



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

(11) (21) **PI 0305309-1 A**



(22) Data de Depósito: 03/11/2003
(43) Data de Publicação: 02/08/2005
(RPI 1804)

(51) Int. Cl.⁷:
H02N 3/00
C10L 3/00

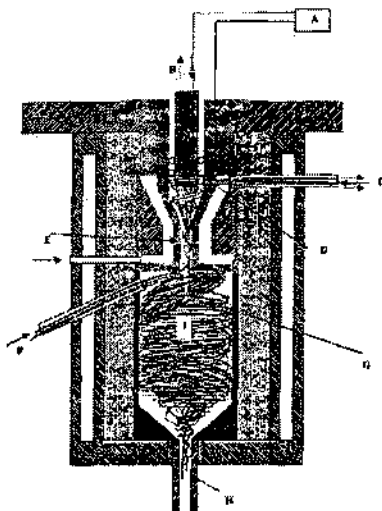
(54) Título: **REFORMADOR PIROLÍTICO A PLASMA PARA A DECOMPOSIÇÃO DE HIDROCARBONETOS OU ÁLCOOIS EM HIDROGÊNIO E CARBONO SÓLIDO**

(71) Depositante(s): Coppe/Ufrj-Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (BR/RJ)

(72) Inventor(es): Paulo Emílio Valadão de Miranda, Aurélio Reis da Costa Labanca, Jorge Néstor Feugas

(74) Procurador: Joubert Gonçalves de Castro

(57) Resumo: "REFORMADOR PIROLÍTICO A PLASMA PARA A DECOMPOSIÇÃO DE HIDROCARBONETOS OU ÁLCOOIS EM HIDROGÊNIO E CARBONO SÓLIDO". A presente invenção se refere a um processo de pirólise a plasma visando a produção de hidrogênio gasoso e material carbonoso sólido a partir da decomposição de hidrocarbonetos e álcoois, aqui exemplificado para a decomposição do gás metano e seu uso. o processo consiste no fornecimento de energia térmica ao fluxo de hidrocarbonetos em quantidade suficiente para a sua reação de decomposição. Utiliza-se um fluxo de gás hidrogênio que é ionizado (o gás do plasma) e que serve de veículo à decomposição do hidrocarboneto. Este fluxo é inicialmente oriundo de fonte externa de hidrogênio e posteriormente composto de hidrogênio gerado pelo próprio processo de pirólise do hidrocarboneto. Uma fonte de energia elétrica de corrente contínua fornece a energia necessária às descargas elétricas no interior do reator em região denominada arco-plasmático.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para
"Reformador Pirolítico a Plasma para a Decomposição de
Hidrocarbonetos ou Álcoois em Hidrogênio e Carbono Sólido".

CAMPO TÉCNICO

5 A presente invenção se refere a um processo de
pirólise a plasma visando à produção de hidrogênio de pureza
elevada e carbono sólido a partir da decomposição de
hidrocarbonetos ou álcoois, aqui exemplificado para a
decomposição do gás metano e seu uso. O processo reivindicado
10 reduz os custos para a obtenção de hidrogênio de elevado teor
de pureza e produz material carbonoso como produto comercial
e ainda disponibiliza energia térmica.

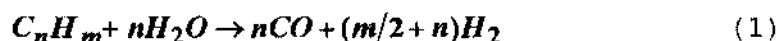
O processo proposto apresenta muitas vantagens em
relação à reforma a vapor de hidrocarbonetos ou álcoois,
15 técnica convencional de produção de hidrogênio. Pela pirólise
de hidrocarbonetos ou álcoois o hidrogênio é gerado sem a
emissão de gases de efeito estufa e praticamente isento de
contaminantes, reduzindo o custo com a purificação do mesmo.
Pela pirólise das moléculas de hidrocarbonetos ou álcoois o
20 carbono é isolado e possui valor econômico que varia de
acordo com as diferentes morfologias que pode apresentar.

TÉCNICA CONVENCIONAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

O hidrogênio é obtido geralmente a partir de
hidrocarbonetos ou álcoois por processos de reforma. Os
25 principais gases gerados na reforma são: H_2 , CO e o CO_2 .
Posterior a etapa de produção do gás rico em hidrogênio, tem-
se a purificação do fluxo gasoso, a fim de se obter
hidrogênio com uma pureza adequada à sua aplicação.

O processo de reforma a vapor do gás natural é o
30 processo mais eficiente e o mais aplicado para a produção de

hidrogênio. No processo de reforma a vapor o hidrocarboneto ou álcool reage no interior do reformador com vapor d'água, reação (1). Para que ocorra a reação é necessário que uma quantidade suficiente de energia seja fornecida aos reagentes, possibilitando a ocorrência dessa reação endotérmica.



Produz-se hidrogênio para diversas aplicações; destaca-se aqui a unidade geradora de hidrogênio existente em muitas refinarias e que tem como objetivo fornecer hidrogênio de pureza elevada aos processos de hidrotratamento e hidroconversão.

O principal método de obtenção de hidrogênio em refinarias consiste na geração de gás rico em hidrogênio pela reforma a vapor do gás natural, e seu tratamento até que seja atingida a pureza requerida.

Primeiramente, para a geração de hidrogênio pela a reforma a vapor, faz-se necessário um pré-tratamento do combustível (carga) a ser processado. O tratamento depende do combustível empregado. Usa-se geralmente o gás natural, gás de refinaria ou nafta.

O sistema de pré-tratamento visa remover ou reduzir os contaminantes a níveis toleráveis pelo processo, principalmente para resguardar os catalisadores, comuns no processo de reforma a vapor, sendo os compostos de enxofre os maiores inativadores dos catalisadores.

Vapor d'água deve ser gerado para reagir com a carga pré-tratada e produzir gás rico em hidrogênio [reação (1)], com o auxílio de catalisadores.

Subseqüente ao processo de reforma a vapor, faz-se a conversão do CO, induzindo este elemento a reagir com a água, reação (2), aumentando a quantidade de hidrogênio produzido. Nesta etapa também se faz o uso de catalisadores.



Após a conversão do CO, inicia-se a etapa de purificação do hidrogênio. Geralmente, pela absorção do CO₂ por aminas, sendo possível a obtenção de hidrogênio com 97% de pureza. Existe também o sistema conhecido como PSA
10 (*Pressure Swing Adsorption*), que possibilita a obtenção de hidrogênio com pureza próxima a 100%. Os sistemas deste tipo utilizam peneiras moleculares que não adsorvem moléculas apolares de pequenas dimensões como o H₂ e interagem com moléculas polares. Portanto, o hidrogênio, gás de alto poder
15 de difusão é adequado a este sistema de purificação.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

A invenção ora proposta descreve um processo de decomposição a plasma de hidrocarbonetos ou álcoois aqui exemplificado para o metano, que consiste no fornecimento de
20 energia térmica ao fluxo de hidrocarbonetos ou álcoois em quantidade suficiente para a sua reação de decomposição. Utiliza-se um fluxo de gás hidrogênio que é ionizado (o gás do plasma) e que serve de veículo à decomposição do hidrocarboneto. Este fluxo é inicialmente oriundo de fonte
25 externa de hidrogênio e posteriormente composto de hidrogênio gerado pelo próprio processo de pirólise do hidrocarboneto. O gás do plasma também pode ser composto por mistura de hidrogênio com hidrocarbonetos ou somente por hidrocarbonetos.

Uma fonte de energia elétrica de corrente contínua fornece a energia necessária às descargas elétricas no interior do reator em região denominada arco-plasmático. A câmara de reação apresenta as condições necessárias à decomposição térmica do hidrocarboneto ou álcool.

Para se iniciar a descarga elétrica é feita a ionização do espaço entre eletrodos mediante a geração de uma faísca pela aplicação de uma alta tensão (2000 V a 5000 V). Esta faísca cria um meio condutor de eletricidade, o plasma do gás hidrogênio (ou deste misturado com hidrocarbonetos ou somente de hidrocarbonetos) introduzido entre os eletrodos. Por ser, a partir desse momento, um meio condutor, a resistência decresce bruscamente, passando a requerer uma voltagem baixa para manter a descarga. Nesta etapa a baixa voltagem (~ 100 V) está acompanhada por uma alta corrente (> 100 A), cujo valor dependerá da vazão de gás a processar. Devido ao fato do gás do plasma circular com um fluxo elevado, sairá à frente dos eletrodos com um dardo de plasma de hidrogênio (ou deste misturado com hidrocarbonetos ou somente de hidrocarbonetos), ingressando na câmara de reação em grande velocidade. Próximo à saída do fluxo de plasma do gás do plasma (totalmente ionizado e à temperatura elevada, composto de hidrogênio ou deste misturado com hidrocarbonetos ou somente de hidrocarbonetos), se injeta o hidrocarboneto a ser processado com direção e vazão controladas. Este hidrocarboneto gasoso, ao tomar contato com o plasma se incorpora a ele, sofrendo a decomposição desejada, com a conseqüente produção de hidrogênio e carbono. A partir desse momento o processo passa a funcionar em forma contínua.

O produto da pirólise é submetido a um resfriamento até que a matéria carbonosa se solidifique e o fluxo gasoso atinja uma temperatura adequada para sua filtragem. Os gases são previamente separados em uma peneira molecular, separando-se do hidrogênio os hidrocarbonetos que não foram decompostos totalmente, estes juntamente com parte do hidrogênio produzido são retroalimentados ao reator, proporcionando o gás do plasma e aumentando a eficiência na conversão.

10 A figura 1 ilustra o reator pirolítico a plasma.

Onde:

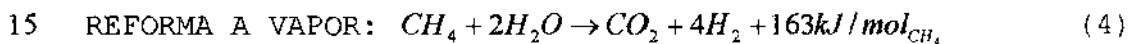
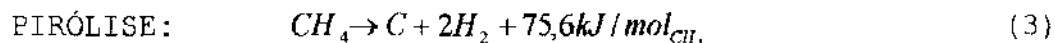
- A - Fonte elétrica
- B - Refrigeração a água do catodo
- C - Entrada do gás do plasma - Hidrogênio
- 15 D - Catodo refrigerado a água
- E - Anodo
- F - Injeção do hidrocarboneto
- G - Câmara de reação (região de alta temperatura)
- H - Saída dos produtos (H_2 e C)
- 20 I - Linhas de corrente (simulação computacional)

A energia elétrica consumida pelo reator assim como outros parâmetros dependem da composição do combustível a ser processado, da sua quantidade e também da geometria do reator. Para o reator de bancada em escala laboratorial pode-se usar, por exemplo, os seguintes valores para a fonte de energia: Correntes na faixa de 50-100 A e uma tensão de 30-60 V para processar gás metano a uma vazão de 0,5 g/s.

30 O processo além de produzir hidrogênio e carbono disponibiliza energia térmica, que pode ser usada na geração de vapor, por exemplo.

Com o principal intuito em otimizar a qualidade do material carbonoso produzido foram feitos modelamentos fluido-dinâmicos que permitiu avaliar o modo adequado de injeção dos gases (gás a ser processado e gás do plasma) no interior do reator. A figura 1 ilustra um modo considerado adequado para a injeção dos gases.

Após a passagem do fluxo a ser processado pelo reator, obtém-se: hidrogênio, carbono e outros gases, os quais dependem da composição do combustível processado. A equação (3) descreve a reação de pirólise do metano, principal constituinte do gás natural, e a equação (4) mostra a reação da reforma a vapor do metano para efeito de comparação.



Na pirólise do metano, percebe-se que não há formação de CO₂, e sim de carbono em sua forma elementar; ou seja, além de tornar possível a eliminação de CO₂ na produção de hidrogênio, produz carbono que pode ser utilizado como produto de valor comercial, como negro-de-fumo, por exemplo.

A ausência de outros reagentes facilita o processo de separação do H₂, já que não é complicado separar a fase que irá se solidificar após o resfriamento (material carbonoso) da fase gasosa (H₂ e hidrocarbonetos). Quanto à separação do fluxo de hidrogênio do fluxo de hidrocarbonetos é dada pela diferença de tamanho e polaridade entre as moléculas.

A eficiência do processo de reforma a plasma do metano na produção de hidrogênio é cerca de 55%. A eficiência total do processo, ou seja, a geração de hidrogênio, de

energia térmica e a produção de material carbonoso a partir do processamento de hidrocarbonetos, considerando o consumo de energia elétrica, é próxima a 98%.

Os seguintes fatores favorecem a adoção da pirólise a plasma em detrimento à reforma a vapor:

→ O tratamento prévio do combustível, que depende da composição química do mesmo, é simplificado ou mesmo eliminado no processo de pirólise a plasma. Pelo fato do reator não possuir catalisadores não existe o problema de envenenamento causado por contaminantes existentes no combustível.

→ O processo de reforma pirolítica a plasma não utiliza vapor, portanto não há a necessidade da geração de vapor. Além do mais, o processo de reforma pirolítica a plasma disponibiliza energia térmica.

→ Não existe no processo de reforma pirolítica a plasma a formação de CO, eliminando esta etapa de purificação do gás produzido pela reforma a vapor.

→ A purificação do hidrogênio é muito simplificada em relação ao processo convencional. O carbono é separado do fluxo gasoso e posteriormente uma peneira molecular adsorve moléculas polares permitindo a passagem das moléculas de hidrogênio.

Outra vantagem do processo reivindicado é a capacidade de produzir carbono sólido em diferentes morfologias, possibilitando inclusive a produção de carbono de maior valor agregado, na forma de fulerenos e nanotubos. Nestes nanomateriais os átomos de carbono se encontram arrançados de uma maneira alotrópica específica, conferindo

aos mesmos propriedades singulares, motivo que os têm tornado objeto de muitas pesquisas.

A redução de custos em relação à técnica convencional pelo emprego da técnica mencionada é evidenciada pelos seguintes aspectos característicos do processo de reforma pirolítica a plasma:

A inexistência de catalisadores elimina os custos dos mesmos e os relativos aos cuidados e a manutenção dos mesmos. Reduz os custos de tratamento prévio da carga a ser processada.

O reator pirolítico a plasma é mais compacto que o reformador a vapor. O plasma apresenta alta densidade energética e, além disso, neste processo não existe o elemento reagente (vapor d'água, como na reforma a vapor) o que reduz a dimensão do reator e de todos os outros equipamentos que interagem com o fluxo gasoso, tais como trocadores de calor, tubulações e sistemas de purificação do hidrogênio. Isso representa, portanto uma redução substancial nos custos.

A geração de hidrogênio pela reforma pirolítica a plasma elimina os gastos com aminas e conseqüentemente os custos relativos ao processo de regeneração das mesmas.

A técnica proposta merece destaque por apresentar grande apelo ambiental por não emitir gases do efeito estufa, diferentemente da reforma a vapor. O que além de representar ganho ambiental, pode significar ganho econômico.

O reator pirolítico a plasma pode processar hidrocarbonetos mais pesados que o metano, como por exemplo,

o etano ou propano, especialmente quando o objetivo principal não for maximização na obtenção de hidrogênio.

5 Laurent Fulcheri [1,2 e 3], pesquisador da *Ecole des Mines de Paris*, patenteou o processo de pirólise a plasma do gás natural com ênfase na produção de materiais carbonosos de alto valor agregado, cujo principal objetivo é a produção de nanotubos e fulerenos em larga escala a partir da decomposição do metano.

10 A KVAERNER S.A. [4,5 e 6] desenvolveu um processo de pirólise a plasma em escala comercial para a produção de negro-de-fumo e hidrogênio a partir de hidrocarbonetos.

15 O Processo desenvolvido por Fulcheri [1,2 e 3] utiliza corrente alternada e a descarga elétrica entre três eletrodos para ionização dos gases e para o fornecimento da energia à reação de decomposição do metano. O processo da Kvaerner utiliza eletrodos de grafita e corrente contínua.

20 O processo reivindicado faz uso de corrente contínua e apresenta materiais diferentes daqueles usados nos estudos citados; apresenta uma relação entre as posições de injeção do hidrocarboneto e do gás do plasma de modo a permitir a otimização da decomposição do hidrocarboneto. Isso significa otimizar a produção de hidrogênio pela decomposição mais completa do hidrocarboneto ou álcool e maximizar a produção de material carbonoso de maior valor agregado.

25 PARTICULARIDADES DO PROCESSO

O Processo de Pirólise a Plasma por arco não-transferido para decomposição de hidrocarboneto ou álcool em hidrogênio e material carbonoso pode ser empregado em plantas

industriais, em unidades estacionárias e em veículos, fazendo ou não uso de pilhas a combustível.

Um exemplo é a sua aplicação em refinarias de petróleo e em outras plantas industriais demandantes de hidrogênio. Sendo capaz de fornecer às mesmas os seguintes insumos: hidrogênio, energia térmica e material carbonoso.

Outro objetivo pode ser a produção de negro-de-fumo, de material carbonoso de alto valor agregado e até a obtenção de fulerenos e nanotubos.

O Processo de Pirólise a Plasma pode ser aplicado para a geração de hidrogênio a fim de alimentar pilhas a combustível e também para enriquecer com hidrogênio a mistura de combustão do combustível em motores a combustão, com seu uso em veículos automotores, como automóveis, ônibus, caminhões, motocicletas e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível, navios e assemelhados motorizados com caldeira, motor a combustão ou com pilha a combustível, trens e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível, aviões e assemelhados motorizados com turbina, motor a combustão ou com pilha a combustível, naves espaciais e assemelhados motorizadas com reator a combustão ou com pilha a combustível, dentre outras.

O reator pirolítico a plasma pode operar nas seguintes faixas:

- De 50 a 100 A e 30 a 60 V;
- De 100 a 200 A e 60 a 90 V;
- De 150 a 300 A e 90 a 180 V;
- De 200 a 400 A e 120 a 180 V;
- De 300 a 500 A e 170 a 400 V.

Os valores para a corrente e a tensão a serem aplicadas dependem do combustível processado e da vazão mássica de hidrogênio que se deseja produzir, portanto os valores acima são meros exemplos e podem ser extrapolados, multiplicando-se as faixas referidas por valores inteiros. Um exemplo de faixa de operação é o processamento de gás natural a uma vazão de 5 g/s operando preferencialmente com correntes da ordem de 300 a 500 A e tensão da ordem de 170 a 400 V.

Através do processo reivindicado é possível a obtenção de energia elétrica a partir de combustível fóssil sem a geração de gases do efeito estufa, e em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, para uso, como por exemplo, em residências civis ou militares, condomínios civis ou militares, indústrias civis ou militares, hospitais e assemelhados civis ou militares, escolas e assemelhados civis ou militares, estabelecimentos comerciais e estabelecimentos empresariais, dentre outros. Isto se deve ao fato da oferta de energia elétrica no Brasil ser em sua maioria proveniente de fonte renovável (hidrelétricas). Portanto o Brasil é um dos poucos países capazes de aproveitar da tecnologia como artifício para a mitigação do efeito estufa.

REIVINDICAÇÕES

1- "Reformador Pirolítico a Plasma" caracterizado por ser o reator composto, pelos componentes listados abaixo, conforme mostrado na figura 1:

5

- A - Fonte elétrica
- B - Sistema de refrigeração do catodo;
- C - Tubulação de injeção do gás do plasma;
- D - Catodo refrigerado;
- E - Anodo;

10

- F - Tubulação de injeção do hidrocarboneto
- G - Câmara de reação (região de alta temperatura)
- H - Tubulação de saída dos produtos (H₂ e C)

15

2- "Processo de pirólise a plasma" por arco não-transferido de hidrocarbonetos ou álcoois para obtenção de hidrogênio e materiais carbonosos a partir da operação do reator da reivindicação 1, caracterizado pela otimização dos produtos obtidos: hidrogênio e material carbonoso e pela utilização de gás do plasma composto por hidrogênio puro ou hidrogênio misturado com outros gases.

20

3- "Processo" de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelos valores para a corrente e a tensão a serem aplicadas, dependerem do combustível processado e da vazão mássica de hidrogênio que se deseja produzir.

25

4- "Processo" de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pela otimização dos produtos obtidos: hidrogênio e material carbonoso e pela utilização de gás do plasma composto por hidrogênio puro; hidrogênio misturado com hidrocarbonetos ou somente por hidrocarbonetos.

5- "Processo" de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pela operação do reator pirolítico a plasma, nas seguintes faixas:

De 50 a 100A e 30 a 60 V;

5 De 100 a 200A e 60 a 90 V;

De 150 a 300 A e 90 a 180 V;

De 200 a 400 A e 120 a 180 V;

De 300 a 500 A e 170 a 400 V

10 6- "Processo" de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo processamento de 5 g/s (CNTP) de gás natural no reator pirolítico a plasma, operando preferencialmente dentro da seguinte faixa:

De 300 a 500 A e 170 a 400 V.

15 7- "Processo" de acordo com as reivindicações 2, 3, 4 ,5 e 6 caracterizado pela obtenção de energia elétrica a partir de combustível fóssil sem a geração de gases do efeito estufa.

8 - "Uso do Processo de Pirólise a Plasma" a partir da operação do reator descrito na reivindicação 1, 20 caracterizado por sua aplicação em refinarias de petróleo, capaz de fornecer à planta de processamento de combustíveis e outras plantas industriais demandantes de hidrogênio, os seguintes insumos: hidrogênio, energia térmica e material carbonoso.

25 9- "Uso" caracterizado por sua aplicação em unidades geradoras de hidrogênio com alto teor de pureza.

30 10- "Uso" caracterizado pela utilização de gás natural e outros hidrocarbonetos como combustível a ser processado, gerando hidrogênio, energia térmica e material carbonoso.

11- "Uso" caracterizado pela produção de negro de fumo.

12- "Uso" caracterizado pela produção de material carbonoso de alto valor agregado.

5 13- "Uso" caracterizado pela produção de fulerenos e nanotubos.

14- "Uso" caracterizado pela sua aplicação para a geração de hidrogênio a fim de alimentar pilhas a combustível.

10 15- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em veículos automotores com motores a combustão para o enriquecimento com hidrogênio da mistura de combustão do combustível.

15 16- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em automóveis e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível.

17- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em ônibus e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível.

20 18- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em caminhões e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível.

25 19- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em motocicletas e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível.

20- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em navios e assemelhados motorizados com caldeira, motor a combustão ou com pilha a combustível.

21- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em trens e assemelhados motorizados com motor a combustão ou com pilha a combustível.

5 22- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em aviões e assemelhados motorizados com turbina, motor a combustão ou com pilha a combustível.

23- "Uso" caracterizado pela sua aplicação em naves espaciais e assemelhados motorizados com reator a combustão ou com pilha a combustível.

10 24- "Uso" de acordo com as reivindicações de 14 a 23, caracterizado pela sua aplicação em unidades de potência auxiliares (e não para a motorização).

15 25- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, residências, civis ou militares.

26- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, condomínios, civis ou militares.

20 27- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, indústrias, civis ou militares.

28- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, hospitais e assemelhados, civis ou militares.

25 29- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, escolas e assemelhados, civis ou militares.

30 30- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, estabelecimentos comerciais.

31- "Uso" caracterizado pela aplicação em unidades estacionárias de geração de energia elétrica, tais como, estabelecimentos empresariais.

FIGURAS

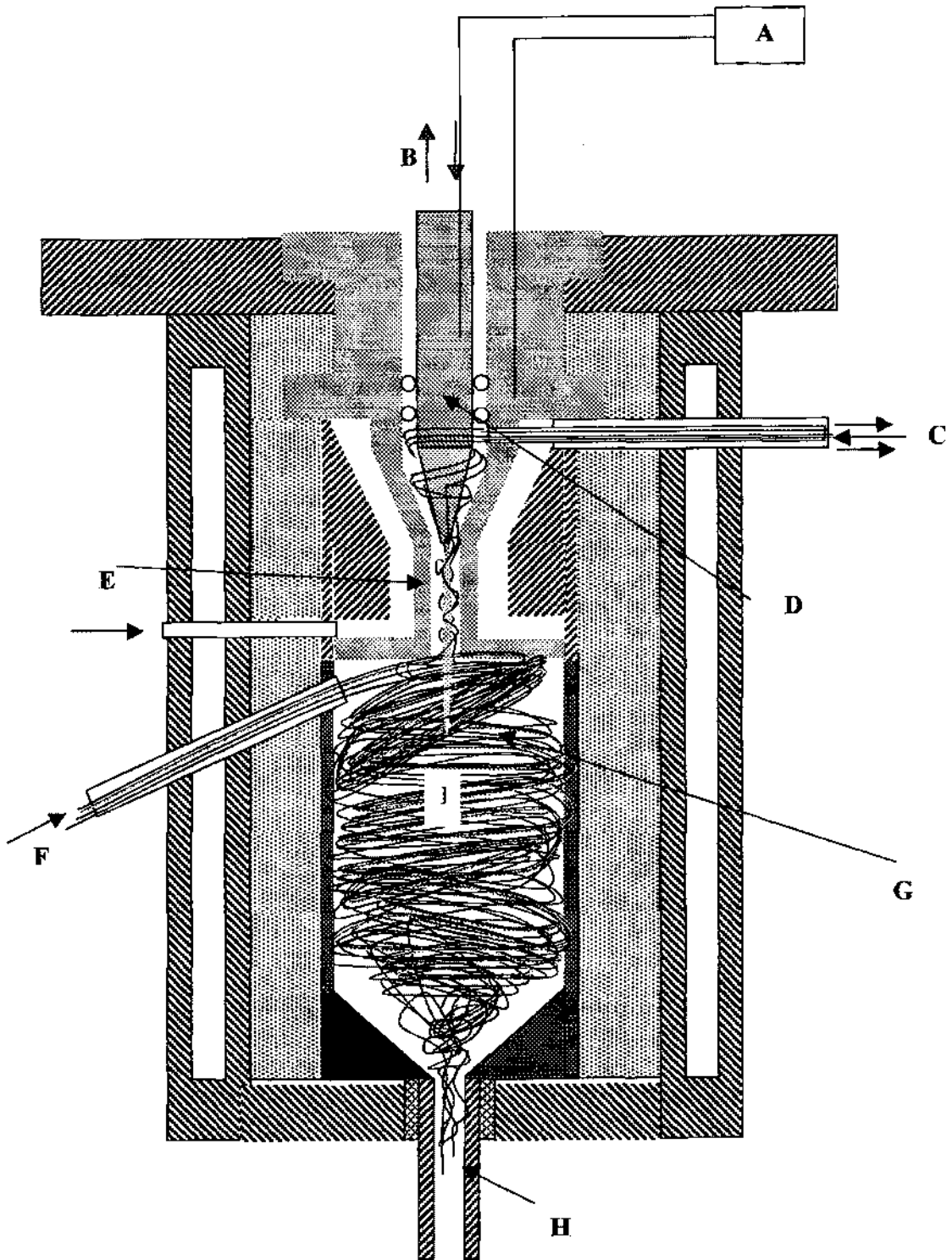


Figura 1

RESUMO

Patente de Invenção para "Reformador Pírolítico a Plasma para a Decomposição de Hidrocarbonetos ou Álcoois em Hidrogênio e Carbono Sólido".

5 A presente invenção se refere a um processo de pirólise a plasma visando a produção de hidrogênio gasoso e material carbonoso sólido a partir da decomposição de hidrocarbonetos e álcoois, aqui exemplificado para a decomposição do gás metano e seu uso. O processo consiste no
10 fornecimento de energia térmica ao fluxo de hidrocarbonetos em quantidade suficiente para a sua reação de decomposição. Utiliza-se um fluxo de gás hidrogênio que é ionizado (o gás do plasma) e que serve de veículo à decomposição do hidrocarboneto. Este fluxo é inicialmente oriundo de fonte
15 externa de hidrogênio e posteriormente composto de hidrogênio gerado pelo próprio processo de pirólise do hidrocarboneto. Uma fonte de energia elétrica de corrente contínua fornece a energia necessária às descargas elétricas no interior do reator em região denominada arco-plasmático.