República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 112013008047-7 B1

(22) Data do Depósito: 20/09/2011

(45) Data de Concessão: 08/12/2020

(54) Título: CONJUNTO DE TURBINA, PROCESSO E SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

(51) Int.Cl.: F01D 5/08; F01D 5/18; F01D 25/14; F02C 3/34.

(30) Prioridade Unionista: 19/09/2011 US 13/236,240; 21/09/2010 US 61/385,047; 21/09/2010 US 61/385,039; 28/01/2011 US 61/437,330.

(73) Titular(es): PALMER LABS, LLC; 8, RIVERS CAPITAL, LLC.

(72) Inventor(es): MILES R. PALMER; RODNEY JOHN ALLAM; JEREMY ERON FETVEDT.

(86) Pedido PCT: PCT US2011052375 de 20/09/2011

(87) Publicação PCT: WO 2012/040214 de 29/03/2012

(85) Data do Início da Fase Nacional: 21/03/2013

(57) Resumo: CONJUNTO DE TURBINA, PROCESSO E SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA. A presente invenção refere-se a processo, conjunto s e sistemas para produção de energia, que podem propiciar componentes mais eficientes e baratos, com origem em controle, redução ou eliminação de erosão mecânica de pá de turbina (400) por erosão por material particulado ou química por meio de gases em um fluxo de produto de combustão (320). Os processos, conjuntos e sistemas podem incluir o uso de pás de turbina (400), que operam com uma velocidade de pá que é significativamente reduzida em relação às turbina (400)s convencionais usa das em sistemas de produção de energia típicos. Os processos e sistema s também podem fazer uso de um fluido circulante (503) reciclado, para proteção de transpiração da turbina (400) e/ou de outros componentes. Ainda mais, o fluido circulante (503) reciclado pode ser empregado para proporciona r materiais de limpeza para a turbina (400).

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"CONJUNTO DE TURBINA, PROCESSO E SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA".**

CAMPO DA INVENÇÃO

[0001] A presente invenção refere-se a componentes de turbina e combustor, que podem ser usados em processos e sistemas de produção de energia. A invenção também proporciona processos de uso desses componentes de turbina e combustor na produção de energia.

ANTECEDENTES

[0002] As turbinas a gás são rotineiramente usadas em sistemas e processos de produção de energia, para extrair energia de um fluxo de gases de combustão, que é dirigido pelas pás presentes na turbina, para girar um eixo da turbina. A energia pode ser extraída do eixo rotativo por um gerador elétrico, para proporcionar energia na forma de eletricidade. Devido às condições extremas (por exemplo, altas temperaturas e presença de materiais erosivos e/ou corrosivos), sob as quais as turbinas são operadas em plantas de produção de energia típicas (por exemplo, plantas de energia de queima de carvão), os componentes de turbinas a gás são formados tipicamente de materiais de alto desempenho. Desse modo, as turbinas a gás são frequentemente componentes de alto custo das instalações de produção de energia.

[0003] As turbinas existentes podem operar com temperaturas de entrada de cerca de 1.200 ºC a cerca de 1.400 ºC com temperaturas das pás de cerca de 900 ºC a cerca de 1.000 ºC. Desse modo as turbinas a gás, que operam em instalações de produção de energia, requerem, tipicamente, o uso de materiais de superligas para suportas as altas temperaturas. Além do mais, em aplicações mais avançadas, o resfriamento das pás é também necessário, juntamente com o uso de tecnologia de fabricação avançada, tais como materiais solidificados direcionalmente, e mesmo uma tecnologia de pás de cristais únicos. O

resfriamento das pás é usado para auxiliar a aperfeiçoar a tolerância de temperatura da turbina, e, desse modo, a eficiência, mas esse processo tem sido limitado pelo fato de que apenas ar, ou, em alguns casos, vapor, tem ficado disponível para resfriamento. A quantidade de ar disponível para resfriamento é limitada pela quantidade de energia disponível, para comprimir e bombear o ar, e, algumas vezes, vapor pelas pás da turbina. Além do mais, ar é tipicamente proporcionado a uma pressão limitada - por exemplo, próxima à pressão atmosférica - e, desse modo, tem capacidade de transferência térmica limitada, mesmo em altas vazões. Além disso, o ar contém grandes proporções de oxigênio, que é altamente reativo a altas temperaturas, e esse é outro fator que tende a requerer que metalurgia das pás de turbina seja limitada a materiais altamente resistentes a oxidação, tais como superligas. Desse modo, a despeito do uso de materiais avançados e resfriamento, as pás de turbinas a gás ainda são atormentadas por degradação oxidante e, em alguns casos, de vapor.

[0004] Ainda que as fontes de combustíveis fósseis estejam em exaustão, vastas reservas de carvão ainda persistem, que podem ser usadas na produção de energia, mas a combustão desses combustíveis fósseis resulta não apenas em poluição, mas também em materiais particulados, que podem provocar dano aos componentes de sistemas de produção de energia, particularmente, as pás de turbinas. Esse dano se origina particularmente de partículas nos fluxos de produtos de combustão, que colidem com as pás de turbinas a altas velocidades - por exemplo, até e superior a 600 mph (milhas por hora) (268 m/s). As tentativas anteriores de atenuar esse dano incluíram os requisitos para sistemas de filtração, para a remoção de materiais particulados dos fluxos de produto de combustão, antes da passagem pela turbina, bem como o uso de materiais de alto desempenho na construção de pás, como mencionado acima. Esses requisitos, no entanto, aumentam o

custo de sistemas de produção de energia. Além do mais, esses requisitos aumentam a complexidade dos sistemas de produção de energia e podem reduzir a eficiência dos processos de produção de energia. Consequentemente, há uma necessidade para uma tecnologia aperfeiçoada de pás de turbinas a gás, que supere pelo menos as limitações mencionadas acima na técnica.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0005] A presente invenção proporciona processos, conjuntos e sistemas para a produção de energia, que possam proporcionar componentes de maior eficiência e menor custo oriundos de controle, redução ou eliminação de degradação química das pás de turbinas por ar e vapor e por erosão mecânica por materiais particulados em um fluxo de produto de combustão. Os processos, conjuntos e sistemas podem compreender o uso de fluxos de fluido a uma maior pressão e/ou pás de turbinas com maior área total de turbina, que propiciem uma geração de energia necessária com uma redução substancial na velocidade das pás e nas suas temperaturas. A invenção proporciona, particularmente, turbinas, que são significativamente menores em pelo menos uma dimensão e com pás mais frias, em comparação com as turbinas usadas em sistemas de produção de energia convencionais. Essas turbinas podem ser particularmente incorporadas em um processo ou sistema de produção de energia. Por exemplo, o processo ou sistema pode ser um que incorpora o uso de um fluido circulante ou operacional de alta razão de reciclagem, de alta pressão, tal como um fluido circulante de CO2. Além do mais, a tecnologia de resfriamento de pás pode ser combinada com o projeto da pá, pressão operacional e velocidade operacional, para permitir a particularização da operação da turbina dentro de uma gama de temperaturas, pressões e velocidades, que controlam, reduzem ou eliminam o aparecimento de colisão de partículas ou degradação química das pás de turbinas. Particularmente,

as pás de turbinas podem incorporar uma proteção de transpiração por meio de uma passagem de um fluido de transpiração (por exemplo, o fluido operacional reciclado) pelas pás de turbinas. Essa proteção de transpiração pode incluir resfriamento de pás, dependendo da temperatura do fluido de transpiração usado. Uma vez que as pás de turbinas podem girar a uma velocidade significativamente reduzida, em relação às pás de turbinas nos sistemas de produção de energia convencional, a invenção pode proporcionar a redução em erosão, maior período de vida útil das pás, e redução nos requisitos de resistência mecânica das pás. Além do mais, as turbinas inventivas podem operar a uma maior eficiência e a temperaturas mais baixas, o que propicia custos operacionais mais baixos, um tempo de vida útil mais longo e um menor consumo de combustível.

[0006] Em uma concretização particular, um processo de geração de energia é proporcionado. O processo pode compreender: introduzir um combustível, O2 e um fluido circulante de CO2 em um combustor; queimar o combustível para proporcionar a corrente de produto de combustão compreendendo incluindo o fluido circulante de CO2 e um teor de material particulado, a corrente de produto de combustão escoando a uma velocidade definida; e expandir a corrente de produto de combustão por uma turbina, compreendendo várias pás de turbina, para gerar energia e descarregar uma corrente de descarga de turbina, a turbina sendo operada de modo que as pás de turbina girem a uma velocidade de pá inferior a cerca de 500 mph (223 m/s).

[0007] O processo pode compreender ainda: passar a corrente de descarga de turbina por um filtro, configurado para remover substancialmente todo o material particulado contido na corrente de descarga de turbina e formar uma corrente de descarga de turbina filtrada. O processo pode também compreender: passar a corrente de descarga de turbina filtrada por um trocador de calor, para proporcionar

uma corrente de descarga de turbina resfriada; tratar a corrente de descarga de turbina resfriada para extrair um ou mais componentes da corrente de descarga de turbina; e passar a corrente de descarga de turbina tratada de volta pelo trocador de calor, para proporcionar uma corrente de fluido circulante reciclado, aquecido. O processo pode compreender adicionalmente: orientar pelo menos uma parte da corrente de fluido circulante reciclado, aquecido para o combustor. Ainda mais, o processo pode compreender: orientar pelo menos uma parte da corrente de fluido circulante reciclado, aquecido para a turbina. Também, o processo pode compreender: orientar pelo menos uma parte da corrente de fluido circulante reciclado, aquecido a uma unidade de material de limpeza, na qual a corrente de fluido circulante reciclado, aquecido é combinada com um material de limpeza, para formar uma corrente de material de limpeza, o material de limpeza na corrente de material de limpeza sendo configurado para remover depósitos nas pás de turbina do conteúdo de material particulado presente na corrente de produto de combustão.

[0008] A corrente de material de limpeza pode ser introduzida diretamente na turbina. Ainda mais, a corrente de material de limpeza pode ser combinada com a corrente de produto de combustão para formar uma corrente de produto de combustão e de material de limpeza combinada, que pode ser dirigida à turbina. O fluido circulante pode compreender CO2, que pode ser proporcionado em um estado supercrítico. Adicionalmente, o processo pode incluir: combinar a corrente de descarga de turbina filtrada com um combustível sólido particulado, para formar combustível adicional na forma de uma pasta; e introduzir o combustível adicional ao combustor. Também, o processo pode incluir usar pelo menos uma parte do fluido circulante, que é reciclado como um fluido de transpiração. O uso do fluido circulante, que é reciclado como o fluido de transpiração, pode compreender: transpirar

o fluido de transpiração a uma superfície externa das pás de turbina. A transpiração do fluido de transpiração para a superfície externa das pás de turbina pode compreender transpirar o fluido de transpiração por um material sinterizado poroso.

[0009] Em outra concretização, um sistema de geração de energia é proporcionado. O sistema de geração de energia pode compreender: um combustor configurado para receber um combustível, O2 e um fluido circulante, e tendo pelo menos um estágio de combustão, que queima o combustível e proporciona uma corrente de produto de combustão incluindo o fluido circulante e um conteúdo de material particulado; uma turbina em comunicação fluida com o combustor, a turbina tendo uma entrada para receber a corrente de produto de combustão, uma saída para liberar uma corrente de descarga de turbina, e várias pás de turbina de dimensões suficiente, de modo que a turbina opere a uma velocidade de pá inferior a cerca de 500 mph (223 m/s); e um filtro para produzir uma corrente de descarga de turbina filtrada.

[0010] O sistema de geração de energia pode compreender ainda um trocador de calor, em comunicação fluida com o filtro e configurado para receber a corrente de descarga de turbina filtrada. O sistema de geração de energia pode também compreender uma unidade de material de limpeza em comunicação fluida com o trocador de calor, a unidade de material de limpeza sendo configurada para combinar um material de limpeza com uma corrente de fluido recebida do trocador de calor, para formar uma corrente de material de limpeza. O sistema de geração de energia pode incluir adicionalmente um desvio combinador de fluxo, configurado para combinar a corrente de material de limpeza com a corrente de produto de combustão, para formar uma corrente de produto de combustão e de material de limpeza combinada; e orientar a corrente de produto de combustão e de material de limpeza para a turbina.

[0011] As pás podem compreender um material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar um fluido de transpiração para uma superfície externa das pás. O material sinterizado poroso pode definir toda a superfície externa das pás. Ainda mais, a turbina pode compreender um rotor, e o rotor pode compreender o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa do rotor.

[0012] Em outra concretização, um processo de geração de energia é proporcionado. O processo pode compreender: introduzir um combustível, O2 e um fluido circulante de CO2 em um combustor; queimar o combustível para proporcionar a corrente de produto de combustão compreendendo CO2; expandir a corrente de produto de combustão por uma turbina, para gerar energia e descarregar uma corrente de descarga de turbina; processar a corrente de descarga de turbina para reciclar pelo menos uma parte do fluido circulante de CO2 para o combustor; retirar uma parte do fluido circulante de CO2, que é reciclada; e usar o fluido circulante de CO2 reciclado como um fluido de transpiração.

[0013] O uso do fluido circulante de CO2 reciclado como o fluido de transpiração pode compreender transpirar o fluido circulante de CO2 reciclado na turbina. O uso do fluido circulante de CO2 reciclado como o fluido de transpiração pode compreender transpirar o fluido circulante de CO2 reciclado no combustor. O processo pode compreender ainda orientar a corrente de produto de combustão do combustor, por um conduto, à turbina, e usar o fluido circulante de CO2 reciclado como o fluido de transpiração pode compreender transpirar o fluido circulante de CO2 reciclado no conduto. O processo pode compreender ainda condicionar o fluido circulante de CO2 reciclado a uma temperatura, que é inferior a uma temperatura da corrente de produto de combustão. O

processo pode incluir adicionalmente condicionar o fluido circulante de CO2 reciclado a uma temperatura, que é substancialmente igual a uma temperatura da corrente de produto de combustão. Também, o processo pode incluir condicionar o fluido circulante de CO2 reciclado a uma temperatura, que é maior do que uma temperatura da corrente de produto de combustão.

[0014] Em outra concretização, um sistema de geração de energia é proporcionado. O sistema pode compreender: um combustor configurado para receber um combustível, O2 e uma corrente de fluido circulante de CO2, e tendo pelo menos um estágio de combustão, que queima o combustível na presença da corrente de fluido circulante de CO2, de modo a proporcionar uma corrente de produto de combustão compreendendo CO2; uma turbina em comunicação fluida com o combustor, a turbina tendo uma entrada para receber a corrente de produto de combustão, uma saída para liberação de uma corrente de descarga de turbina compreendendo CO2, e várias pás de turbina, em que a corrente de produto de combustão age nas pás de turbina para girar a turbina e gerar energia; e um ou mais componentes configurados para processar a corrente de descarga de turbina, para formar uma corrente de fluido circulante de CO2 reciclado, em que um ou mais componentes do sistema são configurados para usar uma parte da corrente de fluido circulante de CO2 reciclado como um fluido de transpiração.

[0015] Os um ou mais componentes configurados para processar a corrente de descarga de turbina, para formar uma corrente de fluido circulante de CO2 reciclado, podem compreender um filtro, um trocador de calor, um separador, e/ou um compressor. Os um ou mais componentes configurados para usar a parte da corrente de fluido circulante de CO2 reciclado, como o fluido de transpiração, pode compreender um material sinterizado poroso, configurado para receber

o fluido de transpiração por ele. As pás de turbina podem ter uma altura de pá inferior a cerca de 0,275 m. A turbina pode compreender menos do que 2.000 das pás de turbina. Uma razão de um comprimento da turbina para um diâmetro médio das pás pode ser superior a 4.

[0016] Em outra concretização, um conjunto de turbina é proporcionado. O conjunto pode compreender vários componentes incluindo: uma carcaça definindo: uma entrada configurada para receber uma corrente de produto de combustão; e uma saída. Os componentes podem compreender ainda: um rotor posicionado na carcaça; e várias pás estendendo-se do rotor, em que um ou mais componentes compreendem um material sinterizado poroso, o material sinterizado poroso configurado para orientar um fluido de transpiração por ele.

[0017] O material sinterizado poroso pode definir a totalidade da superfície externa das pás. A carcaça pode compreender o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície interna da carcaça. O rotor pode compreender o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa do rotor. O rotor pode compreender um desviador de fluxo anular, configurado para desviar a corrente de produto de combustão em torno do rotor. O conjunto pode compreender ainda um conduto de entrada, acoplado à entrada da carcaça e configurado para acoplar-se a uma saída de um conjunto combustor e receber a corrente de produto de combustão dele, e o conduto de entrada pode compreender o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície interna do conduto de entrada. A entrada da carcaça pode ser configurada para acoplar-se diretamente a uma saída de um conjunto combustor. A entrada da carcaça pode ser

configurada para receber a corrente de produto de combustão de vários combustores, dispostos radialmente com relação a um grande eixo definido pelo rotor.

[0018] As pás podem compreender o material sinterizado poroso, o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa das pás. As pás podem compreender ainda pelo menos um elemento de reforço. O elemento de reforço pode compreender uma haste, que se estende pelo material sinterizado poroso em todas as pás. O elemento de reforço pode compreender um núcleo, e o material sinterizado poroso pode se estender em torno do núcleo. O núcleo pode definir um ou mais canais, configurados para receber o fluido de transpiração e orientar o mesmo para o material sinterizado poroso. Um ou mais canais podem ser definidos nas pás, e em que os canais podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientar o mesmo para o material sinterizado poroso. Todas as pás podem se estender de uma borda de avanço a uma borda fuga, e as pás podem ser configuradas para definir um fluxo do fluido de transpiração na borda de avanço, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração na borda de fuga. Todas as pás podem definir uma área de entrada de fluido de transpiração na borda de avanço, que é maior do que uma área de entrada de fluido de transpiração na borda de fuga. Todas as pás podem definir uma espessura de parede, que é maior na borda de avanço do que na borda de fuga. Todas as pás podem se estender de uma raiz no rotor a uma ponta, e o material sinterizado poroso pode definir uma porosidade, que varia entre a raiz e a ponta. A porosidade do material sinterizado poroso pode ser configurada para definir um fluxo do fluido de transpiração na ponta, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração na raiz. A porosidade do material sinterizado poroso pode ser configurada para definir um fluxo do fluido de transpiração na ponta, que é

substancialmente igual ao fluxo do fluido de transpiração na raiz. O material sinterizado poroso pode definir várias camadas, em que a porosidade das camadas aumenta da raiz para a ponta. Todas as pás podem, respectivamente, definir uma estrutura integral, compreendendo várias nervuras internas.

[0019] Os componentes do conjunto de turbina podem compreender ainda vários estatores, em que os estatores compreendem o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa dos estatores. O conjunto de turbina pode compreender ainda um ou mais selos, em que um ou mais dos componentes são configurados para orientar o fluido de transpiração para os selos. Os selos podem compreender o material sinterizado poroso.

[0020] Em outra concretização, um conjunto de turbina é proporcionado. O conjunto de turbina pode compreender ainda uma carcaça definindo: uma entrada configurada para receber uma corrente de produto de combustão; e uma saída. O conjunto pode compreender ainda: um rotor posicionado na carcaça; e várias pás estendendo-se do rotor, em que uma razão de um comprimento do conjunto de turbina para um diâmetro médio das pás é superior a cerca de 4.

[0021] As pás de turbina podem ter uma altura inferior a cerca de 0,275 m. O conjunto de turbina pode compreender menos de 2.000 das pás. As pás podem ser protegidas de transpiração. Ainda mais, as pás compreende um material sinterizado poroso, configurado para orientar um fluido de transpiração a uma superfície externa das pás.

[0022] Outros aspectos e vantagens da presente invenção vão ficar evidentes do que é apresentado a seguir.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[0023] A invenção tendo sido descritas em termos gerais, vai-se

fazer então referência às figuras em anexo, em que:

[0024] a Figura 1 proporciona um fluxograma de um ciclo de combustão e de um sistema de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0025] a Figura 2 proporciona um fluxograma de um ciclo de combustão e de um sistema de acordo com uma outra concretização exemplificativa;

[0026] a Figura 3 proporciona uma vista seccional por um combustor, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0027] a Figura 4 proporciona uma vista seccional por uma turbina incluindo um conduto de entrada, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0028] a Figura 5 proporciona uma vista seccional longitudinal por uma turbina e vários combustores dispostos radialmente, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0029] a Figura 6 proporciona uma vista seccional lateral pela turbina e sistema combustor da Figura 5;

[0030] a Figura 7 proporciona uma vista seccional lateral incluindo um núcleo, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0031] a Figura 8 proporciona uma vista seccional parcial por um conduto de entrada, compreendendo primeira e segunda camadas, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0032] a Figura 9 proporciona uma vista seccional parcial por um conduto de entrada, compreendendo quatro camadas, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0033] a Figura 10 proporciona uma vista seccional entre as bordas de avanço e fuga de uma pá de turbina, compreendendo hastes de reforço, e canais configurados para receber um fluido de transpiração, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0034] a Figura 11 ilustra uma vista seccional entre uma borda de

avanço e uma borda de fuga de uma pá de turbina, incluindo nervuras internas integrais definindo canais, configurados para receber um fluido de transpiração, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0035] a Figura 12 ilustra uma vista seccional entre os elementos de ponta e base da pá de turbina da Figura 11;

[0036] a Figura 13 ilustra uma vista em perspectiva da pá de turbina da Figura 11;

[0037] a Figura 14 ilustra uma vista seccional entre uma borda de avanço e uma borda de fuga de uma pá de turbina, definindo diferentes espessuras de material entre as bordas de avanço e de fuga, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0038] a Figura 15A ilustra uma vista seccional parcial entre as raiz e ponta de uma pá de turbina, incluindo camadas de material definindo diferentes porosidades entre as ponta e raiz, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0039] a Figura 15B ilustra uma vista seccional parcial entre as raiz e ponta de uma pá de turbina, definindo um gradiente de porosidade entre as raiz e ponta, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0040] a Figura 16 ilustra uma trajetória de partícula calculada para uma partícula em uma turbina, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0041] a Figura 17 proporciona uma ilustração gráfica de uma distância de deslocamento radial de material particulado em um fluxo de produto de combustão em um combustor, em função da distância de deslocamento axial, de acordo com uma concretização exemplificativa;

[0042] a Figura 18 ilustra uma seção transversal longitudinal de uma turbina convencional para uso em uma planta de energia de gás natural convencional; e

[0043] a Figura 19 ilustra uma seção transversal longitudinal de uma turbina, de acordo com concretizações exemplificativas, que é

geralmente de um tamanho menor do que de uma turbina convencional.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[0044] A presente invenção será descrita com mais detalhes a seguir, por referência a várias concretizações. Essas concretizações são proporcionadas de modo que esta descrição abrangente e completa e transmita inteiramente o âmbito da invenção àqueles versados na técnica. De fato, a invenção pode ser representada de muitas diferentes formas e não deve ser considerada como limitada às concretizações apresentadas no presente relatório descritivo; em vez disso, essas concretizações são proporcionadas de modo que essa descrição satisfaça os requisitos legais aplicáveis. Como usados no relatório descritivo, e nas concretizações em anexo, as formas singulares "o", "a", "um" e "uma" incluem os plurais associados, a menos que o contexto indique claramente de outro modo.

[0045] A presente invenção se refere, em uma concretização, a projetos de pás de turbina e processos de uso dos mesmos, que podem reduzir ou mesmo eliminar a erosão de pás de turbina oriundas de degradação química por ar ou vapor, ou por colisão de partículas. A invenção também proporciona processos e sistemas de produção de energia, que podem proporcionar uma operação de alta eficiência, enquanto reduzindo ou mesmo eliminando a erosão de pás de turbina oriunda de material particulado em um fluxo de produto de combustão, sem o requisito de filtração antes da passagem pela turbina. A redução e/ou eliminação de erosão de pás pode simplificar os sistemas de produção de energia e aumentar as possíveis realimentações, uma vez que permite que as turbinas processem um fluxo de produto de combustão com uma maior concentração total de material particulado, e é, desse modo, benéfica em processos de combustão usando realimentações, tal como de carvão, que incluem uma concentração relativamente alta de material particulado no produto de combustão.

[0046] Os termos "materiais particulados" e "partículas" (incluindo esses termos na forma singular), usados em relação aos componentes da corrente de produto de combustão, abrangem, especificamente, os materiais sólidos e líquidos presentes na corrente de produto de combustão, em um tamanho unitário relativamente pequeno, entendido, tipicamente, como sendo características de partículas, especificamente em relação ao volume global da corrente de produto de combustão. Em algumas concretizações, as partículas ou materiais particulados podem compreender qualquer material na corrente de produto de combustão que esteja em um estado não gasoso. Os materiais particulados líquidos podem abranger materiais que são líquidos na temperatura da corrente de produto de combustão, mas que são sólidos a uma temperatura, que é inferior à temperatura da corrente de produto de combustão, tal como pelo menos 10 ºC, pelo menos 15 ºC, pelo menos 20 ºC, pelo menos 30 ºC, pelo menos 50 ºC, ou pelo menos 100 ºC inferior à temperatura da corrente de produto de combustão. Esses materiais particulados líquidos têm um ponto de congelamento, que é pelo menos a temperatura ambiente, pelo menos cerca de 40 ºC, pelo menos cerca de 50 ºC, pelo menos cerca de 60 ºC, pelo menos cerca de 80 ºC, pelo menos cerca de 100 ºC, ou pelo menos cerca de 200 ºC. Em concretizações específicas, as partículas líquidos podem ter um ponto de congelamento caindo dentro de qualquer combinação das temperaturas listadas acima (por exemplo, dentro da faixa que é pelo menos 10% inferior à temperatura da corrente de produto de combustão e pelo menos a temperatura ambiente).

[0047] Em concretizações particulares, percebe-se na presente descrição que o dano de impacto de partículas em pás de turbina é relacionado à velocidade das pás. Em particular, uma razão de dano oriunda do impacto de partículas pode mudar aproximadamente com o cubo da velocidade das pás relativa à velocidade das partículas. Nesse

aspecto, a frequência de corrente alternada padrão empregada nos Estados Unidos da América é de 60 Hz. Ainda mais, os sistemas de produção de energia acionam, tipicamente, geradores de corrente alternada síncronos, que operam a 1.800 rpm (30 x 60 Hz) ou a 3.600 rpm (60 x 60 Hz), embora deva-se entender que as turbinas podem girar dentro de outras faixas de rpm (rotações por minuto). Nesse aspecto, outros países podem empregar diferentes frequências de corrente alternada padrões. Por exemplo, no Reino Unido opera-se a uma frequência de 50 Hz. Ainda mais, os sistemas geradores podem empregar geradores de corrente contínua de ímã permanente a qualquer velocidade, de modo que a corrente contínua seja convertida em corrente alternada tendo uma frequência desejada. Consequentemente, deve-se entender que as frequências discutidas no presente relatório descritivo são apresentadas apenas para fins exemplificativos.

[0048] No entanto, as turbinas a gás conhecidas usadas em sistemas e processos de produção de energia, incluindo geradores de corrente alternada síncronos, operam, tipicamente, a velocidades de pás iguais ou superiores a 600 mph (268 m/s). Em velocidades de pás típicas em turbinas a gás e a vapor existentes, a presença de material particulado muito fino, em um fluxo de produto de combustão, pode provocar erosão das pás. A presente descrição, no entanto, reconheceu a capacidade de superar a erosão das pás por alterações na estrutura das pás e na operação, que propiciem menores velocidades das pás. Em concretizações específicas, a velocidade das pás de acordo com a presente invenção, podem ser de cerca de 20 m/s a cerca de 340 m/s na ponta da pá. Mais especificamente, a velocidade das pás pode ser abaixo de 200 m/s, abaixo de 100 m/s ou de cerca de 50 m/s a cerca de 75 m/s. Em uma concretização, a invenção pode propiciar uma operação de turbina a uma velocidade das pás, que é cerca de 3 vezes

menor do que a típica (isto é, 200 mph - 89 m/s), o que pode resultar em uma diminuição na taxa de erosão das pás igual ou superior a 27 vezes. Em uma concretização, uma velocidade de pá de 150 mph (67 m/s) - isto é, uma diminuição de quatro vezes das velocidades de pás típicas - pode proporcionar uma diminuição de aproximadamente 64 vezes na taxa de dano de pás.

[0049] A capacidade de operar a turbina em um sistema de geração de energia a uma menor velocidade pode surgir de vários fatores, que podem ser representados singularmente ou em combinações múltiplas. Por exemplo, as pás de turbina podem ser projetadas com dimensões que podem permitir que a velocidade das pás sejam retardadas a uma velocidade na qual a colisão de partículas não mais provoque erosão das pás de turbina. Mais especificamente, a velocidade operacional das pás pode ser reduzida abaixo da velocidade crítica, na qual ocorre erosão. Nesse aspecto, a velocidade das pás, em qualquer ponto em uma pá, é proporcionada pela seguinte fórmula:

[0050] $v = (rpm / 60) * 2 * \pi * r$ (fórmula 1)

[0051] em que:

[0052] v = velocidade das pás (m/s);

[0053] rpm = rotações da pá por minuto;

[0054] π = pi; e

[0055] r = distância (m) entre um centro do rotor e um ponto na pá, no qual a velocidade das pás vai ser determinada (por exemplo, raio).

[0056] Notar ainda que a velocidade das pás na ponta de uma pá é proporcionada pela seguinte fórmula:

[0057] $V_t = (rpm / 60) * 2 * \pi * (a + b)$ (fórmula 2)

[0058] em que:

[0059] v = velocidade das pás (m/s);

[0060] rpm = rotações da pá por minuto;

[0061] π = pi;

[0062] a = raio (m) do rotor na pá; e

[0063] b = altura da pá (m).

[0064] Desse modo, a velocidade das pás máxima para todas as pás pode ser reduzida por diminuição da distância na qual as pás se estendem do centro do rotor. Como discutido abaixo, o uso de turbinas tendo pás estendendo-se a raios relativamente menores pode ser permitido por emprego de um fluido supercrítico, tendo uma densidade de fluido e pressão relativamente altas, a uma velocidade de escoamento moderada na turbina da presente invenção. Ainda mais, o emprego de um fluido operacional de alta densidade na turbina pode proporcionar uma temperatura da pá de turbina significativamente reduzida por aperfeiçoamento da capacidade de transpiração, para resfriar as pás.

[0065] A altura da pá (isto é, a distância de uma raiz na superfície externa do eixo (por exemplo, rotor) da turbina para a ponta da turbina) é, de preferência, inferior a cerca de 0,275 m. Em concretizações específicas, a altura de pá média pode ser cerca de 0,05 m a cerca de 0,25 m, cerca de 0,075 m a cerca de 0,225 m, cerca de 0,1 m a cerca de 0,2 m, ou cerca de 0,125 m a cerca de 0,175 m. Em concretizações específicas, as alturas de pás efetivas podem variar da entrada da turbina à saída da turbina. Por exemplo, a altura da pá na entrada pode ser menor do que a média e aumentar no sentido da saída, de modo que a altura da pá na saída seja maior do que a média. A largura média da pá pode ser cerca de 0,025 m a cerca de 0,125 m, cerca de 0,04 m a cerca de 0,11 m, cerca de 0,05 m a cerca de 0,1 mm, ou cerca de 0,06 m a cerca de 0,09 m. Em outras concretizações, as altura e largura das pás podem ser de outras dimensões, que propiciem a operação a uma velocidade descrita no presente relatório descritivo.

[0066] As turbinas e os processos operacionais inventivos podem ser também caracterizados por dimensões globais de turbinas. Por

exemplo, uma turbina de acordo com a invenção pode ter um comprimento global inferior a cerca de 11 mm, inferior a cerca de 10 m ou inferior a cerca de 9 m. Em outras concretizações, o comprimento global da turbina pode ser cerca de 6 m a cerca de 10 m, cerca de 6,5 m a cerca de 9,5 m, cerca de 7 ma a cerca de 9 m, ou cerca de 7,5 m a cerca de 8,5 m. Uma turbina de acordo com a invenção pode ter um diâmetro médio inferior a cerca de 3,5 m, inferior a cerca de 3 m, ou inferior a cerca de 2,5 m. Em outras concretizações, o diâmetro médio da turbina pode ser cerca de 0,25 m a cerca de 3 m, cerca de 0,5 m a cerca de 2 m, ou cerca de 0,5 m a cerca de 1,5 m. A razão do comprimento da turbina para o diâmetro médio da turbina (isto é, o diâmetro das pás de turbina) pode ser maior do que cerca de 3,5, maior do que cerca de 4, mais do que cerca de 4,5 ou maior do que cerca de 5. Em concretizações específicas, a razão do comprimento da turbina para o diâmetro médio da turbina pode ser cerca de 3,5 a cerca de 7,5, cerca de 4 a cerca de 7, cerca de 4,5 a cerca de 6,5, ou cerca de 5 a cerca de 6. As razões mencionadas acima podem se referir, especificamente, ao comprimento total da turbina. Em algumas concretizações, o comprimento total pode se referir ao comprimento da carcaça da entrada à saída. Em certas concretizações, o comprimento total pode se referir à distância da carcaça, a partir da pá de turbina imediatamente adjacente à entrada da pá de turbina imediatamente adjacente à saída.

[0067] As turbinas e os processos operacionais inventivos podem ser igualmente caracterizados por um raio médio de pá (centro do rotor à ponta da pá de turbina). De preferência, as turbinas operam com um raio médio de turbina inferior a cerca de 1,2 m, inferior a cerca de 1,1 m, inferior a cerca de 1 m, inferior a cerca de 0,9 m, inferior a cerca de 0,8 m, inferior a cerca de 0,7, ou inferior a cerca de 0,6 m. O raio de pá de turbina pode ser especificamente cerca de 0,25 m a cerca de 1 m, cerca

de 0,275 m a cerca de 0,8 m, cerca de 0,3 m a cerca de 0,7 m, cerca de 0,325 m cerca de 0,6 m, cerca de 0,35 m cerca de 0,5 m, ou cerca de 0,375 m a cerca de 0,475 m.

[0068] Em certas concretizações, uma turbina útil de acordo com a invenção pode ter um número total de pás de turbina, que é significativamente inferior ao presente em sistemas de turbinas a gás típicos. Especificamente, as turbinas inventivas podem ter menos de cerca de 3.000 pás, menos do que cerca de 2.500 pás, ou menos do que cerca de 2.000 pás. Em outras concretizações, o número de pás em uma turbina pode ser cerca de 500 a cerca de 2.500, cerca de 750 a cerca de 2.250, cerca de 1.000 a cerca de 2.000, ou cerca de 1.250 a cerca de 1.750.

[0069] Em algumas concretizações, as turbinas de acordo com a invenção podem proporcionar particularmente uma produção de energia de alta eficiência com menor velocidade de pá por operação a uma pressão de entrada significativamente aumentada, e/ou uma pressão de saída significativamente maior, e/ou uma queda de pressão significativamente maior da entrada para a saída, em relação aos sistemas de produção de energia de turbinas a gás típicos. Em concretizações específicas, a turbina pode ser operada a uma pressão de entrada de pelo menos cerca de 2,5 MPa (25 bar), pelo menos cerca de 5 MPa (50 bar), pelo menos cerca de 10 MPa (100 bar), pelo menos cerca de 15 MPa (150 bar), pelo menos cerca de 20 MPa (200 bar), ou pelo menos cerca de 25 MPa (250 bar). Em outras concretizações, a pressão de entrada pode ser cerca de 5 MPa (50 bar) a cerca de 50 MPa (500 bar), cerca de 10 MPa (100 bar) a cerca de 45 MPa (450 bar), cerca de 15 MPa (150 bar) a cerca de 40 MPa (400 bar), ou cerca de 20 MPa (20 bar) a cerca de 35 MPa (350 bar).

[0070] Em outras concretizações, a turbina pode ser operada com uma pressão de saída de pelo menos cerca de 0,5 MPa (5 bar), pelo

menos cerca de 1 MPa (10 bar), pelo menos cerca de 1,5 MPa (15 bar), pelo menos cerca de 2 MPa (20 bar), ou pelo menos cerca de 2,5 MPa (25 bar). A pressão de saída pode ser cerca de 1 MPa (10 bar) a cerca de 5 MPa (50 bar), cerca de 1,5 MPa (15 bar) a cerca de 4,5 MPa (45 bar), cerca de 2 MPa (20 bar) a cerca de 4 MPa (40 bar), ou cerca de 2,5 MPa (25 bar) a cerca de 3,5 MPa (35 bar).

[0071] Em outras concretizações, a razão de pressão de entrada da turbina para a pressão de saída da turbina pode ser pelo menos cerca de 6, pelo menos cerca de 7, pelo menos cerca de 8, pelo menos cerca de 9, ou pelo menos cerca de 10. Em concretizações específicas, a razão de pressão de entrada da turbina para a pressão de saída da turbina pode ser pelo menos cerca de 6 cerca de 15, cerca de 7 a cerca de 14, cerca de 8 a cerca de 12, ou cerca de 9 a cerca de 11.

[0072] Em mais outras concretizações, as turbinas de acordo com a invenção podem ser operadas em um sistema de geração de energia a uma densidade de escoamento significativamente aumentada, em relação à operação de turbinas em sistemas de produção de energia típicos. Por exemplo, as turbinas inventivas podem ser operadas a uma densidade de escoamento de pelo menos cerca de 20 kg/m3, pelo menos cerca de 50 kg/m3, pelo menos cerca de 100 kg/m3, pelo menos cerca de 150 kg/m3, pelo menos cerca de 200 kg/m3, ou pelo menos cerca de 300 kg/m3, pelo menos cerca de 400 kg/m3, pelo menos cerca de 500 kg/m3, ou pelo menos cerca de 600 kg/m3.

[0073] Em comparação com as turbinas de acordo com a presente invenção, os compressores de turbinas a gás existentes podem operar com pressões de saída de cerca de 0,1 MPa (1 bar) a cerca de 1,5 MPa (15 bar), com densidades de gás na seção do compressor variando de 1 kg/m3 a cerca de 15 kg/m3 (considerando aquecimento por compressão adiabática). A erosão e os outros problemas podem não ser graves para o compressor, devido às temperaturas relativamente

baixas nele. No entanto, na seção quente, a temperatura do gás pode variar de um pico de aproximadamente 1.727 ºC a cerca de 527 ºC. A densidade do gás na seção quente pode variar de uma alta de cerca de 5 kg/m3 a uma baixa de cerca de 0,5 kg/m3. Desse modo, as condições dentro das turbinas existentes podem variar consideravelmente daquelas dentro das turbinas, de acordo com a presente invenção.

[0074] O uso de pressões mais altas em vazões mais baixas e temperaturas mais altas pode aumentar o torque nas pás de turbina. Consequentemente, a turbina pode incluir itens configurados para reduzir o torque aplicado às pás. Em particular, a turbina pode incluir um maior número de pás, discos e/ou estágios do que as turbinas convencionais, o que distribui o torque entre elas, para reduzir o torque aplicado às pás individuais. Ainda mais, as pás pode definir um ângulo de ataque configurado para exercer menos força e torque nas pás. Em particular, as pás podem definir um ângulo menor com relação ao fluxo pela turbina, o que induz menos arrasto e aumenta a razão de força ascensional para arrasto. Consequentemente, esses itens podem reduzir o torque exercido em todas as pás, de modo que possam ser formados de materiais menos resistentes e relativamente mais baratos.

[0075] Em algumas concretizações, a erosão das pás também pode ser controlada, reduzida ou eliminada por combinação de quaisquer das características descritas acima com um ou mais processos de resfriamento de pás. Qualquer processo de resfriamento de pás de turbina pode ser combinado com a presente invenção, incluindo o resfriamento de pás por transpiração, como descrito mais inteiramente abaixo. Nesse aspecto, o resfriamento por transpiração pode ser empregado para resfriar quaisquer dos vários componentes da turbina, combustor e aparelhos relacionados descritos no presente relatório descritivo. Com consideração particular à turbina, a carcaça, os estatores (por exemplo, as pás dos estatores), os selos, as pás (por

exemplo, as pás de turbina), o rotor e vários outros componentes internos podem ser resfriados por transpiração por, por exemplo, emprego de materiais porosos descritos no presente relatório descritivo. Nesse aspecto, os estatores podem compreender o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso pode ser configurado para orientar o fluido de transpiração para uma superfície externa dos estatores. Adicionalmente, um ou mais dos componentes do conjunto de turbina podem ser configurados para orientar o fluido de transpiração para os selos. Os selos podem compreender o material sinterizado poroso em algumas concretizações. As concretizações exemplificativas de selos e de estatores, que podem ser resfriados por transpiração, de acordo com as concretizações da invenção, são descritas na publicação do pedido de patente Norte-Americana 2009/0142187, que é incorporado por referência na sua totalidade no presente relatório descritivo. No entanto, várias outras concretizações de componentes de turbinas, combustores e aparelhos relacionados também podem ser resfriados por transpiração de acordo com a presente invenção.

[0076] Ainda mais, as técnicas de resfriamento por transpiração descritas no presente relatório descritivo podem proporcionar um resfriamento aperfeiçoado relativo às técnicas de resfriamento por transpiração existentes. O resfriamento atual de pás é conduzido tipicamente com ar de sangria do compressor da turbina. O ar tem uma capacidade térmica limitada, devido à sua densidade relativamente baixa (por exemplo, 0,5 - 5 kg/m3), estabelecida pela pressão operacional relativamente baixa da seção quente da turbina nas turbinas existentes, como descrito acima. Isso limita as taxas de transferência térmica. Em comparação, como discutido abaixo, a presente invenção proporciona resfriamento por transpiração por uso de CO2, que pode proporcionar transferência térmica aperfeiçoada.

[0077] As taxas de transferência térmica para as concretizações

existentes das turbinas são também limitadas pela tensão relativamente grande, imposta nas pás de turbina devido ao longo comprimento das pás, resultando em altas forças centrífugas durante rotação delas. As passagens de resfriamento nas turbinas existentes devem ser, desse modo, mantidas relativamente pequenas e não devem definir mais de uma fração relativamente pequena da área da seção transversal total, para limitar a redução em resistência mecânica longitudinal das pás provocada pelas passagens de resfriamento.

[0078] As turbinas inventivas são particularmente úteis em sistemas e processos para produção de energia, pelo fato de que as turbinas não apenas proporcionam uma menor erosão das pás, mas também podem reduzir significativamente o custo total das turbinas. Em concretizações específicas, o custo total das turbinas, em relação às turbinas usadas em sistemas de produção de energia típicos, pode ser reduzido por pelo menos 20%, pelo menos 30%, pelo menos 40%, pelo menos 50%, pelo menos 60%, pelo menos 70%, ou pelo menos 75%, sem qualquer perda significativa em saída de energia elétrica (isto é, perda inferior a 5%, inferior a 4%, inferior a 3%, inferior a 2%, inferior a 1%, ou inferior a 0,8%). As reduções em custo podem ocorrer evitando-se a necessidade para superligas e/ou outros materiais caros nas pás, devido, por exemplo, a uma redução nas forças centrífugas aplicas a elas. Ainda mais, as reduções em saída de energia podem ser minimizada a despeito das menores velocidades de rotação por emprego de altas temperaturas de entrada na turbina, bem como altas pressões operacionais em relação às concretizações de turbina existentes.

[0079] Em concretizações específicas, a presente invenção pode compreender sistemas e processos para produção de energia, que podem incorporar os presentes projetos e modos operacionais de pás de turbina. Por exemplo, os sistemas e processos inventivos propiciam produção de energia por uso de um combustor de alta eficiência (tal

como um combustor resfriado por transpiração), opcionalmente com um fluido circulante associado (tal como um fluido circulante de CO2). Especificamente, o uso de um fluido circulante (ou fluido operacional) de alta pressão, que tem uma alta taxa de reciclagem de CO2, proporciona a capacidade de orientar uma parte do fluido circulante de CO2 para as pás de turbina, para resfriamento por transpiração.

[0080] A combinação de resfriamento por transpiração com os projetos e modos operacionais de pás da presente invenção pode ser particularmente útil, uma vez que a erosão pode ser uma função da temperatura da pá de turbina e da composição da pá de turbina. A combinação de projeto e operação de pá de turbina com a temperatura operacional da pá pode proporcionar uma ampla gama de possíveis velocidades operação de pás e temperaturas operacionais de pás, em que a erosão de pás possa ser controlada, reduzida ou eliminada. A temperaturas das pás mais baixas, a erosão é menor, e a velocidade da pá, na qual a erosão começa, pode ser maior. A capacidade de selecionar as condições operacionais é benéfica pelo fato de que pode permitir o uso de ligas metálicas, que possam resistir à erosão em velocidades de pás maiores, mas que não estariam disponíveis para uso em temperaturas operacionais mais altas. Nesse aspecto, a temperaturas mais baixas, aços de alta resistência a tração são relativamente imunes a danos por impacto. Como um exemplo, blindagem homogênea laminada, usada em veículos militares, não é danificada por balas de aço sólidas deslocando-se a velocidades de até 400 mph (179 m/s).

[0081] Em outras concretizações, no entanto, como descrito mais inteiramente abaixo, a transpiração pode promover proteção das pás por impedimento de solidificação dos componentes da corrente de produto de combustão (por exemplo, cinza líquida). Nessas concretizações, o resfriamento por transpiração pode ser definido como

o resfriamento das pás (e/ou de outros componentes) a uma temperatura abaixo da temperatura da corrente de produto de combustão. Mais particularmente, esse resfriamento pode ser configurado para que tenha um limite inferior, que é maior do que a temperatura na qual um componente da corrente de produto de combustão (por exemplo, cinza líquida) vai congelar (ou solidificar), e, desse modo, ficar depositado nas pás de turbina. Por exemplo, o amolecimento da cinza pode começar a 590 ºC, e a fusão pode ocorrer a 870 ºC. Sem resfriamento por transpiração, a turbina não vai precisar operar muito abaixo de 590 ºC, para evitar o acúmulo de cinza nas pás, que é muito baixa para uma operação eficiente. Com proteção por transpiração, a turbina pode operar acima de 870 ºC, na qual a cinza é líquidas, mas as gotículas líquidos não tocam ou ficam agarradas na superfície, por causa da camada de vapor de transpiração cobrindo substancialmente todas as superfícies que são internas à turbina, e, desse modo, sujeitas a contato com componentes de uma corrente escoando pela turbina (por exemplo, a superfície interna do alojamento de turbina, as superfícies externas das pás de turbina dentro da turbina, etc.). Desse modo, a proteção por transpiração pode reduzir ou eliminar não apenas a degradação, devido à erosão mecânica por colisão de partículas, mas também a degradação química, por manutenção das pás mais frias, e por substituição de ar ou ar / vapor, como o refrigerante, com CO2, como o refrigerante, na forma de um fluido de transpiração.

[0082] Em algumas concretizações, pode ser útil para que as turbinas sejam operadas a velocidades de pás, que são relativas à velocidade do fluxo de produto de combustão. Nessas concretizações, pode ser particularmente benéfico que a velocidade de escoamento seja significativamente inferior às velocidades de escoamento em processos de combustão típicos. Por exemplo, a velocidade de escoamento de acordo com a invenção pode ser inferior a cerca de 400 mph (179 m/s),

inferior a cerca de 350 mph (156 m/s), inferior a cerca de 300 mph (134 m/s), inferior a cerca de 250 mph (112 m/s), inferior a cerca de 200 mph (89 m/s), inferior a cerca de 150 mph (67 m/s), ou inferior a cerca de 100 mph (45 m/s). A razão da velocidade da pá para a velocidade de escoamento é, de preferência, superior a 1, superior a 1,5, superior a 2, superior a 2,5, ou superior a 3. Especificamente, a razão da velocidade da ponta da pá para a velocidade de escoamento pode ser cerca de 1 a cerca de 5, cerca de 1,5 a cerca de 4,75, cerca de 1,75 a cerca de 4,5, cerca de 2 a cerca de 4,25, ou cerca de 2,5 a cerca de 4.

[0083] Em consequência da erosão, as turbinas podem experimentar degradação em desempenho com o tempo (por exemplo, por menor eficiência e/ou saída de energia). Por exemplo, uma turbina convencional pode experimentar degradação operacional de 10% de perda de energia, em um período de dois a três anos. Uma revisão para reparar a turbina pode custar aproximadamente 50% do custo de compra da turbina. Consequentemente, em um período de vida útil de 20 anos, as turbinas existentes podem ser revisadas um total de oito vezes, o que pode custar um total de 4 vezes o preço de compra inicial da turbina.

[0084] Essa degradação pode ser devido à erosão provocada pelas partículas de pó residuais que passarem por um sistema de filtração de ar, posicionado entre o combustor e a turbina. O aumento da eficiência de remoção de material particulado dos filtros pode não ser uma opção viável, porque isso pode limitar o fluxo de ar e reduzir a eficiência da turbina. Desse modo, as turbinas da presente invenção podem proporcionar economias em custo significativas por minimização ou eliminação da necessidade para revisões, por minimização ou eliminação de dano de erosão. Nesse aspecto, a taxa de dissipação da energia de impacto, associada com a colisão entre as partículas e as pás, é aproximadamente proporcional ao cubo da velocidade relativa

entre elas. Nesse aspecto, a erosão de pás de turbina tende a ser aproximadamente proporcional à taxa da dissipação da energia de impacto ("Energia de Impacto"), como ilustrado abaixo:

[0085] $IP = kV^3 / X$ (fórmula 3)

[0086] em que:

[0087] IP = energia de impacto;

[0088] k = um fator variável baseado no material particulado, material da pá, temperatura ambiente e ângulo de impacto;

[0089] V = velocidade relativa entre as pás de turbina e as partículas; e

[0090] X = comprimento característico da interação por impacto.

[0091] Por redução da velocidade das pás e proporcionando-se proteção por transpiração, os impactos podem ser minimizados ou reduzidos abaixo de um limiar, no qual a erosão ocorre, e o dano químico pode ser também reduzido ou eliminado. Consequentemente, os custos associados com as revisões, devido à erosão, podem ser reduzidos ou eliminados, e, desse modo, as concretizações das turbinas proporcionadas no presente relatório descritivo podem proporcionar economias de custo significativas. Ainda mais, como mencionado acima, por eliminação da necessidade para uso de superligas caras, as turbinas de acordo com a presente invenção podem ser relativamente mais baratas do que as turbinas existentes.

[0092] Em várias concretizações conhecidas de plantas de energia, a eficiência é criticamente dependente das temperaturas de entrada da turbina. Por exemplo, um trabalho intenso tem sido feito a um grande custo para obter uma tecnologia de turbina, para temperaturas de entrada tão altas quanto cerca de 1.350 ºC. Quanto mais alta a temperatura de entrada da turbina, maior a eficiência da planta, mas também mais cara a turbina fica, e, potencialmente, com um tempo de vida útil mais curto. Em virtude da temperatura relativamente alta da

corrente de produto de combustão, pode ser benéfico que a turbina seja formada de materiais capazes de suportar essas temperaturas. Pode ser também útil que a turbina compreenda um material que proporcione uma boa resistência química ao tipo de materiais secundários, que podem estar presentes na corrente de produto de combustão.

[0093] Em certas concretizações, a presente invenção pode proporcionar, particularmente, o uso de um fluido de resfriamento com os componentes da turbina. Como descrito mais detalhadamente abaixo, por exemplo, os sistemas e processos inventivos propiciam uma produção de energia por uso de um combustor de combustível de alta eficiência (por exemplo, um combustor resfriado por transpiração) e um fluido circulante associado (tal como um fluido circulante de CO2). Especificamente, uma parte do fluido circulante pode ser orientada para os componentes da turbina, particularmente, as pás de turbina, que vai ser usado no resfriamento da turbina, tal como por resfriamento por transpiração.

[0094] Por exemplo, em algumas concretizações, uma parte de um fluido circulante de CO2 pode ser retirada do ciclo (por exemplo, de uma parte do ciclo na qual o fluido circulante fica sob condições úteis para um fluido de resfriamento por transpiração), e orientada a uma turbina para resfriamento dos componentes, particularmente, as pás de turbina. O fluido de resfriamento de pás pode ser descarregado de furos (ou perfurações) na pá de turbina e serem introduzidos diretamente no escoamento da turbina. Desse modo, em vez de usar ar como o fluido de resfriamento por transpiração (que é limitado na sua capacidade de resfriamento, como descrito acima, e impedido por preocupação de segurança), os processos e sistemas da invenção proporcionam o uso de quantidades muito grandes de CO2 de alta pressão, CO2 supercrítico, e mesmo CO2 líquido, como um meio de resfriamento de pá de turbina. Isso é bastante útil porque aumenta a capacidade de

resfriamento para as pás de turbina por grandes razões, em relação aos processos de resfriamento de pás conhecidos. A invenção é particularmente útil porque o fluido circulante de CO2 e pode estar presente no sistema em proporções muito grandes, o que permite que uma quantidade muito grande de fluido de resfriamento seja movimentada pelas pás de turbina. Essa vazão volumétrica e/ou mássica de fluido circulante de CO2 pelas pás de turbina não apenas protege as pás de turbina do calor extremo, o que é útil para processos de produção de energia de alta eficiência, mas também auxilia na proteção das pás de turbina dos efeitos corrosivos e erosivos dos gases de alta temperatura e do material particulado não filtrado, que escoam pela turbina por transpiração do fluido circulante de CO2 e por toda a superfície da pá. Em uma concretização, o resfriamento por transpiração pode proporcionar temperaturas de pás de cerca de 200 ºC a cerca de 700 ºC, a despeito das temperaturas de entrada de turbina significativamente mais altas descritas acima (por exemplo, 1.350 ºC), o que pode, desse modo, permitir o uso de pás de turbina compreendendo materiais relativamente mais baratos do que aqueles que são atualmente empregados, e/ou temperaturas de entrada de turbina mais altas podem ser empregadas, o que pode promover uma maior eficiência. Os componentes de turbina a gás resfriados por transpiração precedentes podem ser usados em quaisquer processo e sistema de produção de energia, em que CO2 de alta pressão (ou outro fluido que seja menos corrosivo do que ar ou vapor, tal como N2) pode ser disponibilizado como um fluido circulante de alta razão de reciclagem.

[0095] Em concretizações específicas, o uso de um fluido circulante de CO2, como um meio de resfriamento de pá de turbina, permite que as pás de turbina sejam fabricadas de materiais de custo mais baixo do que as pás de turbina conhecidas, usadas em processos de produção

de energia de alta eficiência, porque o uso do meio de resfriamento de CO2 impede que as pás na presente invenção sejam aquecidas a temperaturas extremas do fluxo de produto de combustão circundante e reduz os efeitos corrosivos e erosivo do fluxo de produto de combustão. Por exemplo, de acordo com a presente invenção, as pás de turbina podem ser fabricadas de uma ampla gama de aços de alta resistência a tração, ou mesmo aços de custo relativamente baixo. Igualmente, as pás podem ser fabricadas de compósitos de carbono ou mesmo de materiais para baixas temperaturas, tal como alumínio. Qualquer material reconhecido como útil na técnica para componentes de turbinas a gás, mesmo para turbinas usadas em condições de baixas temperaturas e/ou condições de baixas erosão ou corrosão, pode ser usado para fabricação de componentes de turbinas de acordo com a presente invenção.

[0096] O resfriamento por transpiração de pás de turbina com uma parte de um fluido circulante de CO2 e, de acordo com a presente invenção, é ainda útil porque pode facilitar a passagem segura de gases de combustão contendo cinza (ou outro material particulado e/ou material incombustível) pela turbina, sem a necessidade para uma etapa e um componente de filtração intermediária. Isso pode simplificar bastante o projeto de instalações de produção de energia e ampliar os tipos de materiais que podem ser usados como a fonte de combustível para combustão.

[0097] O uso de um fluido circulante de CO2 em resfriamento por transpiração de componentes de turbina, de acordo com a presente invenção, é vantajoso em relação à termodinâmica do ciclo de produção de energia. Em virtude da capacidade de resfriamento bastante aperfeiçoada do fluido circulante de CO2 em relação aos meios de transpiração conhecidos para pás de turbina, é possível operar o combustor a temperaturas mais altas, sem a limitação da tolerância

térmica da turbina. Desse modo, os combustores capazes de operar a temperaturas extremamente altas (por exemplo, combustores resfriados por transpiração) podem ser operados, de acordo com a presente invenção, bem próximos das temperaturas operacionais máximas, uma vez que o fluxo de produto de combustão possa ser passado pela turbina resfriada com CO2, sem danificar os componentes de turbina. Isso aumenta a eficiência termodinâmica potencial do ciclo de produção de energia a aproximadamente 100%.

[0098] Qualquer combinação de projeto de pá de turbina, projeto global de turbina, e resfriamento por transpiração das pás de turbina pode ser usada em qualquer processo de produção de energia, com o que a vida útil das pás é desejavelmente estendida, tais como os processos e sistemas nos quais a combustão resulta na formação de material particulado. Em algumas concretizações, os processos e sistemas podem ser particularmente aqueles nos quais um fluido circulante pode ser usado. Por exemplo, CO2 de alta pressão pode ser disponibilizado como um fluido circulante de alta razão de reciclagem.

[0099] Por exemplo, uma turbina, como descrita no presente relatório descritivo, pode ser usada em um processo e em um sistema nos quais um fluido circulante de CO2 é proporcionado em um combustor, juntamente com um combustível adequado, qualquer oxidante necessário e quaisquer materiais associados que podem ser úteis para uma combustão eficiente. Esses sistemas e processos podem compreender um combustor, que opera a temperaturas muito altas (por exemplo, na faixa de cerca de 1.600 ºC a cerca de 3.300 ºC, ou ainda maior), e a presença do fluido circulante pode funcionar para moderar a temperatura de uma corrente fluida deixando o combustor, de modo que a corrente de fluido possa ser utilizada em transferência de energia para a produção de energia. Especificamente, uma corrente de produto de combustão pode ser expandida por pelo menos uma

turbina para gerar energia. A corrente de gás expandida pode ser resfriada para a remoção de vários componentes da corrente, tal como água, e aquecer a corrente de gás expandida, que pode ser usada para aquecer o fluido circulante de CO2. A corrente de fluido circulante purificada pode ser depois pressurizada e aquecida para reciclagem pelo combustor. Os sistemas e processos de produção de energia exemplificativos, que podem incorporar os projetos de pás de turbina da presente invenção(com ou sem o resfriamento por transpiração de pás associado), são descritos na publicação do pedido de patente Norte-Americana 2011/0179799, que é incorporado por referência no presente relatório descritivo na sua totalidade.

[0100] A incorporação de uma turbina de acordo com a invenção em um ciclo de energia de combustão é particularmente útil em relação à combustão de combustíveis, que resulta em um componente particulado. Vários tipos de carvão podem ser, por exemplo, queimados em um ciclo de produção de energia, para produzir uma corrente de combustão, tendo um teor de cinza e/ou outro material particulado. Beneficamente, quando uma turbina de acordo com a invenção é incorporada no ciclo de combustão, a corrente de produto de combustão completa (isto é, incluindo o teor total de material particulado) pode ser introduzida na turbina, sem a necessidade de uma etapa de filtração preliminar. Isso permite o uso de uma maior temperatura de entrada na turbina, o que, por sua vez, aumenta a eficiência de combustão em relação aos processos requerendo filtração do produto de combustão, antes da passagem pela turbina. Isso é possível de acordo com a invenção, uma vez que as turbinas inventivas podem ser submetidas a uma colisão de partículas, sem uma erosão significativa. Os materiais particulados podem ser depois filtrados da corrente saindo da turbina.

[0101] Uma concretização de um ciclo de combustão, proporcionado de acordo com a presente invenção, é ilustrada no

fluxograma da Figura 1. Na concretização ilustrada, uma unidade de separação de ar 100 é proporcionada para admitir ar ambiente 10 e descarregar uma corrente enriquecida em oxigênio 120. A corrente de oxigênio 120 pode compreender oxigênio tendo uma pureza molar de pelo menos cerca de 50%, pelo menos cerca de 60%, pelo menos cerca de 70%, pelo menos cerca de 80%, pelo menos cerca de 85%, pelo menos cerca de 90%, ou pelo menos cerca de 95%. A corrente de oxigênio 120 pode ser suprida, por qualquer sistema / técnica de separação de ar conhecido no ramo, tal como, por exemplo, um processo de separação de ar criogênico, ou um processo de separação de oxigênio por membrana de transporte iônico a alta temperatura (do ar) pode ser implementado. Em concretizações específicas, uma corrente rica em oxigênio pode ser produzida pela operação de um processo de separação, no qual oxigênio é pressurizado no processo por bombeamento de oxigênio líquido, que é aquecido eficientemente à temperatura ambiente mantendo a refrigeração. Essa planta de oxigênio bombeado criogênico pode ter dois compressores de ar, ambos sendo operados adiabaticamente sem qualquer resfriamento em estágio intermediário. Em concretizações específicas, pode ser útil incluir componentes proveitosos para recuperação do calor, produzido pela unidade de separação de ar, e transferir o calor a um componente do sistema presentemente descrito, no qual a entrada de calor pode ser desejável.

[0102] O ciclo ilustrado na Figura 1 pode ser útil para combustão de qualquer fonte de combustível que inclua material particulado (por exemplo, cinza), como um componente do produto de combustão. Os exemplos não limitantes de combustíveis, que são úteis de acordo com a invenção, incluem vários graus e tipos de carvão, madeira, óleo, alcatrão de areias de alcatrão, betume, biomassa, algas, resíduo de descarte sólido de grau combustível, asfalto e pneumáticos usados. Em

particular, qualquer material combustível sólido pode ser usado na invenção, e esses combustíveis podem ser particularmente moídos, estraçalhados ou processados de outro modo para reduzir o tamanho de partícula, como desejado. Um meio de fluidização ou empastamento pode ser adicionado, se necessário, para obter uma forma adequada e satisfazer os requisitos de fluidez para bombeamento em alta pressão. Por exemplo, com referência à Figura 1, o combustível sólido 15 pode ser passado por um aparelho de moagem 200, para proporcionar um combustível em pó. Em outras concretizações, o combustível sólido 15 pode ser proporcionado em uma condição particular satisfazer a necessidade de moagem no local. Em concretizações específicas, o combustível sólido 15 pode ter um tamanho de partícula médio de cerca de 10 μm a cerca de 500 μm, cerca de 25 μm a cerca de 400 μm, ou cerca de 50 μm a cerca de 200 μm. Em outras concretizações, o combustível sólido 15 pode ser descrito pelo fato de que mais de 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% ou 99% das partículas de combustível sólido têm um tamanho médio inferior a cerca de 500 μm, 400 μm, 300 μm, 200 μm ou 100 μm.

[0103] O combustível sólido 15 pode ser processado adequadamente para permitir a injeção em um aparelho de combustão a taxas suficientes e pressões acima da pressão dentro da câmara de combustão. Para proporcionar essa característica, o combustível sólido 15 pode ser em forma de líquido, massa semifluida, gel ou pasta, com fluidez e viscosidade adequadas à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas. Por exemplo, o combustível sólido 15 pode ser proporcionado a uma temperatura de cerca de 30 ºC a cerca de 500 ºC, cerca de 40 ºC a cerca de 450 ºC, cerca de 50 ºC a cerca de 425 ºC, ou cerca de 75 ºC a cerca de 400 ºC. Quando o combustível sólido 15 está em uma condição de moído, despedaçado ou processado de outro modo, se modo que o tamanho de partícula seja reduzido

adequadamente, um meio de fluidização ou empastamento pode ser adicional, como necessário, para obter uma forma adequada e satisfazer os requisitos de escoamento para bombeamento a alta pressão. Como ilustrado, na concretização da Figura 1, o combustível sólido particulado 220, produzido do combustível sólido 15 pelo aparelho de moagem 200, pode ser misturado com uma substância fluidizante, para proporcionar carvão na forma de uma pasta. Em particular, o combustível sólido particulado 220 é combinado em um misturador 250 com um arrasto lateral de CO2 562 de uma corrente de fluido circulante de CO2 reciclado 561. O arrasto lateral de CO2 562 pode ser proporcionado em um estado de alta densidade, supercrítico. Em concretizações específicas, o CO2 usado para formar a pasta pode ter uma densidade de cerca de 450 kg/m3 a cerca de 1.100 kg/m3. Mais particularmente, o arrasto lateral de CO2 562 pode cooperar com o combustível sólido particulado 220 para formar uma pasta 255 tendo, por exemplo, de cerca de 10% em peso a cerca de 75% em peso, ou de cerca de 25% em peso a cerca de 55% em peso do carvão particulado. Além do mais, o CO2 do arrasto lateral 562, usado para formar a pasta 255, pode estar a uma temperatura inferior a cerca de 0 ºC, inferior a cerca de -10 ºC, inferior a cerca de -20 ºC, ou inferior a cerca de -30 ºC. Em outras concretizações, o CO2 do arrasto lateral 562, usado para formar a pasta, pode estar a uma temperatura de cerca de 0 ºC a cerca de -60 ºC, cerca de -19 ºC a cerca de -50 ºC, ou cerca de -18 ºC a cerca de -40 ºC. Embora a etapa de empastamento seja descrita em termos de uso de CO2 como um meio de empastamento, deve-se entender que outros meios de empastamento podem ser usados.

[0104] A pasta 255 pode ser transferida do misturador 250, por meio de uma bomba 270, a um aparelho de combustão 300. Em concretizações específicas, o aparelho de combustão 300 pode ser um combustor de alta eficiência, capaz de proporcionar uma combustão

substancialmente completa de um combustível, a uma temperatura de combustão relativamente alta. A combustão em alta temperatura pode ser particularmente útil para proporcionar a combustão substancialmente completa de todos os componentes combustíveis do combustível, e, desse modo, maximizar a eficiência. Em várias concretizações, a combustão em alta temperatura pode significar combustão a uma temperatura de pelo menos cerca de 1.000 ºC, pelo menos cerca de 1.200 ºC, pelo menos cerca de 1.500 ºC, pelo menos cerca de 2.000 ºC ou pelo menos cerca de 3.000 ºC. Em outras concretizações, a combustão em alta temperatura pode significar combustão a uma temperatura de cerca de 1.000 ºC a cerca de 5.000 ºC, ou de cerca de 1.200 ºC a cerca de 3.000 ºC.

[0105] Em certas concretizações, o aparelho de combustão 300 pode ser um combustor resfriado por transpiração. Um exemplo de um combustor resfriado por transpiração, que pode ser usado na invenção, é descrito na publicação do pedido de patente Norte-Americana 2010/0300063 e na publicação do pedido de patente Norte-Americana 2011/0083435, cujas descrições são incorporadas no presente relatório descritivo por referência nas suas totalidades. Em algumas concretizações, um combustor resfriado por transpiração, útil de acordo com a invenção, pode incluir uma ou mais zonas de troca térmica, um ou mais fluidos de resfriamento, e um ou mais fluidos de transpiração.

[0106] O uso de combustor resfriado por transpiração, de acordo com a presente invenção, é particularmente vantajoso em relação à combustão de combustível relativa à técnica conhecida para produção de energia. Por exemplo, o uso de resfriamento por transpiração pode ser útil para impedir corrosão, incrustação e erosão no combustor. Isso permite ainda que o combustor trabalhe em uma faixa de temperaturas suficientemente alta, para produzir uma combustão completa ou substancialmente completa do combustível que é usado. Essas e outras

vantagens são descritas adicionalmente no presente relatório descritivo.

[0107] Em um aspecto particular, um combustor resfriado por transpiração, útil de acordo com a invenção, pode incluir uma câmara de combustão, definida pelo menos parcialmente por um elemento de transpiração, em que o elemento de transpiração é, pelo menos parcialmente, circundado por um elemento de contenção de pressão. A câmara de combustão pode ter uma parte de entrada e uma parte de saída oposta. A parte de entrada da câmara de combustão pode ser configurada para receber o combustível contendo carbono, a ser queimado dentro da câmara de combustão, a uma temperatura de combustão, para formar um produto de combustão. A câmara de combustão pode ser configurada ainda para orientar o produto de combustão no sentido da parte de saída. O elemento de transpiração pode ser configurado para orientar uma substância de transpiração por ele, no sentido da câmara de combustão, para amortecer a interação entre o produto de combustão e o elemento de transpiração. Além disso, a substância de transpiração pode ser introduzida na câmara de combustão, para obter uma temperatura de saída desejada do produto de combustão. Em concretizações particulares, a substância de transpiração pode compreender, pelo menos parcialmente, o fluido circulante. As paredes da câmara de combustão podem ser revestidas com uma camada de material poroso, pelo qual a substância de transpiração, tal como CO2 e/ou H2O, é orientada e escoa.

[0108] O fluxo da substância de transpiração por essa camada de transpiração, e, opcionalmente, por provisões adicionais, pode ser configurado para atingir uma temperatura de saída de corrente de fluido de saída total desejada do aparelho de combustão 300. Em algumas concretizações, como descrito adicionalmente no presente relatório descritivo, essa temperatura pode ser na faixa de cerca de 500 ºC a cerca de 2.000 ºC. Esse fluxo pode também servir para resfriar o

elemento de transpiração a uma temperatura abaixo da temperatura operacional máxima permissível do material formando o elemento de transpiração. A substância de transpiração pode também servir para impedir a colisão de quaisquer materiais de cinza líquidos ou sólidos, ou outros contaminantes, no combustível, que podem corroer, incrustar ou danificar de outro modo as paredes. Nesses casos, pode ser desejável usar um material para o elemento de transpiração com uma condutividade térmica razoável, de modo que o calor radiante incidente pode ser conduzido radialmente para fora pelo elemento de transpiração poroso, e ser depois interceptado por transferência térmica convectiva das superfícies da estrutura de camada porosa para o fluido passando radialmente para dentro pela camada de transpiração. Essa configuração pode permitir que a parte subsequente da corrente, orientada pelo elemento de transpiração, seja aquecida a uma temperatura em uma faixa desejável, tal como cerca de 500 ºC a cerca de 1.000 ºC, ou de cerca de 200 ºC a cerca de 700 ºC, enquanto mantendo simultaneamente a temperatura do elemento de transpiração poroso dentro da faixa de projeto do material usado ele. Os materiais adequados para o elemento de transpiração poroso podem incluir, por exemplo, cerâmicas porosas, mantas de fibras metálicas refratárias, seções cilíndricas furadas, e/ou camadas de metais sinterizados ou pós de metais sinterizados. Uma segunda função do elemento de transpiração pode ser para garantir um fluxo substancialmente radialmente para dentro uniforme de fluido de transpiração, bem como longitudinalmente ao longo do combustor, para obter uma boa mistura entre a corrente de fluido de transpiração e o produto de combustão, enquanto promovendo um fluxo axial uniforme ao longo do comprimento da câmara de combustão. Uma terceira função do elemento de transpiração pode ser obter uma velocidade de fluido diluente radialmente para dentro, de modo a proporcionar um amortecimento

para, ou de outro modo interceptar, as partículas sólidas e/ou líquidas de cinza ou outros contaminantes dentro dos produtos de combustão do impacto da superfície da camada de transpiração e provocar bloqueio, erosão, corrosão ou outro dano. Esse fator pode ser apenas de importância, por exemplo, quando da combustão de um combustível, tal como carvão, tendo um resíduo não combustível inerte residual. A parede interna do recipiente de pressão do combustor, circundando o elemento de transpiração, pode ser também isolado, para isolar a corrente de fluido de transpiração a alta temperatura dentro do combustor.

[0109] Em certas concretizações, uma disposição de mistura (não ilustrada) pode ser proporcionada para combinar os materiais que vão ser introduzidos no aparelho de combustão 300, antes dessa introdução. Especificamente, qualquer combinação de dois ou três do combustível, O2 e fluido circulante (por exemplo, fluido circulante de CO2) pode ser misturada na disposição de mistura opcional, antes da introdução no aparelho de combustão 300.

[0110] O combustível 15 introduzido no aparelho de combustão 300 (como a corrente de pasta 255), juntamente o O2 120 e um fluido circulante reciclado 503, é queimado para proporcionar uma corrente de produto de combustão 320. Em concretizações específicas, o aparelho de combustão 300 é um combustor resfriado por combustão, tal como descrito acima. A temperatura de combustão pode variar dependendo dos parâmetros de processo específicos - por exemplo, o tipo de combustível usado, a razão molar de fluido circulante para carbono no combustível, como introduzida no combustor, e/ou a razão molar de CO2 para O2 introduzida no combustor. Em concretizações específicas, a temperatura de combustão é uma temperatura como descrito acima em relação à descrição do combustor resfriado por transpiração. Em concretizações particularmente preferidas, as temperaturas de

combustão superiores a cerca de 1.000 ºC, como descrito no presente relatório descritivo, podem ser vantajosas.

[0111] Pode ser também útil controlar a temperatura de combustão, de modo que a corrente de produto de combustão deixando o combustor tenha uma temperatura desejada. Por exemplo, pode ser útil que a corrente de produto de combustão, saindo do combustor, tenha uma temperatura de pelo menos cerca de 700 ºC, pelo menos cerca de 900 ºC, pelo menos cerca de 1.200 ºC, ou pelo menos cerca de 1.600 ºC. Em algumas concretizações, a corrente de produto de combustão pode ter uma temperatura de cerca de 700 ºC a cerca de 1.600 ºC, ou de cerca de 1.000 ºC a cerca de 1.500 ºC.

[0112] Especificamente, a pressão da corrente de produto de combustão 320 pode ser relacionada com a pressão do fluido circulante, que é introduzido no aparelho de combustão 300. Em concretizações específicas, a pressão da corrente de produto de combustão 320 pode ser pelo menos cerca de 90% da pressão do fluido circulante introduzido no aparelho de combustão 300.

[0113] A constituição química da corrente de produto de combustão 320, saindo do aparelho de combustão 300, pode variar, dependendo do tipo de combustível usado. Significativamente, a corrente de produto de combustão vai compreender o componente principal do fluido circulante (por exemplo, CO2), que vai ser reciclado e reintroduzido no aparelho de combustão 300, ou em outros ciclos. Em outras concretizações, a corrente de produto de combustão 320 pode compreender um ou mais de vapor d'água, SO2, SO3, HCl, NO, NO2, Hg, excesso de O2, N2, Ar, material incombustível e/ou outro particulado, e, possivelmente, outros contaminantes que podem estar presentes no combustível, que é queimado. Esses materiais presentes na corrente de produto de combustão podem persistir na corrente de fluido circulante de CO2 e, a menos que removidos, tal como pelos

processos descritos no presente relatório descritivo.

[0114] Vantajosamente, de acordo com a presente invenção, a corrente de produto de combustão 320 pode ser orientada a uma turbina 400, sem a necessidade de primeiro filtrar qualquer material particulado na corrente de produto de combustão 320. Na turbina 400, a corrente de produto de combustão 320 é expandida para gerar energia (por exemplo, por meio de um gerador 400a, para produzir eletricidade). A turbina 400 pode ter uma entrada, para receber a corrente de produto de combustão 320, e uma saída, para liberar uma corrente de descarga de turbina 410. Embora uma única turbina 400 seja mostrada na Figura 1, deve-se entender que mais de uma turbina pode ser usada, as múltiplas turbinas sendo conectadas em série, ou, opcionalmente, separadas por um ou mais outros componentes, tal como um outro componente de combustão, um componente de compressão, um componente separador, ou similares.

[0115] A turbina 400 pode ser, especificamente, uma turbina tendo um projeto de pá e/ou um projeto global, como descrito de outro modo no presente relatório descritivo. Ainda mais, a turbina pode incorporar resfriamento por transpiração ou outra tecnologia de resfriamento, como descrito no presente relatório descritivo. Em particular, o projeto de turbina pode ser um com essas baixas velocidade de pá e de colisão de partículas, tal como para permitir que a turbina suporte a colisão sem erosão significativa. O resfriamento por transpiração da turbina pode ainda proteger contra a erosão de partículas, por criação de uma camada de barreira de escoamento contínuo do fluido de transpiração, entre a superfície da pá e o material particulado passando pela turbina.

[0116] Voltando à Figura 1, o sistema e o ciclos exemplificativos compreendem ainda um filtro 5, a jusante da turbina 400. A corrente de descarga de turbina 410 pode ser passada pelo filtro 5, para remover materiais particulados dele. A colocação do filtro 5 a jusante da turbina

400, em vez de a montante da turbina, é uma característica vantajosa da invenção, uma vez que a corrente de produto de combustão 320 pode ser expandida pela turbina em temperatura e pressão mais altas, quando deixando imediatamente o aparelho de combustão 300, e, desse modo, a produção de energia pode ser maximizada. A corrente de descarga de turbina de pressão mais baixa e mais fria 410 pode ser depois filtrada no filtro 5, para remover os materiais particulados dela como a corrente de material particulado 7. A corrente de descarga de turbina filtrada 420 é, desse modo, proporcionada substancialmente livre de material particulado, para processamento posterior no ciclo de combustão.

[0117] Em concretizações específicas, o filtro 5 pode compreender, de preferência, uma configuração que é efetiva para remover, substancialmente, todo o material particulado presente na corrente de produto de combustão 320. O filtro 5 pode compreender um filtro de ciclone e/ou um filtro de vela, em algumas concretizações, e a filtração pode ocorrer de cerca de 300 ºC a cerca de 775 ºC em algumas concretizações. Em concretizações particulares, a remoção de substancialmente todo o material particulado pode abranger a remoção de pelo menos 95%, pelo menos 96%, pelo menos 97%, pelo menos 98%, pelo menos 99, pelo menos 99,5%, ou pelo menos 99,8% em volume do material particulado presente na corrente de produto de combustão. Essa eficiência de remoção de material particulado do filtro pode ser relacionada ao tamanho de partícula. Por exemplo, o percentual mencionado de partículas removidas pode se referir à capacidade do filtro em reter partículas tendo um diâmetro de pelo menos cerca de 0,1 μm, pelo menos cerca de 0,5 μm, pelo menos cerca de 1 μm, pelo menos cerca de 5 μm, pelo menos cerca de 10 μm, pelo menos cerca de 25 μm, pelo menos cerca de 50 μm, pelo menos cerca de 100 μm, ou pelo menos cerca de 500 μm. Em uma concretização, as

partículas produzidas por combustão podem estar na faixa de cerca de 0,1 μm a cerca de 100 μm, e o filtro pode ser configurado para remover substancialmente todas as partículas acima de cerca de 1 μm, acima de cerca de 5 μm, acima de cerca de 10 μm, acima de cerca de 15 μm, ou acima de cerca de 20 μm, e reduzir o nível total de material particulado a menos do que cerca de 10 mg/m3, menos do que cerca de 5 mg/m3, menos do que cerca de 1 mg/m3, ou menos do que cerca de 0,5 mg/m3.

[0118] Em concretizações particulares (isto é, nas quais CO2 é usado como um fluido circulante), a corrente de descarga de turbina filtrada 420 pode ser passada por uma unidade de trocador de calor 500 (que pode ser uma série de trocadores de calor), para formar uma corrente de reciclagem não processada 501. Essa corrente de reciclagem não processada 501 pode ser passada por um trocador de calor de água fria 520, para formar a corrente 521, que é passada a um separador 540 para remoção de componentes secundários (por exemplo, H2O, SO2, SO4, NO2, NO3 e Hg), como uma corrente 542. Em concretizações específicas, o separador 540 pode compreender um reator, que proporciona um contato com tempos de residência suficientes, de modo que a impureza possa reagir com água para formar materiais (por exemplo, ácidos), que são facilmente removidos. Uma corrente de fluido circulante purificado 541, do separador 540, pode ser passada por um compressor 550, para formar a corrente 551, que pode ser resfriada ainda mais com um trocador de calor de água fria 560, para proporcionar um fluido circulante de CO2 de alta densidade, supercrítico 561. Em certas concretizações, o fluido circulante de CO2 purificado 541 pode ser comprimido a uma pressão de pelo menos cerca de 7,5 MPa ou pelo menos cerca de 8 MPa. Uma parte da corrente 561 pode ser retirada como a corrente 562, para uso como o meio de fluidização no misturador 250, para formar a corrente de pasta 255. A corrente de fluido circulante de CO2 de alta densidade, supercrítico 561 é, de outro

modo, pressurizada ainda mais no compressor 570, para formar a corrente de fluido circulante de CO2 de alta densidade, supercrítico, pressurizada 571. Uma parte do CO2 na corrente 571 pode ser retirada como a corrente 572 a uma tubulação de CO2, ou outro meio de sequestro. A parte remanescente do CO2 pode prosseguir como a corrente de fluido circulante de CO2 de alta densidade, supercrítico, pressurizada 573, que pode ser passada de volta pelo trocador de calor 500 (ou uma série de trocadores de calor), para aquecer a corrente. Em concretizações específicas, o fluido circulante de CO2 e pode ser proporcionado a uma densidade de pelo menos cerca de 200 kg/m3, pelo menos cerca de 300 kg/m3, pelo menos cerca de 500 kg/m3, pelo menos cerca de 750 kg/m3, ou pelo menos cerca de 1.000 kg/m3, após descarga do trocador de calor de água fria 560 (e antes da passagem pela unidade de trocador de calor 500 para aquecimento). Em outras concretizações, a densidade pode ser cerca de 150 kg/m3 a cerca de 1.100 kg/m3. A passagem da corrente 551 pelo trocador de calor de água fria 560 pode resfriar o fluido circulante de CO2 e a uma temperatura inferior a cerca de 60 ºC, inferior a cerca de 50 ºC, ou inferior a cerca de 30 ºC. O fluido circulante de CO2 na corrente 561, entrando no segundo compressor 570, pode ser proporcionado a uma pressão de pelo menos cerca de 12 MPa. Em algumas concretizações, a corrente pode ser pressurizada a uma pressão de cerca de 15 MPa a cerca de 50 MPa. Qualquer tipo de compressor, capaz de trabalhar sob as temperaturas mencionadas e capaz de atingir as pressões descritas, pode ser usado, tal como uma bomba de estágios múltiplos de alta pressão.

[0119] O fluido circulante de CO2 de alta densidade, supercrítico, pressurizado pode deixar o trocador de calor 500 como a primeira corrente 503, a ser proporcionada como o fluido circulante reciclado. Em algumas concretizações, o fluido circulante de CO2 de alta densidade,

supercrítico, pressurizado, aquecido pode deixar o trocador de calor 500 como a segunda corrente de fluido circulante reciclado 504, a ser proporcionada como um fluido de transpiração para as pás de turbina. De preferência, a segunda corrente de fluido circulante reciclado 504 pode ser controlável, de modo que a massa ou o volume totais de fluido circulante na corrente possa ser aumentado ou diminuído, como requer a demanda, aumentando ou diminuindo a proteção proporcionada pelo fluido de transpiração. Especificamente, um sistema de acordo com a invenção pode inclui um meio de controle de escoamento, de modo que a segunda corrente de fluido circulante reciclado 504 pode ser completamente interrompida, quando desejado. Notar que em algumas concretizações, o fluido circulante reciclado (por exemplo, CO2), proporcionado à turbina 400, pode se desviar do trocador de calor 500, antes de ser proporcionado à turbina. Nesse aspecto, o CO2 reciclado pode ser comprimido pelo compressor 570, e depois uma parte da corrente de fluido circulante 517 pode se desviar do trocador de calor 500 e entrar na turbina 400. Desse modo, o CO2 (ou outro fluido circulante reciclado) pode ser introduzido na turbina 400, sem que seja aquecido pelo trocador de calor 500. Consequentemente, o CO2 (ou outro fluido circulante reciclado) pode ser introduzido na turbina, a uma temperatura que é inferior à temperatura do fluido aquecido pelo trocador de calor. Nesse aspecto, o CO2 (ou outro fluido circulante reciclado) pode ser introduzido na turbina, a uma temperatura inferior a cerca de 300 ºC, inferior a cerca de 200 ºC, inferior a cerca de 100 ºC, inferior a cerca de 55 ºC, ou inferior a cerca de 25 ºC, e, desse modo, o CO2 (ou outro fluido circulante reciclado) pode ser empregado para resfriar a turbina 400. Para compensar a adição de fluido circulante relativamente mais frio na turbina 400, o O2 pode se deslocar pelo trocador de calor 500, para aquecer o O2 e depois o O2 pode ser combinado com o fluido circulante reciclado 503, orientado para o

combustor 300 para compensar a perda em eficiência que pode ocorrer de outro modo. Em certas concretizações, o fluido circulante deixando a extremidade fria do trocador de calor (ou o trocador de calor final na série, quando dois ou mais trocadores de calor são usados) pode ter uma temperatura inferior a cerca de 200 ºC, inferior a cerca de 100 ºC, inferior a cerca de 75 ºC, ou inferior a cerca de 40 ºC.

[0120] Em certas concretizações, pode ser, desse modo, útil que o trocador de calor recebendo a corrente de descarga de turbina seja formado de materiais de alto desempenho, projetados para suportar condições extremas. Por exemplo, o trocador de calor pode compreender uma liga de INCONEL® ou um material similar. De preferência, o trocador de calor compreende um material capaz de suportar uma temperatura operacional consistente de pelo menos cerca de 700 ºC, pelo menos cerca de 900 ºC, ou pelo menos cerca de 1.200 ºC. Pode ser também útil que um ou mais dos trocadores de calor compreendam um material, que proporcione uma boa resistência química ao tipo de materiais secundários, que podem estar presentes na corrente de produto de combustão. As ligas de INCONEL® são disponíveis da Special Metals Corporation, e algumas concretizações podem incluir ligas à base de níquel e cromo austeníticas. Os trocadores de calor adequados podem incluir aqueles disponíveis sob a marca registrada HEATRIC® (disponível da Meggitt USA, Houston, TX).

[0121] Como mencionado acima, além da água, o fluido circulante de CO2 pode conter outros componentes secundários, tais como impurezas derivadas de combustível, derivadas de combustão e derivadas de oxigênio. Esses componentes secundários do fluido circulante de CO2 (reconhecidos frequentemente como impurezas ou contaminantes) podem ser todos removidos do fluido circulante de CO2 resfriado por uso de processos adequados (por exemplo, os processos definidos na publicação do pedido de patente Norte-Americana

2008/0226515 e nos pedidos de patentes europeias EP 1952874 e EP 1953486, que são incorporados no presente relatório descritivo por referência nas suas totalidades). Por exemplo, SO2 e SO3 podem ser convertidos 100% em ácido sulfúrico, enquanto que > 95% de NO e NO2 podem ser convertidos em ácido nítrico. Qualquer excesso de O2, presente no fluido circulante de CO2, pode ser separado como uma corrente enriquecida para reciclagem opcional ao combustor. Quaisquer gases inertes (por exemplo, N2 e Ar) podem ser ventilados a baixa pressão para a atmosfera.

[0122] Como descrito acima, um ciclo de produção de energia incorporando uma turbina, que é configurada de acordo com a invenção, pode operar a uma alta eficiência, em parte porque a corrente de produto de combustão (por exemplo, oriunda de combustão de um combustível sólido, tal como carvão) pode ser introduzida diretamente na turbina, sem a necessidade para primeiro filtrar o material particulado presente na corrente de produto de combustão. Particularmente, as configurações da turbina inventiva eliminam ou reduzem bastante a erosão das pás, originária de colisão do material não queimado. Ainda que a invenção proporcione essa proteção valiosa dos materiais da turbina, pode ainda haver ocasionalmente uma deterioração da turbina originária da interação dos componentes da turbina com os componentes particulados da corrente de produto de combustão.

[0123] Por exemplo, cinza líquida agarrando e congelando (ou solidificando) nas pás de turbina pode provocar formação de escória, perda de eficiência e/ou perda de equilíbrio do rotor. Consequentemente, em certas concretizações, a presente invenção proporciona a incorporação de componentes específicos em um ciclo de combustão, para aliviar e/ou remover pelo menos parcialmente o acúmulo de depósitos químicos dos componentes da turbina, particularmente, as pás de turbina. Embora o acúmulo de cinza seja

exemplificado nesse caso, deve-se entender que a limpeza proporcionada pelas concretizações da presente invenção vão ser esperadas como sendo efetivas na remoção pelo menos parcial ou completa de qualquer tipo de depósito nos componentes da turbina, originário de materiais presentes na corrente de produto de combustão, particularmente, os materiais particulados. Desse modo, vários tipos de cinza, material derivado de cinza, e carbono podem ser removidos pela limpeza proporcionada neste caso.

[0124] O acúmulo de depósitos químicos nos componentes da turbina, tais como pás de turbina, podem ser impedidos por emprego de técnicas de proteção de transpiração. Por exemplo, como visto na Figura 1, o fluido operacional reciclado quente (por exemplo, CO2) pode ser retirado da extremidade quente do trocador de calor 500, como a corrente 504, e transferido para a turbina 400. Por exemplo, o fluido operacional reciclado quente pode ser transferido para o rotor da turbina, pelas pás de turbina, para proporcionar proteção por transpiração das pás de turbina. Nessas concretizações, as pás de turbina podem ser perfuradas se necessário, de modo que um fluido operacional reciclado quente deixa as pás ao longo de substancialmente toda a superfície das pás, ou pelo menos a superfície de avanço das pás, isto é, na rota direta da corrente de produto de combustão entrando na turbina. Em concretizações específicas, o maior fluxo de fluido de transpiração para fora das pás vai ser nas bordas de avanço das pás.

[0125] O fluido de transpiração pode ser proporcionado a várias temperaturas. Em algumas concretizações, o fluido de transpiração para a turbina pode ficar a uma temperatura que está dentro de cerca de 10%, dentro de cerca de 8%, dentro de cerca de 5%, ou dentro de cerca de 2% da temperatura da corrente de produto de combustão entrando na turbina. Nessas concretizações, a temperatura do fluido de transpiração para a turbina pode ser caracterizada como sendo

substancialmente similar à temperatura da corrente de produto de combustão entrando na turbina. Em outras concretizações, o fluido de transpiração orientado para a turbina, para proteção por transpiração, pode ser 15% a cerca de 90% inferior, cerca de 15% a cerca de 60% inferior, cerca de 15% a cerca de 50% inferior, ou cerca de 20% a cerca de 40% inferior à temperatura da corrente de produto de combustão entrando na turbina. Nessas concretizações, a temperatura do fluido de transpiração para a turbina pode ser caracterizada como sendo substancialmente inferior à temperatura da corrente de produto de combustão entrando na turbina.

[0126] Em algumas concretizações, o uso do fluido de transpiração com as pás de turbina pode promover múltiplas funções. Por exemplo, o fluido de transpiração pode ser efetivo para proteger as pás de turbina, pois pode impedir essencialmente que os materiais particulados na corrente de produto de combustão de entrar em contato de fato com a superfície da pá. Em vez disso, a barreira protetora, formada pelo fluido de transpiração, pode desviar ou de outro modo reorientar os materiais particulados em torno das pás. O fluido operacional reciclado quente pode também funcionar para aquecer as pás, particularmente, as superfícies das pás no lado de saída da turbina. Esse aquecimento adicional pode impedir que as superfícies das pás, no lado de saída e/ou no lado de entrada, de resfriar a uma temperatura na qual a cinza líquida (ou outros materiais que são líquidos na temperatura da corrente de produto de combustão e têm um ponto de congelamento (ou solidificação) que é inferior à temperatura da corrente de produto de combustão, mas maior do que a temperatura ambiente) vai solidificar (isto é, a temperatura de congelamento do material). Isso impede que as partículas líquidas, que de fato entram em contato com a superfície da pá de turbina, congelem (ou solidifiquem), e, desse modo, se depositam nas superfícies das pás.

[0127] A proteção por transpiração pode eliminar o congelamento (ou solidificação) de partículas em algumas concretizações. Nesse aspecto, toda a cinza pode ser manter em fusão acima de aproximadamente 870 - 980 ºC em algumas concretizações. Em outras concretizações, o congelamento das partículas pode ser reduzido em relação aos ciclos e sistemas idênticos, que não incorporam proteção por transpiração. Na medida em que o congelamento de partículas é reduzido mas não eliminado, a limpeza periódica dos componentes da turbina pode ser necessária. Em concretizações específicas, a limpeza dos componentes da turbina, tais como as pás de turbina, pode ser feita por incorporação de componentes de limpeza em um ciclo ou sistema de combustão.

[0128] O ciclo mostrado na Figura 2 ilustra um sistema no qual os materiais de limpeza de pás de turbina podem ser orientados pela turbina, para promover limpeza das pás de turbina. Beneficamente, os materiais de limpeza podem ser orientados pela turbina, em paralelo com a corrente de produto de combustão. Desse modo, a limpeza pode ser feita sem interrupção do ciclo de combustão de produção de energia. Em algumas concretizações, pode ser desejável alterar um ou mais dos parâmetros do ciclo discutidos no presente relatório descritivo, para facilitar o processo de limpeza (por exemplo, alterar a temperatura da corrente de produto de combustão, para aumentar a razão de fluido reciclado para combustível, ou similares). Nas concretizações nas quais a pá de turbina está sendo protegida por transpiração, pode ser desejável interromper o escoamento de fluido de transpiração, para facilitar o contato do material de limpeza com as pás de turbina. No entanto, a combustão e a geração de energia podem continuar durante o processo de limpeza.

[0129] Com referência à Figura 2, um ciclo de combustão pode prosseguir substancialmente como descrito em relação à Figura 1. Nas

presentes concretizações, no entanto, uma terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 pode deixar o trocador de calor 500 e passar por uma junção de material de limpeza 600, na qual o material de limpeza é combinado com a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506, para formar a corrente de material de limpeza 610. A junção de material de limpeza 600 pode compreender qualquer estrutura, unidade, ou dispositivo adequado para combinar a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 com o material de limpeza, em que o material de limpeza é proporcionado em um fluxo contínuo ou é proporcionado em batelada. De preferência, a junção de material de limpeza é configurada de modo que o material de limpeza seja combinado e escoe com a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506. Como também descrito acima em relação à segunda corrente de fluido circulante reciclado 504, a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 pode ser controlada de modo que a vazão possa ser zero ou qualquer vazão necessária para transferir efetivamente o material de limpeza para a turbina.

[0130] O material de limpeza pode ser qualquer material efetivo para entrar em contato com a superfície das pás de turbina, e remover, física ou quimicamente, os depósitos sólidos delas. De preferência, o material de limpeza compreende um material que é efetivo para remover depósitos com uma erosão mínima ou sem ela das próprias superfícies das pás. Os materiais de limpeza sólidos podem incluir partículas de carbono, partículas de alumina ou outras partículas duras configuradas para não fundir nas temperaturas de escoamento. A erosão da cinza, mas não das pás pode ocorrer nas velocidades de impacto baixas, porque a cinza pode definir uma menor resistência a fratura do que a pá. Os materiais de limpeza líquidos podem incluir compostos de potássio, tais como óxido, carbonato ou hidróxido de potássio. Os compostos de potássio podem agir como um fundente para baixar o

ponto de fusão da cinza, de modo que ela possa fundir das pás. Os materiais de limpeza gasosos podem incluir oxigênio, que pode oxidar depósitos, tal como carbono. Os materiais de limpeza sólidos ou líquidos, combinados com a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506, na junção de material de limpeza 600, podem definir menos do que cerca de 0,5%, menos do que cerca de 0,1%, ou menos do que cerca de 0,01% da vazão mássica total da corrente de material de limpeza 600, e de cerca de 0,001% a cerca de 0,1%, de cerca de 0,1% a cerca de 1%, ou de cerca de 0,0001% a cerca de 0,01% da vazão mássica total da corrente de material de limpeza. Os materiais de limpeza gasosos, combinados com a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506, na junção de material de limpeza 600, podem definir menos do que cerca de 5%, menos do que cerca de 2%, ou menos do que cerca de 1% da vazão mássica total da corrente de material de limpeza 610, e de cerca de 0,1% a cerca de 2%, de cerca de 0,01% a cerca de 1%, ou de cerca de 0,01% a cerca de 5% da vazão mássica total da corrente de material de limpeza. Em uma concretização, o ciclo de limpeza pode ser iniciado quando a saída de energia pelo gerador 400a cai de cerca de 2% a cerca de 5%, de cerca de 5% a cerca de 10%, ou de cerca de 1% a cerca de 2%. Por exemplo, a operação de limpeza pode ser conduzida de cerca de uma vez por semana a cerca de uma vez a cada três anos. O ciclo de limpeza pode durar de cerca de cinco minutos a cerca de uma hora em algumas concretizações.

[0131] A corrente de material de limpeza 610 pode escoar diretamente para a turbina 400. Nessas concretizações, a corrente de material de limpeza pode se misturar com a corrente de produto de combustão 320 em uma entrada comum para a turbina 400, ou a corrente de material de limpeza 610 e a corrente de produto de combustão 320 podem ter entradas individuais na turbina, de modo que

as correntes se misturem em um ponto interno na turbina 400. Na concretização ilustrada, a corrente de material de limpeza 610 é primeiro misturada com a corrente de produto de combustão 320 em um desvio combinador de fluxo 650. Desse modo, em um ciclo de limpeza, a corrente de produto de combustão e de material de limpeza combinada 326 deixa o desvio combinador de fluxo 650 e entra na turbina 400.

[0132] Em algumas concretizações, a limpeza contínua pode ser usada na qual algum fluxo mínimo da terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 pode ser mantido de modo que uma quantidade de material de limpeza é continuamente introduzida na turbina. O fluxo da terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 pode ser ajustado para cima ou para baixo, periodicamente, para aumentar ou reduzir a capacidade de limpeza do ciclo. Em outras concretizações, a terceira corrente de fluido circulante reciclado 506 pode ser fechada, de modo que nenhum material de limpeza passe da junção de material de limpeza 600 para o desvio combinador de fluxo 650. Nesse modo operacional, a corrente de produto de combustão 320 pode se desviar do desvio combinador de fluxo 650 e passar diretamente para a turbina, como ilustrado na Figura 1. Alternativamente, a corrente de produto de combustão 320 pode continuar a escoar pelo desvio combinador 650, mas, na ausência de uma corrente de material de limpeza de entrada 610, a corrente deixando o desvio combinador 650 vai ser essencialmente a corrente de produto de combustão 320 e não a corrente de produto de combustão e de material de limpeza combinada 326.

[0133] Nas concretizações nas quais o ciclo de limpeza está ativo, os depósitos ou o resíduo removidos das pás de turbina podem ser removidos do ciclo pelo filtro 5, na maneira descrita em relação à Figura 1. Igualmente, quando são usados materiais de limpeza sólidos, os materiais de limpeza sólidos podem ser removidos do ciclo pelo filtro 5.

Em algumas concretizações, o filtro 5 pode ser um filtro de unidades múltiplas no qual um primeiro meio ou unidade filtrante é usado durante o transcorrer normal do ciclo de combustão, e um segundo meio ou unidade filtrante pode ser usado durante o ciclo de limpeza, para coletar o material de limpeza e os depósitos das pás removidos, sem desnecessariamente incrustar o filtro usado no ciclo de combustão normal. O sistema inventivo pode incorporar os dispositivos adequados para facilitar essa comutação entre os filtros.

[0134] CONCRETIZAÇÕES EXEMPLIFICATIVAS

[0135] A presente invenção vai ser descrita a seguir com referência específica aos exemplos apresentados a seguir, que não são intencionados para ser limitantes da invenção e são, em vez disso, proporcionados para mostrar concretizações exemplificativas.

[0136] A Figura 3 ilustra uma concretização exemplificativa de um combustor 1000, que pode ser empregado de acordo com os sistemas e processos descritos no presente relatório descritivo. O combustor 1000 pode definir uma câmara de combustão 1002, na qual combustível e O2 são orientados por uma entrada de combustível 1004 e uma entrada de O2 1006. Consequentemente, o combustível pode ser queimado para formar uma corrente de produto de combustão 1008. O combustor 1000 pode compreender uma carcaça, compreendendo uma carcaça externa 1010 e uma carcaça interna 1012. A carcaça interna 1012 pode compreender um material de transpiração, tal como um material sinterizado poroso (por exemplo, um material metálico sinterizado poroso), que é configurado para receber um fluido de transpiração 1014 e transpirar o fluido por ele, para definir uma camada de transpiração 1016, configurada para reduzir o calor incidente na carcaça. O fluido de transpiração 1014 pode ser recebido em algumas concretizações por uma entrada 1026, embora o fluido de transpiração possa ser recebido de uma turbina, presa no combustor, em algumas

concretizações, como descrito abaixo. Consequentemente, o corrente de produto de combustão 1000 pode ser configurado para suportar o calor produzido na câmara de combustão 1002, sem empregar materiais termicamente resistentes caros, tais como superligas, e/ou o combustor pode operar a temperaturas de combustão mais altas.

[0137] Como descrito acima, a corrente de produto de combustão produzida por um combustor pode ser empregada para acionar uma turbina. Nesse aspecto, a Figura 4 ilustra uma concretização exemplificativa de uma turbina 2000. Em uma concretização, a turbina 2000 pode incluir um conduto de entrada 2002, configurado para acoplar-se a uma saída de um combustor (por exemplo, o combustor 1000) e orientar uma corrente de produto de combustão (por exemplo, a corrente de produto de combustão 1008) a uma entrada de uma carcaça 2004 da turbina. A turbina 2000 pode compreender um rotor 2006, ao qual várias pás 2008 são presas. O rotor 2006 pode compreender um desviador de fluxo anular 2010, configurado para desviar a corrente de produto de combustão em torno do rotor. Consequentemente, a corrente de produto de combustão 1008 pode ser expandida enquanto deslocando-se pela turbina 2000, fazendo, desse modo, com que as pás 2008 girem o rotor 2006 e um eixo motriz 2011 (que pode ser integral com o rotor, ou acoplado a ele), antes que uma corrente de descarga de turbina 2012 seja descarregada por uma ou mais saídas 2014. Desse modo, a turbina 2000 pode acionar um gerador, ou um outro dispositivo.

[0138] Como ilustrado ainda na Figura 4, o conduto de entrada 2002 pode compreender uma carcaça interna 2016 e uma carcaça externa 2018. Ainda mais, a carcaça 2004 da turbina 2000 pode compreender uma carcaça interna 2020 e uma carcaça externa 2022. Um fluido de transpiração 2024 pode ser orientado de uma entrada 2026, entre as carcaças internas 2016, 2020 e as carcaças externas 2018, 2022 do

conduto de entrada 2002 e da turbina 2000. As carcaças internas 2016, 2020 podem compreender um material de transpiração, tal como um material sinterizado poroso (por exemplo, um material metálico sinterizado poroso), que é configurado para receber o fluido de transpiração 2024 e transpirar o fluido por ele. Desse modo, uma camada de transpiração 2028 pode ser definida entre a corrente de produto de combustão 1008 e a superfície interna do conduto de entrada 2002, e uma camada de transpiração 2030 pode ser definida entre as pás 2008 e uma superfície interna da carcaça interna 2020, e as carcaças internas podem ser resfriadas ou protegidos de outro modo pelo fluido de transpiração 2024. Em algumas concretizações, o fluido de transpiração proporcionado à turbina também pode ser proporcionado ao combustor, para resfriamento por transpiração. Nesse aspecto, por exemplo, o conduto de entrada pode se unir ao combustor, de modo que o fluido de transpiração seja proporcionado a ele em algumas concretizações. No entanto, o fluido de transpiração proporcionado ao combustor pode ser adicional ou alternativamente, proporcionado de uma entrada separada 1026 em algumas concretizações.

[0139] Ainda mais, o fluido de transpiração 2024 pode ser também introduzido na turbina 2000 por uma segunda entrada 2032, que pode ser definida no eixo motriz 2011 em algumas concretizações. Consequentemente, o fluido de transpiração 2024 pode se deslocar pelo eixo motriz 2011 para o rotor 2006. O rotor 2006 e/ou as pás 2008 podem compreender um material de transpiração, tal como um material sinterizado poroso (por exemplo, um material metálico sinterizado poroso), que é configurado para receber o fluido de transpiração 2024 e transpirar o fluido por ele para as superfícies externas delas. Consequentemente, o rotor 2006 e/ou as pás podem ser resfriados ou protegidos de outro modo da corrente de produto de combustão 1008 e

de material particulado nela pelo fluido de transpiração 2024.

[0140] As Figuras 5 e 6 ilustram uma concretização alternativa de uma turbina 2000'. Como ilustrado, vários combustores 1000' podem ser configurados para acionar a turbina 2000'. Em particular, os combustores 2000' podem ser dispostos radialmente com relação ao eixo maior, definido pelo rotor 2006', como ilustrado na Figura 6. Como mostrado na Figura 5, a turbina 2000' pode ser substancialmente similar à concretização da turbina 2000, ilustrada na Figura 4, exceto que os combustores 1000' podem suprir as correntes de produto de combustão 1008' em torno da circunferência do rotor 2006'. Consequentemente, um desviador de fluxo anular pode ser desnecessário para desviar as correntes de produto de combustão 1008' em torno do rotor 2006'. Todos os combustores 1000' podem ser substancialmente similares ao combustor 1000, descrito acima exceto para a colocação dos combustores em torno do rotor 2006'.

[0141] A Figura 7 ilustra uma vista seccional lateral por uma concretização de uma pá de turbina 2008A, que pode ser empregada nas turbinas descritas no presente relatório descritivo. A pá de turbina 2008A pode compreender uma camada externa 3002 e um núcleo 3004. O núcleo 3004 pode definir um metal relativamente resistente mecanicamente, ou outro material configurado como um elemento de reforço. Um metal resistente mecanicamente, como usado na presente invenção, se refere a um metal com uma resistência mecânica superior a 68,9 MPa (10.000 psi), superior a 137,9 MPa (20.000 psi), ou superior a 206,8 MPa (30.000 psi), a temperaturas elevadas adequadas, e que seja quimicamente resistente a temperaturas adequadas. Os exemplos incluem ligas de aço inoxidável e ligas com alto teor de níquel, tal como inconel, etc. Desse modo, a presente invenção permite que ligas mais baratas, tal como aço inoxidável (por exemplo, aço inoxidável 316), ou outras ligas com teores mais baixos de níquel e cobalto, sejam usadas

em vez das superligas típicas, que têm teores de níquel e cobalto relativamente muito altos, e são, desse modo, caras. Nesse aspecto, um aço inoxidável policristalino 316 pode ser tanto quanto vinte vezes mais barato por quilograma (libra) do que uma superliga policristalina, e duas mil vezes de custo mais baixo por quilograma (libra) do que pás de superligas de cristal único.

[0142] Ainda mais, o núcleo 3004 pode definir um ou mais canais 3006. Os canais 3006 podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo para a camada externa 3002. A camada externa 3002 pode definir uma parte, ou a totalidade, de uma superfície externa 3008 da pá 2008A em algumas concretizações. Ainda mais, a camada externa 3002 pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso. Consequentemente, os canais 3006 no núcleo 3004 podem ser configurados para receber fluido de transpiração e orientá-lo para a camada externa 3002. Desse modo, o fluido de transpiração pode escoar pela camada externa 3002 da pá de turbina 2008A e proporcionar uma camada de transpiração em torno da superfície externa 3008 da pá de turbina, que pode proteger a pá de turbina de calor e/ou impactos com material particulado. Nesse aspecto, deve-se entender que uma pá de turbina e/ou outros componentes dos sistemas descritos no presente relatório descritivo podem ser protegidos por transpiração, significando que um fluido de transpiração é orientado a pelo menos uma parte de uma superfície deles, independentemente de se a transpiração resfria o componente. Por exemplo, um componente pode ser protegido por transpiração por um fluido de transpiração, que protege uma superfície do componente de impacto com material particulado ou outro material, independentemente da temperatura do fluido de transpiração. Contrariamente, um componente pode ser, adicional ou alternativamente, protegido por transpiração por um fluido de transpiração, que resfria o componente ou age como uma

barreira, que reduz o aquecimento do componente.

[0143] Como descrito acima, o fluido de transpiração pode ser, adicional ou alternativamente, empregado em outros componentes associados com os sistemas e conjuntos descritos no presente relatório descritivo. Nesse aspecto, a Figura 8 ilustra uma vista seccional por uma parte de um conduto de entrada 2002a, configurado para transferir uma corrente de produto de combustão de um combustor a uma turbina. O conduto de entrada 2002A pode compreender uma camada interna 4002 e uma camada externa 4004. A camada externa 4004 pode compreender uma crosta, que pode compreender um metal forte, como descrito acima, configurada para proporcionar resistência mecânica ao conduto de entrada 2002A. Ainda mais, a camada externa 4004 pode definir um ou mais canais 4006. Os canais 4006 podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo para a camada interna 4002. A camada interna 4002 pode definir uma parte, ou a totalidade, de uma superfície interna 4008 do conduto de entrada 2002A em algumas concretizações. Ainda mais, a camada interna 4002 pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso. Consequentemente, os canais 4006 na camada externa 4004 podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo para a camada interna 4002. Desse modo, o fluido de transpiração pode escoar pela camada interna 4002 do conduto interno 2002A e proporcionar uma camada de transpiração na superfície interna 4008 do conduto de entrada, de calor e/ou impacto de material particulado.

[0144] Como ilustrado na Figura 9, em uma concretização de um conduto de entrada 2002B, uma camada isolante 4010 e uma segunda camada externa 4012 podem ser proporcionadas adicionalmente. A camada isolante 4010 e a segunda camada externa 4012 podem circundar a camada interna 4002 e a camada externa 4004 em algumas

concretizações. A camada isolante 4010 pode isolar o conduto de entrada 2002B, de modo a reter mais calor nele, o que pode aumentar a eficiência do sistema no qual é empregada. Ainda mais, a segunda camada externa 4012 pode proporcionar resistência mecânica adicional ao conduto de entrada 2002B. No entanto, as várias camadas de material e os itens descritos acima podem ser, adicional ou alternativamente, empregados em outros componentes dos sistemas e conjuntos descritos no presente relatório descritivo, tal como em um combustor.

[0145] A Figura 10 ilustra uma vista seccional longitudinal por uma pá de turbina 2008B, de acordo com uma concretização alternativa. A pá de turbina 2008B pode compreender um ou mais elementos de reforço, tais como uma ou mais hastes 5014. As hastes 5014 podem compreender um material metálico, ou outro material configurado para proporcionar resistência mecânica à pá de turbina 2008B.

[0146] A pá de turbina 2008B pode definir ainda um ou mais canais 5006. Os canais 5006 podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo para o material definindo a pá de turbina 2008B. Nesse aspecto, a pá de turbina 2008B pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso. Consequentemente, os canais 5006 na pá de turbina 2008B podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo pela pá de turbina, para proporcionar uma camada de transpiração em uma superfície externa 5008 da pá de turbina, que pode proteger a pá de turbina de calor e/ou impactos com material particulado.

[0147] Em algumas concretizações, a pá de turbina 2008B pode ser configurada para definir um fluxo de fluido de transpiração em uma borda de avanço 5016 da pá de turbina, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de fuga 5018 da pá de turbina. Isso pode proporcionar à borda de avanço uma maior proteção, que pode

ser desejável, uma vez que a borda de avanço pode ser, de outro modo, mais propensa a impactos com partículas do que o restante da pá de turbina. Nesse aspecto, um ou mais canais 5006 na pá de turbina 2008B podem definir uma área de entrada de fluido de transpiração na borda de avanço 5016 (vide, por exemplo, o canal 5006A), que é maior do que uma área de entrada de fluido de transpiração de um ou mais canais na borda de fuga 5018 (vide, por exemplo, o canal 5006B). Alternativamente, um maior número de canais pode ser definido na borda de avanço do que na borda de fuga.

[0148] As Figuras 11 a 13 ilustram uma concretização alternativa de uma pá de turbina 2008C. Como ilustrado, a pá de turbina 2008C pode definir uma estrutura integral, compreendendo uma ou mais nervuras internas 6020. As nervuras internas 6020 podem funcionar como um elemento de reforço, configurado para proporcionar resistência mecânica à pá de turbina 2008C. As nervuras internas 6020 podem ser formadas integralmente com uma camada externa 6002 e/ou um elemento de base 6022 da pá de turbina 2008C.

[0149] A pá de turbina 2008C pode incluir um ou mais canais 6006, que podem ser separados por nervuras internas 6020. Os canais 6006 podem ser configurados para receber fluido de transpiração (por exemplo, de um rotor ao qual se prende o elemento de base 6022) e orientá-lo pela camada externa 6002. Nesse aspecto, a pá de turbina 2008C pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso. Consequentemente, os canais 6006 na pá de turbina 2008C podem ser configurados para receber o fluido de transpiração e orientá-lo pela camada externa 6002 da pá de turbina, para proporcionar uma camada de transpiração em uma superfície externa 6008 da pá de turbina, que pode proteger a pá de turbina de calor e/ou impactos com material particulado. Como ilustrado ainda, os canais 6006 na pá de turbina 2008C podem definir uma área de entrada

de fluido de transpiração na borda de avanço 6016 (vide, por exemplo, o canal 6006A), que é maior do que uma área de entrada de fluido de transpiração de um ou mais canais não borda de avanço 6018 (consultar, por exemplo, o canal 6006B). Consequentemente, em algumas concretizações, a pá de turbina 2008C pode ser configurada para definir um fluxo de fluido de transpiração em uma borda de avanço 6016 da pá de turbina, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de fuga 6018 da pá de turbina.

[0150] A Figura 14 ilustra uma vista em seção transversal lateral por uma concretização adicional de uma pá de turbina 2008D. Como ilustrado, a pá de turbina 2008D pode compreender uma camada externa 7002, que define uma espessura de parede na borda de fuga 7018, que é maior do que uma espessura de parede na borda de avanço 7016. Nesse aspecto, a pá de turbina 2008D pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso. Consequentemente, o fluido de transpiração pode ser orientado pela pá de turbina 2008D, de modo que se desloque pela camada externa 7002, para proporcionar uma camada de transpiração em uma superfície externa 7008 da pá de turbina, que pode proteger a pá de turbina de calor e/ou impactos com material particulado. Uma vez que a espessura de parede da camada externa 7002 é maior na borda de fuga 7018 do que na borda de avanço 7016, a pá de turbina 2008D pode definir um fluxo de fluido de transpiração na borda de avanço, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração na borda de fuga.

[0151] Ainda mais, as pás de turbina, de acordo com as várias concretizações descritas no presente relatório descritivo, podem definir uma porosidade, que varia entre a raiz e a ponta de uma pá de turbina (vide, por exemplo, a raiz 6026 e a ponta 6028 da pá de turbina 2008C ilustradas na Figura 13). Nesse aspecto, em algumas concretizações, as pás de turbina descritas no presente relatório descritivo podem ser

configuradas para definir um fluxo do fluido de transpiração na ponta da pá de turbina, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração na raiz da pá de turbina. Isso pode dotar as pás de turbina com uma proteção adicional, que pode ser desejável, uma vez que a ponta da pá de turbina se movimenta a uma maior velocidade do que qualquer outro ponto na pá de turbina.

[0152] Por exemplo, a Figura 15A ilustra esquematicamente uma vista seccional longitudinal por uma pá de turbina 2008E. Como ilustrado, a pá de turbina 2008E define uma porosidade, que difere entre a raiz 8026 e a ponta 8028. Em particular, a pá de turbina 2008E é mais porosa na ponta 8028 do que na raiz 8026, de modo que relativamente mais fluido de transpiração pode escoar da ponta da pá de turbina do que da raiz da pá de turbina. Nesse aspecto, a pá de turbina 2008E pode compreender um material poroso, tal como um material metálico sinterizado poroso, configurado para transpirar um fluido de transpiração por ele, como discutido acima. Como ilustrado, em algumas concretizações, o material poroso pode definir várias camadas 8030A - D, em que a porosidade das camadas aumenta da raiz para a ponta. As camadas 8030A - D podem ser definidas por diferentes materiais ou pelo mesmo material, que tenha sido sinterizado a vários graus, e, por conseguinte, a sua porosidade varia. Em algumas concretizações, as camadas podem ser laminadas conjuntamente, embora as camadas possam ser presas em várias outras maneiras.

[0153] Em outra concretização, como ilustrado na Figura 15B, a pá de turbina 2008E' define uma porosidade, que difere entre a raiz 8026' e a ponta 8028', como descrito acima com relação à Figura 15B. No entanto, como ilustrado, em algumas concretizações, o material poroso pode definir um gradiente de porosidade, em que, por exemplo, a porosidade do material aumenta da raiz 8026' para a ponta 8028'. Nesse aspecto, a porosidade do material pode variar em vários locais, sem que

haja distintas camadas definindo diferentes porosidades em algumas concretizações.

[0154] Várias outras configurações para as pás de turbina podem ser empregadas. Por exemplo, em algumas concretizações, as pás de turbina podem ser configuradas para definir um fluxo de fluido de transpiração na borda de avanço, que é substancialmente igual ao, ou menor do que o, fluxo de fluido de transpiração na borda de fuga das pás de turbina. Ainda mais, em algumas concretizações, as pás de turbina podem ser configuradas para definir um fluxo de fluido de transpiração na ponta, que é substancialmente igual ao, ou menor do que o fluxo de fluido de transpiração na raiz da pá de turbina. Ainda mais, as variações em porosidade entre a borda de avanço e a borda de fuga podem ser também usadas para controlar o fluxo de fluido de transpiração das pás, em uma maneira similar como descrito com relação ao controle do fluido de transpiração entre a raiz e a ponta.

[0155] Desse modo, por exemplo, a porosidade do material definindo a pá de turbina (ou outro componente) pode aumentar entre a raiz e a ponta, diminuir entre a raiz e a ponta, ser relativamente maior ou menor no centro, em relação às partes externas da pá, aumentar ou diminuir da borda de avanço para a borda de fuga, etc. O gradiente de porosidade ou as camadas de porosidade podem aumentar ou diminuir de cerca de 10% de porosidade a cerca de 90% de porosidade, cerca de 25% de porosidade a cerca de 75% de porosidade, ou cerca de 1% de porosidade a cerca de 25% de porosidade.

[0156] Consequentemente, o fluido de transpiração pode ser configurado para resfriar e/ou proteger de outro modo vários componentes dos sistemas e conjuntos descritos no presente relatório descritivo. Nesse aspecto, a Figura 16 ilustra uma trajetória calculada 900 para uma partícula de cinza de 100 μm, relativa a uma superfície externa 904 de uma pá de turbina 906. A trajetória de partícula de cinza

900 é modelada com base na partícula de cinza 902 deslocando-se inicialmente a 75 m/s, no sentido da pá de turbina 906, com um fluxo de fluido circulante de CO2 908 transpirando da superfície externa 904 da pá de turbina a 2 m/s. O fluido circulante na turbina pode estar a 300 bar (30 MPa) a 700 ºC. Como ilustrado, o fluido de transpiração 908 impede que a partícula de cinza 902 entre em contato com a pá de turbina 906. Em particular, a partícula de cinza 902 é calculada para ficar cerca de 0,2 mm da superfície externa 904 da pá de turbina. Consequentemente, a erosão da pá de turbina 906 pode ser evitada.

[0157] De modo similar, a Figura 17 ilustra um exemplo de acordo com a presente invenção de uma trajetória de partícula calculada 1000 para uma partícula de cinza de 50 μm 1002, relativa a uma superfície interna 1004 de um combustor 1006. A trajetória de partícula calculada 1000 é modelada com base na partícula de cinza 1002 deslocando-se inicialmente a uma velocidade de 50 m/s, perpendicular à superfície interna 1004 do combustor 1006, com uma velocidade de escoamento axial do gás de combustão de cerca de três metros por segundo, uma composição de gás de combustão superior a cerca de 90% de CO2, uma temperatura de gás de combustão de cerca de 1.500 ºC, uma pressão de cerca de 300 bar (30 MPa), e uma vazão de transpiração radial do fluido de transpiração 1008 de cerca de um metro por segundo na direção radial (por exemplo, perpendicular ao fluxo de gás de combustão axial). Como ilustrado, o fluido de transpiração 1008 impede que a partícula de cinza 1002 entre em contato com a superfície interna 1004 do combustor 1006. A partícula de cinza 1002 é calculada para ficar a apenas 0,2 mm da superfície interna 1004 do combustor 1006. Consequentemente, a erosão da superfície interna 1004 do combustor 1006 pode ser evitada.

[0158] A Tabela 1 abaixo proporciona vários parâmetros para operação de um projeto de turbina a gás de gás natural de planta de

energia convencional. Uma seção transversal dessa turbina típica 1100 é mostrada na Figura 18. Como uma comparação, a Tabela 2 abaixo proporciona os mesmos parâmetros para operação de uma turbina de baixa velocidade, alta pressão, de acordo com a presente invenção. Uma seção transversal de uma turbina exemplificativa 1200, de acordo com a invenção, é mostrada na Figura 19. Como pode-se notar por comparação da turbina convencional 1100 com a turbina 1200 da presente invenção, a turbina da presente invenção pode definir um diâmetro relativamente menor, devido à turbina da presente invenção empregar pás de turbina relativamente mais curtas 2008F, em comparação com as pás de turbina 1108 da turbina convencional em algumas concretizações. Nesse aspecto, como mostrado nas tabelas apresentadas a seguir, as pás de turbina 2008F da turbina 1200 da presente invenção podem definir um raio interno médio (isto é, do centro do rotor 2006F para a raiz da pá de turbina), um raio externo médio (isto é, do centro do rotor para a ponta da pá de turbina) e um raio médio (média dos raios interno e externo) relativamente menores, em comparação com as pás de turbina 1108 da turbina convencional 1100 em algumas concretizações. Também, a turbina 1200 da presente invenção pode definir uma razão de comprimento para diâmetro relativamente maior, em comparação com a turbina convencional 1100. Ainda mais, a turbina 1200 da presente invenção pode incluir um número relativamente maior de pás de turbina 2008F do que a turbina convencional 1100. Adicionalmente, o diâmetro do rotor 2006F da turbina 1200 da presente invenção pode ser menor do que o diâmetro do rotor 1106 da turbina convencional 1100.

Tabela 1	
Projeto convencional	
Parâmetro	Valor
Requisito de energia para gerador elétrico	$2,5 \times 10^8$ W

Pressão de entrada da turbina	15 bar (1,5 MPa)
Pressão de saída da turbina	1 bar (0,1 MPa)
Temperatura do fluxo de produto de combustão	1.623 K (1.350°C)
Densidade do fluxo	0,75 kg/m^3
Velocidade do fluxo	700 mph (310 m/s)
Comprimento da turbina	10 m
Diâmetro da turbina	4 m
Número de pás	200

Tabela 2	
Projeto inventivo	
Parâmetro	Valor
Requisito de energia para gerador elétrico	2,5 x 10^8 W
Pressão de entrada da turbina	300 bar (30 MPa)
Pressão de saída da turbina	30 bar (3 MPa)
Temperatura do fluxo de produto de combustão	1.400 K (1.127°C)
Densidade do fluxo	70 kg/m^3
Velocidade do fluxo	100 mph (44 m/s)
Comprimento da turbina	5 m
Diâmetro da turbina	1,5 m
Número de pás	1.000

[0159] Muitas modificações e outras concretizações da invenção mostradas no presente relatório descritivo vão vir à mente daqueles versados na técnica às quais a invenção se refere, tendo o benefício dos ensinamentos apresentados na descrição acima. Portanto, deve-se entender que a invenção não é limitada às concretizações específicas descritas, e que modificações e outras concretizações são intencionadas para serem incluídas dentro do âmbito das reivindicações

em anexo. Embora termos específicos sejam empregados no presente relatório descritivo, são usados em um sentido genérico e descritivo apenas e não para fins de limitação.

REIVINDICAÇÕES

1. Conjunto de turbina (400), **caracterizado pelo fato de que** compreende:

uma pluralidade de componentes incluindo:

um invólucro definindo:

uma entrada configurada para receber uma corrente de produto de combustão (320); e

uma saída;

um rotor posicionado no invólucro; e

uma pluralidade de pás estendendo-se do rotor,

em que:

as pás compreendem um material sinterizado poroso e são configuradas para orientar um fluido de transpiração a uma superfície externa e definir um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de avanço das pás, que excede um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de fuga da pá.

2. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o material sinterizado poroso define a totalidade da superfície externa das pás.

3. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o invólucro compreende o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície interna do invólucro, ou em que o rotor compreende o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa do rotor.

4. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o rotor compreende um desviador de fluxo anular, configurado para desviar a corrente de produto de combustão (320) em torno do rotor.

5. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** uma ou mais das seguintes condições é atendida:

um ou mais canais são definidos nas pás e os canais são configurados para receber o fluido de transpiração e orientar o fluido de transpiração para o material sinterizado poroso;

cada uma das pás define uma área de entrada do fluido de transpiração na borda de avanço que é maior do que uma área de entrada do fluido de transpiração na borda de fuga;

cada uma das lâminas define uma espessura de parede que é maior na borda de fuga do que na borda de avanço;

cada uma das pás define, respectivamente, uma estrutura integral, que compreende uma pluralidade de nervuras internas.

6. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado pelo fato de que** compreende ainda um conduto de entrada, acoplado à entrada do invólucro e configurado para acoplar-se a uma saída de um conjunto combustor (300) e receber a corrente de produto de combustão (320) dele,

em que o conduto de entrada compreende o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície interna do conduto de entrada.

7. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado pelo fato de que** a entrada do invólucro é configurada para acoplar-se diretamente a uma saída de um conjunto combustor (300).

8. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de que** a entrada do invólucro é configurada para receber a corrente de produto de combustão (320) de uma pluralidade de combustores (300), dispostos radialmente com relação a

um grande eixo definido pelo rotor.

9. Conjunto de turbina (400) de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, **caracterizado pelo fato de que** as pás compreendem, respectivamente, pelo menos um elemento de reforço.

10. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o elemento de reforço compreende uma haste, que se estende pelo material sinterizado poroso em todas as pás; ou em que o elemento de reforço compreende um núcleo, em que o material sinterizado poroso se estende em torno do núcleo.

11. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de que** o núcleo define um ou mais canais, configurados para receber o fluido de transpiração e orientar o fluido de transpiração para o material sinterizado poroso.

12. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** todas as pás se estendem de uma raiz no rotor a uma ponta, e em que o material sinterizado poroso define uma porosidade, que varia entre a raiz e a ponta.

13. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de que** a porosidade do material sinterizado poroso é configurada para definir um fluxo do fluido de transpiração na ponta, que é maior do que um fluxo do fluido de transpiração na raiz; ou em que a porosidade do material sinterizado poroso é configurada para definir um fluxo do fluido de transpiração na ponta, que é substancialmente igual ao fluxo do fluido de transpiração na raiz.

14. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de que** o material sinterizado poroso define uma pluralidade de camadas, em que a porosidade das camadas aumenta da raiz para a ponta.

15. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação

1, **caracterizado pelo fato de que** os componentes compreendem ainda uma pluralidade de estatores, em que os estatores compreendem o material sinterizado poroso, e o material sinterizado poroso é configurado para orientar o fluido de transpiração a uma superfície externa dos estatores.

16. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** compreende ainda um ou mais selos, em que um ou mais dos componentes são configurados para orientar o fluido de transpiração para os selos.

17. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado pelo fato de que** os selos compreendem o material sinterizado poroso.

18. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** uma razão de um comprimento do conjunto de turbina (400) para um diâmetro médio das pás é superior a 3,5.

19. Conjunto de turbina (400) de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado pelo fato de que** as pás de turbina (400) têm uma altura de pá inferior a cerca de 0,275 m; ou em que o conjunto de turbina (400) compreende menos do que cerca de 2.000 das pás.

20. Processo de geração de energia, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

introduzir um combustível, O_2 e um fluido circulante (503) de CO_2 em um combustor (300);

queimar um combustível para proporcionar a corrente de produto de combustão (320) compreendendo CO_2;

expandir a corrente de produto de combustão (320) por uma turbina (400), compreendendo uma pluralidade de pás de turbina (400) e definindo uma razão de um comprimento da turbina (400) para um diâmetro médio das pás de turbina (400) superior a 3,5, para gerar

energia e descarregar uma corrente de descarga de turbina (410), em que as pás de turbina (400) compreendem um material sinterizado poroso e são configuradas para orientar um fluido de transpiração a uma superfície externa e definir um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de avanço das pás, que excede um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de fuga da pá;

processar a corrente de descarga de turbina (410) para reciclar pelo menos uma parte do fluido circulante (503) de CO_2 para o combustor (300);

retirar uma parte do fluido circulante (503) de CO_2, que é reciclada; e

usar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado como um fluido de transpiração.

21. Processo de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado pelo fato de que** usar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado como o fluido de transpiração compreende transpirar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado na turbina (400) ou no combustor (300).

22. Processo de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado pelo fato de que** compreende ainda orientar a corrente de produto de combustão (320) do combustor (300), por um conduto, à turbina (400), em que usar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado como o fluido de transpiração compreende transpirar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado no conduto.

23. Processo de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado pelo fato de que** compreende ainda condicionar o fluido circulante (503) de CO_2 reciclado para alterar uma temperatura sua.

24. Sistema de geração de energia, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

um combustor (300) configurado para receber um

combustível, O_2 e uma corrente de fluido circulante (503) de CO_2, e tendo pelo menos um estágio de combustão, que queima o combustível na presença da corrente de fluido circulante (503) de CO_2 e proporciona uma corrente de produto de combustão (320) compreendendo CO_2;

uma turbina (400) em comunicação fluida com o combustor (300), a turbina (400) tendo uma entrada para receber a corrente de produto de combustão (320), uma saída para liberação de uma corrente de descarga de turbina (410) compreendendo CO_2, e uma pluralidade de pás de turbina (400), em que uma razão de um comprimento da turbina (400) para um diâmetro médio das pás da turbina (400) é maior que 3,5 e em que as pás de turbina (400) compreendem um material sinterizado poroso e são configuradas para orientar um fluido de transpiração a uma superfície externa e definir um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de avanço das pás, que excede um fluxo do fluido de transpiração em uma borda de fuga da pá;

um ou mais componentes configurados para processar a corrente de descarga de turbina (410), para formar uma corrente de fluido circulante (503) de CO_2 reciclado,

em que um ou mais componentes do sistema são configurados para usar uma parte da corrente de fluido circulante (503) de CO_2 reciclado como um fluido de transpiração.

25. Sistema de geração de energia de acordo com a reivindicação 24, **caracterizado pelo fato de que** um ou mais componentes configurados para processar a corrente de descarga de turbina (410), para formar uma corrente de fluido circulante (503) de CO_2 reciclado, compreendem um filtro, um trocador de calor, um separador, e um compressor.

26. Sistema de geração de energia de acordo com a reivindicação 24, **caracterizado pelo fato de que** um ou mais componentes configurados para usar a parte da corrente de fluido

circulante (503) de CO_2 reciclado, como o fluido de transpiração, compreendem um material sinterizado poroso, configurado para receber o fluido de transpiração por ele.

27. Sistema de geração de energia de acordo com a reivindicação 24, **caracterizado pelo fato de que** as pás de turbina (400) têm uma altura de pá inferior a 0,275 m ou em que a turbina (400) compreende menos que 2.000 das pás de turbina (400).

28. Processo de geração de energia, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

introduzir um combustível, O_2 e um fluido circulante (503) em um combustor (300);

queimar o combustível no combustor (300) para proporcionar uma corrente de produto de combustão (320), incluindo o fluido circulante (503) e um teor de material particulado, a corrente de produto de combustão (320) escoando a uma velocidade definida; e

expandir a corrente de produto de combustão (320) por uma turbina (400), compreendendo uma pluralidade de pás de turbina (400), para gerar energia e descarregar uma corrente de descarga de turbina (410), a turbina (400) sendo operada de modo que as pás de turbina (400) girem a uma velocidade de pá inferior a 500 mph (metros por hora).

29. Sistema de geração de energia, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

um combustor (300) configurado para receber um combustível, O_2 e um fluido circulante (503), e tendo pelo menos um estágio de combustão, que queima o combustível e proporciona uma corrente de produto de combustão (320) que inclui o fluido circulante (503) e um teor de material particulado;

uma turbina (400) em comunicação fluida com o combustor (300), a turbina (400) tendo uma entrada para receber a corrente de

produto de combustão (320), uma saída para liberação de uma corrente de descarga de turbina (410), e uma pluralidade de pás de dimensões suficientes, de modo que a turbina (400) opere a uma velocidade de pá inferior a 500 mph; e

um filtro em comunicação fluida com a saída da turbina (400) e configurado para produzir uma corrente de descarga de turbina (410) filtrada.

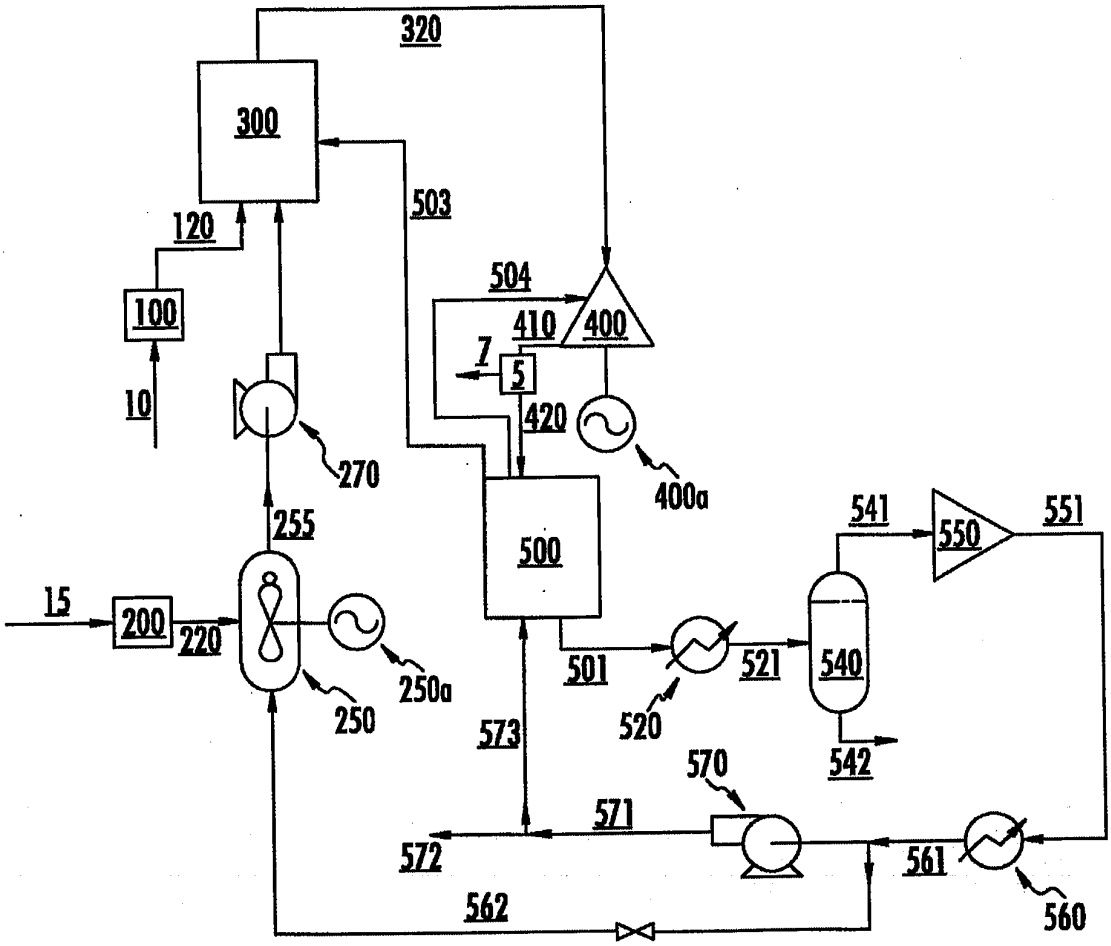
320
300
503
120
100
10
504
410
400
7
5
420
270
400a
255
500
541
550
551
15
200
220
250a
250
501
521
540
520
573
542
570
571
572
561
560
562

FIG. 1

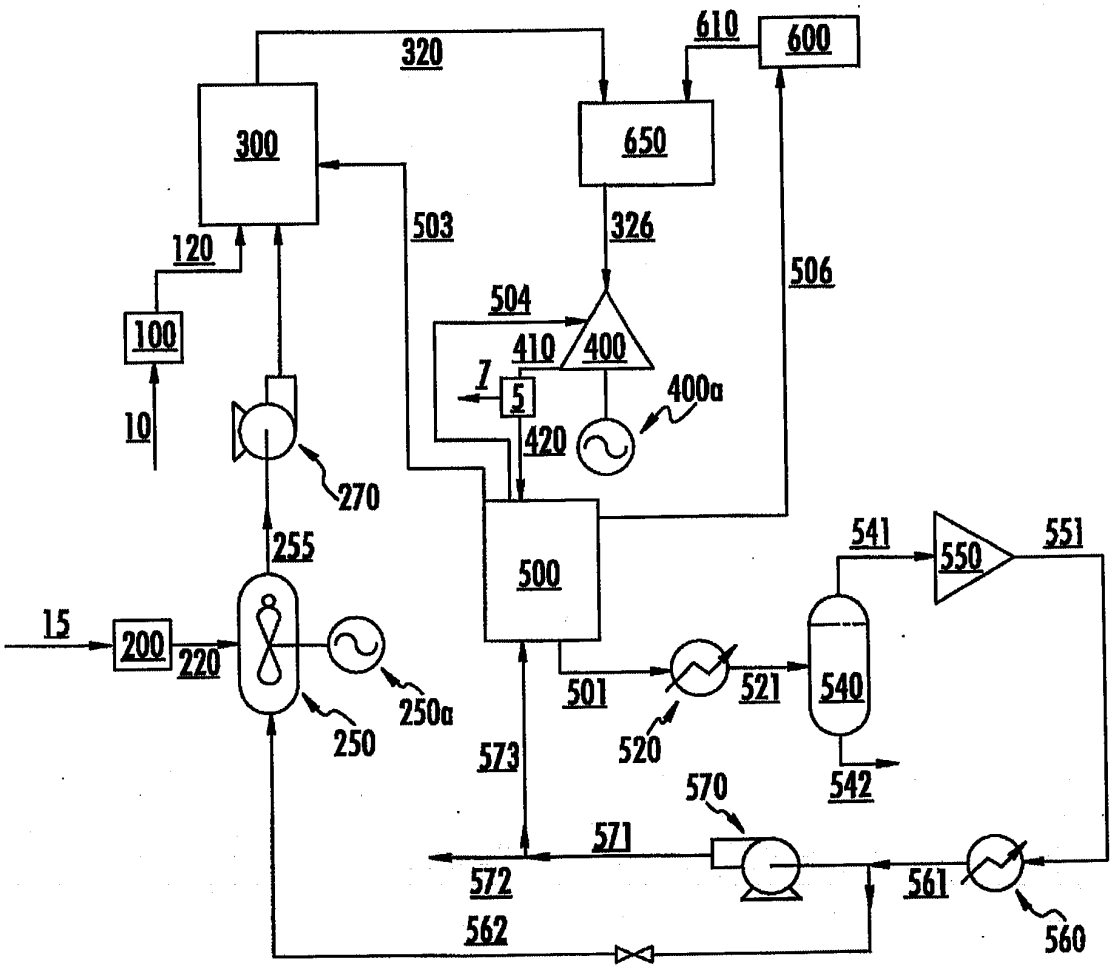
610
600
320
650
300
503
326
120
506
504
410
400
100
7
5
400a
10
420
270
255
500
541
550
551
15
200
220
250a
501
521
540
520
573
542
570
571
572
561
562
560
250

FIG. 2

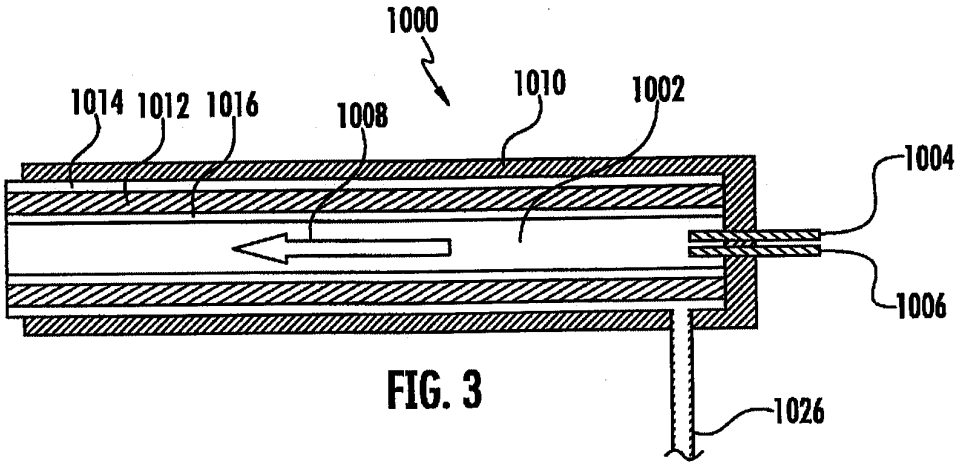
1000
1014
1012
1016
1008
1010
1002
1004
1006
1026

FIG. 3

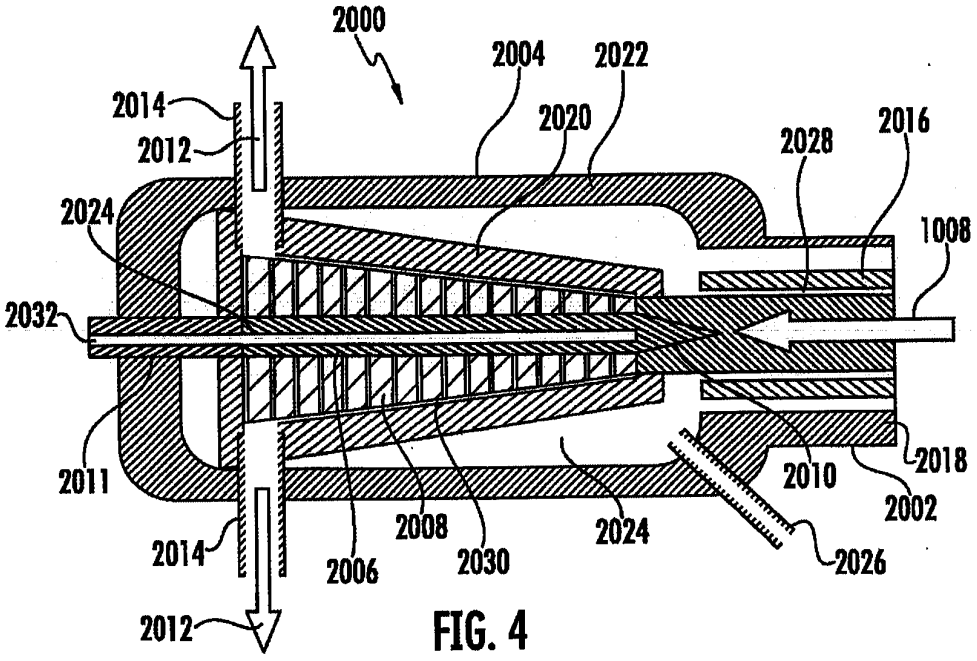
2000
2004
2022
2014
2020
2012
2028
2016
2024
1008
2032
2011
2010
2018
2002
2008
2024
2014
2006
2030
2026
2012

FIG. 4

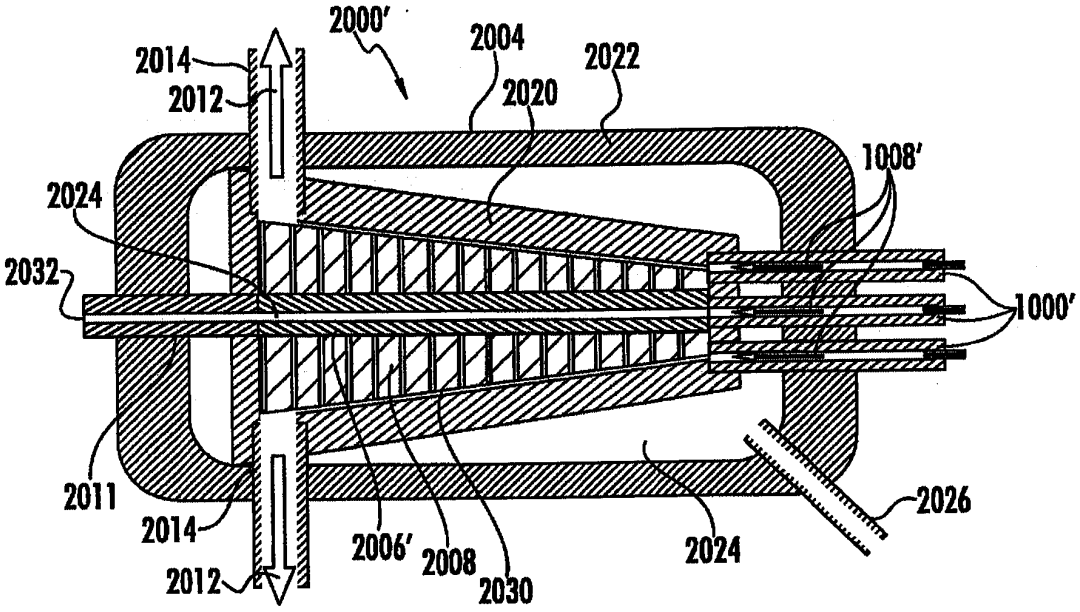
2000'
2004
2022
2014
2012
2020
1008'
2024
2032
1000'
2011
2014
2006'
2008
2030
2024
2026
2012

FIG. 5

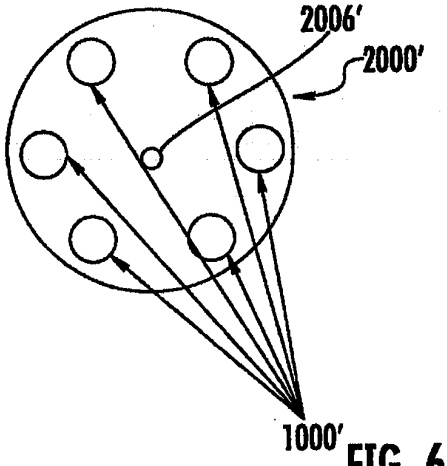
2006'
2000'
1000'

FIG. 6

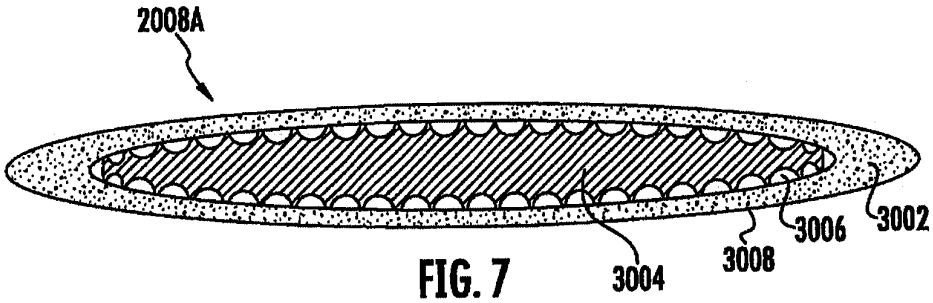

FIG. 7

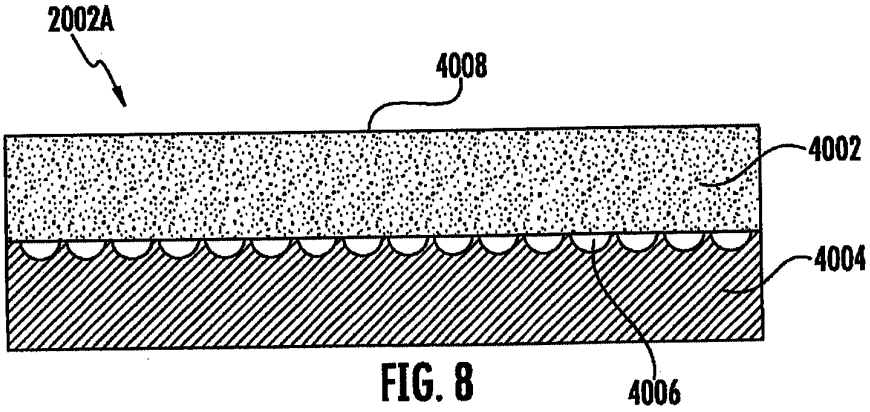

FIG. 8

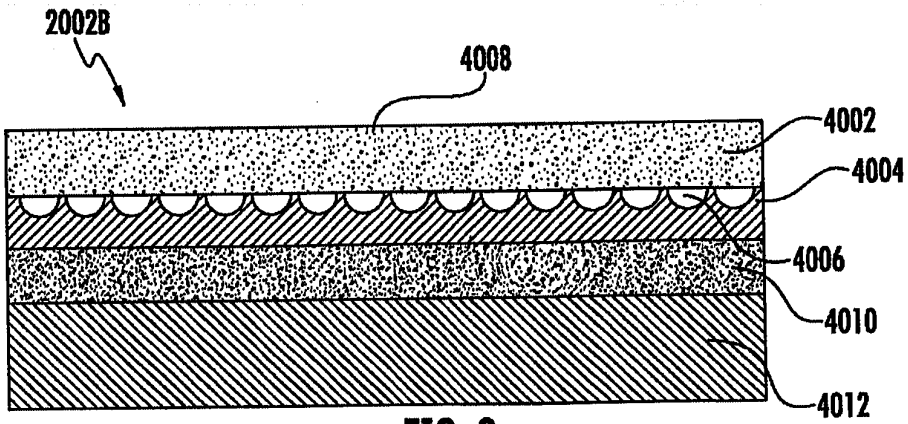

FIG. 9

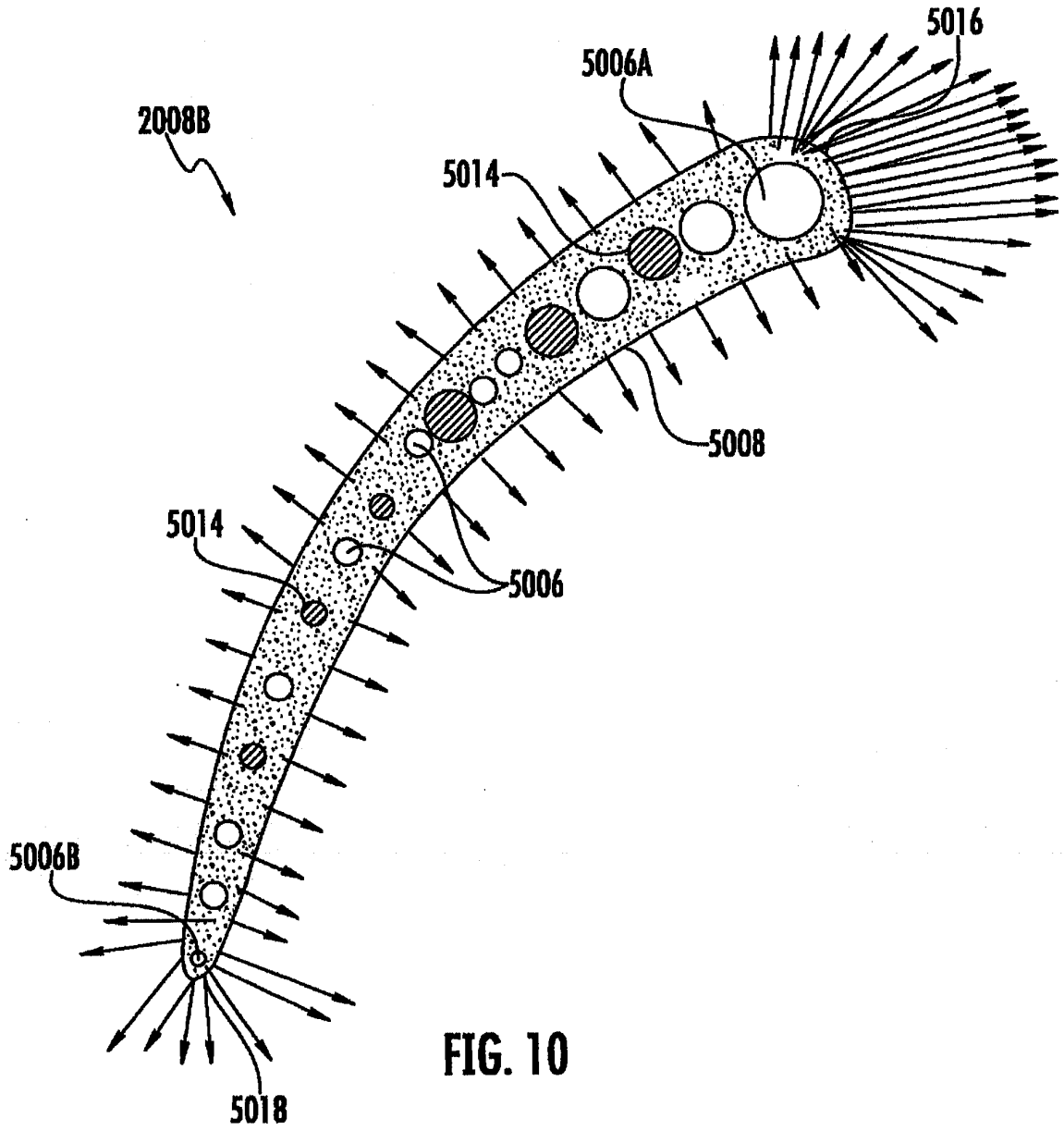

FIG. 10

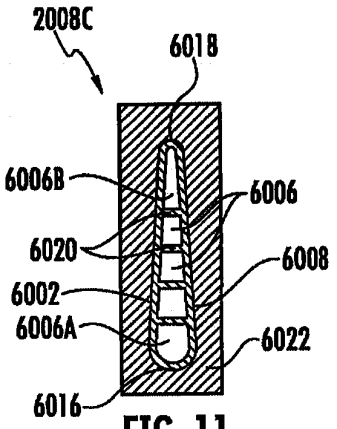

FIG. 11

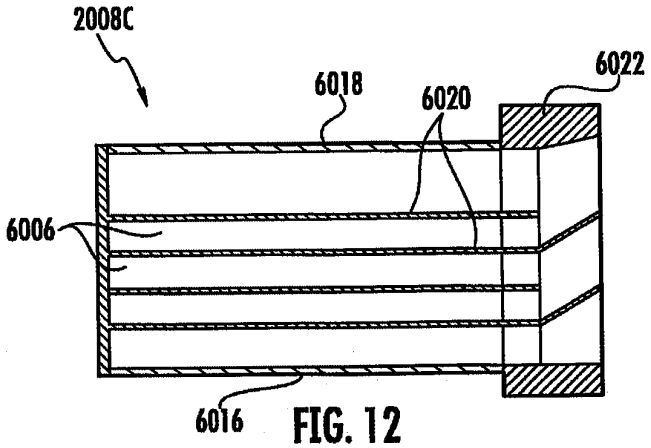

FIG. 12

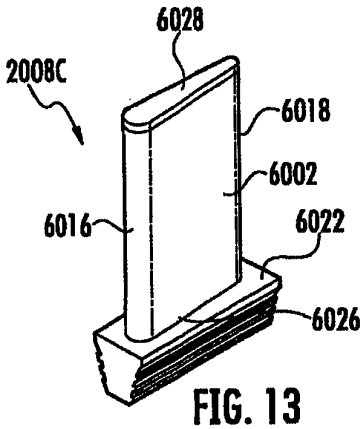

FIG. 13

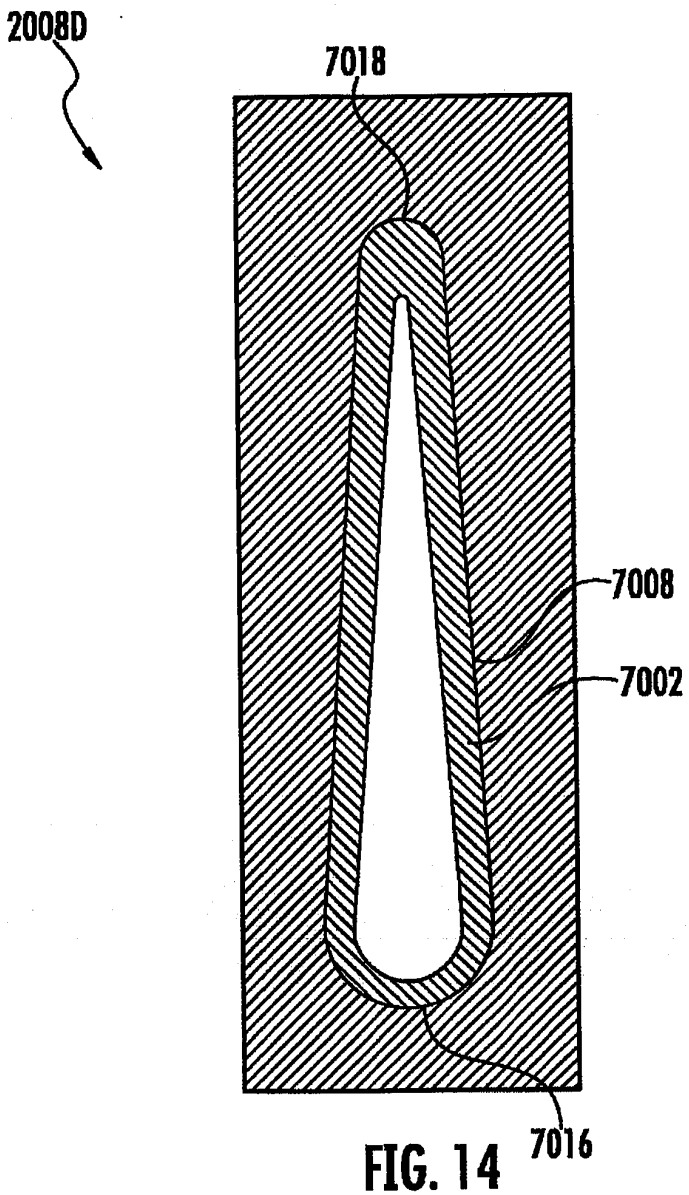

FIG. 14

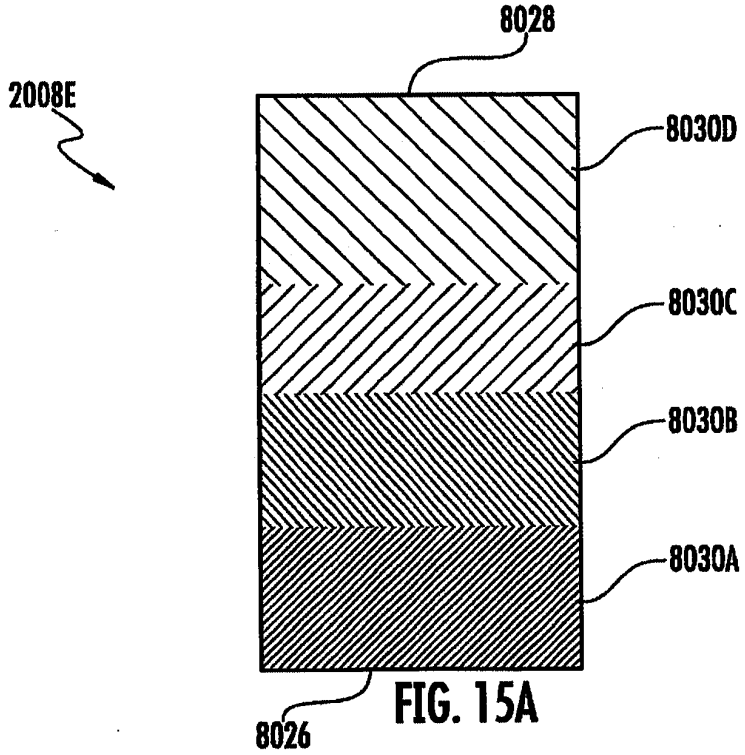

FIG. 15A

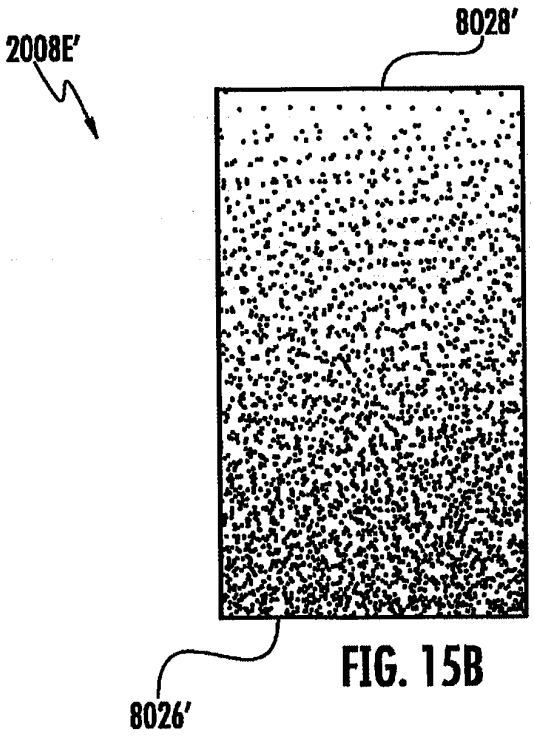

FIG. 15B

Velocidade inicial de 75 m/s de partícula de 100 mícrons em uma trajetória de partícula de cinza calculada, com um fluxo de transpiração a 2 m/s, e um fluxo de CO_2 a 300 BAR (30 MPA) A 700°C

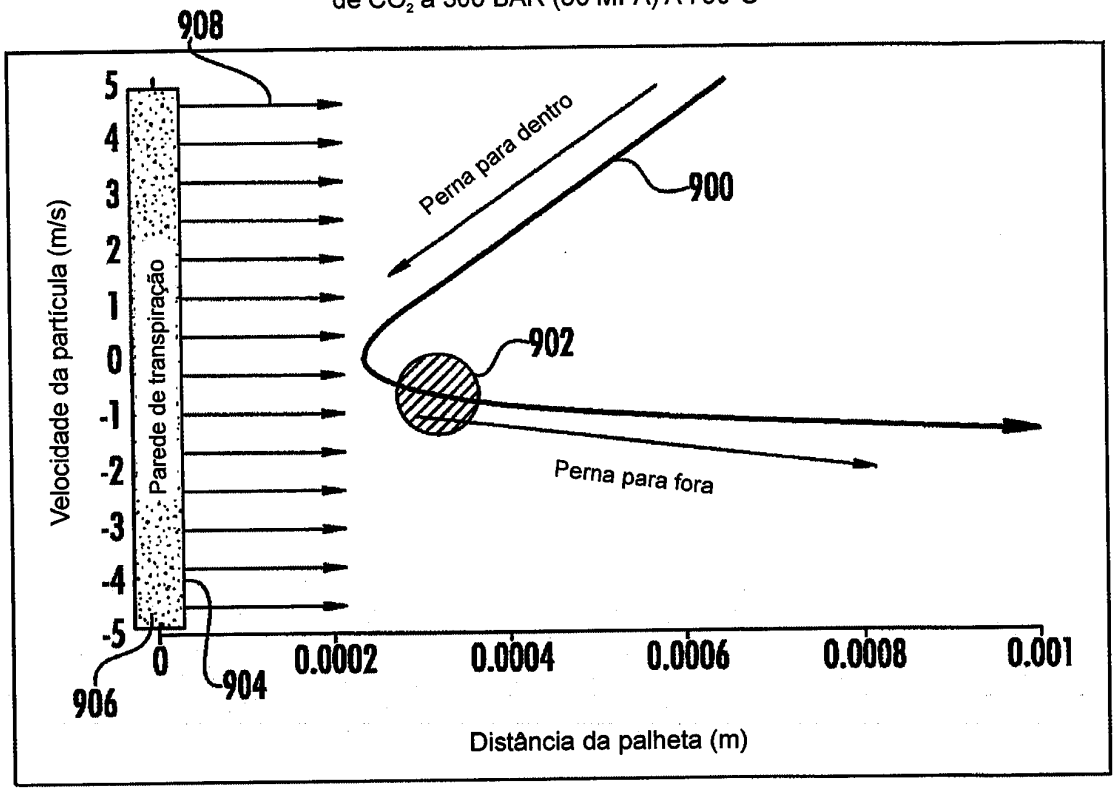

FIG. 16

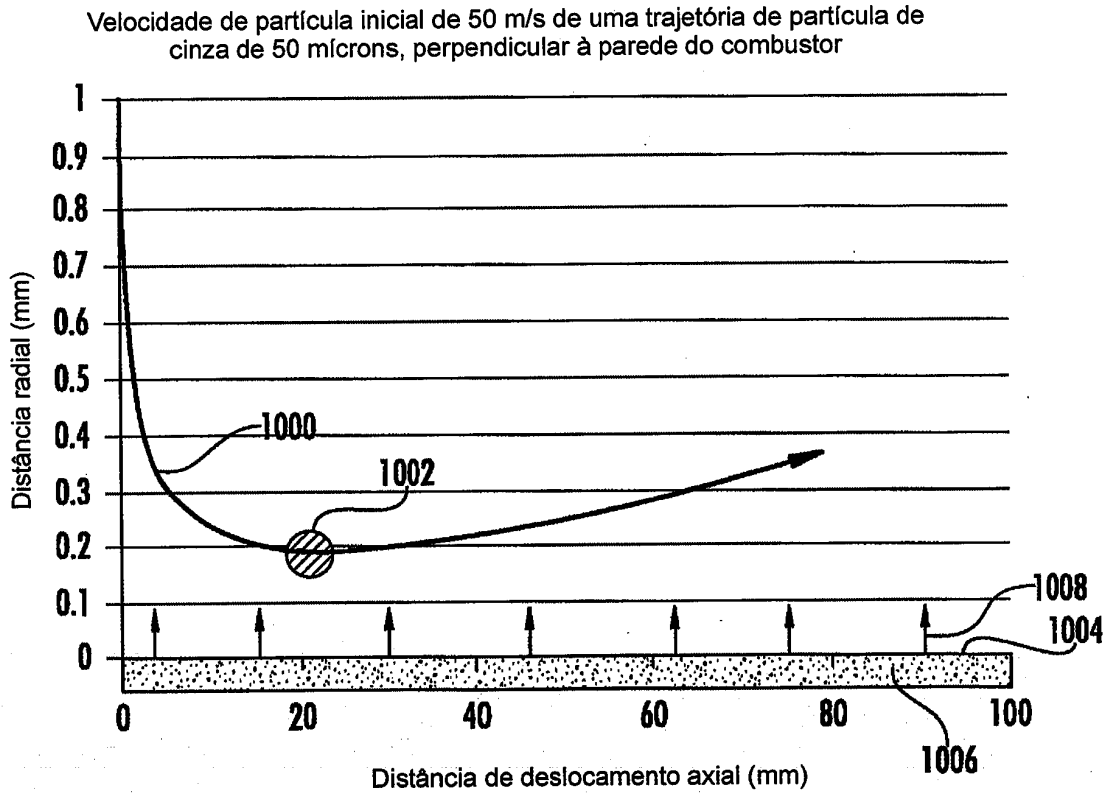
Velocidade de partícula inicial de 50 m/s de uma trajetória de partícula de cinza de 50 mícrons, perpendicular à parede do combustor
Distância radial (mm)
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
1000
1002
1008
1004
1006
0
20
40
60
80
100
Distância de deslocamento axial (mm)

FIG. 17

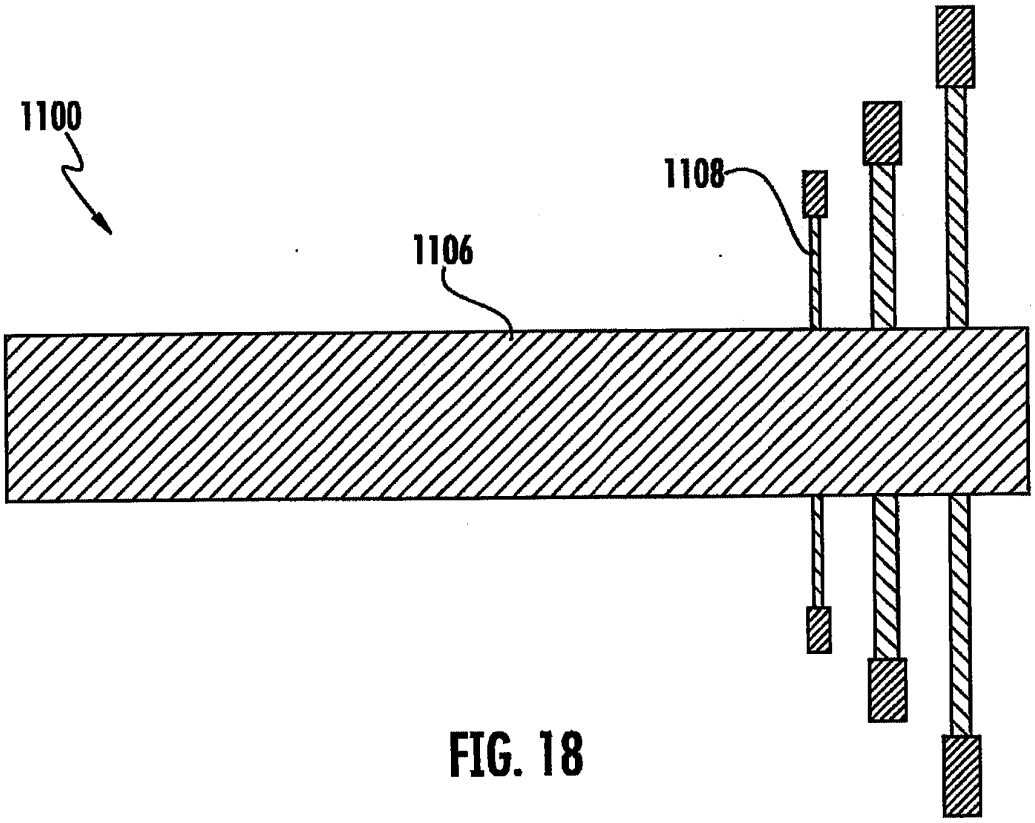

FIG. 18

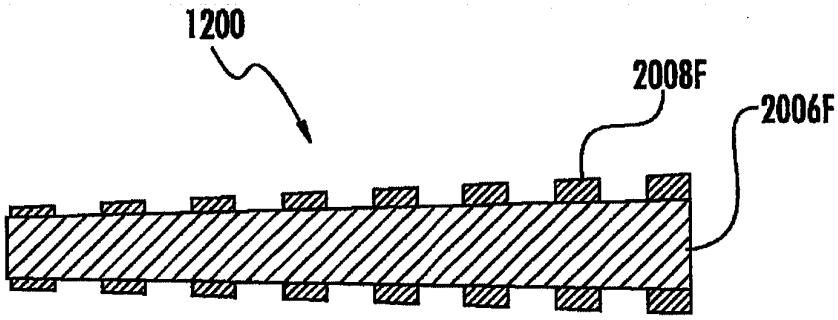

FIG. 19