



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

(11) PI 0819315-0 B1

(22) Data do Depósito: 14/11/2008

(45) Data de Concessão: 13/06/2017



(54) Título: MÉTODO PARA USAR ENERGIA SOLAR, MICRO-ONDAS E PLASMAS PARA PRODUZIR UM COMBUSTÍVEL LÍQUIDO E HIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOMASSA OU CARVÃO MINERAL

(51) Int.Cl.: B01J 19/12; B01J 19/08; C10J 3/02; C10J 3/20; C10J 3/54

(30) Prioridade Unionista: 16/11/2007 FR 0708031, 25/01/2008 FR 08/00384

(73) Titular(es): NICOLAS UGOLIN

(72) Inventor(es): NICOLAS UGOLIN

Relatório Descritivo da Patente de Invenção
para **“MÉTODO PARA USAR ENERGIA SOLAR, MICRO-
ONDAS E PLASMAS PARA PRODUZIR UM
COMBUSTÍVEL LÍQUIDO E HIDROGÊNIO A PARTIR
5 DE BIOMASSA OU CARVÃO MINERAL”.**

O fim das reservas de petróleo e a poluição do dióxido de carbono (CO₂) gerada pela queima de derivados do petróleo (uma das principais causas do aquecimento global) tornam necessário o desenvolvimento de processos de produção
10 de energias alternativos menos poluentes a fim de preservar a qualidade de vida nos países industrializados e solucionar a demanda cada vez maior por energia nos países emergentes. De fato, o consumo de energia mundial foi de 5.500 Mtep em 1971, 10.300 Mtep em 2002 e estima-se que seja de 16.500 Mtep em
15 2030.

É necessário, contudo, distinguir entre:

– as necessidades energéticas para o desenvolvimento urbano e industrial, que podem ser qualificadas como estáticas (para as quais várias soluções vêm surgindo,
20 principalmente, a geração de energia solar, nuclear, hidráulica, geotérmica e eólica); e

– as necessidades energéticas referentes ao transporte, que requerem o armazenamento e o transporte da energia pelo próprio veículo, com a exceção dos veículos
25 elétricos, como metrô, trens e trólebus.

Para esta segunda necessidade, referente ao transporte, as soluções parecem menos óbvias, pois os combustíveis usados nos vários meios de transporte devem cumprir uma série de restrições.

5 Eles devem ser fáceis de transportar e armazenar em condições seguras ao menos equivalentes ao que já existe hoje para os derivados do petróleo, ter um balanço de poluição (produção/uso abaixo do dos hidrocarbonetos) e, por fim, ser viáveis do ponto de vista econômico em relação aos
10 derivados do petróleo. O problema é ainda mais complicado se levarmos em conta as restrições de um combustível compatível com o transporte aéreo.

Vários métodos estão sendo criados para a produção de combustíveis para veículos:

- 15 – a produção de biocombustíveis (álcool, éster);
 – o uso de dihidrogênio como combustível em pilhas a combustível ou motores térmicos;
 – o uso de baterias eficientes em veículos elétricos;
20 – o uso de biomassa ou carvão para gerar combustível.

 À primeira vista, a produção de biocombustível, álcool ou éster de ácido graxo parece promissora e já vem sendo implantada em diferentes países. No entanto, essas soluções não
25 são perfeitas; na verdade, a área de cultivo necessária para gerar autonomia energética é enorme e representa mais do que todas as

áreas de cultivo que existem hoje. Sendo assim, esse tipo de cultivo compete com o cultivo de alimentos. As matérias-primas para a produção desses biocombustíveis são frequentemente produtos alimentícios, como o milho, o trigo, entre outros. A
5 exploração intensa de tais biocombustíveis, junto com a criação de um desequilíbrio na economia agroalimentícia mundial, em especial a dos países emergentes e em desenvolvimento, acarretaria no alto risco de aumentar a fome e causar distúrbios ecológicos significativos.

10 Além disso, certos modos de produção desses biocombustíveis têm um rendimento energético baixíssimo e um balanço de poluição alto em relação ao petróleo. Por exemplo, podemos citar a produção do etanol a partir da beterraba, ou a produção de ácidos graxos ou éster a partir da colza.

15 O uso de dihidrogênio como combustível parece ser uma solução inteligente para um combustível adequado ao uso. No entanto, ainda não é possível produzir um combustível de dihidrogênio não-poluente com um custo de produção equivalente ao dos derivados do petróleo. Além disso, o uso deste
20 combustível requer a superação de uma série de dificuldades de armazenamento e distribuição em vista de seus perigos.

O armazenamento de energia elétrica em baterias para uso em veículos elétricos ou híbridos é uma das soluções propostas por diversas montadoras de automóveis. Esta
25 solução envolve a produção de baterias eficientes a custo reduzido gerando pouca ou nenhuma poluição, seja pela fabricação ou pela

reciclagem. Além disso, o problema de produzir combustíveis alternativos persiste para os veículos híbridos.

Pelo que sabemos, ainda não foi proposta nenhuma solução de propulsão aeronáutica viável com base em pilhas a combustível ou baterias elétricas.

O uso da biomassa e, em especial, de dejetos vegetais, da celulose ou de produtos agrícolas não-atualizados, representa uma fonte importante de matérias-primas para a produção de combustíveis líquidos, bem como os materiais plásticos não-recicláveis no fim de sua vida útil.

As reservas de carvão mineral podem satisfazer as necessidades por combustíveis líquidos por mais várias décadas.

No entanto, seja no caso da biomassa ou do carvão mineral, os métodos de gaseificação usados para a produção de combustíveis líquidos a partir de tais matérias-primas ainda geram muita poluição de CO₂, que pode representar de 20 a 40% dos gases produzidos.

Devido à perda de carbono na forma de CO₂, a produção de combustível a partir da biomassa por gaseificação tem um balanço de poluição apenas um pouco melhor que o do petróleo, que tornar-se pior com rapidez se os problemas de controle da emissão de CO₂ durante a produção da biomassa e de seu transporte para unidades de conversão não for controlado. Ao minimizar as perdas de carbono na forma de CO₂ durante a produção de combustível a partir da biomassa, este balanço pode

ser levado ao equilíbrio ou próximo a ele se for possível capturar o derivado de CO₂ ou transformá-lo em um combustível de melhor rendimento. De fato, sob essas condições, as biomassas manteriam uma taxa de carbono equivalente à liberada pela
5 combustão de combustíveis sintéticos.

No caso do carvão mineral, a situação é bastante diferente. Independente do modo de conversão do carvão em combustível, a combustão do combustível libera na atmosfera o CO₂ proveniente do carvão mineral, além de seus derivados
10 indesejados (enxofre, sulfeto etc.).

Um método de gaseificação sem liberação de CO₂ melhoraria o balanço de poluição dos combustíveis obtidos pelos derivados do petróleo. No entanto, para tornar o balanço de poluição dos combustíveis fósseis equivalente ao balanço dos
15 combustíveis provenientes da biomassa, as soluções de captura ou conversão do CO₂ devem ser praticadas nos locais onde os biocombustíveis são usados, ou seja, nos próprios veículos.

Cada vez mais métodos que permitem a conversão do CO₂ em um produto melhor estão sendo desenvolvidos; porém, pouquíssimos deles descrevem soluções
20 adequadas ao setor da gaseificação da biomassa ou do carvão.

Podemos citar dois importantes tipos de processos de conversão do CO₂:

– Os métodos catalíticos que consistem em
25 reduzir o CO₂ em compostos como o metanol, o formaldeído ou o ácido fórmico, que são diretamente atualizáveis; e

– Os processos eletroquímicos em estado gasoso que consistem na redução do CO₂ em CO (monóxido de carbono) e H₂ (dihidrogênio) por meio de descargas elétricas.

Vale citar que os métodos eletroquímicos em
5 solução permitem a conversão do CO₂ em ácido fórmico.

Embora atualizáveis industrialmente, o metanol, o metano e o ácido fórmico só permitem com muita dificuldade que os hidrocarbonetos sejam sintetizados por processos como o processo de Fischer-Tropsch (FT).

10 Os processos eletroquímicos em estado gasoso podem produzir CO e H₂ a partir do CO₂. Os métodos com arco de corrente (GlidArc) são especialmente promissores, embora consumam grandes quantidades de energia (vários quilovolts por metro cúbico do gás produzido). Os processos GlidArc descritos
15 até então geralmente exigem o uso de aditivos gasosos, como o ácido sulfúrico (H₂S) ou o metano (CH₄), para reduzir o CO₂. Esses métodos não são descritos para oxidar partículas carbonizadas de carvão. Os aditivos que promovem reações são sempre gases. As geometrias descritas para os processos GlidArc
20 dificultam bastante a otimização do rendimento das diferentes reações em função dos fluxos de diferentes gases. Os métodos GlidArc geram os conhecidos plasmas sem equilíbrio. Nenhuma descrição leva em conta a combinação de métodos envolvendo, concomitante e alternadamente, um plasma sem equilíbrio junto
25 com um plasma termodinâmico. Da mesma forma, nenhum estudo levou em conta processos envolvendo plasmas de origem

óptica, plasmas elétricos sem equilíbrio e plasmas termodinâmicos. Nenhum estudo levou em conta processos para orientar as reações ocorrendo em um plasma por enriquecimentos com metais, partículas ou catalisadores, promovendo assim dada
5 reação no plasma.

A redução do CO₂ em CO e H₂ é um grande desafio tecnológico no setor da síntese de hidrocarbonetos. De fato, grande parte (de 30 a 40%) da matéria-prima (carvão) é perdida na forma do CO₂, o que faz deste setor, além de oneroso
10 do ponto de vista econômico, altamente poluente.

Propomos um processo e uma série de dispositivos alternativos adequados para a gaseificação da biomassa e do carvão, permitindo a produção de um gás de síntese (CO – H₂) com redução dos gastos de energia da biomassa
15 ou do carvão usados para a síntese. De fato, a energia necessária para as diferentes reações é normalmente oferecida pela queima de parte do carvão. No método descrito aqui, grande parte desta energia é substituída pela energia solar e pela energia de diferentes plasmas produzidos durante o processo. Os diferentes
20 plasmas usados têm origens variadas e a energia elétrica necessária para sua produção provém de fontes renováveis (solar, eólica) ou da energia advinda da recuperação térmica do dispositivo. As perdas de carbono, na forma de CO₂, são minimizadas pelo uso de plasmas de diferentes tipos (elétrico,
25 micro-ondas, ICP, óptico). Estes plasmas são usados durante o processo como meios adicionais para oxidar o carbono em CO e

reduzir o CO₂ em CO. A ação dos plasmas é ampliada por seu enriquecimento com diferentes metais ou elementos (Mg, Mn, Al, Fe, Si, SiO₂ etc.).

Princípio de operação

5 A invenção consiste em um processo para organizar uma série de unidades funcionais utilizando a energia de micro-ondas complementada pela energia térmica solar e/ou pela energia de plasma para realizar diferentes etapas envolvidas na gaseificação de compostos ricos em carbono como, por
10 exemplo, a biomassa ou o carvão, a fim de produzir um gás de síntese (CO, H₂) pretendido, por exemplo, para a síntese de combustíveis líquidos.

Em geral, qualquer composto contendo carbono é adequado. Além da biomassa, é possível usar detritos, polpa de
15 papel, lodo da purificação ou do tratamento de águas servidas etc.

Ao longo deste documento, chamaremos os materiais usados para a gaseificação de substratos. De preferência, os substratos são acomodados ou aglomerados em partículas ou grânulos mais ou menos úmidos, de preferência,
20 com um teor de umidade de 10 a 30%.

De preferência, a composição de grânulos é reproduzível, por exemplo, por uma mistura de materiais de origens diferentes (biomassa, lodo de purificação de águas servidas, detritos, polpa de papel etc.). A proporção dos diferentes
25 materiais necessários para produzir os grânulos é, de preferência, definida espontaneamente durante a mistura dos referidos

materiais por uma análise básica dos materiais usados na composição dos grânulos. É possível usar, por exemplo, um processo de LIBS (Espectroscopia por Decomposição Induzida a *Laser*) para definir a composição básica de diferentes materiais, 5 que serão misturados de acordo com as proporções definidas pela análise a fim de gerar um grânulo com uma composição básica reproduzível.

Após uma possível etapa de preparação do substrato, podemos dividir o processo de gaseificação dos 10 compostos contendo carbono para produzir um gás de síntese contendo principalmente CO e H₂ em duas etapas principais:

A) uma primeira etapa de pirólise de torrefação dos compostos, em carvão e gás de pirólise, em um reator solar de micro-ondas provocada pelo aquecimento dos compostos contidos 15 no referido reator solar de micro-ondas por energia térmica sinérgica alimentada junto com o aquecimento das paredes do reator graças à concentração, por convergência ou reflexão, de radiação solar na superfície das referidas paredes e pelas micro-ondas injetadas diretamente no reator e nos compostos; e

20 B) uma segunda etapa de converter o carvão e o gás de pirólise, advindos do reator solar de micro-ondas solar, essencialmente em CO e H₂ por reações de oxirredução química ocorrendo em um reator ciclônico, em que o referido reator ciclônico permite a formação de um turbilhão gasoso que guia e 25 oxida as partículas de carvão graças à combustão do gás de pirólise ou de outro gás, à injeção de um gás ou uma mistura de

gases aquecidos no reator ciclônico e ao aquecimento direto dos gases presentes no referido reator por micro-ondas injetadas diretamente no reator ciclônico.

Os gases usados para produzir as reações de oxirredução são aquecidos, acelerados e pressurizados pela ação sinérgica da energia térmica resultante do aquecimento das paredes de um reator de aquecimento por pressurização e aceleração, por convergência e/ou reflexo da radiação solar na superfície das paredes do referido reator e por micro-ondas injetadas no referido reator.

Os reatores ciclônicos e/ou os reatores de aquecimento por pressurização e aceleração incluem meios para produzir plasmas gasosos e plasmas ou plasmons misturados de gás/partículas.

É possível usar as micro-ondas junto com radiação infravermelha, de preferência, a frequências correspondentes às frequências de absorção dos modos de vibração assimétrica das moléculas de CO₂.

O substrato de gaseificação pode incluir partículas heterogêneas compreendendo partículas de compostos contendo carbono e partículas aditivas que promovam a gaseificação opcionalmente aglomeradas ou misturadas a partículas dos compostos contendo carbono.

As partículas aditivas podem incluir metais de redução que promovam a gaseificação por reações de oxirredução e a produção de elementos carregados e radicais livres por arcos

elétricos produzidos por correntes criadas nas partículas, mas também partículas de sílica e/ou silício produzindo SiO capaz de ligar parte do carbono contido nos compostos na forma de SiC.

A implementação do processo envolve um reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação e um reator ciclônico:

– O reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação compreende, entre outros:

– um tubo, por exemplo, feito de um material refratário;

– meios para mover os compostos dentro do tubo do reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação;

– meios para concentrar e causar a convergência de radiação solar na superfície do tubo do reator;

– meios para isolar o tubo do reator do ambiente externo;

– meios para melhorar a inércia térmica do tubo do reator;

– meios para produzir micro-ondas;

– meios para guiar as micro-ondas.

– O reator ciclônico compreende, entre outros:

– pelo menos duas unidades ciclônicas sobrepostas ou encaixadas em comunicação uma com a outra;

– dispositivos para permitir a combustão para criar turbilhões gasosos nas unidades;

- dispositivos para a injeção lateral ou tangencial de gás nas unidades para criar turbilhões gasosos;

- meios para produzir e guiar as micro-ondas.

A implementação do processo também envolve,

5 entre outros:

- um reator de aquecimento por pressurização e aceleração do gás de oxidação compreendendo:

- um tubo, por exemplo, feito de um material refratário,

10 – meios para concentrar e causar a convergência da radiação solar na superfície do tubo do reator;

- meios para isolar o tubo do reator do ambiente externo;

15 – meios para melhorar a inércia térmica do tubo do reator;

 – meios para mover os gases e, opcionalmente, as partículas ao longo do tubo do reator, comprimindo-os, aquecendo-os e acelerando-os como (entre outros), rotores de pá, compressores centrífugos, turbinas, pelo menos uma câmara anelar e pelo menos uma fonte de micro-ondas opcionalmente complementada por uma fonte de infravermelho;

20

 – dispositivos de corrente elétrica induzida ou não, ópticos e de micro-ondas para produzir plasmas gasosos e/ou plasmons com mistura de gás/partículas;

25

– pelo menos um magnétron e pelo menos um guia de ondas para produzir micro-ondas entre 1 GHz e 300 GHz e guiá-las.

1.1 Em uma concretização, a unidade funcional
5 que permite a torrefação e a pirólise do substrato em um reator de forno solar/micro-ondas (F_smo) composto por um tubo (figura 1.1) de diâmetro entre 1 cm e 5 m e comprimento entre 10 cm e 10 m. O tubo pode ser, por exemplo, feito de um material refratário como (entre outros) carbono coberto por cerâmica,
10 cerâmica, aço de tungstênio, titânio, níquel etc.

No centro do tubo, encontramos uma rosca helicoidal (figura 1.2), que permite que a biomassa ou o carvão movam-se através do orifício do tubo. O substrato pode ser organizado em grânulos ou partículas homogêneos ou não de
15 tamanho entre vários milímetros e vários centímetros. Neste documento, referir-nos-emos aos grânulos e partículas como grânulos. Fora do tubo, a uma distância constante ao longo de seu comprimento, encontramos um ou mais espelhos ou concentradores solares, por exemplo, de alumínio (figura 1.3),
20 para permitir que a luz do sol concentre-se na superfície do tubo. De preferência, o tubo é preto fosco para permitir o máximo de absorção da luz e do calor da radiação solar. A pintura do tubo pode compreender partículas de sílica de vários microns de diâmetro (partícula quântica ou Qdot) para otimizar a absorção da
25 radiação UV. Em geral, a camada externa do tubo pode ser coberta ou composta por materiais que permitam o máximo de

absorção do calor e da luz, tais como os desenvolvidos para aquecedores de água solares. Em certas concretizações, os espelhos são, por exemplo, côncavos ou elipsoidais em relação ao eixo principal do tubo com a rosca helicoidal, fazendo com que o raio da curvatura seja igual à distância que separa os espelhos da superfície do tubo com a rosca helicoidal. Em outra concretização, os espelhos podem ser espelhos de pouca largura retangular dispostos em paralelo ao eixo do tubo com a rosca helicoidal de acordo com seus comprimentos a uma distância constante da superfície do tubo. A distância entre os espelhos e a superfície do tubo é definida de modo que a largura da imagem ou o reflexo do espelho na superfície do tubo com a rosca helicoidal seja menor do que o diâmetro do tubo para que todas as luzes refletidas pelo espelho atinjam sua superfície. Em um corte transversal do tubo com a rosca helicoidal, incluímos uma série de espelhos de modo que a largura dos espelhos permita que um semicírculo ou qualquer corte elipsoidal em torno do tubo seja formado em uma disposição escalonada (figura 1.4). No caso de espelhos perfeitamente planos, espelhos cuja largura seja menor do que o diâmetro do tubo com a rosca helicoidal são suficientes. Cada espelho tem uma inclinação mais ou menos significativa em relação à tangente do suporte circular ou elipsoidal na altura da ligação do espelho de modo a possibilitar o reflexo de todas as luzes na superfície do tubo com a rosca helicoidal.

Qualquer condição intermediária envolvendo vários espelhos côncavos retangulares em um corte transversal do

tubo com a rosca helicoidal pode ser considerada. A distância entre os espelhos e a superfície da rosca helicoidal é definida pelo raio de curvatura dos espelhos. Como alternativa, esta distância pode ser encurtada para que a largura da imagem do espelho no

5 tubo com a rosca helicoidal seja entre um ponto de referência (uma linha ao longo do tubo) e o tamanho do diâmetro do tubo com a rosca helicoidal. O suporte dos espelhos, em uma parte circular ou elipsoidal, gira em torno do tubo com a rosca helicoidal de modo a oferecer um melhor reflexo da luz sobre a

10 superfície do tubo. De forma semelhante, como alternativa, cada espelho tem um pino adequado que permite que ele gire em relação à tangente do suporte para proporcionar o melhor ângulo de reflexo em relação à posição do sol. Como alternativa, um sistema de acionamento controlado por computador pode ser

15 responsável por todos os movimentos dos suportes dos espelhos ou dos espelhos em si. As células receptoras visuais dispostas no tubo com a rosca helicoidal determinam melhor inclinação.

De preferência, o tubo com a rosca helicoidal é direcionado longitudinalmente para o sul para a máxima

20 exposição ao sol. Uma área dos espelhos localizada precisamente na mesma linha que o tubo com a rosca helicoidal jamais será iluminada. Como alternativa, os espelhos na área escura podem ser removidos. A posição da área escura pode variar dependendo da orientação do tubo com a rosca helicoidal e ajustes podem ser

25 feitos de acordo com a orientação. Na linha da área escura acima do tubo com a rosca helicoidal, encontramos lentes convergentes

ou de Fresnel (figura 1.5) a uma distância da superfície do tubo com a rosca helicoidal próxima à distância focal dela. O número de lentes depende do tamanho e do diâmetro do tubo com a rosca helicoidal. As lentes são dispostas em um suporte cujos
5 movimentos de orientação são integrados às rotações do suporte do espelho do outro lado do tubo com a rosca helicoidal.

Em pontos diferentes do tubo com a rosca helicoidal, são introduzidas micro-ondas a uma frequência entre 1 GHz e 300 GHz. O número de fontes de micro-ondas, entre uma e
10 várias, depende da potência desejada e do consumo elétrico projetado para a instalação. Em certas concretizações, essas fontes de micro-ondas são compostas por um solenoide ao redor do tubo com a rosca helicoidal conectado a um gerador de corrente elétrica de alta frequência. Pela ação da corrente alternada, o
15 solenoide gera radiofrequências no tubo com a rosca helicoidal.

Em uma concretização preferida, a fonte de micro-ondas é um magnétron (figura 1.6). Como alternativa, a parte da rosca helicoidal oposta à antena do magnétron ou ao guia de ondas é feita de um material insensível ou transparente a
20 micro-ondas e eletricamente neutro, tipicamente de cerâmica. De preferência, a largura do tubo é igual a um número inteiro próximo ao comprimento de onda " λ " das micro-ondas usadas. Esta largura pode ser ajustada de acordo com a defasagem " ϕ " devido aos reflexos nas paredes. Como alternativa, a região do
25 tubo em que as ondas produzidas pela antena do magnétron são introduzidas é coberta, na superfície interna, por um material

capaz de refletir as micro-ondas, normalmente uma folha de alumínio disposta em um revestimento de cerâmica (qualquer outro material que reflita micro-ondas também pode ser usado). A área coberta do refletor estende-se de ambos os lados da região onde as micro-ondas são introduzidas, de preferência com um comprimento igual a $\lambda/4$ de modo a promover interferências construtivas. Em uma concretização preferida, o material compreendendo o tubo com a rosca helicoidal reflete micro-ondas.

As micro-ondas aquecem com extrema rapidez as moléculas do substrato de gaseificação agitando as moléculas de água contidas nos grânulos ou qualquer outra molécula com um momento dipolar. O calor produzido pelas micro-ondas somado ao calor da convergência da radiação solar causa a torrefação e a pirólise do substrato. Durante a pirólise, há a liberação de materiais voláteis contendo alcatrão, bem como vários outros gases inflamáveis. Esses diferentes gases são coletados por tubos de desgaseificação (figura 2.8) para serem injetados em um reator de gaseificação. Antes de serem injetados no gaseificador, esses gases podem ser superaquecidos (entre 160 e 2.000° C) pela aplicação de micro-ondas por um magnétron ou outra fonte de micro-ondas.

1.2 Em certas concretizações, o tubo do reator (figura 1.1a) encontra-se em uma câmara de confinamento transparente a vácuo (figura 1.1c) para limitar as perdas de calor para o ambiente externo.

Em certas concretizações, o espaço (figura 1.1b) entre a câmara de confinamento e o tubo é preenchido por um gás para limitar a perda de calor para o ambiente externo. Ele pode ser xenônio, criptônio, argônio ou qualquer outro gás ou mistura de gases que permita a limitação da perda de calor entre a superfície do tubo do reator e o ambiente externo. Em uma concretização preferida, a câmara a vácuo é um tubo feito de vidro ou qualquer outro material transparente para conter o tubo do reator. A parede ou a superfície (figura 1.1d) do tubo pode conter partículas quânticas fluorescentes (partículas de quartzo) para converter a luz solar ultravioleta em luz visível ou infravermelha, permitindo que ela cruze a parede da câmara de confinamento com eficiência.

Em certas concretizações, a superfície interna da parede inclui uma parte refletora (figura 1.3a) que permite que a luz seja refletida na superfície do tubo do reator.

1.3 Em uma concretização preferida, uma extremidade do tubo do reator F_{smo} (figura 11.1a) abre-se na câmara de confinamento transparente (figura 11.1c) para que o gás que limita as perdas de calor possa entrar no tubo do reator.

No entanto, a extremidade do tubo do reator F_{smo} em questão é fechada por um corpo poroso (figura 11.85) que requer vários contatos entre o gás que entra no tubo do reator F_{smo} e a malha do corpo poroso. O corpo poroso, feito de preferência de cerâmica, tem uma grande superfície de troca e age como um absorvedor de radiação solar, melhorando a inércia térmica do reator F_{smo} . O corpo poroso é, por exemplo, um

monólito com vários canais em forma de favos, por exemplo, de cordierita ou uma espuma cerâmica porosa feita de carbetto de silício, SiC. O corpo poroso é coberto por ou contém, por exemplo, óxidos M_xO_x , em que M é escolhido de preferência entre Al, Si, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ti ou Zr. Como alternativa, os óxidos presentes na superfície ou no corpo poroso, além de aquecerem o gás, podem catalisar a redução do gás que atravessa o corpo poroso, por exemplo, CO₂ em CO ou H₂O em O₂ e H₂, se CO₂ ou H₂O forem usados como o gás para limitar as perdas de calor. Nesta concretização, os gases de efeito estufa, como o CO₂, o NH₄ ou o H₂O, são os preferidos para serem adotados como o gás para limitar as perdas de calor. O gás para limitar as perdas de calor é injetado na câmara de confinamento do lado oposto à abertura do tubo do reator. Os gases, então, circulam na câmara de confinamento transparente isolando a parede do tubo do reator F_{smo} da parede da câmara de confinamento transparente. Dessa forma, o gás captura a radiação infravermelha advinda da parede do tubo do reator F_{smo} aquecida pela radiação solar e, internamente, pela pelas micro-ondas, aquecendo a si mesmo à medida que segue para a entrada do tubo do reator. O gás, então, atravessa o corpo poroso, onde é aquecido ainda mais em contato com a estrutura porosa. O gás pode ser reduzido pela ação de qualquer óxido presente no corpo poroso. Em seguida, o gás, ou sua forma reduzida, entra na parte do tubo do reator contendo o substrato e a rosca helicoidal, onde contribui para a pirólise e a torrefação do substrato.

1.4 Em um momento específico, o reator de forno solar/micro-ondas (F_smo) pode prover a energia necessária para outros tipos de reações industriais, como a fermentação do álcool a partir de água adoçada com suco de cana-de-açúcar, ou
5 cana-de-açúcar triturada, além de reações de digestão enzimática necessárias para a produção de açúcar e álcool a partir da beterraba, do milho, da banana etc.

O sistema é, então, ajustado para atingir temperaturas (30 a 40°) que permitam reações enzimáticas durante
10 o trânsito dos substratos no tubo do reator pela ação da rosca helicoidal. O substrato é aquecido desde o princípio pelas micro-ondas e pela convergência de luz na superfície do tubo do reator. As enzimas necessárias para a fermentação, digestão e isomerização são introduzidas de acordo com a ordem de reações
15 desejada após a fonte de micro-ondas por entradas de fermentação.

Em geral, o reator F_smo pode ser usado em todas as reações químicas ou físico-químicas de síntese, lise ou mudança de estado de um ou mais produtos ou substratos que
20 exijam a entrada de calor a fim de acionar e/ou manter as reações, em particular, reações de saponificação ou esterificação.

2.1 Após a pirólise, o carvão é despejado em um gaseificador. É possível usar qualquer tipo de gaseificador. A concretização preferida inclui um gaseificador misturado de leito
25 fixo/leito ciclônico fluidizado (FBCB) ou, em um sentido mais amplo, um reator ciclônico.

Em uma concretização específica, o FBCB é formado por um núcleo que consiste em um tubo com diâmetro médio entre 10 cm e 5 m (figura 2.9). O núcleo pode ser feito de aço inoxidável refratário, titânio, zircônio, níquel, cerâmica, aço de tungstênio ou qualquer outro material capaz de resistir a temperaturas acima de 800° C. O substrato é despejado pela rosca helicoidal (figura 2.2) em uma câmara de combustão ciclônica (figura 2.10) ligada ao núcleo do reator por uma câmara de coleta (figura 2.98).

Como alternativa, a câmara de combustão permite que os gases da fase de pirólise sejam combinados com outros gases de combustão, como o metano, que serão queimados. Os gases são, por exemplo, queimados por dois queimadores (figura 2.11) posicionados tangencialmente em relação à câmara de combustão para que as chamas (2.13) façam com que os gases de combustão (essencialmente CO_2 e H_2O) girem (figura 2.12), formando um turbilhão gasoso descendente e uma coluna de gás ascendente no ciclone.

A entrada da câmara de combustão é obstruída em parte por uma estrutura cônica (figura 2.20) de modo que a superfície inferior do cone seja equipada com aletas (ou pás) com uma orientação semelhante ao sentido de rotação do turbilhão gasoso da câmara de combustão, permitindo assim que os gases da coluna ascendente sejam reorientados rumo ao turbilhão gasoso.

A superfície superior do cone inclui canais que formam, com a borda superior da câmara de combustão, entradas pelas quais o substrato despejado pela rosca helicoidal possa entrar na câmara de combustão. As entradas da câmara de combustão são orientadas no sentido de rotação do turbilhão da câmara de combustão.

Um pino (figura 2.99) atravessa a estrutura cônica pelo vértice para ser girado. O pino é disposto na câmara de combustão ciclônica com um escudo térmico (figura 2.97) que o protege do calor do gás ascendente. Na câmara de combustão, um impulsor (figura 2.96) é ligado ao pino para fazer com que a montagem integral pino-rotor gire pela ação da coluna de gás ascendente. Na outra extremidade do pino, na câmara que recebe o substrato, encontramos uma lâmina (figura 2.95) integrada ao pino para, por meio de rotação, triturar os grânulos do substrato despejados pela rosca helicoidal pela câmara de coleta. O material triturado é, então, aspirado pela câmara de combustão pelos condutos da superfície superior da estrutura cônica graças ao efeito de Bernoulli causado pelo fluxo da coluna de gás ascendente na superfície inferior da estrutura cônica quando os gases ascendentes do ciclone são redirecionados rumo ao turbilhão giratório descendente. Em certas concretizações, a estrutura que encerra o topo da câmara ciclônica é um cone invertido munido de pás, cuja borda é curvada rumo à câmara de combustão ciclônica, permitindo assim que a coluna de gás ascendente seja reorientada rumo à câmara de combustão.

A mistura gasosa queimada na câmara de combustão (gás de pirólise, ar, outro gás) pode, como alternativa, ser produzida diretamente na câmara de combustão graças a três tubos independentes (figuras 2.14, 2.15, 2.16) que alimentam um bico queimador. Cada tubo difunde um dos três gases à pressão e velocidade desejadas e a ignição do queimador é acionada por uma fonte de centelha (ou arco elétrico) disposta ali perto. O rendimento da combustão é controlado pela taxa de fluxo de gás de cada tubo.

No entanto, é possível usar qualquer tipo de misturador, regulador ou carburador opcionalmente associado a medidores do fluxo de gás para alimentar os queimadores. Outros tipos de queimadores também podem ser adequados. A pressurização dos gases injetados pode ser obtida por turbocompressores, que combinam uma turbina e uma bomba; a bomba comprime os gases pela ação da turbina, que é operada por vapor de água ou pela expansão de outro gás ou por qualquer outro processo de pressurização de gás.

O volume do núcleo do reator é segmentado por uma série de abas (figuras 2.17 e 3.18-3.19). Cada aba consiste de um cone perfurado voltado para baixo estreitando a abertura do reator a partir da parede do núcleo. Tais abas realizam duas funções: limitam a compressão da coluna de grânulos; e criam áreas de turbilhão para promover a reação:



ou:



A circulação circular de gases, guiando os grânulos torrados, permite capturas maiores de tais grânulos nos diferentes ciclones criados no FBCB pelas várias abas. Um corpo abrasivo, como areia, pedra-pomes empilhada ou qualquer outro material abrasivo, pode ser misturado ao carvão injetado nos ciclones para exercer abrasão ou erosão nas partículas de carvão devido ao movimento circular dos gases, bem como à maior inércia térmica. A areia ou o material abrasivo também permitem que o material fundido seja absorvido (metais ainda presentes no carvão), impedindo, assim, que os poros e os canais ou ranhuras do sistema entupam. Uma primeira aba é disposta após a câmara de combustão 17. Vários centímetros abaixo da abertura central da aba, encontramos uma estrutura cônica 20 para obstruir em parte 21 a abertura do funil formado pela aba. Vários condutos 22 são criados entre a borda da aba 23 e a estrutura cônica 20 por uma série de pontas 24, fazendo com que seja necessário passar por um deles para atravessar o orifício da aba. O tamanho dos condutos deve ser suficiente para permitir a travessia dos grânulos torrados. Os condutos são dispostos de forma regular de acordo com a rotação de um ângulo constante em torno do vértice do cone que obstrui a aba. Como alternativa, os condutos são curvados ou oblíquos e orientados de modo que, ao atravessá-los, os grânulos e gases sejam projetados tangencialmente em relação à parede do reator em um movimento de rotação no mesmo

sentido que a rotação submetida ao gás de combustão pelos
queimadores. A superfície inferior do cone 25 é equipada com
aletas (ou pás) 26 com uma orientação semelhante a dos condutos.
Na câmara de combustão, os gases de combustão, a uma
5 temperatura acima de 800°C e movidos em rotação, atacam os
grânulos torrados despejados pela rosca helicoidal. Alguns dos
grânulos são oxidados de acordo com as reações r_1 e r_2 e guiados
pelos gases em um movimento circular através dos condutos do
orifício da aba. Abaixo da primeira aba, a uma distância entre 10
10 e 500 cm (de preferência, de 50 cm), encontramos uma segunda
aba (figura 3.18) com o mesmo dispositivo de cone e condutos
descrito acima que obstrui, em parte, a abertura da aba. CO_2 ou
uma mistura de $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$, pressurizada a uma temperatura acima
de 800°C , normalmente a 1.500°C , é então injetada, na parte
15 superior do espaço definido pelas duas abas, tangencialmente em
relação à parede do reator (figura 3.27) no sentido de rotação
induzido pelos queimadores. O espaço definido pelas duas abas
representa um ciclone com uma entrada dupla axial e tangencial
(figura 3.28). Em uma concretização preferida, há cinco vezes
20 mais CO_2 do que H_2O na mistura de gás injetada
tangencialmente.

Em certas concretizações, abaixo da área de
introdução tangencial da mistura de gás, pelo menos um
magnétron 6, 7 (ou qualquer outra fonte de radiofrequência)
25 transmite micro-ondas no reator entre as duas abas. As micro-
ondas permitem o aquecimento da mistura de gás injetada, ativam

a reação r_2 e r_1 e aumentam a velocidade do turbilhão de gás e de grânulos. Quando os grânulos chegam à altura da segunda aba, eles são conduzidos com alguns dos gases através dos condutos do orifício da aba e o restante dos gases, separado da maioria das partículas, sobe de acordo com o centro do núcleo do reator, em um fluxo ascendente, para a superfície inferior do cone superior que obstrui em parte o orifício da primeira aba. Como alternativa, é possível incluir um cilindro no centro do reator (figura 3.29) no primeiro quarto do espaço definido pelas duas abas para guiar os fluxos de gás ascendentes rumo à superfície inferior do cone da aba superior. Os canais causticados na superfície inferior do cone induzem um movimento de rotação no fluxo ascendente e o redirecionam rumo aos gases giratórios descendentes do turbilhão no mesmo sentido de rotação.

Em certa concretização, abaixo da segunda aba, encontramos uma terceira aba, obstruída em parte por um cone, para formar um novo ciclone/unidade de micro-ondas. Em seguida, vapor de água pressurizado a uma temperatura acima de 800°C , normalmente a 1.500°C , é injetado, na parte superior do espaço definido pelas abas segunda e terceira, tangencialmente em relação à parede do reator no sentido de rotação induzido pelos queimadores e pelo ciclone acima. Abaixo da região de injeção do vapor de água, pelo menos um magnétron (ou outra fonte de radiofrequência) transmite micro-ondas para o ciclone, permitindo o superaquecimento do H_2O e ativando fortemente a

reação r1 (com cinco vezes mais rapidez do que a reação r2 à mesma temperatura).

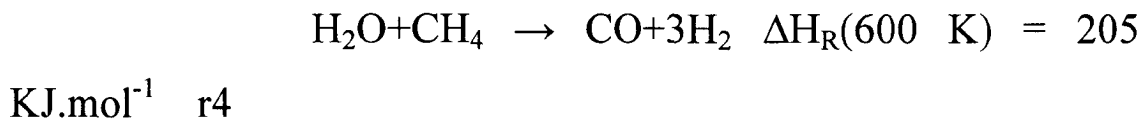
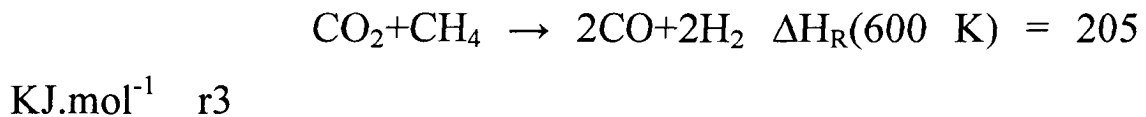
Como alternativa, as abas podem ser conectadas a uma ou mais fontes ultrassônicas, permitindo, assim, que ondas ultrassônicas sejam injetadas no reator para quebrar os envoltórios esvaziados de gás de H₂O e CO₂ que se formam em torno dos grânulos e que retardam as reações de gaseificação. As ondas ultrassônicas também permitem que os grânulos sejam fragmentados durante a gaseificação, tornando-os mais acessíveis.

10 Como alternativa, as abas podem ser conectadas a uma fonte de vibração para facilitar a passagem dos grânulos pelos condutos.

Em certas concretizações, uma onda ultrassônica com frequência entre 1kHz e 20 MHz é introduzida na junção entre a aba e o tubo do núcleo do reator (figuras 12.90 e 12.91). A onda ultrassônica permite a formação de borrifos resultantes da explosão de cavidades em líquidos, tais como as esferas de alcatrão presentes nas paredes do ciclone, e ajuda a reduzir essas esferas de alcatrão.

Os ciclones/unidades de micro-ondas, definidos pelas duas abas, podem ser repetidos várias vezes no FBCB com injeções de CO₂, CO₂/H₂O ou H₂O em qualquer ordem. Esta estrutura forma uma rede de ciclones sobrepostos.

É possível injetar um gás adicional, tal como o metano, tangencialmente nos ciclones. O metano é oxidado pela água e o CO₂ em CO com a produção de H₂ de acordo com as reações a seguir:



5 A liberação do H₂ no reator retarda a reação r₁, promovendo, assim, a reação r₂ e, portanto, o consumo de CO₂, além melhorar o balanço de poluição do sistema.

 Como alternativa, a região do núcleo do reator de gaseificação que recebe micro-ondas pode ser coberta por um
10 material que reflita micro-ondas, tipicamente alumínio em um suporte cerâmico. De preferência, o núcleo do reator é feito de um material que reflita micro-ondas e pode ter um diâmetro igual a um número inteiro do comprimento de onda “λ” das micro-ondas usadas. Esta largura pode ser ajustada de acordo com a defasagem
15 “φ” devido aos reflexos nas paredes.

 2.2 Em outra concretização, o núcleo do reator consiste em dois tubos encaixados um no outro para formar um FBCB de dois núcleos (FBCB_{dc}). O tubo interno do núcleo inclui as unidades de micro-ondas/ciclones descritos acima na
20 seção 2.1. Os ciclones são modificados para que o cone que obstrui em parte a abertura das abas e o tubo de fluxo ascendente no centro do ciclone sejam unidos para formar uma estrutura oca em forma de T (figura 4.30) que permite que os fluxos ascendentes do ciclone sejam despejados para fora do ciclone e
25 para dentro do tubo externo do núcleo. A base do T consiste no

tubo de fluxo ascendente (figura 4.31). A junção entre a base do T e a barra horizontal constitui o cone. A barra horizontal do T representa os bocais de saída de gás (figura 4.32) que conectam, por um tubo oco, o cone ao espaço entre o tubo interno (figura 5 4.33) e o tubo externo (figura 4.34) do núcleo do reator. Chamaremos a estrutura horizontal oca identificada como barra do T de “bocal horizontal (figura 4.32). O bocal horizontal, portanto, permite que os fluxos ascendentes do ciclone atravessem o tubo central, rumo ao espaço entre os dois tubos encaixados um 10 no outro, que chamaremos de espaço entretubos (figura 4.35). É possível tornar a estrutura em T mais complexa duplicando os bocais horizontais pela rotação no mesmo plano perpendicularmente ao tubo de fluxo ascendente do ciclone. A parte dos bocais horizontais localizada entre o cone e a borda das 15 abas é perfilada na forma de uma pá e todas as pás são orientadas na mesma direção para criar um sistema de condutos oblíquos para permitir que gases e partículas penetrem no ciclone localizado abaixo (figura 4.36). A orientação das pás é definida de modo a induzir a rotação no mesmo sentido que a rotação 20 submetida pelos queimadores na câmara de combustão (de preferência, o sentido induzido pela força de Coriolis).

É possível acrescentar pás intermediárias à estrutura de “pás tubulares” para otimizar o tamanho dos condutos sem ter que aumentar o número de bocais. Os bocais horizontais 25 são curvados no sentido de rotação geral dos gases nos reatores ou dispostos de forma oblíqua para permitir que os gases entrem

mais ou menos tangencialmente em relação à parede do tubo externo do núcleo do FBCB_dc. A saída dos bocais é direcionada levemente para baixo e termina perto da parede do tubo externo. Devido à orientação dos bocais horizontais, a entrada dos gases
5 no espaço entretubos gera, neste espaço, um movimento de rotação de gás descendente, formando um turbilhão descendente que gira na mesma direção que o movimento induzido na câmara de combustão.

Na parte inferior do FBCB_dc, o tubo externo é
10 maior do que o tubo interno por um comprimento entre 10 cm e 5 m e, de preferência, de 100 cm. O tubo externo forma, no final, um cone aberto. O cone, por exemplo, é formado com uma distância maior do que 50 cm para uma extremidade de 100 cm. Indicamos distâncias a título meramente exemplificativo; muitas
15 adaptações são possíveis. A abertura do cone tem um diâmetro entre o diâmetro do tubo interno mais 30% e o diâmetro dos orifícios das abas dos ciclones do tubo interno. O tubo externo do núcleo do FBCB_dc forma, portanto, um ciclone contendo o tubo interno na altura do fluxo ascendente do tubo externo. A
20 extremidade inferior do tubo interno do núcleo termina com uma aba com uma curvatura circular (figura 4.37) e um orifício com uma vedação parcial de formato específico. A vedação consiste de dois cones de tamanhos diferentes, ou do mesmo tamanho, (figura 4.38) opostos um ao outro e fixados por suas bases (bicone). Se os
25 tamanhos forem diferentes, o cone menor obstrui em parte o orifício da aba, ao passo que o maior serve como uma tampa

protetora na extensão da curvatura circular da aba. A estrutura de bicone é, por exemplo, ligada pela ponta do cone menor a um suporte disposto através do orifício da aba. Como alternativa, todo o bicone, ou parte dele, pode girar em torno do eixo definido pela
5 linha que atravessa os dois vértices. De preferência, apenas o cone maior (na extensão da curvatura circular) gira em torno do eixo. Como alternativa, a superfície cônica do cone na extensão da curvatura circular é equipada com padrões (pás e/ou aletas) que fazem com que ele gire pela ação do fluxo ascendente do tubo
10 externo. O fluxo central do ciclone do tubo externo do núcleo é separado e acelerado pelo cone. O vácuo gerado pela separação e aceleração aspira os grânulos torrados, que deixam o último ciclone do tubo interno do núcleo, e, então, os conduz por uma distância substancial. A parte móvel da estrutura de bicone gira
15 pela ação do fluxo, permitindo a expulsão mais eficiente dos grânulos. A presença do bicone impede que as partículas fluam de volta ao último ciclone do tubo interno. A gaseificação dos grânulos ocorre no tubo externo do núcleo do reator, seja na fase dinâmica nos diferentes fluxos do ciclone do tubo
20 externo ou na fase estática no leito fixo após o acúmulo na base do tubo externo.

Todos os elementos que atravessam o espaço entretubos:

– tubos que alimentam os ciclones do
25 tubo interno do núcleo do reator com CO₂, H₂O e outros gases;

– guias de ondas que transmitem micro-ondas dentro dos ciclones (quando os magnétrons são usados como fontes de micro-ondas);

– saídas dos bocais de saída dos ciclones do
5 tubo interno;

são perfilados aerodinamicamente para não interromper o fluxo dos gases. Em uma concretização específica, os elementos no espaço entretubos são cobertos por estruturas perfiladas estacionárias orientadas de modo a não perturbar a
10 orientação dos fluxos. Esses perfis, ou estruturas perfiladas, são paralelos ao fluxo das diferentes regiões do ciclone formado pelo tubo externo do núcleo do reator. Em uma concretização preferida, as estruturas perfiladas são segmentos pequenos capazes de deslocar diferentes condutos, que são orientados da
15 melhor forma para os fluxos das diferentes regiões do ciclone do tubo externo do núcleo do reator. As estruturas perfiladas, por exemplo, são estruturas retangulares ou trapezoides menores, cujo comprimento pode variar de 0,5 cm a 1 m com um corte transversal no formato da asa de uma aeronave ou de uma gota de
20 água. Cada estrutura perfilada compreende um pino-pivô oco em paralelo ao comprimento do retângulo ou trapézio, permitindo que ele seja disposto nos diferentes condutos que atravessam o espaço entretubos. De preferência, o pivô é excêntrico em relação ao centro de gravidade de modo a permitir a orientação rápida e
25 estável nos diferentes fluxos. Em geral, todos os formatos perfilados aerodinâmicos que facilitam os fluxos dos gases ou

fluidos podem ser usados para formar estruturas perfiladas. Todos os elementos que atravessam o espaço entretubos podem ser perfilados por elementos aerodinâmicos móveis.

Os bocais horizontais de saída de gás dos
5 ciclones do tubo interno entram no espaço entretubos munidos de estruturas perfiladas móveis ou estacionárias. Os bocais terminam próximos à parede do tubo externo do núcleo do reator tangencialmente a qualquer orientação descendente. A distância entre as saídas dos bocais e a parede do tubo externo é entre 0 e
10 95% da distância entre os dois tubos que formam o núcleo do reator. Sobre a saída do bocal, uma estrutura perfilada é ligada à parede do tubo externo do núcleo do reator de modo que a borda de orientação da estrutura seja direcionada para cima de modo a orientar o fluxo que sai do bocal para baixo no mesmo ângulo. Os
15 fluxos de gás que deixam os bocais horizontais são, portanto, organizados como um vértice em correntes descendentes giratórias. O vértice ataca o leito de grânulos advindo do tubo central e depositado na base do tubo externo. Nessa altura, ocorre uma gaseificação significativa pelo ataque de gases, que penetra o
20 leito em profundidade para erguer-se em um fluxo central que conduz os grânulos mais leves.

No entanto, quando o leito de grânulos é muito grande, o turbilhão não é capaz de atravessar o leito todo. Para permitir que ele ataque os grânulos depositados mais cedo, uma
25 peneira, cujos poros são calibrados, é opcionalmente disposta em toda a parede do tubo externo definida pela região entre o último

ciclone do tubo interno e a base do tubo externo (figura 5.39). O tubo interno como um todo pode ser peneirado em consideração da perda de alguma energia cinética do turbilhão; em contrapartida, a área peneirada pode ser reduzida para diminuir a
5 perda de energia cinética do turbilhão.

Para diminuir a perda de energia cinética do turbilhão, a peneira pode ser feita de uma chapa de material lisa com furos regulares ou pode ser feita de modo que a estrutura mais interna do núcleo do reator (isto é, a primeira em contato
10 com o turbilhão) seja orientada no sentido de rotação do turbilhão (mais ou menos em paralelo à estrutura perfilada ligada ao tubo externo que serve para orientar a rotação do turbilhão).

Na altura do orifício do cone do tubo externo, a peneira é organizada como um cone ascendente rumo ao tubo
15 interno (figura 5.40). A estrutura da peneira do cone mais profundo do núcleo do reator (o primeiro em contato com o turbilhão) é paralela à direção principal (comprimento) do tubo externo ou invertida em relação à peneira da parede do tubo externo do núcleo do reator. O cone-peneira é encerrado em sua
20 extremidade, seja pela peneira em si ou por uma parte de bicone (figura 5.41) (cones do mesmo tamanho) esférica, oval ou de qualquer formato que favoreça o fluxo dos fluidos.

À medida que se aproxima da altura do leito de grânulos torrados, o turbilhão penetra abaixo do leito através da
25 peneira com as partículas mais finas (menores do que os poros da peneira) e gaseifica as partículas no fundo do leito; em seguida, o

turbilhão forma uma coluna de fluxo ascendente em torno e dentro do cone-peneira de modo a erguer-se no centro do tubo externo do núcleo do reator. Parte do gás e das partículas escapa pelo orifício do cone do tubo externo do núcleo e é recuperada
5 por meio de tratamentos posteriores.

Em certas concretizações, uma parte do tubo externo, definida pela região entre o último ciclone do tubo interno e a base do tubo externo, é perfurada com ranhuras de largura entre 50 microns e 5 mm e profundidade entre 100
10 microns e 2 cm. Em uma concretização preferida, as ranhuras têm 500 microns de largura e 2 mm de profundidade. Na parte cilíndrica do tubo externo, as ranhuras são paralelas ao sentido de rotação do turbilhão (mais ou menos paralelas à estrutura perfilada ligada ao tubo externo para orientar a rotação do
15 turbilhão). Na parte cônica do tubo externo paralelo, as ranhuras encontram-se ou nas duas direções (em paralelo ao sentido de rotação do turbilhão e perpendiculares a ela) ou ausentes. Quando à peneira, as ranhuras podem reduzir a energia cinética do turbilhão (embora a energia local nas ranhuras seja aumentada
20 pelo efeito Venturi). Todo o tubo interno pode ser perfurado, mas, para limitar as perdas de energia, é preferível limitar a superfície perfurada. Em certas concretizações, a presença das ranhuras é combinada com a peneira. Quanto à peneira, as ranhuras permitem que o turbilhão passe para baixo do leito de partículas;
25 porém, as partículas conduzidas costumam ser mais finas.

2.3 Em certas concretizações, um rotor composto por uma cesta pode receber os grânulos que deixam o último ciclone que compreende o tubo interno do gaseificador. Em uma concretização preferida, encontramos uma cesta anelar (figura 5.42) com uma cavidade no centro (abertura) (figura 5.43) em um pino (figura 5.44) que une o centro da abertura no cone do último ciclone do tubo interno e a base do FBCB_dc. O pino é, por exemplo, ligado por uma cruz ou uma barra disposta através da abertura da aba que encerra o último ciclone do tubo interno do reator. O cesto é ligado ao pino por um ou mais impulsores dispostos (figura 5.45) entre as paredes da abertura do cesto, permitindo, assim, que ele gire em torno do pino. De preferência, a estrutura dos impulsores é projetada para que o fluxo ascendente no tubo externo do FBCB_dc faça com que o cesto gire no sentido de rotação do turbilhão gasoso no tubo externo. Como alternativa, a abertura do cesto é coberta com uma tampa telada na forma de um bicone, permitindo que os grânulos que saem do ciclone sejam direcionados do estágio superior para dentro do cesto sem perturbar o fluxo ascendente.

Como alternativa, a aba de saída do último ciclone do tubo interno do FBCB_dc é munida de um sistema de pás que forma condutos rumo ao espaço entretubos sobre o cesto. Esses condutos são organizados em torno de um pequeno cilindro telado (figura 5.46). O cilindro telado, formado por hastes metálicas verticais dispostas a vários milímetros umas das outras (figura 5.47) permite a formação do fluxo ascendente no ciclone e

a filtragem dos grânulos transportados pelo turbilhão do ciclone e o sentido dele através dos condutos (figura 5.48-5.49) rumo ao cesto anelar. Este sistema de cilindro telado vertical pode ser adaptado para a saída de todos os ciclones. Pela ação das micro-ondas, as correntes induzidas nas hastes fazem com que arcos elétricos catalisem, em suas proximidades, a síntese do CO_2 e do H_2 . Em certas concretizações, uma de cada duas hastes metálicas é isolada eletricamente do suporte e as outras são aterradas. O cilindro telado pode ser estendido com o cilindro de fluxo ascendente do ciclone inferior (figura 5.50a). Em certas concretizações, o cilindro de fluxo ascendente pode ser substituído por um cone pequeno (figura 5.50a).

A borda externa do cesto anelar pode ser munida de pás com a mesma inclinação que as estruturas perfiladas dispostas na parede do tubo externo para orientar o turbilhão. As pás na parede externa do cesto e os impulsores da abertura permitem que o cesto gire a uma velocidade próxima a do turbilhão. A força centrífuga resultante impede que o leito de carvão seja comprimido na base do reator. Em certas concretizações, as pás na parede externa são complementadas ou substituídas por pás com a mesma curvatura dispostas na borda externa do cesto e direcionadas rumo ao interior do cesto (figura 5.51). Essas pás servem para girar o cesto pela ação do turbilhão do tubo interno e para redirecionar uma parte do fluxo do turbilhão rumo ao interior do cesto para uma gaseificação mais eficaz. As paredes do cesto são produzidas, por exemplo, como

uma peneira com poros calibrados ou como uma chapa de metal, ou qualquer outro material, perfurada por vários orifícios calibrados. As paredes externas dos cesto são retas ou curvadas para fora ou para dentro de acordo com as velocidades de rotação atingidas pelo rotor e com a potência do redirecionamento dos gases rumo ao interior do cesto nas diferentes concretizações.

2.4 Em uma concretização específica do reator FBCB_dc descrito no ponto 2.2, com exceção da estrutura em T (figura 6.30) localizada na altura da aba (figura 6.17) que encerra a câmara de combustão, todas as estruturas em T são substituídas por um tubo oco ligado ao orifício das abas no ciclone dentro da aba (figura 6.46). Como alternativa, o tubo é estendido no ciclone superior por um cilindro formado por hastes verticais dispostas a vários milímetros umas das outras (figura 5.47). Um sistema de pás forma condutos que levam ao ciclone inferior (figuras 5.48-5.49). Esses condutos são organizados em torno do tubo e do cilindro de hastes verticais. Dessa forma, os fluxos ascendentes dos diferentes ciclones do tubo interno do núcleo unem-se um com os outros e são descarregados rumo ao espaço entretubos pela estrutura em T da aba que encerra a câmara de combustão. Nesta última configuração, removendo o bicone que obstrui em parte a última aba do tubo interno do núcleo do reator ou substituindo-o por um cilindro ou um cone oco (uma estrutura cilíndrica telada, figura 5.46), todos ou alguns dos fluxos ascendentes do ciclone formados pelo tubo externo das juntas do núcleo com o fluxo ascendente dos ciclones do tubo interno do

núcleo. Nestas configurações, algumas das partículas que deixam os diferentes ciclones do tubo interno são recuadas para dentro dos ciclones, possibilitando uma gaseificação maior às suas alturas. O fluxo ascendente do tubo externo, que não ultrapassa o tubo interno, subirá ao longo do tubo interno do núcleo do reator. Todas as situações intermediárias em que alguma das estruturas em T é removida são possíveis para unir os fluxos ascendentes dos ciclones contínuos. Neste tipo de configuração, a alimentação de gás tangencial de certos ciclones do tubo interno pode ser feita com gases que circulam no tubo externo do reator. Por exemplo, os ciclones, cujas estruturas em T são substituídas por um cilindro curto, podem ter ao menos um tubo de alimentação de gás tangencial que abra na altura da parede do tubo externo do reator voltada para o sentido de rotação dos gases de modo que eles entrem no referido tubo de alimentação. O tubo de alimentação de gás volta ao ciclone do tubo interno em uma direção tangencial ao tubo interno de modo a permitir a injeção dos gases atingindo a parede do ciclone para induzi-los a uma rotação dentro do ciclone no mesmo sentido que o turbilhão do tubo externo.

Em geral, os ciclones usados no gaseificador têm uma carga tangencial para gases e uma carga longitudinal para grânulos e gases advindos do estágio superior. O tubo interno do reator é, portanto, composto por uma série de ciclones sobrepostos e conectados que permitem que os grânulos submetidos à gaseificação sejam transmitidos para ciclones posteriores.

2.5 Em uma concretização específica, pelo menos um dos ciclones do tubo interno do núcleo do reator é equipado com um elétrodo de mola helicoidal ligado a um elétrodo anelar para permitir o estabelecimento de arcos elétricos transmitidos ao longo do elétrodo helicoidal (Figura 6.52).

Em uma concretização específica, o ciclone compreendendo o elétrodo é o último ciclone do tubo interno do núcleo do reator e a aba em seu fim tem um formato cônico ou circular. As paredes deste ciclone são feitas de um material isolante de eletricidade. Os condutos de entrada para partículas e gases e o cone ou cilindro ao contrário na parte superior do ciclone é feito de metal ou de um material condutor de eletricidade. A parte superior do ciclone forma um elétrodo, que é aterrado e/ou conectado a um potencial negativo. O elétrodo de mola é disposto perto da parede do reator. A base da mola termina com uma estrutura anelar para encerrar o última volta em torno de si (figura 6.53). A outra extremidade da mola é curvada de modo a voltar ao centro do espiral da própria mola para formar um pino central (figura 6.54). A mola é disposta na parte cônica do ciclone por sua extremidade que tem a estrutura anelar. De resto, a mola encontra-se a uma distância entre 0,5 mm e 2 cm a partir do elétrodo na parte superior do ciclone. A haste axial da mola estende-se a partir do ciclone através da abertura da aba inferior. Esta haste central é conectada fora do reator a um sistema manual ou automático que permite que a mola seja acionada comprimindo-a, de modo a encurtá-la, ou esticando-a, de modo a

estendê-la. Por exemplo, a haste é conectada a outra haste perpendicular feita de um material isolante de eletricidade. A haste perpendicular estende-se a partir do reator e é, por exemplo, conectada a um servoacionador ou acionador elétrico que permite
5 que a mola seja comprimida ou esticada. Ou a mola é conectada a um gerador de corrente alternada, contínua ou pulsante de alta tensão capaz de gerar 100 V a 1.000 kV. A mola é mais ou menos estivada ou comprimida de acordo com a tensão elétrica aplicada, e também com a velocidade e a temperatura dos gases que
10 circulam no ciclone. Esta compressão ou extensão faz com que a distância entre a mola e o eletrodo no vértice do ciclone e a distância entre as voltas do espiral da mola variem, permitindo o ajuste do tipo de arco planado obtido em relação ao fluxo de gás e partículas e a parâmetros físico-químicos no ciclone. Pela ação do
15 potencial elétrico, os arcos formam-se entre o eletrodo aterrado e a mola. Esses arcos elétricos são, então, impelidos rumo ao eletrodo anelar pelo fluxo que gira dentro do ciclone. Esses arcos interagem com as partículas e os gases que atravessam o ciclone, criando moléculas reativas (moléculas carregadas e de radicais
20 livres), que interagem com umas com as outras e com os grânulos para formar CO e H₂, ao mesmo tempo em que limitam a produção de metano. Durante a formação dos arcos elétricos, a variação na circulação elétrica nas molas causa variações no campo magnético induzido pelo solenoide da mola. Tais variações
25 no campo magnético aumentam a energia cinética das moléculas polares e carregadas, tornando-as mais reativas.

Em certas concretizações, o metano e o vapor de água são injetados neste estágio dos ciclones GlidArc de modo a promover as reações r3 e r4.

Em certas concretizações, as micro-ondas são
5 injetadas no ciclone. Pela ação das micro-ondas, a energia cinética das moléculas carregadas sob o efeito dos arcos (além das moléculas dipolares) aumenta a temperatura do gás, tornando-a ainda mais reativa, e correntes induzidas na mola acionam arcos
10 elétricos entre o elétrodo espiral e o elétrodo na parte superior do ciclone. Pela ação das micro-ondas, o ciclone com um elétrodo helicoidal pode operar no modo GlidArc sem ser submetido à tensão elétrica.

2.6 Em certas concretizações, pelo menos três ciclones, cada deles um compreendendo um elétrodo helicoidal
15 (figura 6.55), são organizados de modo a lembrar uma rosa (figura 6.57) em torno da abertura da aba do último ciclone do tubo interno do FBCB_dc (figura 6.58). Os elétrodos helicoidais desses ciclones são construídos de acordo com o mesmo princípio que o elétrodo descrito no ponto 2.5; porém, com menor escala de
20 produção. De fato, os tubos que constituem os ciclones têm um diâmetro entre 20 e 400 mm terminando em um cone aberto. Os pinos dos elétrodos ou são conectados individualmente ao exterior do reator, conforme descrito no ponto 2.5, ou todos os pinos dos elétrodos são conectados a uma estrutura estelar (figura 6.56),
25 permitindo que eles sejam acionados ao mesmo tempo. Em certas concretizações, a estrutura estelar tem uma cavidade no centro,

permitindo que o pino de rotação do cesto descrito no ponto 2.3 a
atravesse. O pino oco que começa na estrela é conectado a um
pino isolante de calor perpendicular. Este pino permite que todas
as molas dos ciclones sejam comprimidas ou esticadas ao mesmo
5 tempo. A abertura do elemento róseo definido pelos ciclones
GlidArc forma a passagem para o fluxo ascendente comum ao
ciclone apresentado pelo tubo externo e os ciclones sobrepostos
do tubo interno. Na parte superior de cada ciclone de arco de
corrente, um tubo de alimentação de gás é implantado
10 tangencialmente à parede do ciclone e abre-se no espaço
entretubos oposto ao turbilhão do tubo externo perto de sua
parede (figura 6.64). A estrutura do tubo de alimentação permite
que alguns dos gases do turbilhão do tubo externo penetrem nos
ciclones do elemento róseo, criando um turbilhão em cada um
15 deles. A parte superior de cada ciclone é encerrada por tampas
(figura 6.58) perfuradas no centro pela passagem de um cilindro
oco formando um tubo na parte superior do ciclone (figura 6.59).
Este cilindro permite que o fluxo ascendente no centro do ciclone
GlidArc seja recuperado para que possa ser conduzido ao espaço
20 entretubos. A parte do cilindro localizada no espaço entretubos é
curvada e é direcionada rumo à parede do tubo externo do
FBCB_dc de modo que o orifício de abertura encontra-se perto da
parede do tubo externo. Em uma concretização, o tubo de fluxo
ascendente dos ciclones de GlidArc é curvado para distribuir os
25 gases no sentido de rotação do turbilhão gasoso do tubo externo
do reator. Em uma concretização preferida, o tubo de fluxo

ascendente dos ciclones GlidArc é curvado para distribuir os gases perpendicularmente ao sentido de rotação do turbilhão gasoso no tubo externo do reator. Nesta configuração, os gases do fluxo ascendente são aspirados pelo vácuo criado no turbilhão de
5 acordo com a lei de Bernoulli.

A parte da tampa dos ciclones GlidArc localizada ao lado da aba do último ciclone do tubo interno é perfurada com fendas (figura 6.60) circundadas por pás oblíquas (figura 6.61) para permitir que os gases entrem no ciclone de arco
10 de corrente, induzindo uma rotação aos referidos gases no mesmo sentido que à do turbilhão do ciclone. As fendas têm um tamanho suficiente para permitir a passagem dos grânulos advindos do estágio superior. Tais fendas são conectadas por um canal (figura 6.63) para os condutos de saída de gás e grânulos do ciclone do
15 estágio superior, em que esses condutos são organizados em torno de um cilindro pequeno de colunas verticais dispostas para deixar o orifício da aba do ciclone superior. A tampa dos ciclones GlidArc é feita de um material condutor de eletricidade para formar um ou dois elétrodos, que são aterrados e/ou têm potencial
20 negativo.

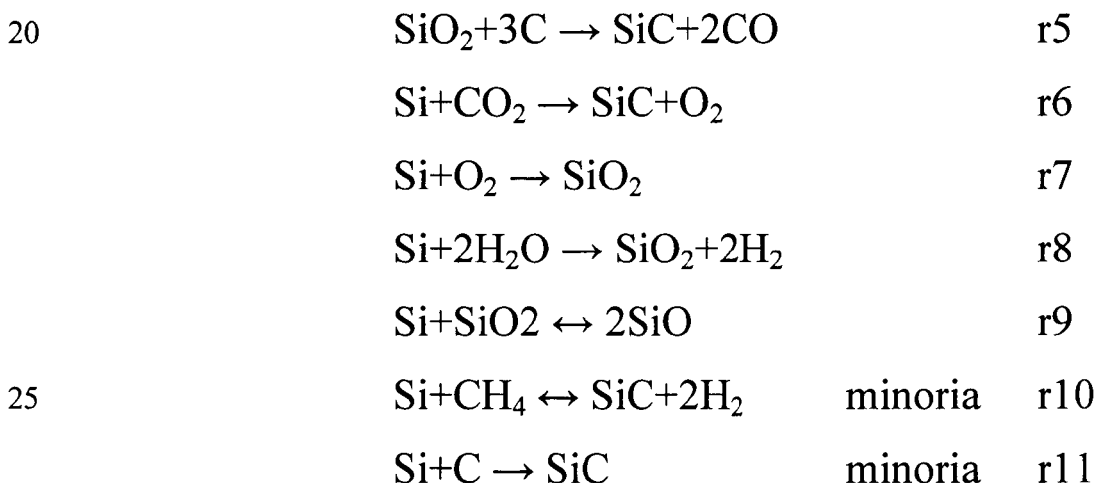
2.7 Os grânulos usados para gaseificação podem conter partículas de alumínio, óxido de alumínio, magnésio, óxido de magnésio ou qualquer outro metal capaz de atuar como um redutor. Pela ação das micro-ondas, as correntes induzidas nas
25 partículas condutoras geram arcos elétricos entre partículas, criando assim, por sua passagem, radicais livres e elementos

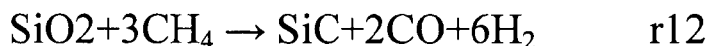
carregados. Os radicais livres e os íons formados reagem uns com os outros e com o carbono presente no reator para produzir CO e H₂. Os átomos de alumínio reduzidos pelos arcos elétricos e/ou os átomos de magnésio fragmentam as moléculas da água para liberar o H₂ ou fragmentam as moléculas de CO₂ para liberar o C. Cascadas de reações mais menos complexas resultam na formação de CO e H₂. Os óxidos de alumínio e magnésio produzidos são gerados novamente durante a reação em alumínio e magnésio pela ação dos arcos elétricos e da radiação UV dos plasmas induzida pelos arcos elétricos e as micro-ondas no reator.

Em outra concretização, as partículas de SiO₂ (silício) ou uma mista de partículas de Si (sílica) e SiO₂ (silício) finamente moídas de tamanho uniforme ou não entre 1 nanômetro e 2 mm são adicionadas aos grânulos do gaseificador.

Tais partículas com base em sílica produzem, pela ação do calor, monóxido de carbono e carbetto de silício SiC, um composto inerte capaz de sustentavelmente reter carbono, melhorando o balanço de poluição do processo de gaseificação.

De acordo com a reação:





Ou qualquer combinação das reações de r5 a r19.

Essas partículas, com base em silício ou sílica, podem ser acrescentadas na forma de partículas finas (menores do que 500 microns) nos gases injetados na gaseificação.

O SiC obtido após a gaseificação pode servir como um catalisador para as sínteses de Fischer-Tropsch.

O SiO₂, SiO e SiC resultantes dessas reações são inertes a temperatura ambiente e representam, na forma do SiC, um meio para reter o carbono advindo do CO₂ e armazená-lo.

2.8 No vértice do tubo externo do FBCB_{dc}, um tubo é encaixado entre o tubo interno e o tubo externo do reator (figura 4.65). Ele serve para guiar, no fim do curso de deslocamento, o fluxo ascendente ao longo do tubo interno do núcleo (guia de fluxo). A guia de fluxo é disposto levemente atrás dos dois tubos interno (figura 4.33) e externo (figura 4.34) do núcleo. As pás (figura 4.66) são dispostas entre o tubo externo e o guia de fluxo com uma inclinação semelhante à da estruturas perfiladas disposta na parede do tubo interno acima dos bocais de saída dos ciclones. A câmara de combustão que leva ao tubo interno é posicionada acima do núcleo do reator e a base dela (figura 4.67) é ligada à parte superior dos tubos externo e tubo interno do reator. A base do reator forma, com o tubo interno, uma carcaça circular separada por uma cortina de pás inclinadas

de uma segunda carcaça formada pelo tubo externo. Ao subir entre o tubo interno e o guia de fluxo, os gases do fluxo ascendente são aquecidos na câmara formada pelo tubo interno e a base da câmara de combustão. Os gases aquecidos atravessam a
5 cortina de pás onde um membro descendente giratório é transmitido a eles no mesmo sentido de rotação em que os gases são impulsionados na câmara de combustão. Os gases, então, entram na região formada pelo tubo externo e pelo guia de fluxo para formar um turbilhão descendente giratório ao longo da
10 parede do tubo externo do tanque.

2.9 Em uma concretização específica, as micro-ondas são impulsionadas no tubo externo do núcleo do reator. É possível injetá-las, por exemplo, pelo tubo interno na região cilíndrica do tubo externo a partir de pelo menos uma fonte de
15 micro-ondas, de preferência um magnétron.

2.10 Em certas concretizações, misturas de gases compostas por todas as proporções possíveis (CO_2 , H_2O , CH_4) são injetadas tangencialmente em relação à parede do tubo externo no espaço entretubos.

20 2.11 Em uma concretização específica, a radiação solar converge ou é refletida em uma imagem na superfície do núcleo do reator. A imagem refletida tem um tamanho menor ou igual ao diâmetro do núcleo do reator para que toda a energia refletida seja absorvida pelo reator e a região que
25 recebe a radiação é preta e o revestimento opcionalmente contém partículas quânticas para impedir o reflexo da radiação UV. A

convergência ou o reflexo podem, por exemplo, ser atingidos por meio de espelhos planos, esféricos ou ovais ou por vários espelhos planos ou esféricos organizados em uma estrutura plana, esférica ou oval. Como alternativa, é possível usar uma lente 5 convergente simples ou uma lente de Fresnel para fazer com que os raios de luz convirjam. Em geral, o reflexo ou a convergência da radiação solar no reator podem usar qualquer tipo de forno solar ou meio de reflexão de luz para refletir a luz do sol na superfície do reator. As regiões que recebem a radiação solar são 10 feitas de metal ou ligas de metal, revestidas com metal ou ligas de metal capazes de resistir a altas temperaturas de cerca de 1.000° C e, de preferência, acima de 2.000° C.

2.12 Em outra concretização, o tubo externo do FBCb_dc é munido de pelo menos uma janela de quartzo ou 15 qualquer outro material transparente resistente a temperaturas de 1.500° C. A radiação solar converge ou é refletida em uma imagem dentro do núcleo do reator (pela janela) por um dos processos descritos em 2.11. As imagens são de tamanho menor ou igual ao diâmetro da janela para que toda a energia solar 20 penetre no interior do reator. Em certas concretizações, a luz do sol pode ser injetada, seja por reatores com um núcleo de tubulação simples ou composta, diretamente na câmara de combustão.

Em outras concretizações, a radiação solar é 25 injetada na câmara de combustão diretamente usando uma lente de Fresnel de grande diâmetro (entre 50 cm e 10 m). A lente faz

com que a radiação solar convirja no centro da câmara de combustão.

2.13 Depois de passar pelo último ciclone, os grânulos são depositados na base do reator ou no cesto para concluir sua gaseificação. A base do reator corresponde à última parte do tubo que forma o núcleo de tipo FBCB ou o tubo externo dos reatores do tipo FBCB_dc. A abertura da base do reator é obstruída por uma peneira (figura 7.68) cujos orifícios são grandes o bastante para permitir que cinzas e partículas de carvão mínimas (da ordem de vários milímetros) a atravessem. O tamanho dos orifícios é entre 500 micrômetros e 0,5 mm. A peneira é móvel e pode ser abaixada ou erguida e girada, seja por ativação manual, por um sistema de parafuso mecanizado, por um sistema acionador pneumático ou hidráulico, por um sistema de mola e parafuso ou por qualquer outro sistema que permita uma combinação dos três movimentos a serem realizados. Em certas concretizações, o sistema para permitir que a peneira mova-se transmite ao mesmo tempo movimentos de vibração ascendente rápidos para remover as cinzas e evitar a compressão do leito de grânulos. A peneira da base também pode ser conectada a uma fonte ultrassônica para escalonar as cinzas e promover a gaseificação pelos motivos supramencionados. Em geral, o reator inteiro pode ser conectado a fontes ultrassônicas de pulso contínuo ou alternado para facilitar a passagem de fluxos pelas ranhuras, pela peneira ou pelo leito de grânulos e promover a gaseificação. Depois da peneira, uma estrutura semicônica (figura

7.69) permite que as cinzas sejam despejadas em um tanque de cinzas (figura 7.70). O tanque e a estrutura semicônica são separadas por um sistema de isolamento, por exemplo, uma válvula pneumática ou qualquer outro sistema que permita que o tanque de cinzas seja isolado da estrutura cônica. Um tubo conecta a estrutura semicônica à entrada de um ciclone de separação de gás/partículas (figura 7.71). Como alternativa, uma bomba ou um ou uma turbobomba entre a estrutura semicônica e o ciclone de separação e permite que a saída de gás do reator seja regulada. Em certas concretizações, o ciclone de separação é um ciclone com uma carga tangencial e uma descarga axial, mas qualquer outro tipo de ciclone pode ser usado, incluindo sistemas baseados em centrífuga ou filtragem.

A saída de cinzas do ciclone de separação leva a um segundo tanque de cinzas. Os dois tanques são conectados por uma rosca helicoidal que permite a evacuação e a recuperação das cinzas. Em certa concretização, a saída de cinzas do ciclone de separação leva ao mesmo tanque de cinzas que o gaseificação (figura 7.70).

Quando usamos biomassa para produzir carvão, a cinza obtida é rica em potassa, que é usada para saponificar óleos vegetais, a fim de produzir ésteres e glicerol (princípio da produção de sabão). Essas reações podem ser produzidas no reator de forno solar/micro-ondas (F_{smo}) descrito no ponto 1.3.

A reação de esterificação pode ser dividida, por exemplo, em quatro etapas:

1) saponificação de gorduras e óleos;

2) separação de glicerol e ácidos graxos saponificados;

3) ativação dos ácidos graxos saponificados, por exemplo, por uma reação com um haleto de fósforo (X_3P) ($X = I, Br, Cl, F, \text{etc.}$) para formar $RCOOPX_2$ ou $RCOX$ (fosfodiéster ou haleto alcaloide);

4) reação entre o álcool e o éster ativado para formar um éster de álcool.

10 Como alternativa, a reação de ativação pode ser feita com um ácido forte como o HX pela formação de haletos de álcool.

2.14 Em uma concretização específica, o último ciclone do núcleo interno (tubo interno) do reator de ciclone
15 termina com um cone ao contrário fechado (figura 12.89). Tubos que iniciam na parede do cone estendem-se em um sentido perpendicular ao eixo principal do ciclone (figura 12.88), que chamaremos de poços de aspiração neste documento. De preferência, incluímos três poços de aspiração um a 120° em
20 relação ao outro. Oposto a poço de aspiração oposto e perpendicular ao sentido deles, incluímos um queimador (12.87) que permite que gases de pirólise ou gases adicionais sejam queimados para que os gases de combustão tenham um sentido perpendicular á abertura do poço, aspirando, assim, as partículas
25 que chegam à base do último ciclone rumo às chamadas do queimador pelo efeito de Bernoulli. Além disso, a direção das

chamas dos queimadores, mais ou menos paralela à direção do turbilhão, mantém o turbilhão gasoso criado no tubo externo do reator de dois núcleos. Sendo assim, o sistema poço de aspiração-queimador permite que as cinzas que caem na base do último ciclone do tubo interno sejam extraídas e que as últimas partículas de carbono, que não foram reagidas, sejam gaseificadas.

2.15 Em uma concretização específica, os processos de arco de corrente elétrica (GlidArc) usados para reduzir várias formas químicas indesejáveis, que podem se formar durante a gaseificação, como o H_2S ou o NO_3 etc., incluem um sistema de elétrodos, composto de um impulsor (figura 13.93) ou de um rotor com pás giratórias e uma peneira estacionária disposta como uma cruz (figura 13.92) ou uma estrela de vários braços, introduzido em vários locais dos reatores ciclônicos ou Tb_smo . Cada braço da peneira é conduzido a um potencial elétrico, contínuo ou alternado, entre 100 V e 1.000 kV, ao passo que o impulsor ou o rotor de pás é aterrado. Ao girar pela ação dos gases em circulação nos reatores, cada pá do impulsor ou rotor passa oposta a uma barra da cruz ou estrela. A distância entre o rotor ou impulsor e a cruz ou estrela é tal que um ou mais arcos elétricos possam se formar entre a referida pá e uma barra da cruz ou estrela. Afastando-a da barra, a pá amplia o arco elétrico, conferindo, assim, as propriedades do arco de corrente a ela, gerando plasmas sem equilíbrio. O cenário da formação e da ampliação dos arcos elétricos ocorre novamente a cada passagem de uma pá de rotor ou impulsor oposta a uma barra da estrela ou

cruz. Em certas concretizações, a conexão à terra e ao potencial elétrico podem ser invertidas entre o rotor ou o impulsor e a estrela ou a cruz.

Em certas concretizações, discos dispostos na
5 altura do rotor ou impulsor (figura 13.94) e/ou da cruz ou estrela permitem o aumento da eficiência das reações catalisadas.

O dispositivo GlidArc de impulsor/rotor e a cruz/estrela pode ser disposto em vários locais no processo, em particular na altura dos condutos em T para a expulsão dos gases
10 ascendentes dos ciclones do tubo interno do reator ciclônico ou depois do reator de gaseificação na saída do ciclone de separação entre o gás e as cinzas.

3.1 Os gases (CO_2 , H_2O , CH_4 , O_2) que alimentam o reator de gaseificação ciclônico podem ser
15 comprimidos, acelerados e aquecidos por diferentes processos usando bombas e fornos convencionais. No entanto, em um processo específico, todos os gases que alimentam o reator de gaseificação ciclônico são aquecidos e pressurizados por turbobombas de forno solar/micro-ondas.

20 Uma turbobomba de micro-ondas/solar (Tb_smo) é composta por um tubo (figura 8.72) de diâmetro entre 1 cm e 5 m e comprimento entre 10 cm e 5 m. As dimensões da Tb_smo dependem da natureza e do uso dos gases comprimidos e aquecidos. De preferência, a Tb_smo tem diâmetro no ordem de
25 20 cm e comprimento na ordem de 1,5 m para comprimir e aquecer os gases destinados aos ciclones. Elas têm diâmetro na

ordem de 10 cm e comprimento na ordem de 70 cm para aquecer e comprimir gases destinados aos queimadores da câmara de combustão. O tubo que constitui a Tb_smo pode ser confinado em uma câmara transparente a vácuo ou conter gases com as mesmas
5 propriedades que os da câmara de confinamento de um F_smo.

Em uma concretização preferida, a entrada do tubo da Tb_smo abre-se na câmara de confinamento transparente para que os gases que limitam a perda de calor possam penetrar no tubo do reator Tb_smo.

10 A entrada do tubo do reator Tb_smo é, no entanto, fechada por um corpo poroso que requer vários contatos entre o gás que penetra no tubo do reator da Tb_smo e a malha do corpo poroso. O corpo poroso, feito de preferência de cerâmica, tem uma grande superfície de troca e age como um absorvedor de
15 radiação solar, melhorando a inércia térmica do reator da Tb_smo. O corpo poroso, por exemplo, é do tipo monólito com vários canais em forma de favo, por exemplo, feito de cordierita ou uma espuma cerâmica porosa feita de carbetto de silício SiC. Nesta
concretização, os gases de efeito estufa, como o CO₂, o NH₄ ou o
20 H₂O, são os preferidos para serem adotados como gases para limitar as perdas de calor. O gás para limitar as perdas de calor é injetado na câmara de confinamento do lado oposto à abertura do tubo do reator. Os gases, então, circulam na câmara de confinamento transparente isolando a parede do tubo do reator da
25 Tb_smo da parede da câmara de confinamento transparente. Dessa forma, o gás captura a radiação infravermelha advinda da

parede do tubo do reator da Tb_smo aquecida pela radiação solar e, internamente, pela pelas micro-ondas, aquecendo a si mesmo à medida que segue para a entrada do tubo do reator. O gás, então, entra no tubo do reator da Tb_smo através do corpo poroso, onde
5 é aquecido ainda mais em contato com a estrutura porosa. Em seguida, o gás penetra na parte do tubo do reator para os rotores, onde é acelerado, comprimido e aquecido.

Pelo menos um pino é disposto no centro do tubo. Ele é equipado em duas regiões com rotores, localizadas no
10 primeiro terço (figura 8.73) e no último terço do pino (figura 8.74). Cada região de rotores é composta, por exemplo, por três rotores compreendendo 60 pás dispostas a cada 6° em uma rotação em torno do pino. As pás são mais ou menos inclinadas; porém, a inclinação das pás do rotor do último terço do pino,
15 correspondente ao estágio da turbina, podem ser maiores do que as do primeiro terço, correspondente ao estágio do compressor. Indicamos o número de linhas de rotores para fins meramente ilustrativos; ele é possível diminuí-lo ou aumentá-lo de acordo com a potência ou o tamanho da bomba. O tamanho e a inclinação
20 das pás dependem da pressão a qual a turbina é submetida. O número de pás por rotor é meramente ilustrativo e pode variar de acordo com o tamanho e a potência da Tb_smo. Como alternativa, o pino do rotor é oval (figura 8.75) permitindo que o volume dentro do reator seja diminuído progressivamente ao nível da
25 primeira região de rotor. Nesta mesma região, uma saliência da parede do tubo ou uma curvatura da mesma diminui

progressivamente o corte transversal do pino sobre toda a primeira região de rotor. Na parte atrás da primeira região de rotor, na altura do segundo terço do pino, uma câmara de micro-ondas anelar (Figura 8.76) circunda o pino de rotação dos rotores.

- 5 Em certas concretizações, a câmara anelar é integrada ao pino e gira com ele. A parede da câmara anelar que circunda o pino não é maior do que a oposta ao pino. A parede da câmara anelar oposta ao pino forma, junto com a parede do tubo da Tb_smo, uma passagem através da qual os gases podem penetrar a área
- 10 atrás da câmara anelar. As paredes da câmara anelar são feitas de um material que permite que as micro-ondas sejam refletidas e capaz de resistir a temperaturas elevadas, na ordem de 2.000° C, normalmente ligas de titânio de alumínio, ligas de tungstênio de níquel, aços inoxidáveis, carbonetos revestidos de cerâmica
- 15 vidrosa, cerâmica ou qualquer outro composto suficientemente refratário. Micro-ondas são injetadas na câmara anelar de modo a fazer com que elas reflitam na parede que circunda o pino de rotação com um ângulo adequado para fazer com que elas saltem rumo ao interior da câmara anelar. As micro-ondas são injetadas
- 20 logo depois da parede da câmara anelar oposta ao pino. Elas são produzidas por pelo menos um magnétron. De preferência, quatro magnétrons (figura 8.6) injetam, em uma disposição em cruz, micro-ondas na câmara de micro-ondas anelar. As ondas são injetadas na câmara anelar por meio de guias de ondas (figura
- 25 8.7). Em geral, é possível usar qualquer fonte energética de radiofrequência capaz de ser direcionada pelos guias de onda.

Pela ação das micro-ondas, os gases contidos na câmara anelar passam por um aquecimento significativo, que os dilata e os expelle por meio dos rotores do último terço do pino. Pela ação da passagem de gases no rotor do último terço, o pino começa a
 5 girar, as pás do rotor do primeiro terço do pino impelem os gases rumo à câmara anelar, ao mesmo tempo em que os comprimem devido à contração do corte transversal. Os gases comprimidos e aquecidos pelas micro-ondas na câmara anelar mantêm o movimento por sua expulsão pelas pás dos rotores do último terço
 10 do pino. Na configuração em que os espelhos e as lentes são distribuídos de forma regular ao longo do tubo da Tb_smo, a energia térmica solar é envolvida na compressão de gás somente pela dilatação uniforme causada pelo acúmulo de calor ($PV = NRT$). No entanto, para que o calor térmico solar também seja
 15 convertido em energia de compressão cinética, a superfície do espelho e o tamanho da lente podem ser localmente aumentados na região dos rotores do último terço do pino. A energia solar adicional alimentada neste nível também aquecerá os gases, acelerando a velocidade do pino e, portanto, da compressão.

20 Em certas concretizações, os rotores do primeiro terço do pino podem ser substituídos por um compressor centrífugo. Nesta configuração, o diâmetro do tubo da Tb_smo é aumentado no estágio de compressão para ser capaz de recebê-lo.

A Tb_smo pode servir como uma base para
 25 projetar novas gerações de motores turbojatos usados para movimentar veículos (aéreos, terrestres, marítimos etc.). É

possível aumentar a potência de um reator acrescentando, entre o estágio, ou os estágios de compressão e os estágios de turbina de um reator, uma câmara de micro-ondas anelar contendo guias de ondas para injetar micro-ondas a partir de magnétrons, levando
 5 assim a uma expansão ainda maior dos gases. Esta expansão pode ser aumentada acrescentando água, que seria vaporizada pelas micro-ondas e participaria da propulsão. Este processo permitiria que as consequências da presença da água no combustível fossem limitadas já que a água presente no combustível seria vaporizada
 10 pelas micro-ondas e serviria para a propulsão.

O consumo elétrico dos magnétrons pode ser compensado pela introdução, perpendicularmente ao pino de rotação, de um ou mais magnetos de barra “tesla” (por exemplo, uma barra de 2.5 teslas com uma magnetização orientada
 15 longitudinalmente). As barras de magneto podem ser diretamente as pás de rotor do estágio de compressão, por exemplo. Perpendicularmente ao plano de rotação dos magnetos, uma ou mais bobinas, feitas de fios de cobre ou outros fios de qualquer outro material, e fios supercondutores (por exemplo, uma fita de
 20 nanotubo de carbono etc.) são dispostas dentro ou sobre o tubo da Tb_smo ou do turbojato. A rotação do pino causa a produção de um campo magnético girando perpendicularmente ao plano da bobina, permitindo a produção de uma grande quantidade de corrente elétrica.

25 Como o H₂O tem momentos dipolares elevados (1,85), o aquecimento e a compressão deste gás pela Tb_smo é

5 muito eficaz. Na saída da Tb_smo, os gases aquecidos podem ser diretamente injetados nos diferentes ciclones pelo reator de gaseificação ciclônico. No entanto, como o metano, o CO₂ e o ar têm momento dipolares menores do que a média, de preferência, eles devem ser misturados com vapor de água para serem aquecidos e pressurizados por uma Tb_smo antes de serem injetados nos queimadores da câmara de combustão.

Os gases de pirólise, naturalmente ricos em água, podem ser aquecidos e pressurizados efetivamente por um Tb_smo antes de serem injetados na câmara de combustão.

Uma alternativa para evitar a adição de água ao gás consiste em ionizá-la com descargas elétricas durante seu contato com as micro-ondas.

15 Parte do vapor de água usado nos reatores de gaseificação ciclônicos são produzidos por água evaporada em um forno solar/micro-ondas (F_smo). O resto do vapor de água advém da água contida na biomassa ou produzida durante a combustão na câmara de combustão. A pressão dos gases injetados varia entre 1 e 2.000 atm.

20 3.2 Em certas concretizações, a Tb_smo permite que ciclones de areia ou outro corpo abrasivo, como pedra-pomes empilhado, carbetto de silício ou qualquer outro corpo abrasivo (figura 3.27) seja projetado na entrada tangencial dos ciclones. Esta projeção dos corpos abrasivos permite que as partículas de carvão sofram erodam com bastante rapidez, aumentando a eficácia da gaseificação.

Em certas concretizações, o corpo abrasivo é pré-aquecido entre 200 e 600° C por um F_{smo} antes de ser projetado tangencialmente dentro dos ciclones ou, como alternativa, é misturado com a matéria-prima durante a fase de torrefação ou pirólise de modo a acelerá-la.

3.3 Em certas concretizações, o F_{smo} é dividido em uma parte solar e outra de micro-ondas. A parte solar é disposta como um pente (figura 8.83) para aumentar a eficácia do aquecimento. A montagem dos dentes do pente é conectada a um único tubo contendo fontes de micro-ondas. Em uma concretização mais preferida, os dentes do pente são preenchidos por corpos porosos abrindo-se na câmara de confinamento.

Em certas concretizações, as extremidades do pente levam ao ar livre, permitindo, assim, que o ar seja aspirado e aquecido. O ar aquecido pode ser usado para secar a matéria-prima antes da torrefação ou pirólise.

É possível considerar unidades semelhantes para a Tb_{smo} .

Em certas concretizações, as micro-ondas podem ser acopladas a fontes de radiação infravermelha. Esta segunda fonte de radiofrequências induz movimentos assimétricos nas moléculas. De fato, a energia infravermelha é essencialmente absorvida pelas vibrações das ligações químicas das moléculas. Isso cria, além do aumento na temperatura da molécula, modos de vibração assimétrica ocasionais que geram um momento dipolar

temporário. Dessa forma, moléculas apolares tornam-se temporariamente sensíveis a micro-ondas.

Em certas concretizações, a combinação das micro-ondas e das frequências infravermelhas é usada para
5 aquecer gases como o CO₂ para as várias configurações consideradas.

4.1 Em certas concretizações, o reator de gaseificação ciclônica é inteiramente isolado contra o calor, incluindo o ciclone para a separação do gás e das cinzas após
10 deixarem o reator ciclônico. Esta isolação térmica pode ser obtida, por exemplo, cobrindo todas as partes em contato com o ar ambiente com um produto isolante de calor (lã de rocha, cerâmica etc.).

Em uma concretização específica, o reator
15 ciclônico inteiro é contido em uma câmara calorimétrica ou recipiente térmico, que manterá um vácuo elevado entre as paredes do reator ciclônico e a câmara de confinamento. O vácuo é ou estático, vedando a câmara calorimétrica, ou dinâmica, bombeando o ar contido na câmara calorimétrica. Este
20 bombeamento pode, por exemplo, ser realizado com uma Tb_smo ou uma Tb_smo capaz de ionizar os gases.

4.2 Na saída do reator de gaseificação ciclônico, após a passagem pelo ciclone de separação de poeira e gás, a mistura gasosa composta principalmente por CO e H₂ pode conter
25 CO₂ mais ou menos reduzido. De acordo com ajustes de gaseificação, a composição do gás de saída é (sem incluindo o

valor de água): 37% de CO, 27% de H₂, 7% de CO₂, 6% de O₂ e 1,5% de CH₄. Indicamos estas proporções para fins ilustrativos; elas podem variar significativamente de acordo com o ajuste do aparelho. No entanto, esses valores indicam que as proporções de CO e H₂ podem não corresponder às necessárias para as sínteses de Fischer-Tropsch. Para corrigir desequilíbrios, é possível separar o CO₂ dos outros gases. Podemos usar qualquer método para separar o CO₂ de outros gases, em especial métodos criogênicos.

10 No entanto, esses processos consomem grandes quantidades de energia.

Em uma concretização específica, tiraremos proveito do fato de que o CO₂ tem um coeficiente de solubilização em água ($76,6 \cdot 10^{-3}$ mols/litro a 0° C e 1,013 bares) muito maior do que o do CO ($1,5 \cdot 10^{-3}$ mols/litro a 0° C e 1,013 bares), o do CH₄ ($2,4 \cdot 10^{-3}$ mols/litros a 0°C e 1,013 bares) e o do H₂ ($0,9 \cdot 10^{-3}$ mols/litro a 0° C e 1,013 bares).

Ao sair do ciclone de separação do gás e das cinzas, os gases atravessam um ou mais trocadores de calor, nos quais transferem seu calor para:

- a água;
- o vapor de água;
- o CO₂;
- a mistura de gás de síntese destinada a reagir em um reator Fischer-Tropsch;

- produtos destinados a serem refinados;
- em geral, qualquer produto que requeira calor durante seu ciclo de conversão.

Após ser posta na temperatura ambiente, a
5 mistura gasosa é borbulhada em um tanque de separação contendo
água. O volume de água do tanque pode, a título exemplificativo,
ser entre 10 e 1.000 litros. O volume do tanque pode exceder
1.000 litros para volumes muito grandes de gases a serem
tratados. O tanque é hermeticamente fechado e uma válvula na
10 posição para cima (sobre a água) permite que os gases não-
dissolvidos saiam. Como alternativa, o tanque de separação é
controlado termostaticamente a uma temperatura entre 0 e 35° C.
A injeção de gases no tanque é realizada a uma pressão entre 1 e
100 bares. A temperatura do tanque pode ser menor do que 0° C
15 se a água contiver produtos anticongelantes ou salinos que
permitam uma melhor dissolução (a temperatura pode variar de -
20° C a +35° C).

A água é bombeada a partir do tanque antes de
ser injetada novamente após a desgaseificação. O bombeamento
20 ocorre a uma grande distância do ponto de borbulhagem dos
gases, em uma área onde não há bolhas em suspensão. A taxa de
fluxo da água bombeada pode ser proporcionar à taxa de
borbulhagem dos gases no tanque. Ela pode ser ajustada de
acordo com a proporção de CO₂ na mistura gasosa e a taxa de
25 solubilização do CO₂ para otimizar a dissolução do CO₂ e limitar
a dos outros gases. A proporção de CO₂ dissolvido na água

depende das propriedades físico-químicas da água, em especial o pH e a concentração de sal. De preferência, o pH é básico a fim de aumentar a taxa de dissolução do CO₂. Este pH pode, em especial, ser ajustado com base nas cinzas oriundas da gaseificação do carvão, em geral ricas em potassa. O CO₂ se dissolve com rapidez na água, ao passo que os outros gases passam essencialmente para a parte de ar do tanque. Dependendo da origem da matéria-prima usada para a pirólise, os gases que saem do reator de gaseificação ciclônico são mais ou menos contaminados por NO_x, HS_x, metais pesados, entre outros.

Geralmente, esses compostos têm coeficientes de solubilização na água (ou em certas misturas de solvente) muito altos e, portanto, são dissolvidos durante a borbulhagem em um solvente adequado. Em certas concretizações, a água (ou qualquer outro solvente) bombeada do tanque é tratada por um processo de osmose ou filtragem ao contrário para concentra os diferentes solutos dissolvidos durante a borbulhagem em uma salmoura, incluindo o CO₂ dissolvido na forma de H₂CO₃. Vários processos de tratamento da água já existe e podem ser usados (dessalinização, purificação da água, destilação, entre outros).

A água bombeada em um fluxo laminar direta ou opcionalmente após a filtragem é desgaseificada ao ser submetida a ondas ultrassônicas, a um vácuo elevado ou a um aquecimento rápido. Uma combinação desses três tratamentos pode ser aplicada simultânea ou sequencialmente. De preferência, a água é desgaseificada pela ação do vácuo e das ondas

ultrassônicas. Os gases resultantes da desgaseificação compreendem, principalmente, o CO₂ e, opcionalmente, NO_x e HS_x. Se for puro o bastante, o CO₂ pode ser reintroduzido em um ciclo de gaseificação sendo reintroduzido no reator de gaseificação ciclônico após o aquecimento. Como alternativa, a mistura de gás obtida pode ser submetida a uma redução de estado líquido/gasoso na interface de um plasma criado por um arco elétrico entre dois elétrodos de carbono porosos ou ocos. Durante este estado de redução, o NO_x e o HS_x serão reduzidos a enxofre ou N₂ ou em compostos com um número de oxidação intermediário (esta redução pode ser concluída por um tratamento elétrico do tipo GlidArc).

Os elétrodos de carvão usados para essas reduções podem conter aditivos como o alumínio, o magnésio ou qualquer outro metal de redução, por exemplo, na forma de um talco altamente aglomerado com partículas de carbono. Esses metais promover a produção de CO e H₂ reagindo com a água, o CO₂ ou o carbono dos elétrodos. Os óxidos metálicos gerados pelas reações de oxirredução são gerados novamente pelas correntes elétricas e pela luz intensa do plasma; em específico, o MgO é reduzido em Mg e o oxigênio (o oxigênio reage com o carbono) pelo plasma. Os elétrodos de carvão podem, por opção, conter aditivos de Si e SiO₂, que reagem com a água, o CO₂ e o carbono para produzir CO, dihidrogênio e SiC. Os aditivos também pode se fazer presentes na água dos reatores de plasma. A distribuição dos talcos aditivos nos elétrodos pode ser uniforme

ou não, por exemplo, em uma série de camadas separadas por camadas contendo somente carbono. O carvão dos elétrodos vem, por exemplo, das cinzas recuperadas pela rosca helicoidal, que atravessa os tanques de cinzas do reator de gaseificação ciclônico e o ciclone de separação de gás e cinzas.

Após o resfriamento, um ou mais trocadores de calor recuperam-se na altura da rosca helicoidal para aquecer produtos que requerem calor durante seu ciclo de conversão, e as cinzas frias são lavadas em um ciclone hidráulico. Em seguida, elas são trituradas em partículas bem finas, uniformes ou não, de tamanho de 1 micrômetro e 1 mm. As partículas são opcionalmente misturadas com diferentes compostos (partículas de metal, fósforo, Si, SiO₂ etc.) que promovam a redução do CO₂ e a oxidação do carvão. Uma pasta é produzida dessas partículas e moldada ou retirada e comprimida em um eletrodo após a adição opcional de um agente de coesão tal como uma cola ou uma resina resistente à água, com base em um composto de carbono, por exemplo, ou qualquer cimento.

Após a redução no plasma do arco elétrico, os gases recuperados são submetidos a outra etapa de separação.

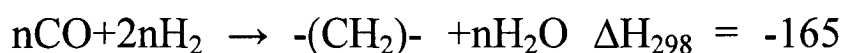
A água para lavar as cinzas, que é bastante básica devido á potassa que contém, é usada para aumentar o pH do tanque de água para a separação do gás, ou como uma salmoura para a saponificação de gorduras e óleos em um F_{smo} destinado a este fim (pontos 1.3 e 2.13). Em geral, toda a água borbulhada e lavada é recuperada por osmose inversa, filtrada e

submetida a uma redução elétrica com elétrodos ocos de carvão. Também podemos considerar métodos de destilação.

4.4 Os gases recuperados na parte de ar do tanque de separação formam um gás de síntese composto, principalmente, por CO e H₂. Os gases são recuperados por meio de válvulas calibradas para abrirem a uma pressão predefinida. Todavia, pequenas porcentagens de CO₂, CH₄ e O₂, na ordem de 1 a 3%, continuam pra cada composto.

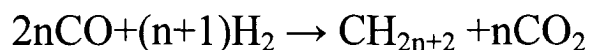
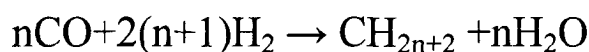
Para que a reação (Ft)

(FT geral):

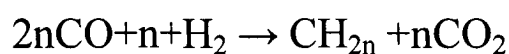
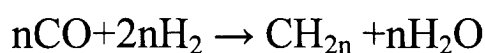


KJ.mol

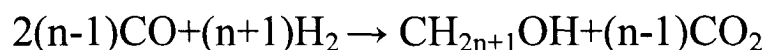
formação de alcanos:



formação de alcenos:



formação de álcools:



seja eficiente, é necessária que a estequiometria da equação seja respeitada na mistura de gás de síntese usada. De fato, a razão de CO/H₂ orienta as reações predominantes na síntese FT. Além disso, devido a diferentes difusões entre o CO e o H₂ nos vários reatores existentes, muitas vezes a composição do

gás de síntese deve ser ajustada de acordo com o reator FT usado. Por fim, é importante minimizar os gases secundários CH₄ e CO₂ produzidos durante a gaseificação.

Em uma primeira etapa, a água contida no gás de síntese é removida pela condensação do vapor de água, por exemplo, em uma torre de resfriamento ou qualquer meio que permite que o gás de síntese seja submetido a uma temperatura perto de 0° C. A compressão do gás de resfriamento pode, opcionalmente, ser realizada por uma Tb_smo. A água líquida produzida conduz parte do CO₂ presente no gás de síntese. O CO₂ da água de condensação é recuperado por desgaseificação e reintroduzido no circuito de síntese.

O gás de síntese secado é umedecido pelo vapor de água a uma porcentagem definida pela razão CO/H₂ final desejada.

Em seguida, o gás umedecido é aquecido novamente a uma temperatura entre 200 e 1.200° C, por exemplo, em uma Tb_smo ou um forno solar/micro-ondas oco simples (sem turbina ou rosca helicoidal) ou qualquer outro meio.

Isso permite que o H₂ seja produzido a partir do CO para impedir uma produção indesejada de CO₂, de acordo com a reação:



O CO₂ produzido por ser removido de acordo com um dos processos descritos acima, mas eles correm o risco de criar um desequilíbrio na fórmula do gás de síntese.

Damos preferência a um método de redução de CO₂ eletroquímico que envolva plasmas.

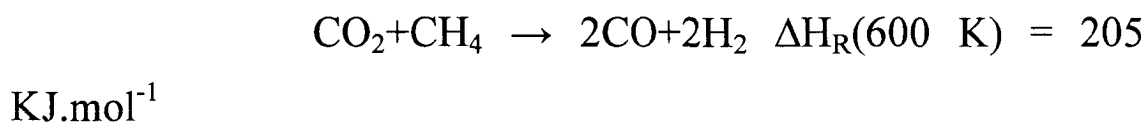
Em uma concretização específica, o reator eletroquímico é produzido à base de uma turbobomba de micro-ondas/solar em que a parte “solar” (espelhos e lentes) é removida ou reduzida a somente a parte localizada na altura da segunda região dos rotores e da câmara anelar de modo a obter um reator de micro-ondas/solar ou um reator de micro-ondas (R_smo). De preferência, o tubo que forma o R_smo tem diâmetro entre 10 e 20 cm e é feito, por exemplo, de um material isolante elétrico, tal como o pyrex, o quartzo, entre outros. Materiais bons condutores podem ser adequados desde que controlem o percurso das correntes induzidas. Se materiais transparentes a micro-ondas forem usados, o R_smo é encerrado em uma estrutura que reflete micro-ondas, por exemplo, um tubo de alumínio ou qualquer outro material que reflita micro-ondas, pelo menos na região do R_smo submetida a micro-ondas (que corresponde à região atrás da primeira região de rotor). Pelo menos um rotor da primeira região de rotor consiste de pás feitas de um material isolante elétrico ou isolado do pino do rotor. Os referidos rotores têm pelo menos uma pá condutora de eletricidade em contato com o pino do rotor, que é condutora elétrica e conectada à terra. Na parede do R_smo, no plano de rotação do rotor, encontramos pelo menos um eletrodo submetido a uma corrente entre 100 V e 1.000 kV.

Em uma concretização específica, um rotor consiste de quatro pás condutoras de eletricidade em contato com

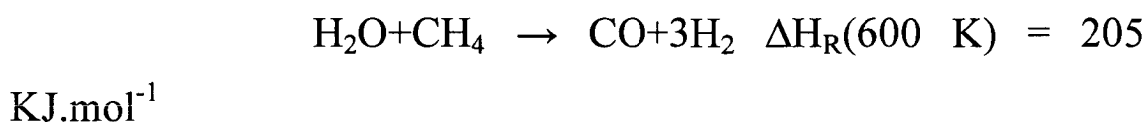
o pino do rotor e o resto das pás é isolada eletricamente do pino do rotor ou feita de um material isolante (por exemplo, cerâmica isolante) (figura 9.77). As pás condutoras são dispostas em cruz em relação ao pino. O comprimento das pás definido de modo que elas sejam dispostas a uma distância entre 1 micron e 5mm da parede do tubo do R_{smo}. No plano de rotação do rotor, encontramos 4 elétrodos dispostos a 90° um do outro (com um tamanho entre, por exemplo, 50 microns 1 cm). Em certas concretizações, os elétrodos podem ser segmentos do impulsor (figura 9.78). De preferência, a extremidade das pás condutoras projeta-se de modo a promover a formação de um arco elétrico entre o elétrodo e a pá. Cada elétrodo é levado à fase de um gerador elétrico de alta tensão, ao passo que o pino rotativo é conectado à terra (é possível usar uma corrente direta e o pino dos rotores dos elétrodos é conectado aos terminais do gerador).

Durante a rotação do rotor, as pás condutoras são aproximadas dos elétrodos (entre 60 microns e 1 cm) e forma-se um arco elétrico entre as pás e os elétrodos. Em seguida, as pás afastam-se dos elétrodos, o arco é estendido entre os elétrodos e as pás condutoras de acordo com o menor percurso cruzando as pás neutras ou eletricamente isoladas. Quando usamos elétrodos helicoidais, os arcos elétricos podem deslizar ao longo dos elétrodos. Em certas concretizações, vários estágios de rotor e elétrodos podem ser acrescentados ao sistema, organizando os elétrodos condutores de cada rotor de forma escalonada para cobrir o maior corte transversal possível do tubo do R_{smo}.

O gás de síntese equilibrado contendo o CO₂ indesejável a que uma proporção desejada de metano (CH₄) foi adicionada é, então, inserido no R_smo, onde é aspirado pelo primeiro estágio de compressão do R_smo pela ação dos arcos elétricos e o metano, CH₄, e uma grande parte do CO₂ presente no gás de síntese são reduzidos pela reação:



Da mesma forma, grande parte do H₂O ainda presente no gás de síntese é reduzido pela reação:



5.2-1 O consumo elétrico do R_smo pode ser reduzido inserindo, na região do primeiro rotor, pelo menos um estágio de rotor contendo pelo menos um magneto estacionário e uma bobina de arame condutora ou supercondutora na altura da parede do tubo do reator. Os magnetos estacionários podem ser pás eletricamente isoladas dos rotores contendo pás condutoras. Em uma concretização preferida, os magnetos são integrados aos rotores diferentemente dos rotores contendo pás condutoras. Os dois tipos de rotores podem ser sobrepostos ou separados em duas partes diferentes da primeira região de rotor. Pode haver qualquer número de pás magnéticas; porém, é necessário ajustar o número e a disposição de pás condutoras de acordo com o formato e a disposição de pás magnéticas e o formato e a disposição das bobinas elétricas.

Em uma concretização específica, o número de pás magnéticas é igual a $2n$ pás, onde n é par.

Em uma concretização específica em que $n = 2$, as pás magnéticas são dispostas cruzadas (figura 10.79). Nesta
 5 orientação, as pás são simétricas de modo que duas pás simétricas tenham polaridades "N/S" opostas. Sendo assim, as pás magnéticas têm uma distância angular de 90° entre elas. Os solenoides (figura 10.80), por exemplo, quatro deles, podem ser dispostos perpendicularmente ao plano de rotação do rotor que
 10 contém as pás magnéticas. Ao girar, o rotor faz com que o campo magnético nos solenoides varie, gerando assim uma corrente elétrica alternada na mesma frequência de rotação que a rotor. Ao conectar um terminal do solenoide a um dos elétrodos do tubo do R_{smo} e o outro ao rotor condutor de eletricidade, que gira no
 15 plano dos elétrodos, a rotação do rotor "magnético" gera a corrente elétrica necessária para a produção de arcos elétricos entre o rotor condutor de eletricidade e os elétrodos do tubo. Em uma concretização específica, os quatro solenoides são conectados por um de seus terminais a um único rotor. O referido
 20 rotor é eletricamente isolado do pino, mas as pás condutoras do rotor são conectadas umas às outras. O segundo terminal de cada solenoide é conectado a um dos elétrodos no plano de rotação do rotor condutor. A orientação dos solenoides em relação ao plano de rotação do rotor contendo as pás magnéticas é definida de
 25 modo que as correntes elétricas induzidas nos solenoides sempre tenham a mesma direção nos solenoides em relação ao rotor

condutor de eletricidade. As correntes elétricas de todos os solenoides conectados ao mesmo rotor são simultâneas, seja das bobinas para o rotor ou do rotor para as bobinas.

5 5.2-2 Em uma concretização específica, em uma das configurações das pás magnéticas simétricas descritas no ponto 5.2-1, os solenoides são conectados aos terminais de um gerador de corrente alternada. Os dois solenoides opostos são conectados inversamente ao gerador para que os campos magnéticos induzidos sejam simétricos em relação ao eixo (em
10 sentidos opostos). Em seguida, o sistema solenoide-rotor atua como um motor radial elétrica agindo acionando o estágio de compressão. O estágio de turbina pode, então, ser removido visto que o motor elétrico realiza a compressão do gás.

Em certas concretizações, o estágio de
15 compressão pode ser conduzido por um motor elétrico externo.

5.3 Em uma concretização específica, encontramos $2n$ pás magnéticas do rotor, onde n é ímpar. As pás magnéticas são dispostas de forma regular no rotor de acordo com um passo angular de $360/(2n)$. As pás magnéticas são simétricas,
20 lado a lado em pares, de acordo com o eixo de rotação e duas pás simétricas têm uma polaridade “N/S” oposta. Ao atravessar a roda formada de acordo com a distribuição das pás magnéticas do rotor, obtemos uma alternância regular de polaridade magnética Norte e Sul, que é axialmente simétrica. Esta simetria faz com que
25 um polo Norte corresponda a um polo Sul em relação ao eixo de rotação. É possível inserir pás magneticamente neutras entre as

pás magnéticas para obter o número desejado de pás no rotor. Essas pás neutras podem servir como uma peneira entre os campos magnéticos das pás magnéticas. A rotação do rotor gera variações de escudo muito rápidas na ordem de $2n$ vezes a
 5 velocidade de giro do rotor. Esses campos magnéticos variam com extrema rapidez, além de produzirem uma corrente de frequência elevada ($2n$ vezes a velocidade de rotação), e podem aquecer com extrema rapidez moléculas de momento dipolar como o H_2O , o SiO ou certos gases como o hélio de acordo com
 10 o mesmo princípio que ICP.

No entanto, em uma configuração de solenoides perpendiculares ao plano de rotação do rotor de pás magnéticas, os campos magnéticos induzidos nos solenoides opõem o campo magnético estacionário. A intensidade dos campos magnéticos,
 15 que varia perpendicularmente em relação ao plano de rotação dos rotores, a que os gases que atravessam o R_{smo} são submetidos, é muito baixa.

5.4 Em um processo específico, os solenoides do R_{smo} têm forma de Z. O solenoide consiste de um arame
 20 formando um semicírculo em um plano mais alto e, então, caindo em um plano inferior de acordo com uma projeção perpendicular. No plano inferior, o arame forma outro semicírculo complementar, em seguida sobe para o plano superior de acordo com uma projeção ortogonal. A rotação de um solenoide,
 25 portanto, consiste de dois semicírculos em dois planos paralelos sobrepostos conectados por duas verticais. De cima, a rotação do

solenóide lembra um círculo. A operação é repetida várias vezes para obter um solenoide. O formato circular pode ser substituído por qualquer forma geométrica: quadrangular, oval, retangular etc.

5 O solenoide em Z é posicionado em torno do tubo do R_smo de modo que os dois semicírculos sejam perpendiculares (em cima e embaixo) ao plano de rotação do rotor de pás magnéticas e as duas colunas conectando os semicírculos sejam paralelas ao plano de rotação do rotor. As duas colunas
10 podem estar no plano de rotação do rotor ou excêntricas em relação a ele. A girar no plano de rotação, o rotor de pás magnéticas produz um campo variável por meio dos dois semicírculos perpendiculares do solenoide. Este campo variável induz uma corrente elétrica e um contra-campo magnético
15 induzido oposto aos campos estacionários das pás. A corrente que atravessa o circuito do solenoide passando para a parte vertical cria um campo magnético perpendicular aos outros campos magnéticos e ao plano dos rotores. Este campo não é compensado e é aplicado aos gases que atravessam o R_smo.

20 Usando um rotor com n sendo ímpar e com polaridade alternada, é possível variar o campo magnético a uma frequência de vários milhares de Hertz (2n vezes a velocidade do rotor). Esta variação rápida dos campos magnéticos induz um campo magnético paralelo ao eixo dos rotores, que permite que os
25 gases sejam significativamente aquecidos de modo a fazê-los reagirem. A frequências altas (acima de 2 MHz), o campo

magnético induzido pode gerar plasmas térmicos em gases polares como o NH_3 , o H_2O , o SiO , entre outros.

No entanto, em um campo variável ligado a um sistema de arco elétrico, módulos neutros e apolares como o CO_2 tornam-se dipolares, que podem ser aquecidos pela ação de micro-ondas ou campos magnéticos variáveis. Este tipo de dispositivo é usado pra aquecer o CO_2 seco.

5.6 Em uma concretização específica, o rotor é composto por $2n$ pás magnéticas. É possível inserir pás neutras entre as pás magnéticas para obter o número desejado de pás no rotor. As pás magnéticas são dispostas de forma regular no rotor de acordo com um passo angular de $360/(2n)$. As pás magnéticas são simétricas, lado a lado em pares, de acordo com o eixo de rotação. As duas pás simétricas têm a mesma polaridade nas extremidades “N/N” ou “S/S” (figura 10.81). As partes centrais das pás podem ser cobertas por um material formando uma peneira para os campos magnéticos. Uma alternativa consiste em produzir pás feitas de materiais compostos dos quais somente as extremidades são magnéticas. Em torno do rotor assim formado, encontramos um número par de solenoides de acordo com uma simetria central em torno do eixo do rotor. De preferência, o número de solenoides é de quatro (figura 10.80). Outro solenoide é disposto em torno do tubo do R_{smo} , em um plano paralelo ao plano de rotação do rotor magnético, de preferência entre a primeira região de rotor e a câmara anelar (figura 10.82). Um dos terminais de cada solenoide perpendicular ao rotor é conectado ao

mesmo terminal do solenoide paralelo ao plano do rotor. O segundo terminal do solenoide paralelo é conectado ao rotor condutor de eletricidade. O segundo terminal dos solenoides perpendiculares é conectado a um dos elétrodos da parede localizados no plano de rotação do rotor condutor de corrente. Em certas concretizações, o tubo que formar o R_smo é condutor e substitui e realiza diretamente a função do elétrodo. O circuito elétrico é produzido de modo que todas as correntes advindas de bobinas perpendiculares siga rumo à bobina paralela ao mesmo tempo e na mesma direção. Ao girar, o rotor magnética faz com que os campos magnéticos das bobinas opostas variem simetricamente. Os campos magnéticos induzidos pelas bobinas perpendiculares são opostos, de par em par, limitando assim as forças serpenteantes sobre a bobina. A corrente induzida nos quatro solenoides perpendiculares passa para a bobina paralela e gera um campo magnético variando a $2n$ vezes a velocidade de rotação do rotor magnético. O fato de que a bobina paralela é posicionada entre a primeira região de rotor e a câmara anelar impede o aquecimento excessivo dos rotores. O pino dos rotores é protegido por um defletor, impedindo o aquecimento em excesso.

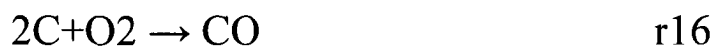
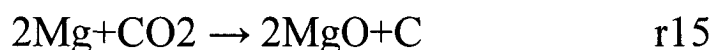
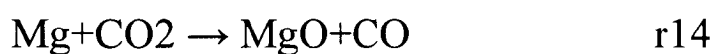
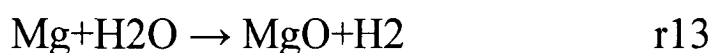
5.7 Em uma concretização específica, o R_smo é usado para reduzir o CO₂ e oxidar o excesso de CH₄ produzido durante a gaseificação e a fase de síntese de FT, em CO e H₂. Uma mistura de CO₂/CH₄ ou, opcionalmente, CO₂/CH₄/H₂O é aspirada pela primeira região dos rotores do R_smo. A mistura pode ser enriquecida com partículas de carbono (carvão) de 1 a

500 micrômetros. Partículas metálicas, como o manganês, o óxido de manganês, o alumínio, o magnésio, o índio, o titânio, o ferro, o cobre, entre outros ou qualquer outro metal capaz de aumentar a quantidade de CO e H₂ produzida pela mistura de gás pode ser
5 acrescentado a mistura.

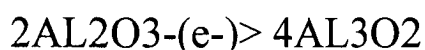
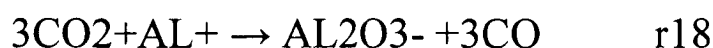
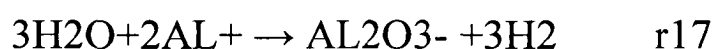
Pela ação dos arcos elétricos do primeiro estágio, as moléculas de gás são ionizadas de modo a se tornarem agentes reativos que interagem uns com os outros e com as partículas de carbono de acordo com as reações
10 supramencionadas e r13 a r19.

Os metais injetados na forma de partículas são oxidados pelo diferente agente reativo formado; eles podem ser reduzidos pela ação dos plasmas (luz e corrente) e das correntes induzidas pelas micro-ondas na câmara anelar.

15 Como exemplo, podemos citar a ação do magnésio:



ou do alumínio:



O carbono produzido pode ser oxidado em CO pelo CO₂ ou pela água ou por radicais de oxigênio produzidos no reator.

5 5.8 Pós de alumínio são altamente inflamáveis e pós de magnésio ainda mais, tornando-os dificílimos de se manipular.

Para podermos enriquecer os gases e plasmas com metais sem ter que manipular pós, um pequeno bloco do metal ou da liga de metal desejada, geralmente qualquer material
10 desejado, é introduzido a montante ou a jusante da primeira região de rotor. O bloco é posicionado ou contra a parede do tubo do R_smo ou no defletor término na altura do pino do rotor. Uma janela feita de quartzo ou qualquer outro material transparente aos comprimentos de onda usados é disposta oposta ao bloco. Pela
15 janela, um feixe de laser é focalizado no bloco com a lente ou a objetiva de um microscópio. O feixe delega a superfície do bloco. A frequência do laser é entre 1 e 10⁶ Hertz com pulsos na ordem de 1 femtossegundo a 100 nanosegundos. A ablação do laser do bloco metálico pulveriza, na entrada do reator, gases de material
20 expelido do bloco, que atravessam o R_smo e reagem com as moléculas de gás conforme descrito no ponto 5.7. Para potências de laser suficientes (começando em 8 microjoules/mícron quadrado) e pulsos suficientemente pequenos de menos de 10 nanosegundos, formam-se plasmas ópticos. Esses plasmas
25 ionizam ainda mais os gases e os átomos de material expelido, tornando todos os elementos altamente reativos pela criação de

entidades carregas e/ou radicais livres. Todos os comprimentos de onde podem ser adequados para as ablações. No entanto, os comprimentos de onda no UV, por exemplo de 266 nanômetros, são preferidos. A energia cinética do gás é mantida alta graças às

5 rápidas variações dos campos magnéticos no espaço entre a primeira região de rotor e a câmara anelar. O gás comprimido pela ação da primeira região de rotor e o aumento na temperatura entra na câmara anelar, onde as micro-ondas advindas dos magnétrons aumentam a temperatura.

10 5.9 Em uma concretização específica, os metais e partículas usados para enriquecer os gases são condutores de corrente. Pela ação das micro-ondas na câmara anelar, as correntes elétricas são induzidas nas partículas em suspensão no gás. Essas correntes induzidas formam arcos elétricos entre as

15 partículas ou com as paredes do reator R_smo, produzindo, assim, plasmas de origem elétrica no gás. Esses plasmas geram elementos ativados que, ao reagirem uns com os outros, com o gás e com o carbono ou as partículas de metal, produzem CO e H2 pelas reações descritas acima. Os plasmas gerados pelos arcos

20 de corrente elétrica são, por natureza, plasmas sem equilíbrio.

5.10 Em uma concretização específica, a distância entre a base da câmara anelar e o primeiro rotor da segunda região de rotor (região de turbina) é igual a $n \cdot \lambda + \phi$ com n sendo um número inteiro, λ o comprimento de onda das micro-

25 ondas e ϕ a defasagem induzida pelos reflexos na parede ou no rotor. O primeiro rotor é feito de um material que conduz a

corrente elétrica e reflete as micro-ondas. O diâmetro do rotor é, por exemplo, igual a $0,5 \lambda$. O pino que atravessa os rotores são feitos de um material composto cuja maior parte é feita de um material isolante elétrico. No entanto, a segunda região do pino é feita sobre um comprimento de $\lambda/4$ começando do primeiro rotor rumo à câmara anelar de um material condutor elétrico ou material revestido por um condutor elétrico. Os guias de onda dos magnétrons direcionam as micro-ondas para a câmara anelar, que refletem em parte rumo ao primeiro rotor da segunda região de rotor. Em certas concretizações, as ondas, na saída dos guias de onda, são direcionadas rumo ao primeiro rotor. O rotor e a parte condutora do pino atuam como uma antena de micro-ondas. Com isso, são produzidas correntes induzidas no rotor e na parte do pino condutor de corrente. Essas correntes formam arcos elétricos entre a antena e:

- os elétrodos dispostos perto do rotor da antena;
- as partículas contidas no gás e o próprio gás;
- os outros rotores opcionalmente aterrados;
- as paredes do R_smo.

Além disso, devido à distância entre a câmara anelar e a antena, as micro-ondas podem adequadamente estimular o carbono e opcionalmente as partículas de metal introduzidas no gás para formar um plasmoide (ou plasma). Em seguida, há a redução do CO₂ e a oxidação do carbono e do CH₄ para produzir CO e H₂. Quando o reator R_smo está em ação, os

gases opcionalmente enriquecidos com partículas de carbono (e opcionalmente outros elementos) são aspirados pelo primeiro estágio de rotor. Nesta altura, uma ativação dos gases inicia por causa dos arcos elétricos produzidos entre as pás condutoras e os elétrodos implantados na parede do reator. Em seguida, os gases são comprimidos a montante da câmara anelar e opcionalmente aquecidos por um campo magnético variável paralelo ao pino do rotor e que causa a rotação das pás magnéticas e dos solenoides. Em seguida, os gases passam para a câmara anelar, onde são significativamente aquecidos pela ação das micro-ondas para formar um plasma termodinâmico contendo plasmas sem equilíbrio devido aos arcos de corrente elétrica induzidos. Os gases aquecidos e ionizados acionam os rotores da segunda região de rotor, que acionam o pino do rotor, mantendo a operação do reator R_smo.

5.11 Em uma concretização, o R_smo é composto por uma turbina e um sistema compressor em dois estágios. Um sistema de rotor formando um estágio de compressão de baixa pressão é conectado por um pino de rotação a um sistema de rotor que forma um estágio de turbina. Essas duas regiões de rotor formam o sistema de rotor mais afastado do reator. Entre os estágios dos rotores externos, inserimos um estágio de compressão de alta pressão conectado por um pino oco a um segundo estágio de turbina. Esses dois últimos estágios formam o sistema de rotor mais interno do reator. O pino de rotação do sistema externo é encaixado no pino do sistema

interno. O pino de rotação oco é alargado e dobrado no centro do reator para formar uma câmara de micro-ondas anelar integrada ao pino. O pino interno, bem como os rotores, é feito de um material condutor de eletricidade e é isolado do sistema de rotor mais externo, que é conectado à terra. Pela ação das micro-ondas injetadas na câmara anelar, as correntes elétricas induzidas são produzidas no sistema de rotor mais interno. Essas correntes geram arcos elétricos entre os dois sistemas de rotor e entre o sistema de rotor mais interno e a bobina do reator aterrado. Esses arcos elétricos ativam os gases e as partículas que atravessam o reator, conforme descrito nas seções anteriores. As várias concretizações descritas para o R_smo podem ser combinadas em diversas variações. Em certas concretizações, o espaço entre os dois rotores é preenchido com óleo ou um líquido que permita o acoplamento hiperboloide entre os dois sistemas. Os pinos são equipados, por exemplo, com pás (dentro do pino oco do sistema mais interno e a superfície do pino do sistema mais externo) para amplificar este acoplamento. Em certas concretizações, o estágio de turbina do sistema mais externo é removido. O sistema de compressão de pressão baixa é acoplado ao resto do sistema de rotor (correspondendo ao sistema de rotor interno) encaixando os pinos.

Em certas concretizações, o compressor do sistema mais interno é composto por um compressor centrífugo cuja traseira da parte de suporte (cone equipado com pás ou ranhuras: impulsor) é unida à câmara anelar.

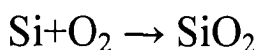
5.12 Em geral, um R_smo é usado como um reator complementar ou principal para gaseificação do carbono para oxidá-lo em CO e produzir H₂. Sob essas condições, as etapas de filtragem, borbulhagem, difusão diferencial através de membranas, separação ciclônica, separação criogênica ou qualquer outro processo de separação e purificação podem ser realizadas para purificar o gás de síntese obtido e remover as partículas e os metais contidos no gás de síntese.

5.13-1 Em uma concretização específica, a gaseificação realizada em um R_smo (opcionalmente uma Tb_smo) é realizada com vapor de SiO.

O gás de CO é aquecido, por exemplo, em um reator R_smo a uma temperatura entre 500° e 2.000° C. Como o CO₂ não é polar, H₂O é opcionalmente adicionado ao CO₂ para obter uma mistura de gás aquecida mais eficiente.

O gás ou a mistura de gás é posicionada em contato com uma mistura partículas de Si (sílica) e SiO₂ (silício). As partículas de Si e SiO₂ têm entre 1 nanômetro e 5 mm. O tamanho das partículas é uniforme ou não de acordo com a concretização do processo.

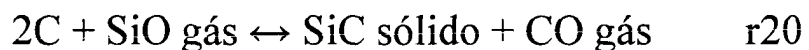
Pela ação do calor e do gás, as reações a seguir ocorrem em proporções variadas:



A mistura de gás obtida é opcionalmente superaquecida em um segundo R_smo a uma temperatura entre 500° C e 2.000° C. Visto que o SiO tem um momento dipolar perto de 1,54 D, ele é aquecido significativamente pelas micro-ondas.

Em seguida, a mistura gasosa é colocada em contato com partículas de carbono com de tamanho uniforme ou não entre 1 nanômetro e 2 centímetros de acordo com a concretização do processo.

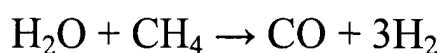
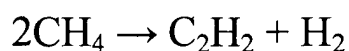
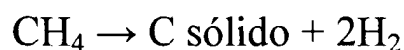
Devido à ação da mistura de gás, ocorre a reação a seguir:



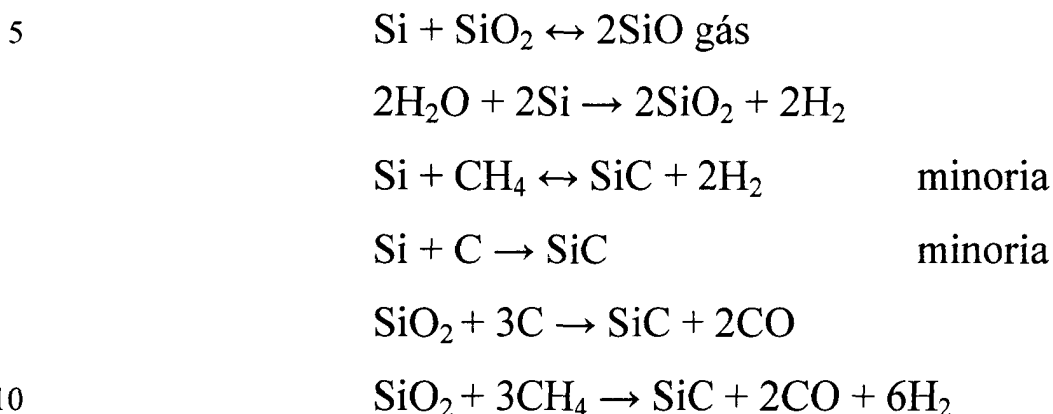
Esta última reação pode ser realizada em uma Tb_smo ou um R_smo junto com um ciclone que permita que as partículas da mistura de gás de CO₂/CO obtida seja isolada.

5.13-2 Em um processo alternativo, o gás de aquecimento usado é o metano CH₄ em vez do CO₂. O gás de é aquecido, por exemplo, em um reator R_smo (como alternativa, em uma Tb_smo) a uma temperatura entre 500° e 2.000° C. Visto que o CH₄ tem polaridade muito baixa, ele é opcionalmente misturado a uma pequena quantidade de H₂O.

As reações a seguir ocorrem em proporções variadas:



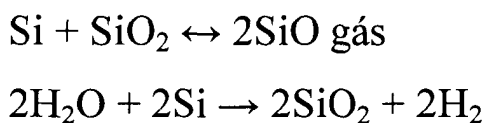
A mistura de gás na saída do R_smo é colocada em contato com uma mistura de partículas de Si (sílica) e SiO₂ (silício) de acordo com o processo descrito no ponto 5.13-1. Ocorrem as reações a seguir:



Em seguida, a mistura gasosa é colocada em contato com partículas de carbono de acordo com o processo descrito no ponto 5.13-1 e a reação 20 ocorre.

5.13-3 Em um processo alternativo, o gás de aquecimento usado é o H₂O, que é aquecido em um R_smo (como alternativa, em uma Tb_smo) a uma temperatura entre 500° C e 2.000° C. A mistura gasosa é, então, colocada em contato com uma mistura de partículas de Si e SiO₂ de acordo com o processo descrito em 5.13-1.

20 Devido à ação do calor e do gás, ocorrem as reações a seguir:



25 Sob certas condições, o SiO₂ é produzido durante a reação da sílica Si sozinha.

Em seguida, a mistura gasosa é colocada em contato com partículas de carbono de acordo com o processo descrito no ponto 5.13-1 e a reação 20 ocorre.

O gás de síntese obtido (H_2 , CO , C_2H_2 , CO_2) ou (CO , CO_2) pode ser purificado e equilibrado acrescentando-se vapor de água.

O C_2H_2 tem um coeficiente de solubilização em água ($76,6 \cdot 10^{-3}$ mols/litro a $0^\circ C$ e 1,013 bar) próximo ao do CO_2 e, portanto, pode ser separado do resto das moléculas de acordo com o processo descrito em 4.2.

O SiC produzido durante as várias reações de gaseificação são usados como um catalisador de reação FT.

6.1 Na entrada do R_{smo} , os gases são resfriados em trocadores de calor e purificados para remover as partículas e resíduos de CO_2 . O gás de síntese é equilibrado, conduzido à temperatura desejada por uma Tb_{smo} ou por outro meio antes de ser injetado no reator FT.

Na saída do reator FT, a mistura de hidrocarboneto e álcool é aquecida em um F_{smo} .

Em uma concretização preferida, para obter uma melhor ação de micro-ondas, certa quantidade de vapor de água é inserido na mistura de hidrocarboneto e álcool que deixa o reator FT. A mistura também pode ser aquecida pelo calor advindo dos trocadores de calor. A mistura de hidrocarboneto e álcool na saída do F_{smo} atinge uma temperatura entre 200 e $600^\circ C$ (de

preferência de 370° C), suficiente para a destilação em uma coluna de destilação.

Em certas concretizações, espelhos planos ou esféricos ou espelhos com uma organização de Fresnel refletem a radiação solar na coluna de destilação.

Em certas concretizações, as lentes ópticas fazem com que a radiação solar convirja na superfície do tubo do F_smo ou no F_smo em si por uma janela transparente para aquecer a mistura de hidrocarboneto e álcool.

6.2 O metano obtido no fim da destilação pode ser usado como combustível no reator de gaseificação ciclônica e nos diferentes reatores e reações descritos no presente documento.

No entanto, parte do metano produzido pela síntese FT pode servir como um combustível para motores de combustão interna agindo como um alternador a fim de produzir parte da corrente usada. O CO₂ produzido pelos motores é injetado no circuito de CO₂ do sistema de produção de gás de síntese. O calor produzido pelos motores também é recuperado para a vantagem do sistema de produção.

6.3 Em certas concretizações, o CO₂ pressurizado é produzido pela combustão do metano em uma turbina de gás junto com um gerador de corrente ou um tubogerador. Na saída da turbina, após possivelmente passar para uma Tb_smo para ser superaquecido, o CO₂ alimenta os ciclones do gaseificador, o reator de plasma, o R_smo ou qualquer outro reator do sistema de produção.

6.4 Parte da energia elétrica é alimentada por painéis solares. Os painéis solares têm partículas de quartzo ou partículas quânticas (quântico ou Qdot) na sua superfície. Essas partículas têm a faculdade de transmitir fluorescência no infravermelho e no visível pela ação da radiação UV. Esta conversão da luz UV em espectro visível e IR torna-a adequada par uso em painéis convencionais.

Em geral, o Qdots pode ser integrado ao revestimento preto dos tubos do reator a fim de aumentar sua capacidade de absorção de luz.

Outra parte da energia elétrica necessária para operar a instalação advém da energia eólica.

Em geral, qualquer tipo de produção de corrente elétrica pode ser adequado para satisfazer os requisitos de energia elétrica do processo (figura 14). No entanto, uma produção de corrente elétrica não-polvente, incluindo o sistema de pilhas a combustível, é preferida para não prejudicar o equilíbrio de poluição do sistema.

LEGENDAS DAS FIGURAS

- 1) Tubo de forno solar/micro-ondas
- 1a) Parede do forno solar
- 1b) Vácuo ou gás de isolamento (argônio, por exemplo)
- 1c) Parede transparente da câmara de confinamento

1d) Partículas quânticas na parede da câmara de confinamento que convertem a radiação solar UV em radiação visível e infravermelha capaz de atravessar a parede

2) Rosca helicoidal

5 3) Sistema de espelhos

3a) Espelho dentro da câmara de confinamento

4) Espelhos em uma disposição escalonada em um corte elipsoidal

5) Lentes convergentes ou de Fresnel

10 6) Magnétron

7) Guia de ondas

8) Tubos de desgaseificação

9) Núcleo do reator (FBCB)

10) Câmara de combustão

15 11) Queimadores tangenciais à parede da câmara de combustão

12) Gases de combustão girando pela ação das chamas de combustão

13) Chamas de combustão

20 14) Entrada de ar

15) Entrada para gás de pirólise de grânulos

16) Entrada para gases adicionais como o CH₄

17) Aba formando um cone perfurado voltado para baixo: saída axial da câmara de combustão para grânulos e

25 gases e entrada axial para o primeiro ciclone

18) Aba formando um cone perfurado voltado para baixo: saída axial para grânulos e gases do primeiro ciclone e entrada axial para o segundo ciclone

19) Aba formando um cone perfurado voltado para baixo: saída axial para grânulos do segundo ciclone

20) Cone para encerrar as aberturas de funil das abas. O cone é munido de pás para criar passagens oblíquas rumo ao ciclone inferior para fazer com que os gases girem no sentido de rotação do turbilhão do ciclone.

21) Obstrução parcial das aberturas de funil das abas. Uma série de condutos dispostos entre a borda da aba e a estrutura cônica forma passagens entre os dois compartimentos.

22) Conduto oblíquo entre a borda da aba e o cone para encerrar em parte a abertura de funil da aba

23) Borda da abertura de funil da aba

24) Pás criando passagens oblíquas rumo ao ciclone inferior

25) Vistas de um cone para encerrar as aberturas de uma aba: vistas em corte transversal e inferior

26) Pás da superfície inferior de um cone para encerrar as aberturas de uma aba

27) Tubo para a injeção tangencial de gases nos ciclones

27a) Entrada para produtos abrasivos no tubo para injeção tangencial de gases nos ciclones

28) Ciclone com entrada dupla axial e tangencial

29) Guia de fluxo de gás ascendente

30) Estrutura em T oca

5 31) Base da estrutura em T oca: tubo de fluxo ascendente

32) Bocal de saída de gás (bocal horizontal): saída de fluxo ascendente no espaço entretubos

33) Tubo interno do núcleo do reator

10 34) Tubo externo do núcleo do reator

35) Espaço entretubos

36) Conduto oblíquo da entrada axial no ciclone

37) Entrada inferior do tubo interno do núcleo: aba de curvatura circular

15 38) Vedação parcial da extremidade inferior do tubo interno: bicone

39) Peneira com poros calibrados

40) Peneira organizada como um cone ascendente rumo ao tubo interno

20 41) Bicone vedando o cone-peneira

42) Cesto anelar com uma cavidade no centro (abertura)

43) Abertura do cesto anelar

44) Pino de rotação do cesto anelar

25 45) Impulsor para a ligação do cesto ao pino de rotação

46) Conduitos organizados em torno de um cilindro-peneira pequeno formado por hastes metálicas verticais

47) Hastes metálicas verticais permitindo a formação do fluxo ascendente no ciclone, a filtragem de grânulos e a geração de arcos de corrente elétrica induzida

48) Pá formando conduitos oblíquos

49) Conduto oblíquo concedendo um movimento de rotação aos gases carregados com partículas

50) A: Cilindro de fluxo ascendente e B) cone perfurado para fluxos ascendentes

51) Pá disposta na borda externa do cesto anelar e voltada para o interior dele

52) Eléttrodo de mola helicoidal ligado a um eléctrodo anelar

53) Base do eléctrodo de mola terminando com uma estrutura anelar fechando a última volta em torno de si

54) Extremidade do eléctrodo de mola curvada de modo a voltar ao centro do espiral da própria mola para formar um pino central

55) Ciclone com eléctrodos helicoidais: GlidArc

56) Estrutura estelar conectando os pinos dos ciclones GlidArc permitindo assim que as molas sejam acionadas ao mesmo tempo

57) Ciclone GlidArc disposto em formato de rosa em torno da abertura da aba do último ciclone do tubo interno do FBCB_dc

58) Tampa para encerrar ciclones. A: vista lateral, B: vista inferior

59) Cilindro de saída de fluxo ascendente no ciclone GlidArc

5 60) Fenda oblíqua para a alimentação axial do ciclone GlidArc

61) Pá oblíqua em torno das fendas de alimentação axial dos ciclones

63) Conduto para alimentar axialmente ciclones GlidArc a partir de condutos de saída do ciclone do estágio superior

64) Tubo para alimentação tangencial do ciclone GlidArc; o tubo abre-se no espaço entretubos oposto ao turbilhão do tubo externo perto da parede dele

15 65) Tubo para guiar fluxos ascendentes

66) Pás dispostas entre o tubo externo e o guia de fluxo

67) Base da câmara de combustão

68) Peneira para obstruir a base do reator de gaseificação

69) Estrutura semicônica

70) Tanque de cinzas do gaseificador

71) Ciclone de separação de gases/partículas

72) Paredes da Tb_smo

25 73) Região do rotor localizada no primeiro terço do pino compressor

74) Região do rotor localizada no último terço do pino

75) Pino de rotor oval

76) Câmara anelar para o confinamento de micro-ondas

77) Rotor composto por quatro pás condutoras de eletricidade em contato com o pino, em que as pás restantes são eletricamente isoladas do pino

78) Quatro elétrodos a 90° em relação uns aos outros perpendiculares ao plano de rotação do rotor

79) As pás magnéticas são dispostas em forma de cruz, em que duas pás simétricas têm polaridades “N/S” opostas

80) Quatro solenoides dispostos perpendicularmente ao plano de rotação do rotor contendo as pás magnéticas

81) Rotor de pás magnéticas com simetria central, em que duas pás simétricas têm a mesma polaridade nas extremidades “N/N” ou “S/S”

82) Solenoide disposto em paralelo ao plano de rotação do rotor contendo as pás magnéticas

83) Forno solar em forma de pente

84) Unidade de micro-ondas conectando uma série de fornos solares

85) Corpo poroso

86) Carga do substrato

87) Queimadores tangenciais à parede da câmara de combustão

88) Poços de aspiração

89) Cone ao contrário encerrando o último
5 ciclone do tubo interno

90) Fonte de ultrassom

91) Guia de ultrassom

92) Impulsor aterrado

93) Conjuntos de quatro elétrodos conectados a
10 um gerador elétrico

94) Isolante elétrico para isolar as pás do impulsor dos elétrodos 93

95) Lâminas

96) Impulsor

15 97) Escudo térmico

98) Câmara de coleta

99) Pino da pá do impulsor

REIVINDICAÇÕES

1. – Processo de gaseificação de compostos contendo carbono para produzir um gás de síntese contendo principalmente CO e H₂, caracterizado pelo fato de incluir:

5 A) uma primeira etapa de pirólise de torrefação dos compostos, em carvão e gás de pirólise, em um reator solar de micro-ondas provocada pelo aquecimento dos compostos contidos no referido reator solar de micro-ondas por energia térmica sinérgica alimentada junto com o aquecimento das paredes do reator graças à concentração, por convergência ou reflexão, de
10 radiação solar na superfície das referidas paredes e pelas micro-ondas injetadas diretamente no reator e nos compostos; e

 B) uma segunda etapa de conversão do carvão e do gás de pirólise, advindos do reator solar de micro-ondas, principalmente em CO e H₂, por reações de oxirredução química
15 ocorrendo em um reator ciclônico, em que o referido reator ciclônico permite a formação de um turbilhão gasoso que guia e oxida as partículas de carvão graças à combustão do gás de pirólise ou de outro gás, à injeção de gás ou mistura de gases
20 aquecidos no reator ciclônico, e ao aquecimento direto dos gases presentes no referido reator por micro-ondas injetadas diretamente no reator ciclônico.

2. – Processo, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os gases usados para produzir as
25 reações de oxirredução são aquecidos, acelerados e pressurizados pela ação sinérgica da energia térmica resultante do aquecimento

das paredes de um reator de aquecimento por pressurização e aceleração, por convergência e/ou reflexo da radiação solar na superfície das paredes do referido reator e por micro-ondas injetadas no referido reator.

5 3. – Processo, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que os reatores ciclônicos e/ou os reatores de aquecimento por pressurização e aceleração incluem meios para produzir plasmas gasosos e plasmas ou plasmons misturados de gases/partículas.

10 4. – Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 3, caracterizado pelo fato de que as micro-ondas são usadas ao mesmo tempo como radiação infravermelha, de preferência a frequências correspondentes às frequências de absorção dos modos de vibração assimétricos das moléculas de
15 CO₂.

 5. – Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 4, caracterizado pelo fato de que um substrato de gaseificação inclui partículas heterogênicas compreendendo partículas de compostos contendo carbono e
20 partículas aditivas que promovem a gaseificação opcionalmente aglomeradas ou misturadas às partículas dos compostos contendo carbono.

 6. – Processo, de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que as partículas aditivas incluem
25 metais de redução que promovem a gaseificação por reações de oxirredução e pela produção de elementos carregados e radicais

livres por arcos elétricos produzidos por correntes criadas nas partículas e também partículas de sílica e/ou silício produzindo SiO capaz de ligar parte do carbono contido nos compostos em forma de SiC.

5 7. – Dispositivo para implementar o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado pelo fato de inclui um reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação e um reator ciclônico, em que o reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação compreende um
10 tubo (1), por exemplo, feito de um material refratário, meios para mover os compostos dentro do tubo do reator solar de micro-ondas de pirólise de torrefação (2), meios para concentrar e causar convergência da radiação solar na superfície do tubo do reator (3-3a-4-5), meios para isolar o tubo do reator do ambiente externo
15 (figura 1.1c), meios para melhorar a inércia térmica do tubo do reator, meios para produzir micro-ondas e meios para guiar as micro-ondas, e em que o reator ciclônico compreende pelo menos duas unidades ciclônicas sobrepostas ou encaixadas e em comunicação umas com as outras, dispositivos para permitir uma
20 combustão que crie turbilhões gasosos nas unidades, dispositivos para a injeção lateral ou tangencial de gás nas unidades para criar turbilhões gasosos, meios para produzir micro-ondas e meios para guiar as micro-ondas.

8. – Dispositivo, de acordo com a reivindicação
25 7, caracterizado por incluir, entre outros um reator de aquecimento por pressurização e aceleração do gás de oxidação

compreendendo um tubo, por exemplo feito de uma material refratário, meios para concentrar e causar convergência de radiação solar na superfície do tubo do reator, meios para isolar o tubo do reator do ambiente externo para melhorar a inércia
5 térmica do tubo do reator, meios para mover os gases e, opcionalmente, as partículas ao longo do tubo do reator comprimindo-os, aquecendo-os e aceleram-nos.

9. – Dispositivo, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o reator de aquecimento por
10 pressurização e aceleração do gás de oxidação inclui, entre outros, rotores de pás, compressores centrífugos e/ou de pás, turbinas, pelo menos uma câmara anelar e pelo menos uma fonte de micro-ondas opcionalmente complementada por uma fonte de infravermelho para mover, comprimir, aquecer e acelerar os gases

15 10. – Dispositivo, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 6 a 9, caracterizado por incluir dispositivos de corrente elétrica induzida ou não, ópticos e de micro-ondas para produzir plasmas gasosos e/ou plasmons misturados de gases/partículas.

20 11. – Dispositivo, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 6 a 10, caracterizado por incluir pelo menos um magnétron e pelo menos um guia de ondas para produzir micro-ondas entre 1 GHz e 300 GHz e guiá-las.

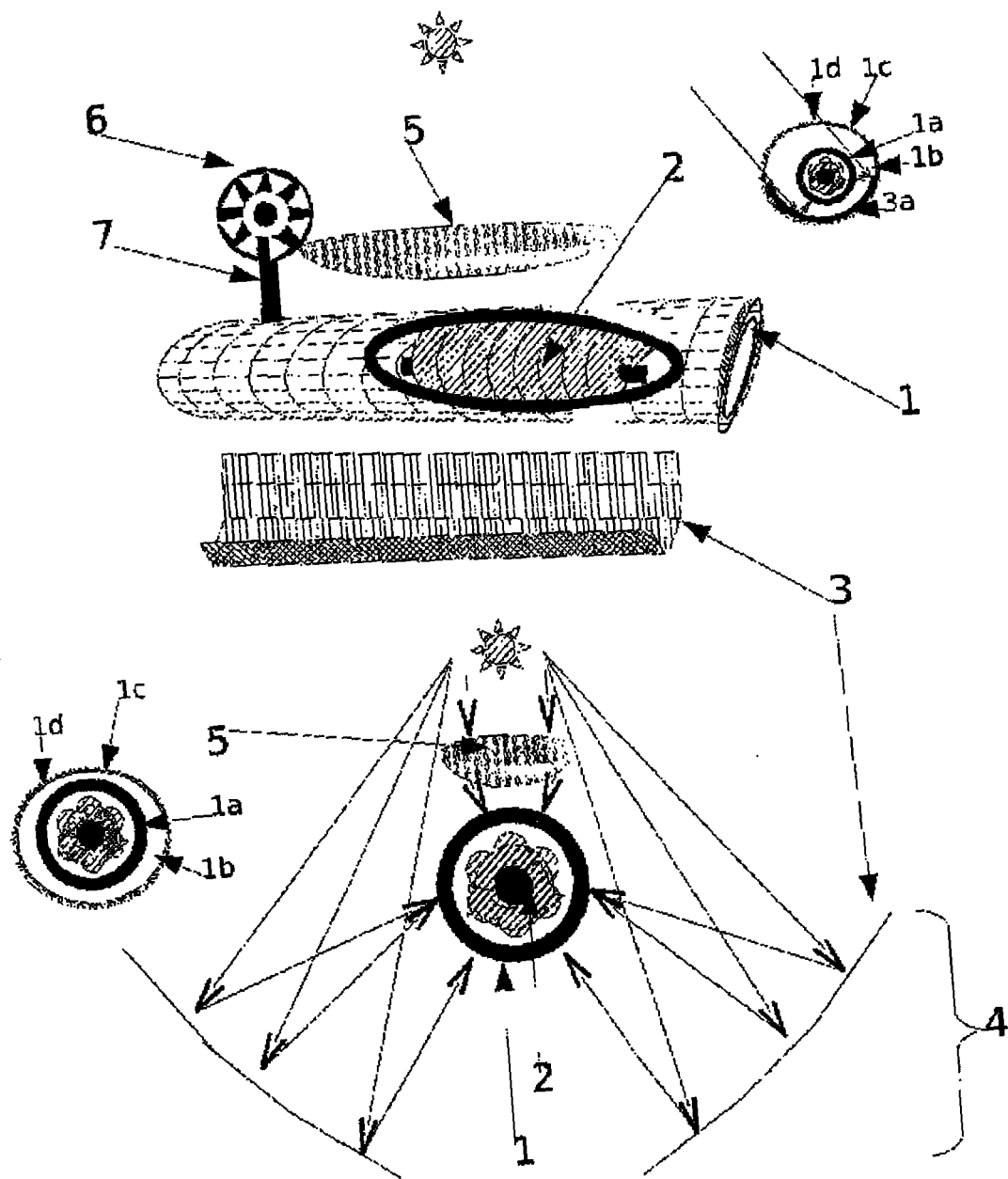


Fig1

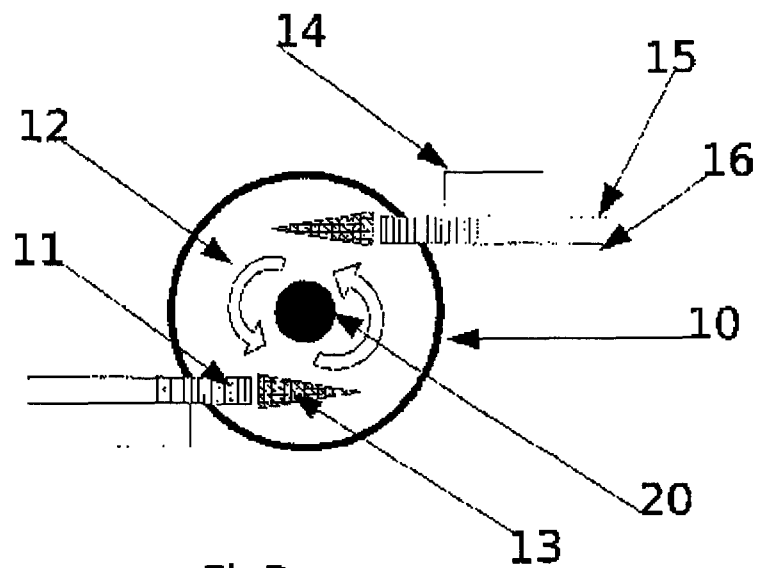
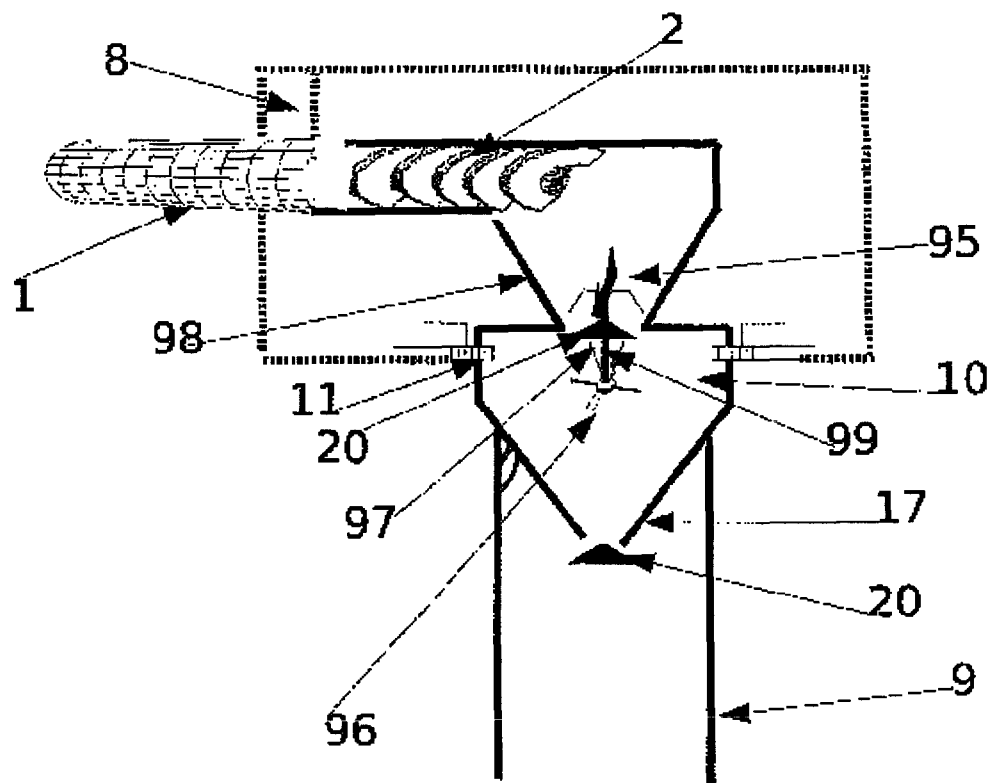


Fig2

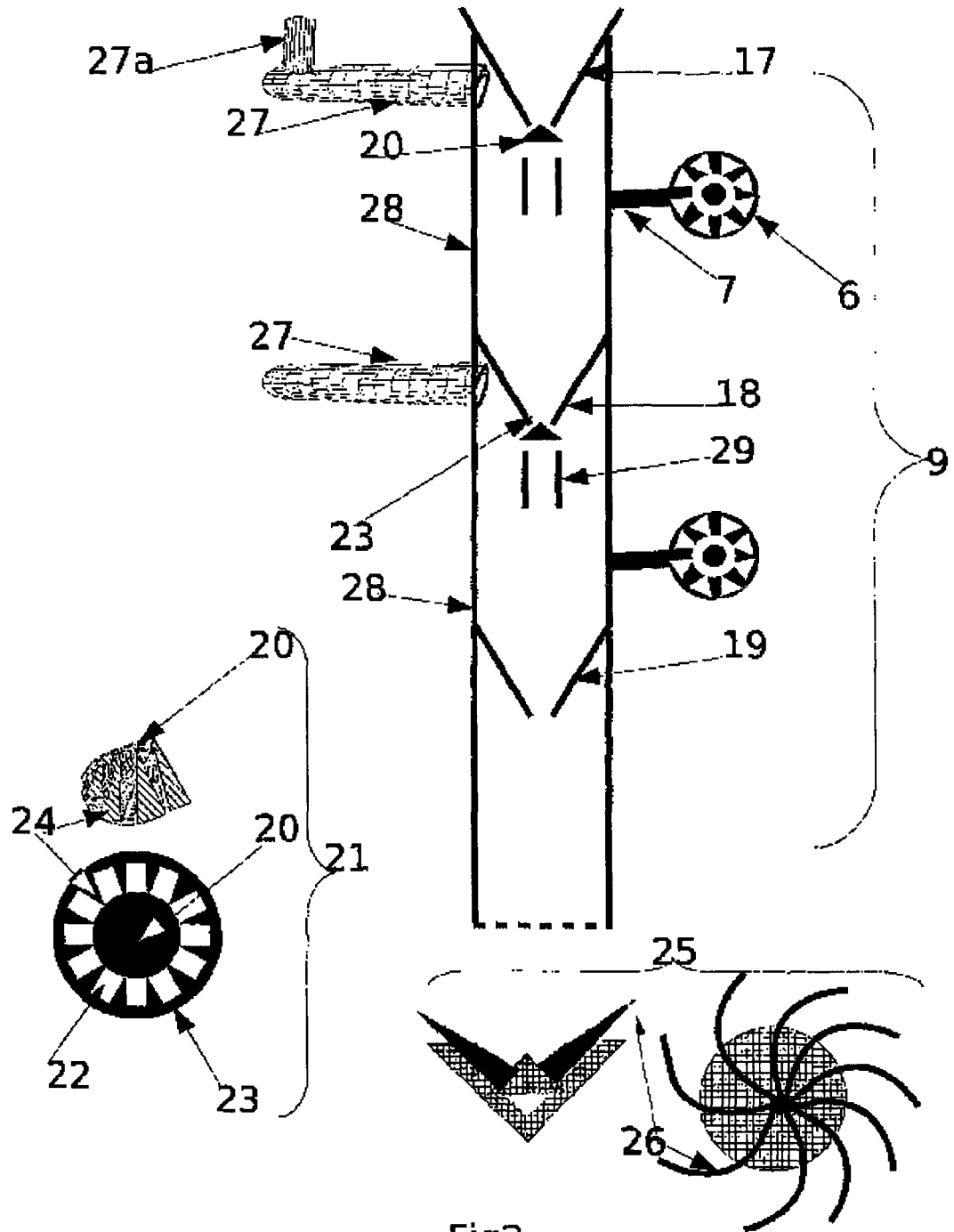


Fig3

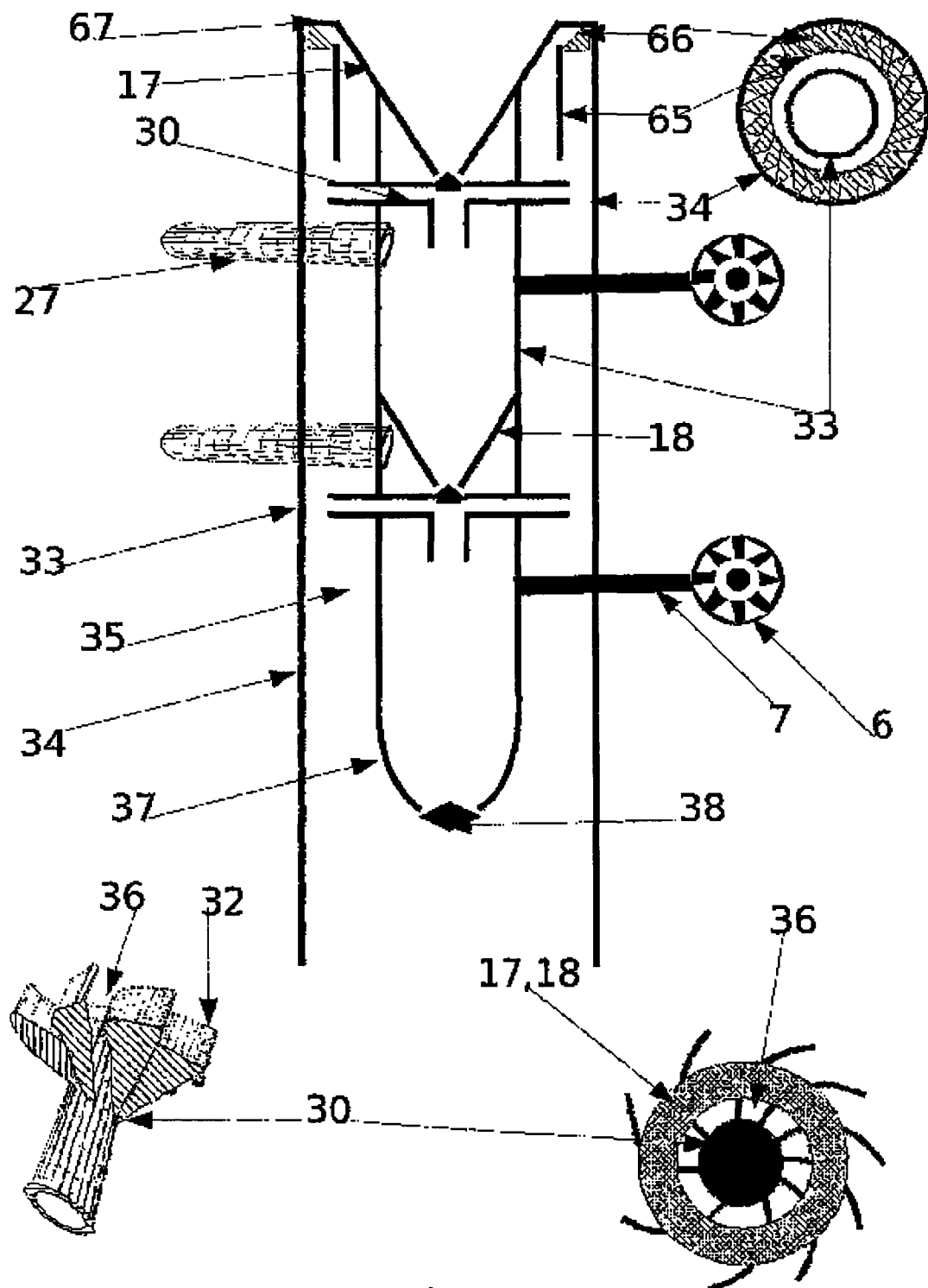


Fig4

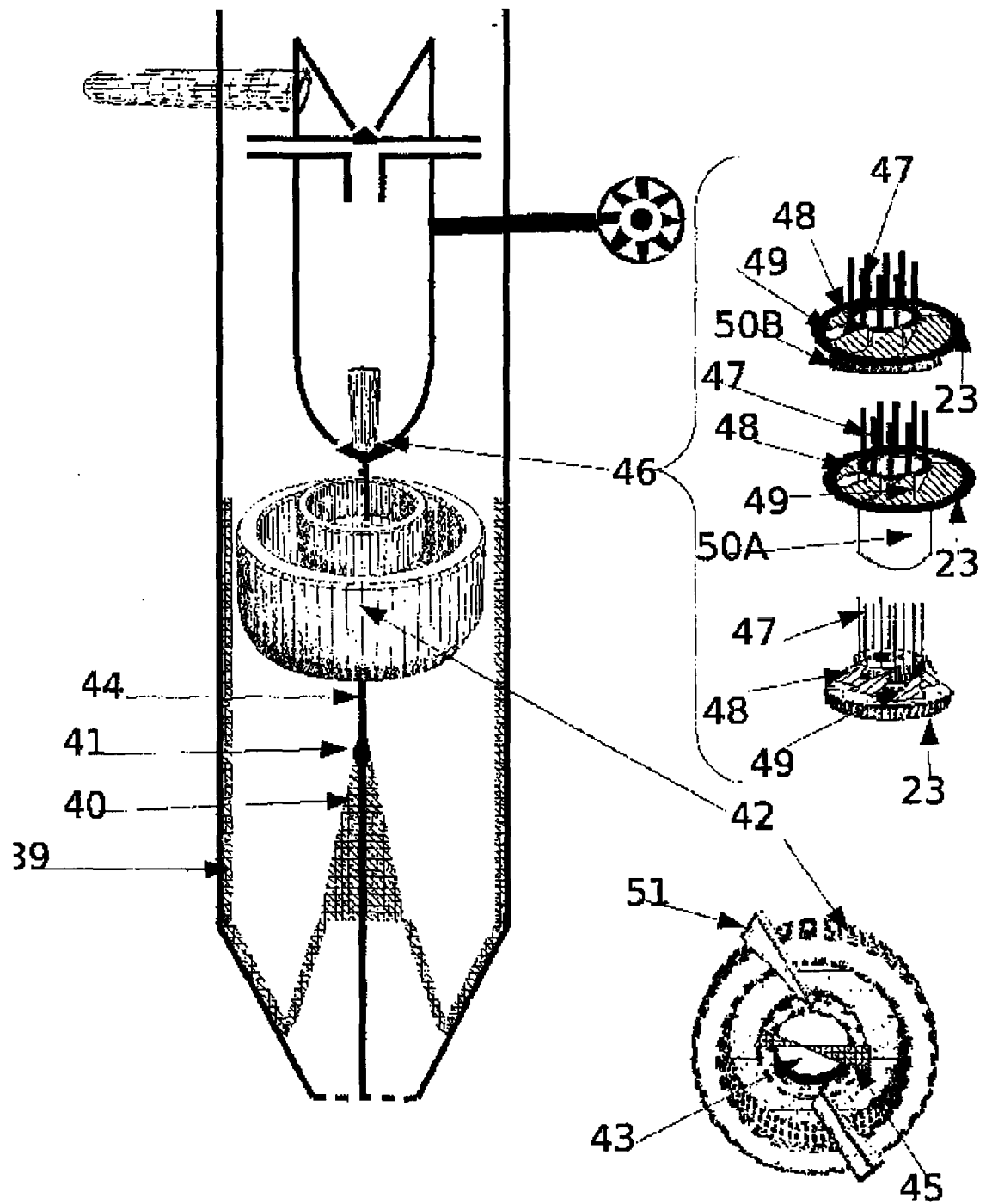


Fig5

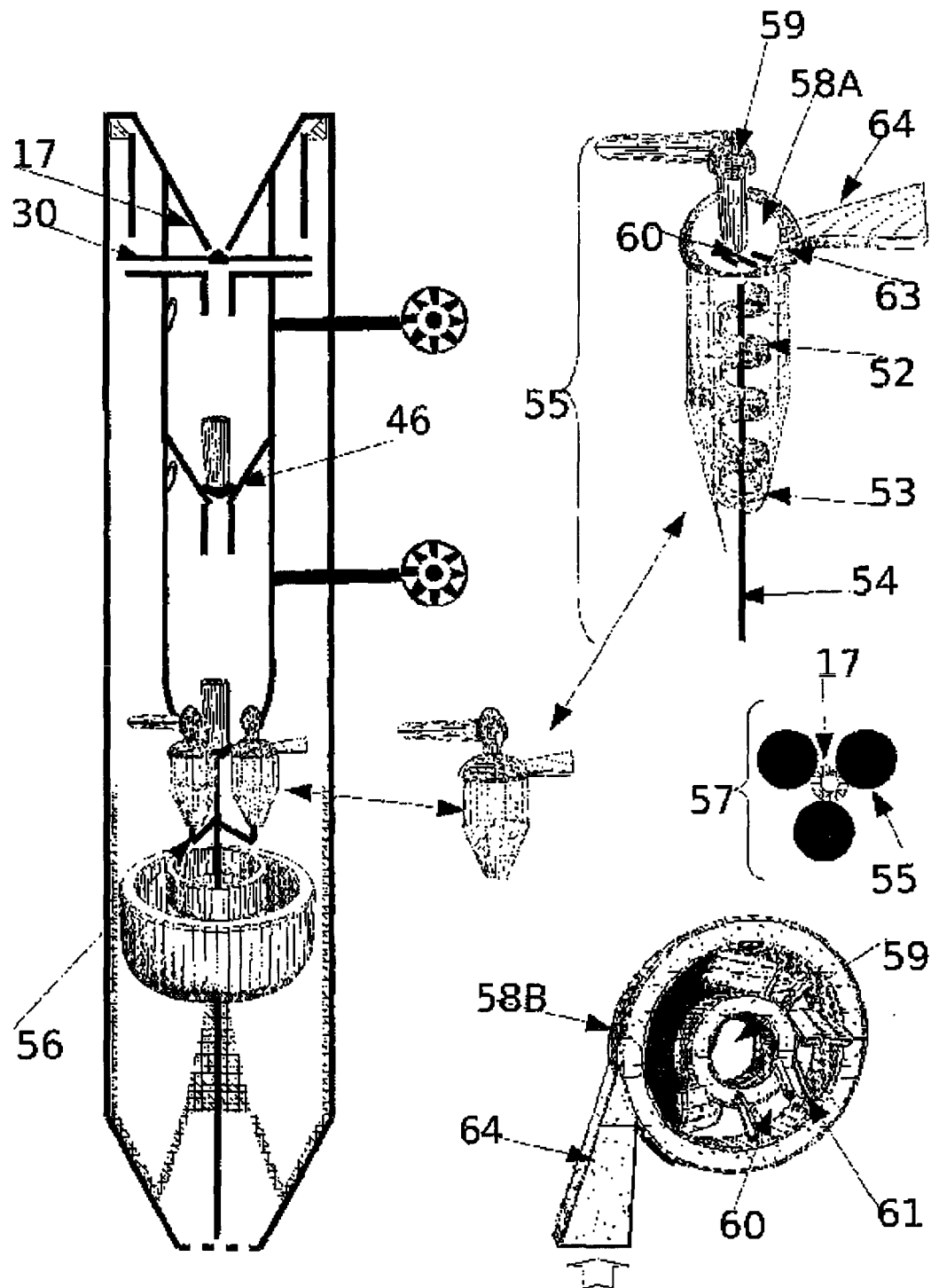


Fig6

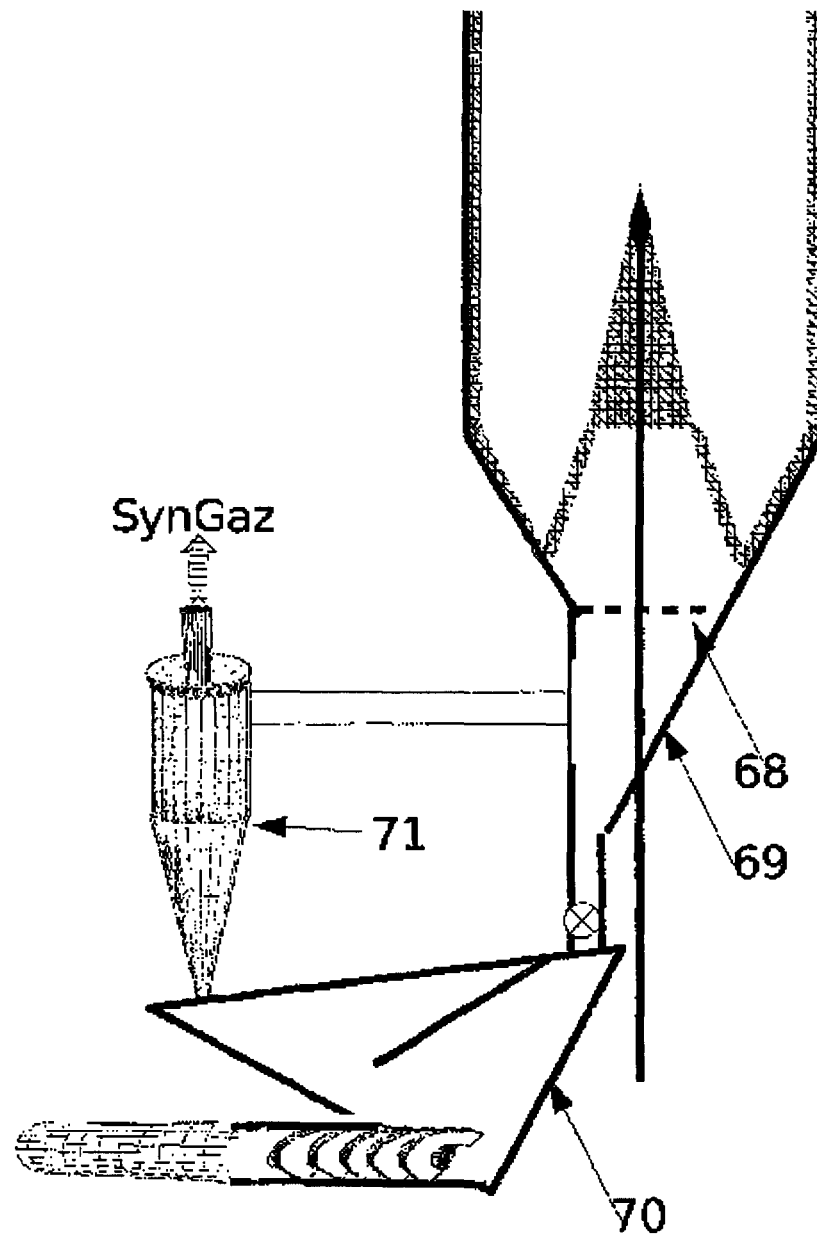


Fig7

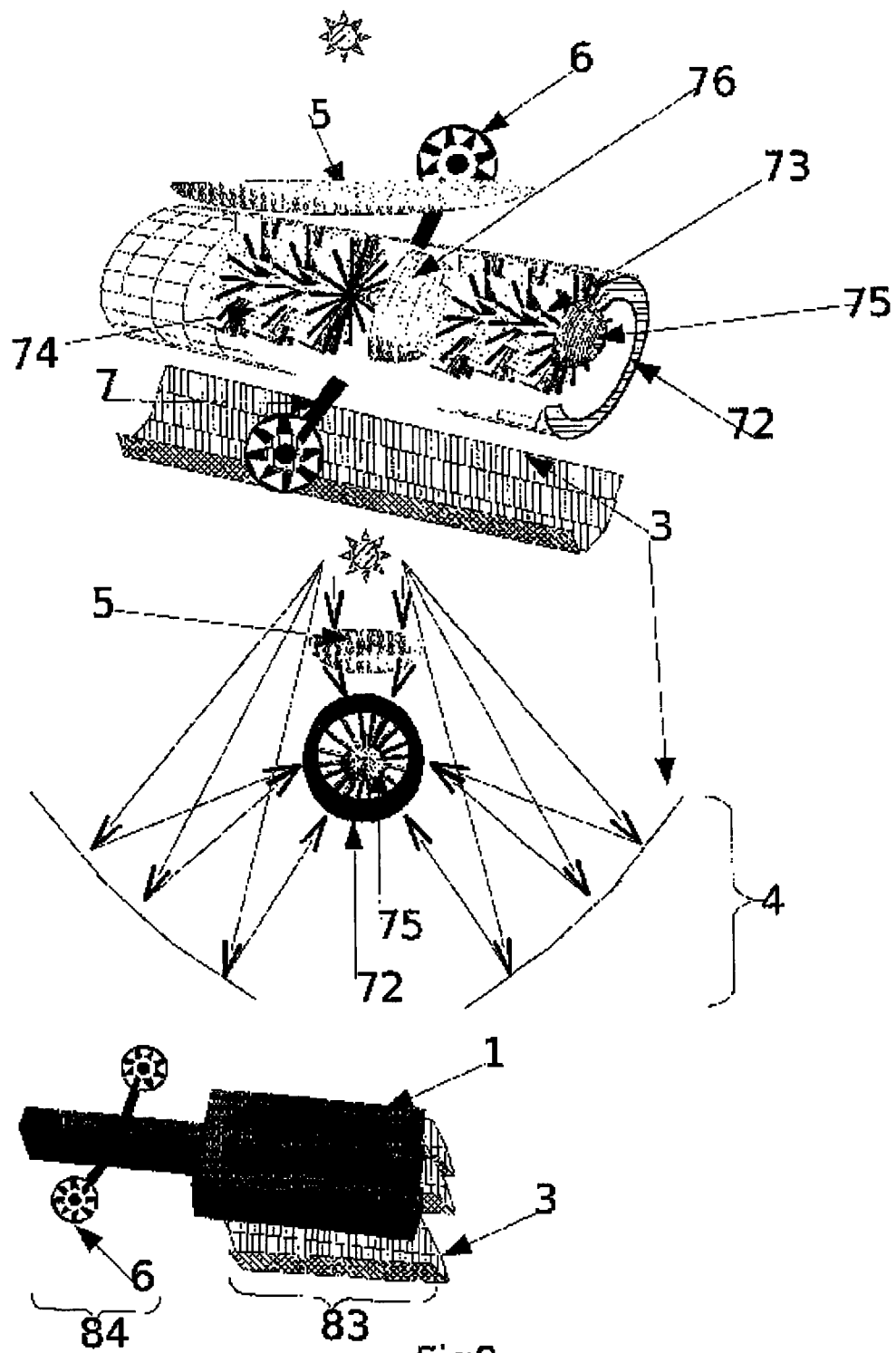


Fig8

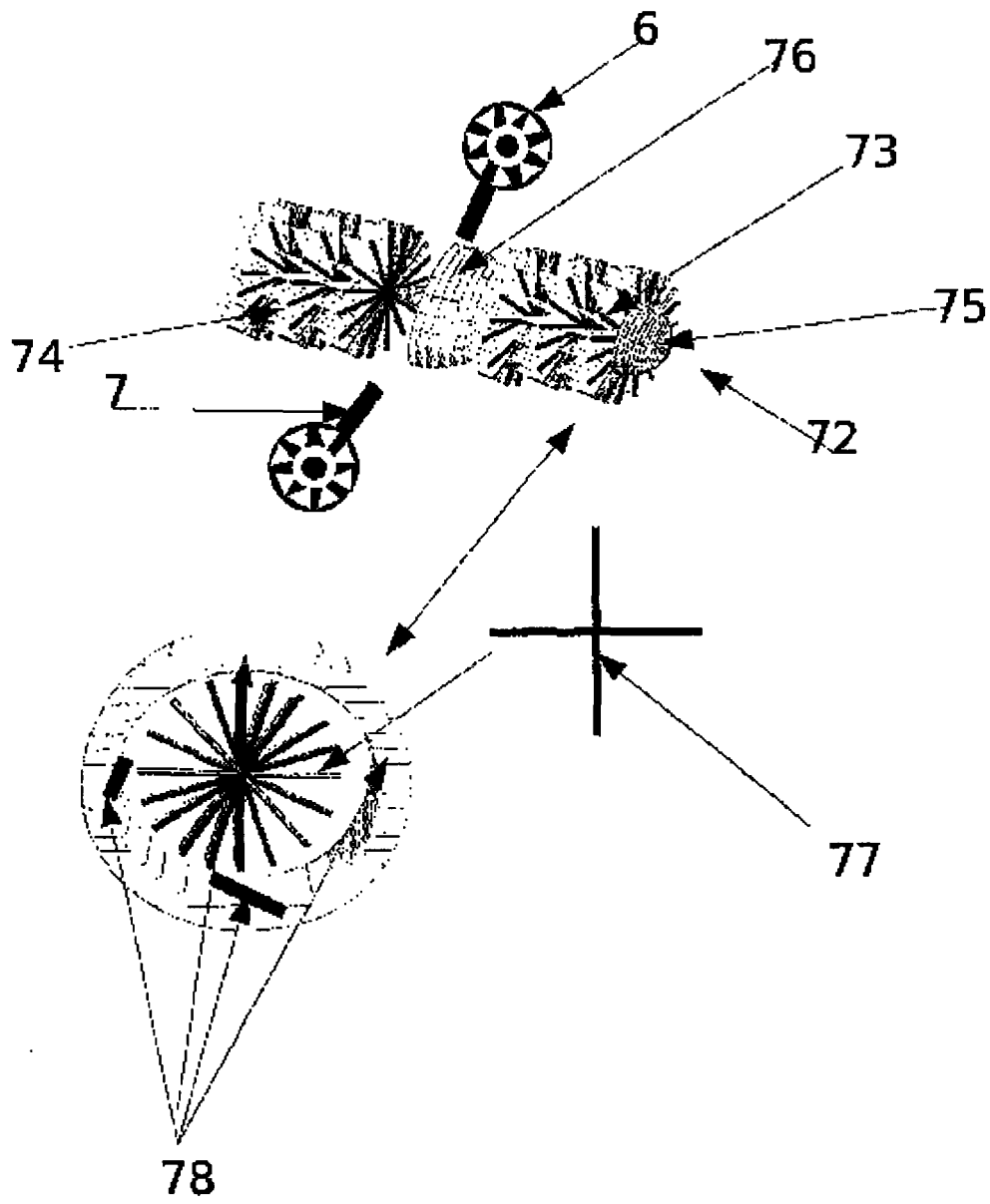


Fig9

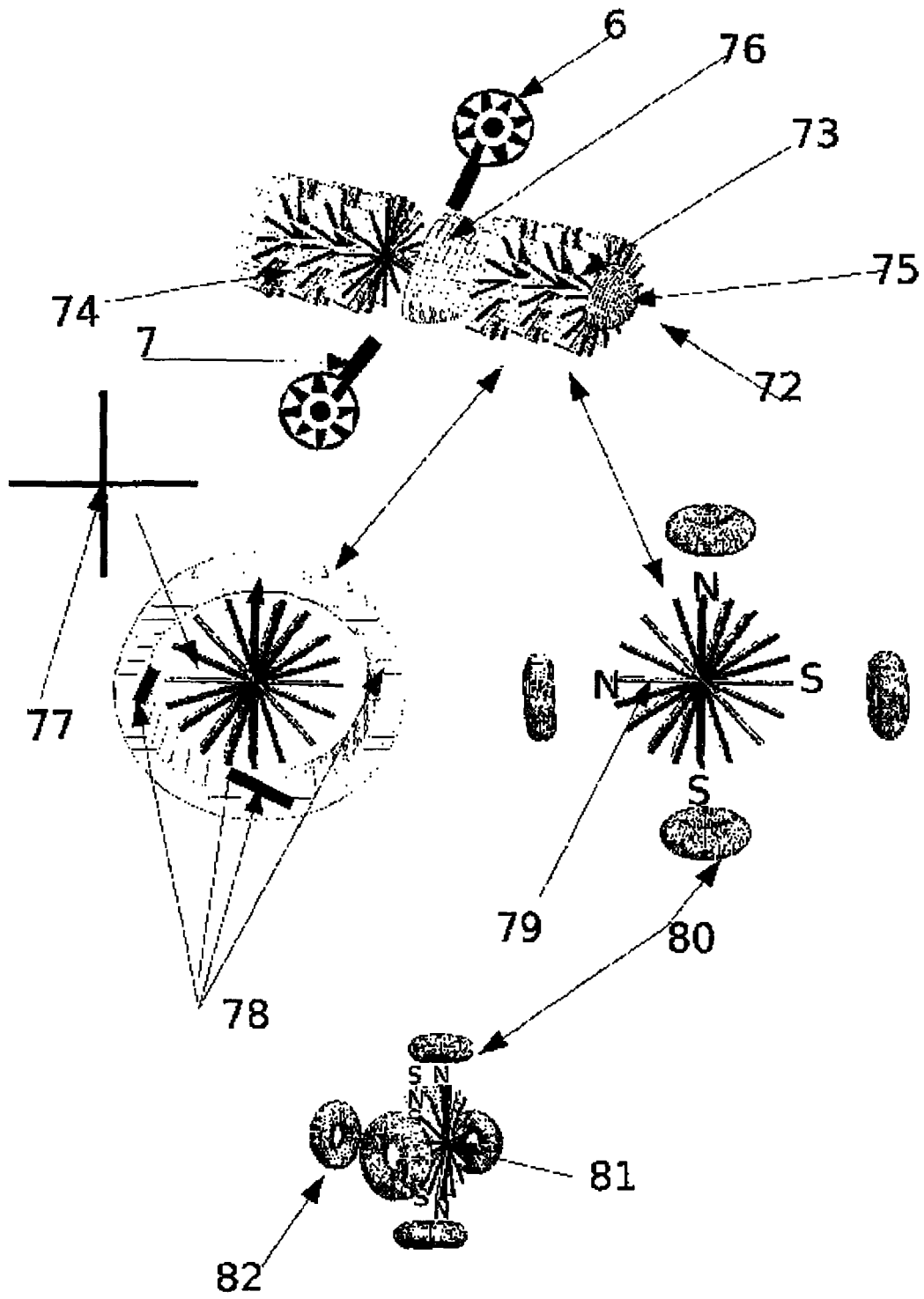


Fig10

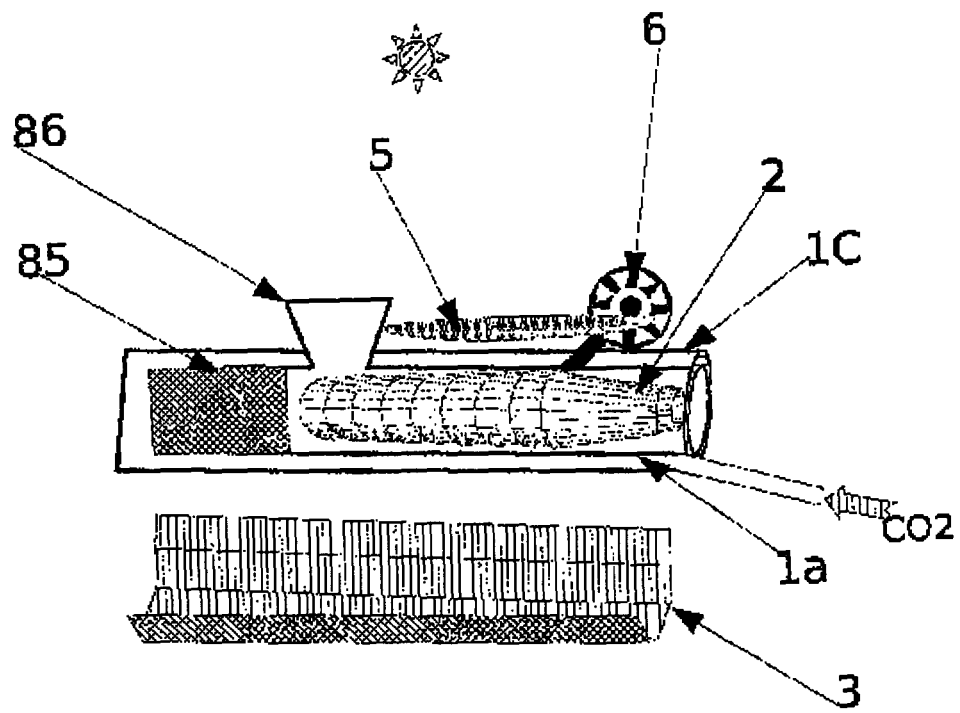


Fig11

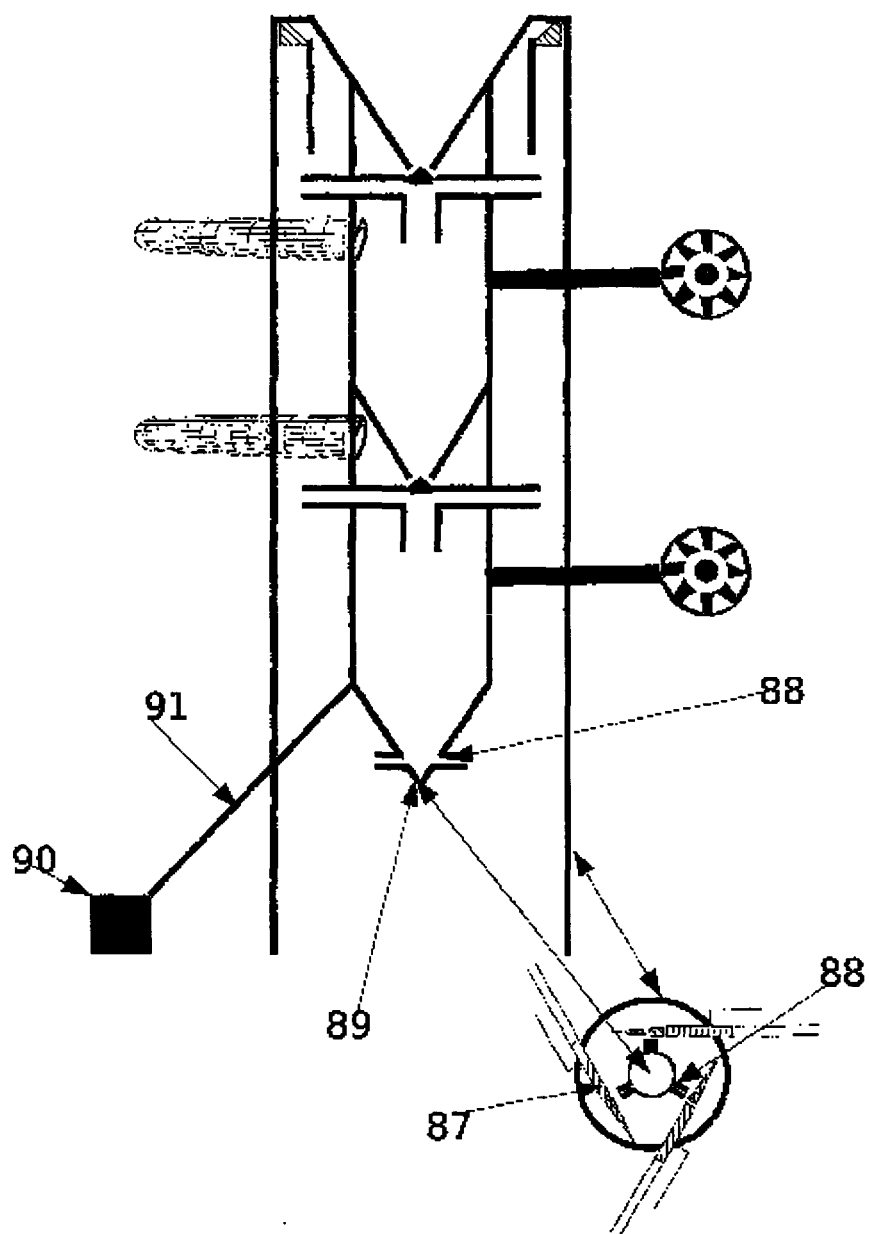


Fig12

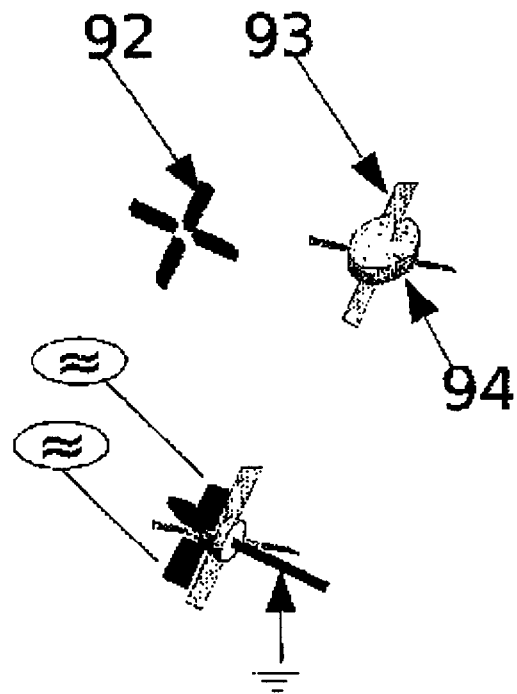


Fig13

