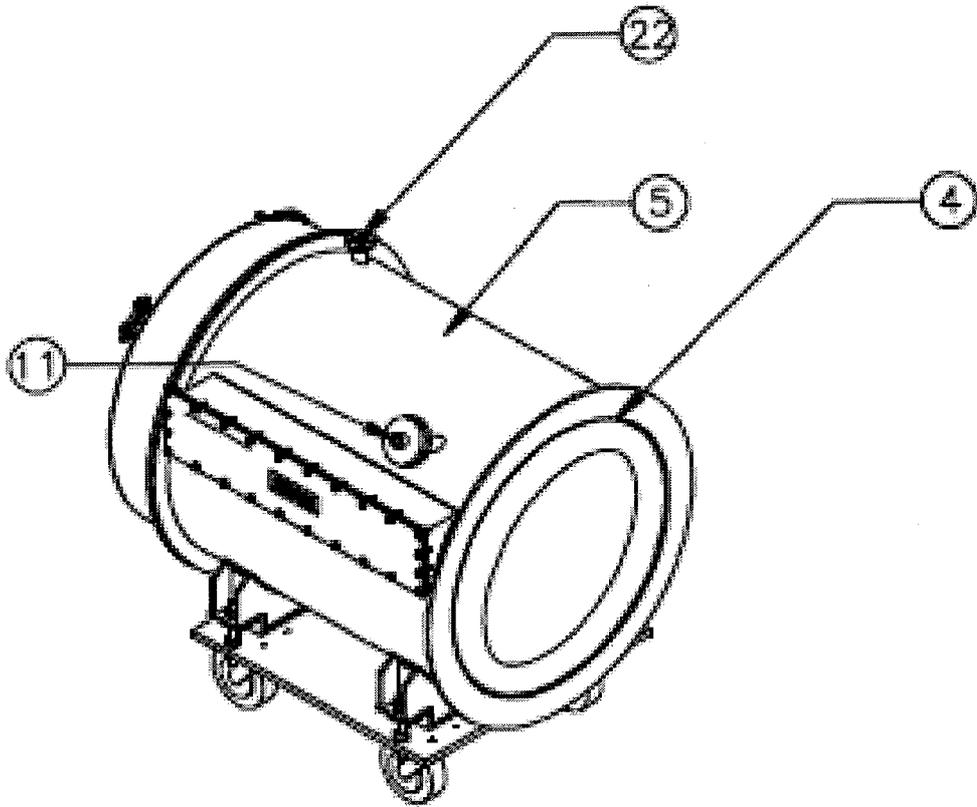


FIGURA 4

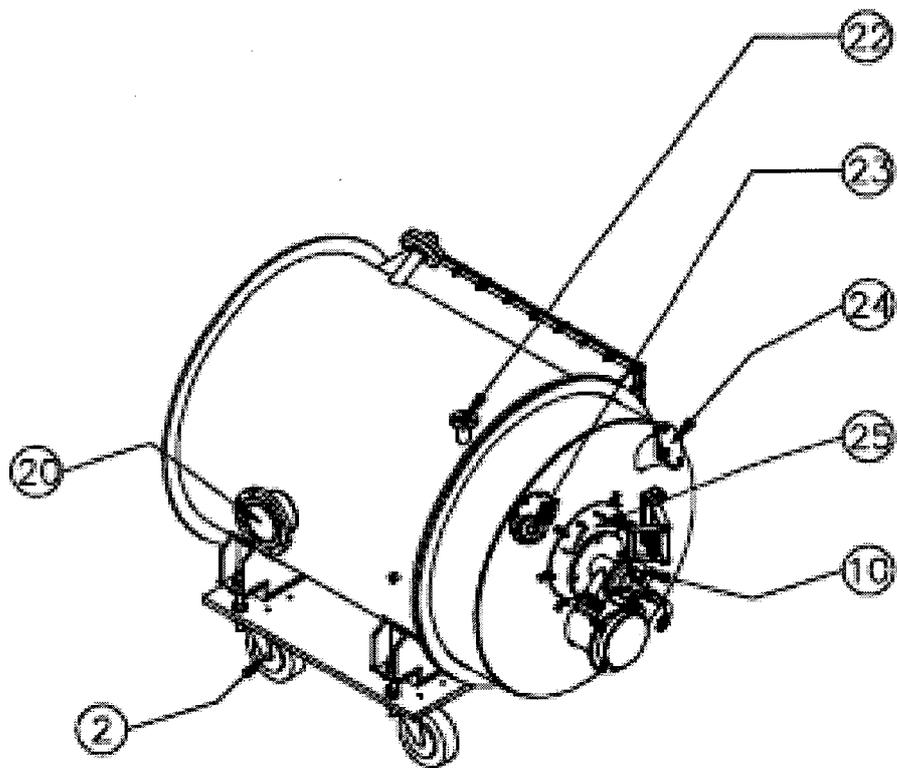


FIGURA 5

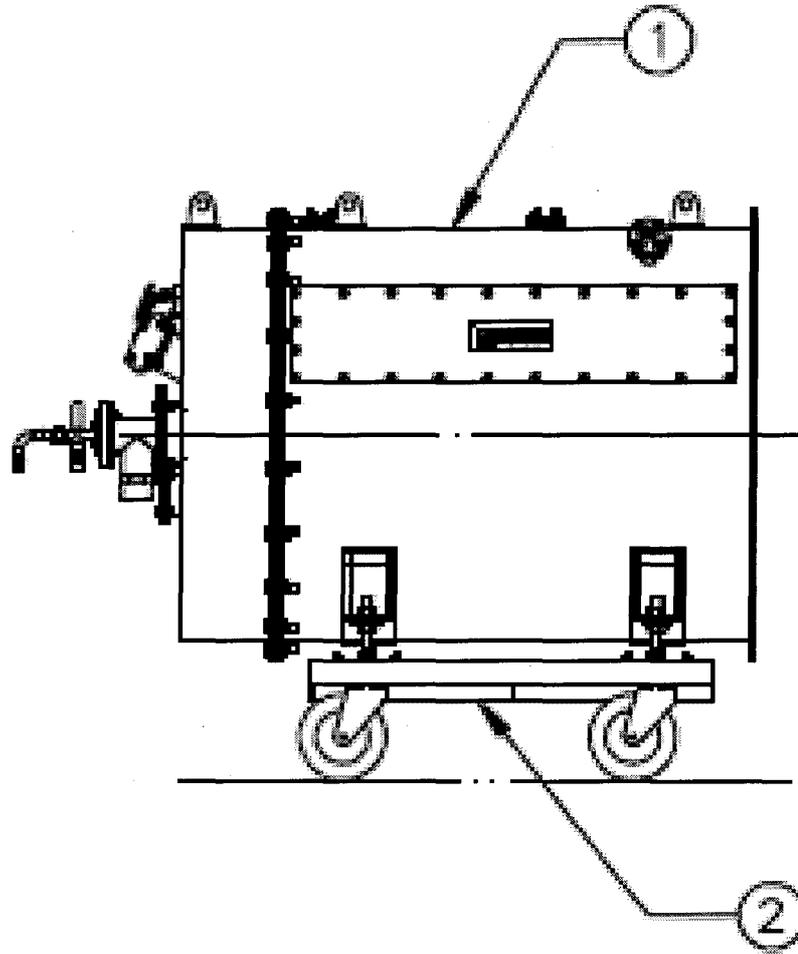


FIGURA 6

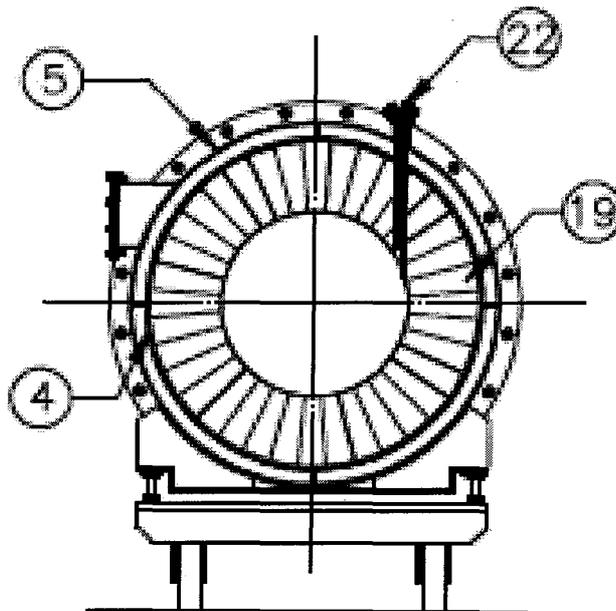


FIGURA 7

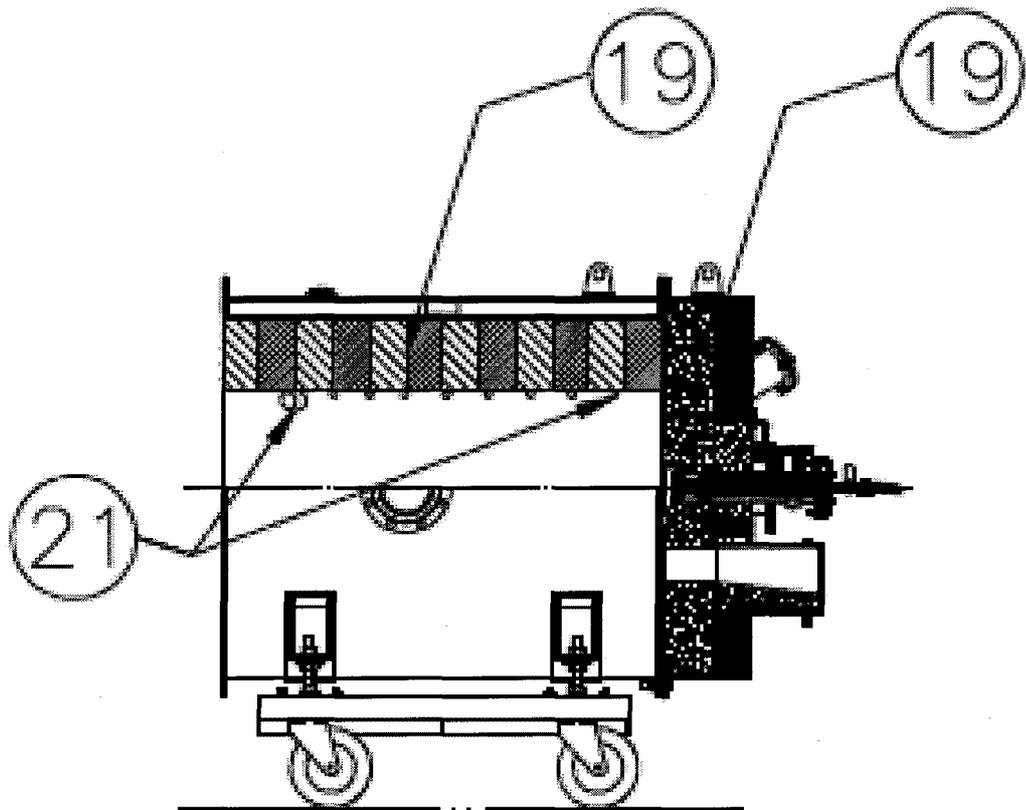


FIGURA 8

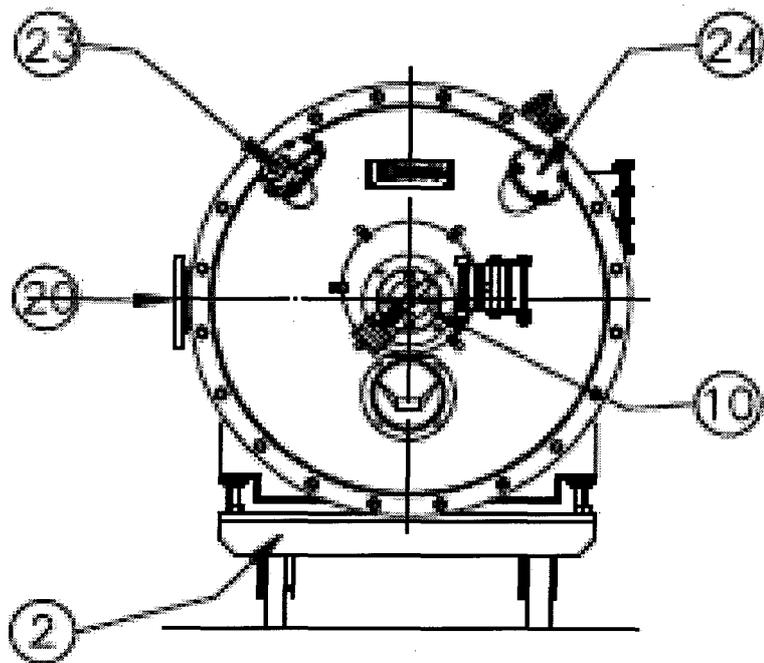


FIGURA 9

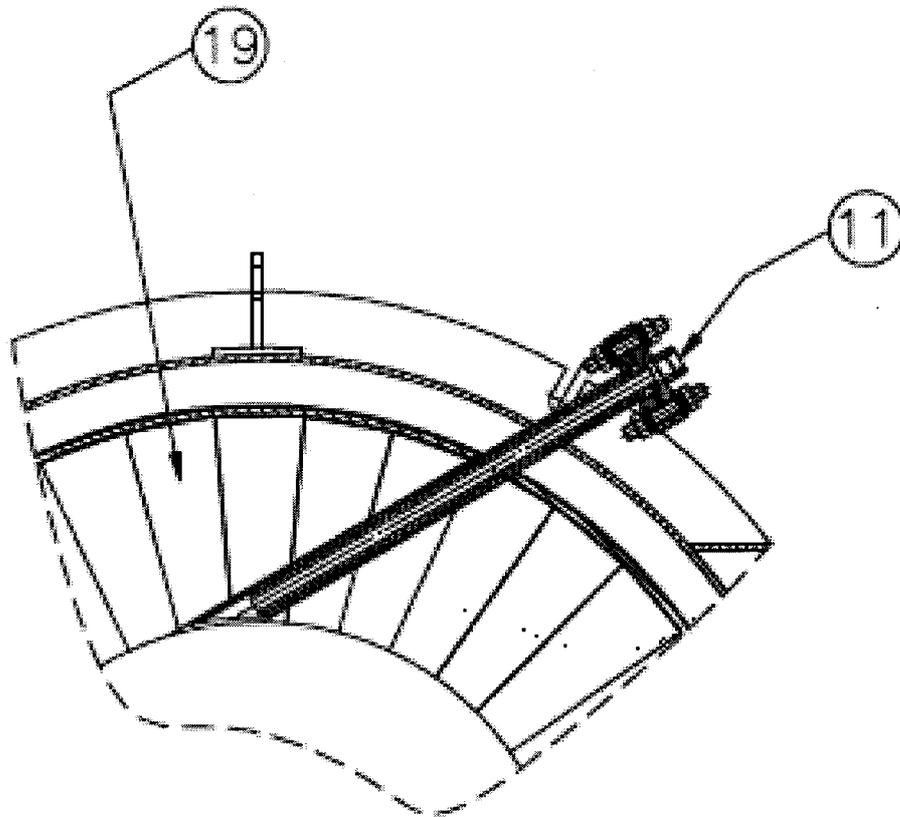


FIGURA 10

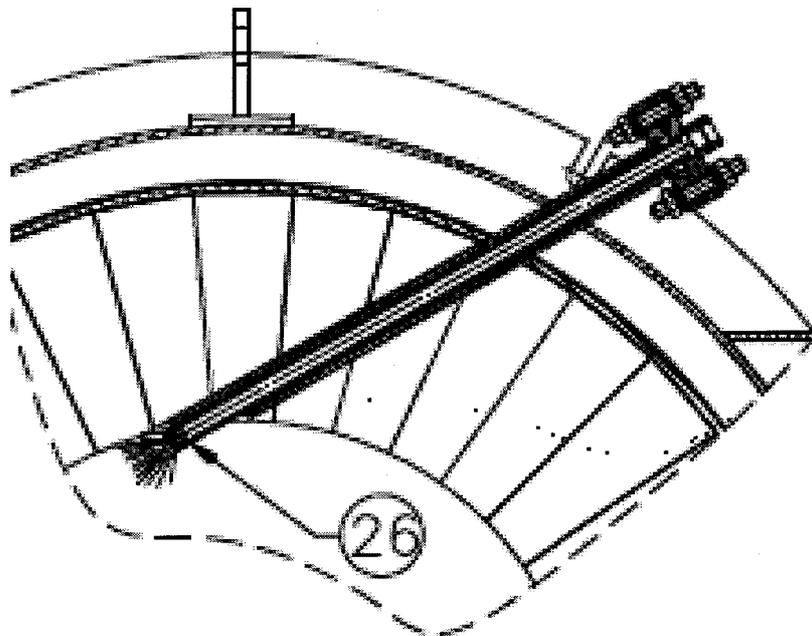


FIGURA 11

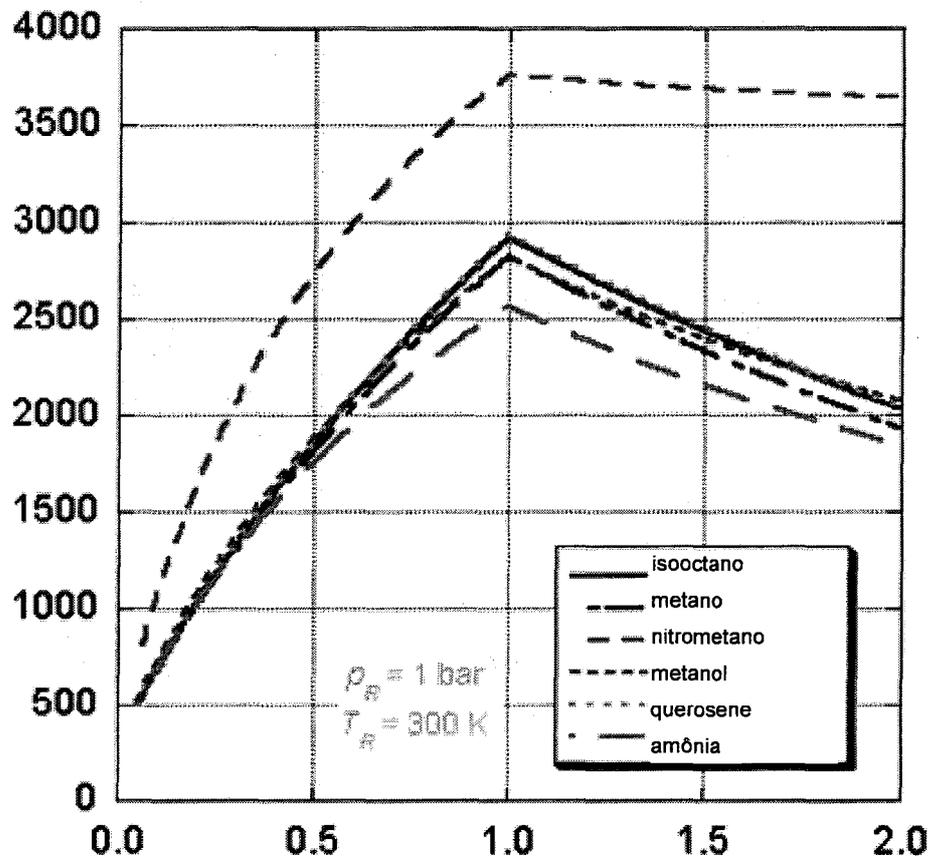


FIGURA 12

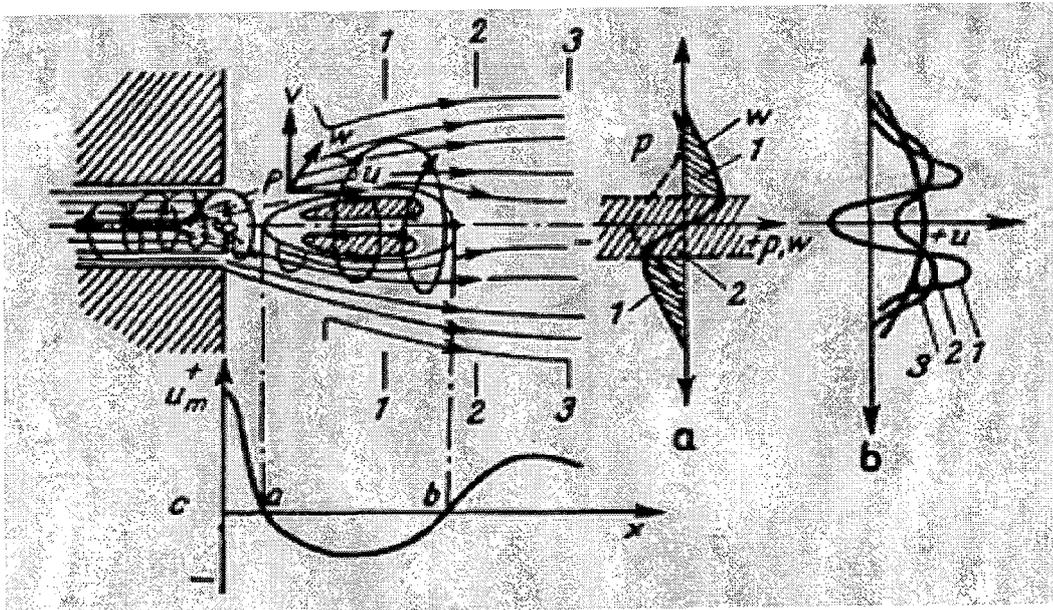


FIGURA 13

Resumo

Sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta.

5 A presente invenção trata de sistema de gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos em câmara compacta. Dentre estes pode-se citar especialmente o processo de redução metálica e de calcinação de minérios.

O sistema de gaseificação de combustíveis sólidos em câmara compacta que compreende:

- 10 a) câmara de combustão (1) consistindo de: carcaça interna (4) revestida de material refratário (19), apresentando diversos furos injetores (21) de ar primário, uma ou mais lanças de injeção tangencial de água (11), uma ou mais lanças de injeção tangencial de combustível sólido (22) junto à parede da pré-câmara da carcaça externa (5), bocal de queimador auxiliar (25) e ponto de conexão do piloto (24);
- 15 (b) carro de suporte e translação (2);
- (c) sistema de suprimento de ar (3);
- (d) soprador de ar de transporte de combustível sólido (13);
- (e) sistema de dosagem de sólidos (12);
- (f) tubulações de ar de transporte e ar primário (7);
- 20 (g) cavalete de medição e controle de combustível auxiliar (óleo e gás natural) (18).