



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial



(11) BR 112018015643-4 B1

(22) Data do Depósito: 24/02/2017

(45) Data de Concessão: 19/12/2023

(54) Título: PROCESSO PARA CONVERTER CALOR EM TRABALHO MECÂNICO, SISTEMA DE CICLO DE RANKINE ORGÂNICO E MÉTODO PARA SUBSTITUIR O FLUIDO DE TRABALHO

(51) Int.Cl.: F01K 25/08.

(30) Prioridade Unionista: 25/02/2016 US 62/299,580.

(73) Titular(es): THE CHEMOURS COMPANY FC, LLC.

(72) Inventor(es): KONSTANTINOS KONTOMARIS; LUKE DAVID SIMONI.

(86) Pedido PCT: PCT US2017019323 de 24/02/2017

(87) Publicação PCT: WO 2017/147400 de 31/08/2017

(85) Data do Início da Fase Nacional: 31/07/2018

(57) Resumo: Um processo é fornecido para converter energia de calor de uma fonte de calor em trabalho mecânico ou eletricidade mediante o uso de um fluido de trabalho que compreende perfluoroocteno. O processo compreende aquecer um fluido de trabalho usando o calor fornecido pela fonte de calor; e expandir o fluido de trabalho aquecido para gerar trabalho mecânico. Também é fornecido um sistema do ciclo de alimentação de Rankine orgânico que utiliza um fluido de trabalho que compreende perfluoroocteno. Adicionalmente é fornecido um método de substituição do fluido de trabalho de um Sistema de Ciclo de Alimentação de Rankine Orgânico projetado e configurado para utilizar um fluido de trabalho compreendendo HFC-2455fa com um fluido de trabalho compreendendo um perfluoroocteno.

**"PROCESSO PARA CONVERTER CALOR EM TRABALHO MECÂNICO,
SISTEMA DE CICLO DE RANKINE ORGÂNICO E MÉTODO PARA
SUBSTITUIR O FLUIDO DE TRABALHO"**

REFERÊNCIA REMISSIVA A PEDIDO CORRELATO

[001] Este pedido reivindica o benefício do pedido provisório US n° de série 62/2/299.580, depositado em 25 de janeiro de 2016, cuja revelação está aqui incorporada a título de referência, em sua totalidade.

CAMPO TÉCNICO DA INVENÇÃO

[002] A invenção refere-se de modo geral a Sistemas de Ciclo de Energia; mais especificamente, a sistemas de Ciclo de Rankine Orgânico; e, mais particularmente, ao uso de um fluido de trabalho orgânico nesses sistemas.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[003] Um sistema de Ciclo de Rankine Orgânico (ORC) é nomeado por seu uso de fluidos de trabalho orgânicos que permitem que esse sistema capture calor a partir de fontes de calor de baixa temperatura, como calor geotérmico, combustores de biomassa, calor de resíduos industriais e similares. O calor capturado pode ser convertido pelo sistema ORC em trabalho mecânico e/ou eletricidade. Os fluidos de trabalho orgânicos são selecionados por suas características de alteração de fase de vapor-líquida, como tendo uma temperatura de ebulição mais baixa que a água.

[004] Um sistema ORC típico inclui um evaporador para absorver calor para evaporar um fluido de trabalho orgânico líquido em um vapor, um dispositivo de expansão, como uma turbina, através da qual o vapor se expande, um condensador para condensar o vapor expandido de volta em um líquido, e um compressor ou bomba para líquido para circular o fluido de trabalho líquido de volta através do evaporador para repetir o ciclo. Conforme o vapor de fluido orgânico se expande através da turbina, ele gira a turbina que, por sua vez, gira um eixo de acionamento de saída. O eixo de acionamento de saída giratório

pode ser adicionalmente conectado através de ligação mecânica para produzir energia mecânica ou girar um gerador para produzir eletricidade.

[005] O fluido de trabalho orgânico passa pelo seguinte ciclo em um sistema ORC: a pressão quase adiabática aumenta através do compressor, próximo do aquecimento isobárico através do evaporador, próximo à expansão adiabática no expansor, e próximo à rejeição de calor isobárico no condensador. 1,1,1,3,3-Pentafluoropropano (também conhecido como "R245fa" ou "HFC 2455fa") é comumente escolhido como um fluido de trabalho para uso em sistemas de ORC devido às suas propriedades termodinâmicas que são adequadas para uso com fontes de calor de baixa temperatura, características não inflamáveis e nenhum Potencial de Depleção de Ozônio (ODP). No entanto, a pressão de trabalho máxima admissível do equipamento de ciclo de alimentação mais disponível comercialmente é limitada a cerca de 3 MPa, o que limita a temperatura de evaporação de ciclos que operam com HFC-245fa como o fluido de trabalho para abaixo de cerca de 145°C.

[006] Há uma necessidade contínua de se buscar fluidos orgânicos de trabalho alternativos que sejam capazes de capturar calor em uma maior faixa de condições, quimicamente estáveis e ainda ambientalmente amigáveis.

SUMÁRIO

[007] É fornecido um processo para converter calor em trabalho mecânico em um ciclo de alimentação. O ciclo de alimentação inclui as etapas de aquecimento de um fluido de trabalho com uma fonte de calor a uma temperatura suficiente para pressurizar o fluido de trabalho e fazer com que o fluido de trabalho pressurizado realize o trabalho mecânico. O fluido de trabalho pode incluir um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e combinações dos mesmos. O processo pode utilizar um ciclo de alimentação sub-crítico, um ciclo de

alimentação trans-crítico, ou um ciclo de alimentação super crítico.

[008] É fornecido adicionalmente um processo para converter calor em trabalho mecânico em um ciclo de Rankine. O ciclo de Rankine inclui as etapas de vaporizar um fluido de trabalho líquido com uma fonte de calor de baixa temperatura, expandir o vapor resultante através de um dispositivo de expansão para gerar trabalho mecânico, resfriar o vapor expandido resultante para condensar o vapor em um líquido, e bombear o fluido de trabalho líquido para a fonte de calor para repetir o processo. O fluido de trabalho pode incluir um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e combinações dos mesmos.

[009] Ainda é adicionalmente fornecido um sistema de ciclo de Rankine orgânico que tem um circuito primário configurado para utilizar um fluido de trabalho que compreende HFC-245fa para converter calor em trabalho mecânico. O circuito primário pode ser carregado com um fluido de trabalho que tem um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e combinações dos mesmos. O sistema de ciclo de Rankine orgânico também pode incluir um circuito de troca de calor secundário configurado para transferir calor de uma fonte de calor remota para o circuito primário. O circuito de troca de calor secundário também pode ser carregado com um fluido de trabalho que tem um perfluorohepteno.

[010] Ainda é fornecido um método para substituir o fluido de trabalho de um sistema de Ciclo de Rankine Orgânico carregado com HFC-245fa. O método inclui as etapas de evacuar o fluido de trabalho que compreende HFC-245fa do sistema ORC, opcionalmente lavar o sistema ORC com um fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno, e carregar o sistema ORC com um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e combinações dos mesmos.

[011] Perfluoroheptenos, como 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e misturas dos mesmos, têm temperaturas críticas mais altas, pressões de vapor mais baixas, e espera-se que tenham GWPs mais baixos quando comparados com HFC-245fa. Os fluidos de trabalho contendo perfluoroheptenos podem ser usados como substitutos diretos para HFC-245fa em sistemas de ORC existentes. É projetado que pela substituição de um fluido de trabalho que compreende HFC-245fa por um fluido de trabalho compreendendo uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno, a eficiência do ciclo do sistema ORC pode ser aumentada (por exemplo, em 1,8%) enquanto reduz a pressão de operação do trocador de calor do evaporador para níveis muito abaixo das pressões de projeto máximas dos componentes de equipamento comercial mais comuns (por exemplo, trocadores de calor) e reduz o GWP de fluido de trabalho em mais de 99,5%.

[012] Características e vantagens adicionais da invenção irão aparecer mais claramente em uma leitura da descrição detalhada a seguir das modalidades da invenção, que é dada somente a título de exemplo não limitador e com referência aos desenhos em anexo.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[013] A Figura 1 é um diagrama de blocos de um sistema de ciclo de Rankine Orgânico exemplificador.

[014] A Figura 2 é um diagrama de blocos de um sistema de ciclo de Rankine Orgânico exemplificador que tem um sistema de circuito secundário.

DESCRIÇÃO DETALHADA

DEFINIÇÕES

[015] Antes de tratar dos detalhes das modalidades descritas abaixo, os termos a seguir são definidos ou esclarecidos.

[016] "Um" ou "uma" são usados para descrever os elementos e os componentes aqui descritos. Isto é feito meramente para conveniência e para

dar um sentido geral do escopo da invenção. Esta descrição deve ser lida como incluindo um ou ao menos um e o singular também inclui o plural, a menos que seja óbvio que é significado do contrário.

[017] "Pressão crítica" é a pressão maior ou igual que um fluido não sofre uma transição de fase de vapor-líquida, independentemente de quanto a temperatura é variada.

[018] "Temperatura crítica" é a temperatura maior ou igual na qual um fluido não sofre uma transição de fase de vapor-líquida, independentemente de quanto a pressão é variada.

[019] "Eficiência de Ciclo" (também chamada de eficiência térmica) é a saída de energia do ciclo líquida dividida pela taxa na qual o calor é recebido pelo fluido de trabalho durante o estágio de aquecimento de um ciclo de alimentação (por exemplo, ciclo de Rankine Orgânico).

[020] "Potencial de aquecimento global (GWP)" é um índice para estimar a contribuição de aquecimento global relativa devido à emissão atmosférica de um quilograma de um gás de efeito estufa específico em comparação com a emissão de um quilograma de dióxido de carbono. O GWP pode ser calculado para diferentes horizontes de tempo, mostrando o efeito do tempo de vida atmosférico para um determinado gás. O GWP para um horizonte de tempo de 100 anos é comumente o valor de referência.

[021] "Calor de Baixa Qualidade" significa calor de baixa temperatura que tem menos densidade de exergia e não pode ser convertido em um trabalho útil eficientemente. É geralmente entendido que uma fonte de calor com temperatura abaixo de 300°C é considerada como uma fonte de calor de baixa qualidade, pois o calor é considerado não convertido eficientemente abaixo daquela temperatura com o uso de ciclo de Rankine de vapor.

[022] "Saída de Energia do Ciclo Líquida" é a taxa de geração de trabalho mecânico no expansor (por exemplo, uma turbina) de um ORC menos

a taxa de trabalho mecânico consumida pelo compressor (por exemplo, uma bomba para líquido).

[023] "Ponto de Ebulação Normal (NBP)" é a temperatura na qual a pressão de vapor do líquido é igual a um décimo de megapascal (uma atmosfera).

[024] "Capacidade Volumétrica" para geração de energia é a saída de energia do ciclo líquida por volume de unidade do fluido de trabalho (conforme medido nas condições na saída do expansor) circulado através do ciclo de alimentação (por exemplo, ciclo de Rankine orgânico).

[025] "Sub-resfriamento" é a redução da temperatura de um líquido abaixo da temperatura de saturação daquele líquido para uma determinada pressão. A temperatura de saturação é a temperatura na qual uma composição de vapor é completamente condensada em um líquido (também chamada de ponto de bolha). O sub-resfriamento secundário continua a resfriar o líquido até um líquido de temperatura mais baixa à pressão fornecida. A quantidade secundária é a quantidade de resfriamento abaixo da temperatura de saturação (em graus) ou quanto abaixo de sua temperatura de saturação, uma composição líquida é resfriada.

[026] "Superaquecimento" é um termo que define quanto acima da temperatura de vapor de saturação de uma composição de vapor uma composição de vapor é aquecida. A temperatura do vapor de saturação é a temperatura na qual, se uma composição de vapor é resfriada, a primeira gota de líquido é formada, também chamada de "ponto de orvalho".

UM SISTEMA ORC QUE TEM UM FLUIDO DE TRABALHO MELHORADO

[027] É mostrado na Figura 1 um sistema ORC exemplificador 10 para converter calor em potência mecânica útil usando um fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno. O sistema ORC 10 inclui um circuito fechado de fluido de trabalho 20 que tem um primeiro trocador de calor 40, um dispositivo

de expansão 32, um segundo trocador de calor 34, e uma bomba 38 ou compressor 38 para circular o fluido de trabalho através do circuito fechado de fluido de trabalho 20. O primeiro trocador de calor 40 pode estar em contato térmico direto com uma fonte de calor 46 de baixa qualidade a partir da qual o calor de temperatura relativamente baixa é capturado pelo sistema ORC 10 e convertido em trabalho mecânico útil, como girar um eixo de acionamento ao redor do seu eixo geométrico longitudinal. O sistema ORC pode incluir um tanque de compensação opcional 36 a jusante do segundo trocador de calor 34 e a montante do compressor 38 ou da bomba 38.

[028] A energia de calor é transferida da fonte de calor 46 para a ciclagem de fluido de trabalho através do primeiro trocador de calor 40. O fluido de trabalho aquecido sai do primeiro trocador de calor 40 e entra no dispositivo de expansão 32 onde uma porção da energia do fluido de trabalho em expansão é convertida no trabalho mecânico. Os dispositivos de expansão exemplificadores 32 podem incluir expansores turbo ou dinâmicos, como turbinas; ou expansores de deslocamento positivo, como expansores de rosca, expansores em espiral, expansores de pistão e expansores de pá de hélice rotativa. O fluido de trabalho expandido e resfriado que sai do dispositivo de expansão entra no segundo trocador de calor 34 para ser adicionalmente resfriado. A bomba 38 ou o compressor 38 está situado a jusante do segundo trocador de calor 34 e a montante do primeiro trocador de calor 40 para circular o fluido de trabalho através do sistema ORC 10 para repetir o processo.

[029] A haste giratória pode ser usada para realizar qualquer trabalho mecânico ao empregar disposições convencionais de esteiras, polias, engrenagens, transmissões ou dispositivos similares, dependendo da velocidade e do torque desejados necessários. O eixo de acionamento giratório também pode ser conectado a um dispositivo gerador de energia elétrica 30 como um gerador por indução. A eletricidade produzida pode ser usada localmente ou

fornecida a uma grade.

[030] É mostrado na Figura 2 um sistema ORC que tem um circuito de troca de calor secundário 25'. O circuito de troca de calor secundário 25' pode ser usado para transportar energia de calor de uma fonte remota 46' para um trocador de calor de suprimento 40'. O calor da fonte de calor remota 46' é transportado para o trocador de calor de suprimento 40' usando um ciclo de meio de transferência de calor através do circuito do trocador de calor secundário 25'. O meio de transferência de calor flui do trocador de calor de suprimento de calor 40' para a bomba 42' que bombeia o meio de transferência de calor de volta para a fonte de calor 46' para repetir o ciclo. Essa disposição oferece outros meios para remover o calor de uma fonte de calor remota e liberá-lo para o sistema ORC 10'. O trocador de calor de suprimento 40' do circuito de troca de calor secundário 25' pode ser igual ao trocador de calor 40 do sistema ORC 10 da Figura 1, entretanto, o meio de transferência de calor do circuito de troca de calor secundário 25' está em comunicação térmica sem contato com o fluido de trabalho do sistema ORC 10'. Em outras palavras, o calor é transferido do meio de transferência de calor do circuito secundário 25' para o fluido de trabalho do sistema ORC 10', mas o meio de transferência de calor do circuito secundário não se mescla com o fluido de trabalho do sistema ORC 10'. Essa disposição proporciona flexibilidade ao facilitar o uso de vários fluidos para uso no circuito secundário e no sistema ORC.

[031] O fluido de trabalho contendo um perfluorohepteno pode também ser usado como um fluido de circuito de troca de calor secundário, desde que a pressão no circuito seja mantida maior ou igual a pressão de saturação de fluido na temperatura do fluido de trabalho no circuito. Alternativamente, fluidos de trabalho contendo um perfluorohepteno podem ser usados como fluidos de circuito de troca de calor secundário ou fluidos carreadores de calor para extrair calor de fontes de calor em um modo de

operação no qual os fluidos de trabalho são deixados para evaporar durante o sistema de troca de calor, gerando assim grandes diferenças de densidade de fluido suficientes para sustentar o fluxo de fluidos (efeito de termossifão). Adicionalmente, fluidos com alto ponto de ebulação como glicóis, salmouras, silicones, ou outros fluidos essencialmente não voláteis podem ser usados para transferência de calor sensível na disposição do circuito secundário.

FLUIDO DE TRABALHO COMPREENDENDO UM PERFLUOROHEPTENO

[032] Um calor disponível a temperaturas relativamente baixas, em comparação com a temperatura dos ciclos de alimentação (inorgânico) de acionamento de vapor de alta pressão, pode ser usado para gerar trabalho mecânico através de ciclos de alimentação de Rankine Orgânicos. O uso de um fluido de trabalho compreendendo um perfluorohepteno pode permitir ciclos de alimentação para receber energia térmica através da evaporação a temperaturas mais altas que as temperaturas críticas dos fluidos de trabalho atuais conhecidos, como HFC-245fa, levando assim a eficiências de energia de ciclo mais altas. O "HFC-245fa" é também conhecido pelo seu nome químico 1,1,1,3,3,-pentafluoropropano, e é comercializado sob o nome comercial Enovate® e Genetron®, junto à Honeywell. Perfluoroheptenos podem incluir 2-perfluorohepteno ($CF_3CF_2CF_2CF_2CF=CFCF_3$) e 3-perfluorohepteno ($CF_3CF_2CF_2CF=CFCF_2CF_3$), e estão disponíveis junto à Chemours Company, LLC. Perfluoroheptenos podem ser produzidos pelo processo para a produção de olefinas fluoradas conforme apresentado na patente US N° 5.347.058, que está aqui incorporada a título de referência, em sua totalidade.

[033] Perfluoroheptenos têm temperaturas críticas mais altas, pressões de vapor mais baixas, e espera-se que tenham GWPs mais baixos quando comparados com HFC-245fa. Os fluidos de trabalho contendo um perfluorohepteno podem ser usados como substitutos diretos para HFC-245fa em sistemas de ORC existentes que são projetados para utilizar fluidos de

trabalho que contêm HFC-245fa. O fluido de trabalho pode conter 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno ou combinações dos mesmos. É projetado que se um fluido de trabalho que compreende HFC-245fa é substituído por um fluido de trabalho compreendendo uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno, a eficiência do ciclo do sistema ORC pode ser aumentada (por exemplo, em 1,8%) enquanto se reduz a pressão de operação do trocador de calor do evaporador para níveis muito abaixo da pressão de design máxima dos componentes de equipamento comercial comumente disponíveis (por exemplo, trocadores de calor) para sistemas ORC e reduz o GWP de fluido de trabalho em mais de 99,5%.

[034] O fluido de trabalho melhorado pode compreender pelo menos um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno. Conforme mostrado na Tabela 1, a temperatura e pressão críticas de uma mistura de 2-perfluorohepteno (20%) e 3-perfluorohepteno (80%) (pureza: 99,20%) são 198°C e 1,54 MPa, respectivamente. O ponto de ebulição normal da mistura é 72,5°C. A temperatura crítica mais elevada da mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno permite que o fluido de trabalho receba calor através da condensação a temperaturas mais elevadas que se aproximam de 198°C.

[035] O fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno pode compreender adicionalmente pelo menos um composto selecionado a partir do grupo que consiste em Hidrofluorolefinas (HFOs), Hidro-Cloro-Flúor-Olefinas (HCFOs), Hidro-Flúor-Carbonos (HFCs), Hidro-Flúor-Éteres (HFEs), Hidro-Flúor-Éter-Olefinas (HFEOS), Álcoois, Éteres, Cetonas e Hidrocarbonetos (HCs). Mais especificamente, o fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno pode compreender adicionalmente pelo menos um componente selecionado a partir do grupo que consiste em Vertrel® Sinera™ (também conhecido como Vertrel® HFX 110; é uma mistura de isômeros de Metil

Perfluoro-Hepteno Éter disponível junto à Chemours Co., de Wilmington, Delaware, EUA), HFO-153-10mzzy, F22E, HFO-1438mzz(E), HFO-1438mzz(Z), HFO-1438ezy(Z), HFO-1438ezy(E), HFO-1336ze(Z), HFO-1336ze(E), HFO-1336mzz(Z), HFO-1336mzz(E), HFO-1234ze(E), HFO-1234ze(Z), HFO-1234yf, HCFO-1233zd(Z), HCFO-1233zd(E), HFC-43-10mee, HFC-365mfc, HFC-236ea, HFC-245fa, HFE-7000 (também conhecido como HFE-347mcc ou n-C₃F₇OCH₃), HFE-7100 (também conhecido como HFE-449mccc ou C₄F₉OCH₃), HFE-7200 (também conhecido como HFE-569mccc ou C₄F₉OC₂H₅), HFE-7300 (também conhecido como 1,1,1,2,2,3,4,5,5,5-decafluoro-3-metoxi-4-(trifluorometil)-pentano ou C₇H₃F₁₃O), HFE-7500 (também conhecido como 3-etoxi-1,1,1,2,3,4,4,5,5,6,6,6-dodecafluoro-2-trifluorometil-hexano ou (CF₃)₂CFCF(OC₂H₅)CF₂CF₂CF₃), pentanos, hexanos, metanol, etanol, propanóis, fluorinol, dimetoximetano, dimetoxietano e dietoxietano. HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300 e HFE-7400 são comercializados como Fluidos Manipulados Novec® junto à 3M®.

[036] Como uma alternativa, o fluido de trabalho aprimorado pode consistir em um componente selecionado a partir de um grupo consistindo em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno, e uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno. Ainda assim, como outra alternativa, a composição de fluido de trabalho pode consistir em 2-perfluorohepteno. Ainda assim, como outra alternativa, a composição de fluido de trabalho pode consistir em 3-perfluorohepteno. Ainda assim, como outra alternativa, a composição de fluido de trabalho pode consistir em uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno.

[037] Como indicado acima, a temperatura crítica de uma mistura de 2-perfluorohepteno (20%) e 3-perfluorohepteno (80%) (pureza: 99,20%) é 198°C. Portanto, um fluido de trabalho contendo um perfluorohepteno permite um sistema ORC projetado e configurado para um fluido de trabalho que

compreende HFC-245fa para extrair calor a temperaturas de evaporação mais altas e obter maior eficiência energética do que com o fluido de trabalho que compreende HFC-245fa. O fluido de trabalho que compreende HFC-245fa nos sistemas de ORC existentes pode ser substituído por um fluido de trabalho contendo um perfluorohepteno para aumentar a eficiência desses sistemas existentes.

CICLO SUBCRÍTICO

[038] Em uma modalidade, a presente invenção refere-se a um processo de uso de um fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno para converter calor em trabalho mecânico mediante o uso de um ciclo de energia subcrítico. O sistema ORC está operando em um ciclo subcrítico quando o fluido de trabalho recebe calor a uma pressão mais baixa que a pressão crítica do fluido de trabalho e o fluido de trabalho permanece abaixo de sua pressão crítica durante todo o ciclo. Este processo inclui as seguintes etapas: (a) comprimir um fluido de trabalho líquido a uma pressão abaixo de sua pressão crítica; (b) aquecer o fluido de trabalho líquido comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor para formar um fluido de trabalho de vapor; (c) expandir o fluido de trabalho de vapor da etapa (b) em um dispositivo de expansão para gerar trabalho mecânico; (d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho líquido resfriado; e (e) circular o fluido de trabalho líquido resfriado da etapa (d) para a etapa (a) para repetir o ciclo.

[039] Funcionando em ciclos subcríticos, a temperatura de evaporação na qual o fluido de trabalho compreende um perfluorohepteno absorve calor da fonte de calor está na faixa de cerca de 100°C a cerca 190°C, de preferência de cerca 125°C a cerca 185°C, com mais preferência de cerca 150°C a 185°C. As pressões de entrada do expansor típico para ciclos subcríticos estão dentro da faixa de cerca de 0,25 MPa a cerca de 0,01 MPa

abaixo da pressão crítica. As pressões de saída do expansor típico para ciclos subcríticos estão dentro da faixa de cerca de 0,01 MPa a cerca de 0,25 MPa, mais tipicamente de cerca de 0,04 MPa a cerca de 0,12 MPa.

[040] No caso de operações de ciclo subcrítico, a maior parte do calor fornecido ao fluido de trabalho é fornecida durante a evaporação do fluido de trabalho. Como resultado, quando o fluido de trabalho consiste em um único componente fluido, ou quando o fluido de trabalho é uma blenda de fluido de multicomponente quase azeotrópica, a temperatura do fluido de trabalho é essencialmente constante durante a transferência de calor da fonte de calor para o fluido de trabalho.

CICLO DE RANKINE TRANSCRÍTICO

[041] Em contraste com o ciclo subcrítico, a temperatura do fluido de trabalho pode variar quando o fluido é aquecido isobaricamente sem alteração de fase a uma pressão acima de sua pressão crítica. Consequentemente, quando a temperatura da fonte de calor varia, o uso de um fluido acima de sua pressão crítica para extraír calor de uma fonte de calor permite uma melhor correspondência entre a temperatura da fonte de calor e a temperatura do fluido de trabalho em comparação com o caso de extração de calor subcrítica. Como resultado, a eficiência do sistema de troca de calor entre uma fonte de calor de temperatura variável e um componente de trabalho quase azeotrópico em um ciclo supercrítico ou um ciclo transcritico é frequentemente maior que aquela de um ciclo subcrítico (consulte Chen, et al., Energy, 36, (2011) 549-555 e referências no mesmo).

[042] Em outra modalidade, a presente invenção refere-se a um processo de uso de um fluido de trabalho que compreende perfluorohepteno para converter energia de calor em trabalho mecânico mediante o uso de um ciclo de energia transcritico. O sistema ORC está operando como um ciclo transcritico quando o fluido de trabalho recebe calor a uma pressão mais alta

que a pressão crítica do fluido de trabalho. Em um ciclo transcírtico, o fluido de trabalho não permanece em uma pressão mais alta que sua pressão crítica durante todo o ciclo. Este processo inclui as seguintes etapas: (a) comprimir um fluido de trabalho líquido para uma pressão acima da pressão crítica do fluido de trabalho; (b) aquecer o fluido de trabalho comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor; (c) expandir o fluido de trabalho aquecido da etapa (b) para reduzir a pressão do fluido de trabalho abaixo de sua pressão crítica para gerar trabalho mecânico; (d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho líquido resfriado; e (e) circular o fluido de trabalho líquido resfriado da etapa (d) para a etapa (a) para repetir o ciclo.

[043] Na primeira etapa do sistema de ciclo de alimentação transcírtico, descrito acima, o fluido de trabalho na fase líquida é comprimido para acima de sua pressão crítica. Em uma segunda etapa, o dito fluido de trabalho é passado através de um trocador de calor para ser aquecido até uma temperatura mais alta antes do fluido entrar no expansor, sendo que o trocador de calor está em comunicação térmica com a dita fonte de calor. O trocador de calor recebe energia de calor da fonte de calor por quaisquer meios conhecidos de transferência térmica. O fluido de trabalho do sistema ORC circula através do trocador de calor de suprimento de calor onde o fluido ganha calor.

[044] Na etapa seguinte, ao menos uma porção do fluido de trabalho aquecido é removida do trocador de calor e é roteada para o expansor onde a expansão do fluido resulta na conversão de pelo menos uma porção do conteúdo de energia térmica do fluido de trabalho em energia mecânica, como energia do eixo de acionamento. A pressão do fluido de trabalho é reduzida para abaixo da pressão crítica do fluido de trabalho, produzindo assim um fluido de trabalho em fase de vapor.

[045] Na etapa seguinte, o fluido de trabalho é passado do

expansor para um condensador, sendo que o fluido de trabalho em fase de vapor é condensado para produzir fluido de trabalho em fase líquida. As etapas acima formam um sistema de circuito e podem ser repetidas muitas vezes.

[046] Adicionalmente, para um ciclo de alimentação transcrítico, existem vários modos diferentes de operação. Em um modo de operação, na primeira etapa de um ciclo de energia transcrítico, o fluido de trabalho é comprimido acima da pressão crítica do fluido de trabalho substancialmente isentropicamente. Na etapa seguinte, o fluido de trabalho é aquecido sob uma condição de pressão substancialmente constante (isobárico) para acima de sua temperatura crítica. Na etapa seguinte, o fluido de trabalho é expandido substancialmente isentropicamente a uma temperatura que mantém o fluido de trabalho na fase de vapor. Ao final da expansão, o fluido de trabalho é um vapor superaquecido a uma temperatura abaixo de sua temperatura crítica. Na última etapa desse ciclo, o fluido de trabalho é resfriado e condensado enquanto o calor é rejeitado para um meio de resfriamento. Durante essa etapa, o fluido de trabalho é condensado para um líquido. O fluido de trabalho poderia ser sub-resfriado no final desta etapa de resfriamento.

[047] Em outro modo de operação de um ciclo de energia ORC transcrítico, na primeira etapa, o fluido de trabalho é comprimido acima da pressão crítica do fluido de trabalho substancialmente isentropicamente. Na etapa seguinte, o fluido de trabalho é então aquecido sob uma condição de pressão substancialmente constante para acima de sua temperatura crítica, mas apenas até o ponto em que na próxima etapa, quando o fluido de trabalho é expandido substancialmente isentropicamente, e sua temperatura é reduzida, o fluido de trabalho está suficientemente próximo de ser um vapor saturado no qual a condensação ou formação de névoa parcial do fluido de trabalho pode ocorrer. No final desta etapa, entretanto, o fluido de trabalho ainda é um vapor levemente superaquecido. Na última etapa, o fluido de trabalho é resfriado e condensado

enquanto o calor é rejeitado para um meio de resfriamento. Durante essa etapa, o fluido de trabalho é condensado para um líquido. O fluido de trabalho poderia ser sub-resfriado no final desta etapa de resfriamento/condensação.

[048] Em outro modo de operação de um ciclo de energia ORC transcrítico, na primeira etapa, o fluido de trabalho é comprimido acima da pressão crítica do fluido de trabalho substancialmente isentropicamente. Na etapa seguinte, o fluido de trabalho é aquecido sob uma condição de pressão substancialmente constante a uma temperatura ou abaixo ou somente levemente acima de sua temperatura crítica. Nesse estágio, a temperatura do fluido de trabalho é tal que quando o fluido de trabalho é expandido substancialmente isentropicamente na próxima etapa, o fluido de trabalho é parcialmente condensado. Na última etapa, o fluido de trabalho é resfriado e completamente condensado e o calor é rejeitado para um meio de resfriamento. O fluido de trabalho pode ser sub-resfriado no final desta etapa.

[049] Embora as modalidades acima para um ciclo de ORC transcrítico mostrem expansões e compressões substancialmente isentrópicas, e aquecimento ou resfriamento substancialmente isobárico, outros ciclos nos quais essas condições isentrópicas ou isobáricas não são mantidas, mas o ciclo é, no entanto, realizado, está dentro do escopo da presente invenção.

[050] Tipicamente para um ORC transcrítico, a temperatura para a qual o fluido de trabalho é aquecido usando calor da fonte de calor está na faixa de cerca de 195°C a cerca 300°C, de preferência de cerca 200°C a cerca 250°C, com mais preferência de cerca 200°C a 225°C. As pressões de entrada de expansor típicas para ciclos transcríticos situam-se na faixa de cerca da pressão crítica, 1,79 MPa, a cerca de 7 MPa, de preferência, de cerca da pressão crítica a cerca de 5 MPa e, com mais preferência, de cerca da pressão crítica a cerca 3 MPa. As pressões de saída de expansor típicas para ciclos transcríticos são comparáveis àquelas para ciclos subcríticos.

CICLO DE RANKINE SUPERCRÍTICO

[051] Outra modalidade da presente invenção refere-se a um processo de uso de um fluido de trabalho que compreende perfluoroocteno para converter energia de calor em trabalho mecânico mediante o uso de um ciclo de energia supercrítico. Um sistema ORC está operando como um ciclo supercrítico quando o fluido de trabalho usado no ciclo está a pressões maiores que sua pressão crítica em todo o ciclo. O fluido de trabalho de uma ORC supercrítica não passa através de uma transição de duas fases de vapor-líquida distintas como em uma ORC subcrítica ou transcrítica. Este método inclui as seguintes etapas: (a) comprimir um fluido de trabalho a partir de uma pressão acima de sua pressão crítica para uma pressão mais alta; (b) aquecer o fluido de trabalho comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor; (c) expandir o fluido de trabalho aquecido da etapa (b) para reduzir a pressão do fluido de trabalho para uma pressão acima de sua pressão crítica e gerar trabalho mecânico; (d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho resfriado acima de sua pressão crítica; e (e) circular o fluido de trabalho resfriado da etapa (d) para a etapa (a) para compressão.

[052] Tipicamente para ciclos supercríticos, a temperatura para a qual o fluido de trabalho é aquecido usando calor da fonte de calor está na faixa de cerca de 190°C a cerca 300°C, de preferência de cerca 200°C a cerca 250°C, com mais preferência de cerca 200°C a 225°C. A pressão do fluido de trabalho no expansor é reduzida a partir da pressão de entrada do expansor até a pressão de saída do expansor. As pressões de entrada de expansor típicas para ciclos supercríticos situam-se na faixa de cerca de 2 MPa a cerca de 7 MPa, de preferência, de cerca de 2 MPa a cerca de 5 MPa e, com mais preferência, de cerca de 3 MPa a cerca 4 MPa. As pressões de saída de expansor típicas para ciclos supercríticos estão dentro de cerca de 0,01 MPa acima da pressão crítica.

FONTES DE CALOR DE BAIXA QUALIDADE

[053] Os fluidos de trabalho inovadores da presente invenção podem ser usados em sistemas de ORC para gerar trabalho mecânico a partir do calor extraído ou recebido a partir de fontes de calor de temperatura relativamente baixa como vapor de baixa pressão, vapor de resíduo industrial, energia solar, água quente geotérmica, vapor geotérmico de baixa pressão (disposições primária ou secundária), ou equipamentos de geração de energia distribuídos que usam células de combustível ou máquinas térmicas, como turbinas, microturbinas, ou motores de combustão interna. Uma fonte de vapor de água de baixa pressão poderia ser o sistema conhecido como ciclo Rankine geotérmico binário. Grandes quantidades de vapor de água de baixa pressão podem ser encontradas em numerosos locais, como em usinas termoelétricas.

[054] Outras fontes de calor incluem calor residual recuperado a partir de gases de exaustão de motores de combustão interna móveis (por exemplo, motores a diesel de caminhões, trens ou navios), calor residual de gases de exaustão de motores de combustão interna estacionários (por exemplo, geradores de energia a diesel estacionários), calor residual de células a combustível, calor disponível em usinas de esfriamento e aquecimento distritais ou de energia, de esfriamento e de aquecimento combinados, calor residual de motores abastecidos com biomassa, calor de queimadores de gás natural ou de gás metano ou de caldeiras aquecidas com metano ou células a combustível de metano (por exemplo, em instalações de geração de energia distribuídas) operadas com metano de várias fontes incluindo biogás, gás de aterro e metano de jazida de carvão, calor de combustão da cortiça e lignina em moinhos de papel/polpa, calor de incineradores, calor de vapor d'água de baixa pressão em casas de força de vapor d'água convencionais (para conduzir a "chegada ao fundo" dos ciclos de Rankine) e calor geotérmico.

[055] Em uma modalidade dos ciclos de Rankine desta invenção,

o calor geotérmico é fornecido ao fluido de trabalho que circula acima do solo (por exemplo, casas de força geotérmicas de ciclo binário). Em outra modalidade dos ciclos de Rankine desta invenção, uma composição de fluido de trabalho inovadora desta invenção é usada tanto como fluido de trabalho do ciclo de Rankine quanto como um veículo de calor geotérmico que circula em poços profundos com o fluxo em grande parte ou exclusivamente acionado por variações de densidade de fluido induzidas por temperatura, conhecidas como "o efeito de termossifão" (por exemplo, consulte Davis, A. P. e E. E. Michaelides: "Geothermal power production from abandoned oil wells", Energy, 34 (2009) 866-872; Matthews, H. B., patente US nº 4.142.108, 27 de fevereiro de 1979)

[056] Outras fontes de calor incluem calor solar de matrizes de painéis solares incluindo matrizes de painel solar parabólico, calor solar a partir de centrais de energia solar concentrada, calor removido do sistema solar fotovoltaico (PV) para resfriar o sistema PV para manter uma alta eficiência do sistema PV.

[057] Em outras modalidades, a presente invenção também usa outros tipos de sistema ORC, por exemplo, um sistema de ciclo Rankine de pequena escala (por exemplo, de 1 a 500 kW, de preferência de 5 a 250 kW) com o uso de microturbinas ou expansores de deslocamento positivo de tamanho pequeno (por exemplo, Tahir, Yamada and Hoshino: "Efficiency of compact organic Rankine cycle system with rotary-vane-type expander for low-temperature waste heat recovery", Intl J. of Civil and Environ. Eng 2:1 2010), combinados, de multiestágios, e ciclos de Rankine em cascata, e um sistema de Ciclo de Rankine com recuperadores para recuperar calor do vapor que sai do expensor.

[058] Outras fontes de calor incluem pelo menos uma operação associada a pelo menos um setor selecionado a partir do grupo que consiste em: transporte marinho, refinarias de petróleo, plantas petroquímicas, oleodutos e

gasodutos, indústria química, prédios comerciais, hotéis, shoppings, supermercados, padarias, indústrias de alimentos, restaurantes, fornos de cura de tinta, produção de móveis, modeladores de plásticos, estufas de cimento, estufas de madeira, operações de calcinação, indústria siderúrgica, indústria de vidro, fundições, fusão, condicionamento de ar, refrigeração e aquecimento central.

EXEMPLO

[059] Os conceitos aqui descritos serão adicionalmente descritos nos exemplos a seguir, os quais não limitam o escopo da invenção descrita nas reivindicações.

EXEMPLO 1.

[060] A eficiência de ciclo projetada de um sistema ORC usando HFC-245fa como um fluido de trabalho foi comparada à eficiência de ciclo projetada do sistema ORC usando uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno como um fluido de trabalho. Presume-se que a pressão de trabalho máxima exequível do sistema ORC era de cerca 3 MPa e que uma fonte de calor estava disponível que permitiria a manutenção da temperatura de qualquer fluido de trabalho na entrada do expansor a 160°C.

[061] É mostrada na Tabela 1 uma tabela comparativa para HFC-245fa e uma mistura contendo 20% de 2-perfluorohepteno e 80% de 3-perfluorohepteno (pureza da mistura: 99,20%) utilizada como o fluido de trabalho em um ciclo subcrítico. Os parâmetros operacionais do sistema ORC usando HFC-245fa como o fluido de trabalho são mostrados sob a coluna chamada "HFC-245fa". Os parâmetros operacionais do sistema ORC usando a mistura de 2-perfluorohepteno/3-perfluorohepteno como o fluido de trabalho são mostrados sob a coluna chamada "2-Perfluorohepteno/3-Perfluorohepteno". As pressões de vapor determinadas experimentalmente da mistura de 2-perfluorohepteno/3-perfluorohepteno são mostradas abaixo na Tabela 1A.

TABELA 1

Parâmetros	Unidades	HFC-245fa	2 Perfluorohepteno/ 3 Perfluorohepteno
Peso molecular médio	g/mol	134,05	350,0546
GWP	-	858	Menor que cerca de 4
NBP	°C	15,1	72,5
Tcr	°C	154	198
Pcr	MPa	3,65	1,54
Temperatura do Evaporador	°C	145	160
Superaquecimento do Evaporador	°K	15	0
Temperatura do Condensador	°C	85	85
Sub-resfriamento do Condensador	°K	5	5
Eficiência do Expansor		0,75	0,75
Eficiência da Bomba		0,55	0,55
Temperatura de Entrada do Expansor	°C	160	160
Pressão do Evaporador	MPa	3,1	0,785
Pressão do Condensador	MPa	0,893	0,135
Razão de Expansão		3,473	5,827

Parâmetros	Unidades	HFC-245fa	2 Perfluorohepteno/ 3 Perfluorohepteno
Expansor de Saída do Expansor	°C	116,3	138,2
Eficiência de Ciclo	%	7,023	7,151
Eficiência de Ciclo vs HFC-245fa	%		+1,8%

TABELA 1A

Temp (°C)	Pressão de vapor (kPa (psia))
-9,926	0,3421
-0,062	0,6348
9,885	1,1202
19,904	1,8863
20,000	1,8905
20,015	1,8922
29,992	3,0673
45,036	5,8476
60,045	10,3122
75,068	17,1183
90,150	27,1188
105,184	41,0299
120,217	59,9598
130,256	75,9433

[062] O exemplo acima presume que calor está disponível para

manter a entrada do expansor a 160°C. A temperatura de evaporação com HFC-245fa foi limitada a 145°C, para assegurar que a pressão dentro do evaporador permaneça abaixo da pressão de trabalho máxima permitida para os componentes de equipamento comercial comumente disponíveis (por exemplo, trocadores de calor) para sistemas de ORC.

[063] A pressão de evaporação com a mistura de 2-perfluorohepteno/3-perfluorohepteno permanece suficientemente menor que a do HFC-245fa de modo que nem a pressão máxima de trabalho para equipamentos comerciais comumente disponíveis para sistemas de ORC, nem o limiar de pressão para medidas de segurança adicionais necessárias em algumas jurisdições para o sistema ORC projetado para HFC-245fa são excedidas. Além disso, espera-se que a mistura de perfluorohepteno exiba estabilidade química aceitável dentro desses parâmetros de trabalho.

[064] O exemplo acima mostra que o uso de uma mistura de 2-perfluorohepteno/3-perfluorohepteno pode alcançar uma eficiência de ciclo 1,8% maior em comparação com HFC-245fa quando usado em um sistema ORC projetado para uso com HFC-245fa como o fluido de trabalho enquanto reduz o GWP de fluido de trabalho em mais de 99,5%. O fluido de trabalho contendo HFC-245fa em um sistema ORC existente pode ser substituído pela evacuação do fluido de trabalho, lavando o sistema ORC com um lubrificante ou fluido de trabalho que compreende um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e combinações dos mesmos, e carregando o sistema ORC com um fluido de trabalho possuindo um perfluorohepteno selecionado a partir do grupo que consiste em 2-perfluorohepteno, 3-perfluorohepteno e suas combinações.

EXEMPLO 2

[065] É mostrada na Tabela 2 uma tabela comparativa para uma mistura contendo 20% de 2-perfluorohepteno e 80% de 3-perfluorohepteno

(pureza da mistura: 99,20%) utilizada como o fluido de trabalho em um ciclo subcrítico e como o fluido de trabalho em um ciclo transcrítico, onde a temperatura de entrada do expansor é mantida a 220°C.

TABELA 2.

Parâmetros	Unidades	Subcrítico Ciclo	Transcrítico Ciclo
Temperatura do Evaporador	°C	160	n/a
Superaquecimento do Evaporador	°K	60	n/a
Temperatura do Condensador	°C	85	85
Sub-resfriamento do Condensador	°K	5	5
Eficiência do Expansor		0,75	0,75
Eficiência da Bomba		0,55	0,55
Pressão de Entrada do Expansor	MPa	0,785	3
Temperatura de Entrada do Expansor	°C	220	220
Pressão do Evaporador	MPa	0,785	n/a
Pressão do Condensador	MPa	0,135	0,135
Razão de Expansão		5,8	22,3
Expansor de Saída do Expansor	°C	200,6	158,8
Eficiência de Ciclo	%	6,158	8,102
Eficiência de Ciclo Térmico versus Ciclo Subcrítico	%	-	+31,6%
CAP do Ciclo	kJ/m ³	160,255	187,582

Parâmetros	Unidades	<u>Subcrítico</u>	<u>Transcrítico</u>
		<u>Ciclo</u>	<u>Ciclo</u>
CAP do Ciclo versus Ciclo Subcrítico	%	-	+17,1%

[066] A tabela acima indica que quando o calor está disponível a uma temperatura que permite que a temperatura de entrada do expansor seja mantida a 220°C, a operação transcrítica possibilita uma eficiência térmica de ciclo e uma capacidade volumétrica de ciclo maior que aquelas de operação subcrítica em 31,6% e 17,1%, respectivamente.

[067] Embora a presente invenção tenha sido particularmente mostrada e descrita em termos da modalidade preferencial da mesma, é compreendido pelo versado na técnica que várias alterações em detalhes podem ser feitas na mesma sem que se desvie do espírito e escopo da invenção, conforme apresentado nas reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. PROCESSO PARA CONVERTER CALOR EM TRABALHO MECÂNICO em um ciclo de alimentação, caracterizado por compreender as etapas de:

aquecer um fluido de trabalho com uma fonte de calor para uma temperatura suficiente para pressurizar o fluido de trabalho; e
fazer com que o fluido de trabalho pressurizado realize trabalho mecânico;

em que o dito fluido de trabalho consiste de uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno.

2. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fluido de trabalho consistir em uma mistura de 20% de 2-perfluorohepteno e 80% de 3-perfluorohepteno.

3. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado pela dita etapa de aquecimento do fluido de trabalho com uma fonte de calor compreender adicionalmente aquecer o fluido de trabalho até uma temperatura suficiente para vaporizar o fluido de trabalho e formar um vapor pressurizado do fluido de trabalho.

4. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado por compreender adicionalmente expandir o dito vapor pressurizado do fluido de trabalho por meio de um dispositivo de expansão para executar o trabalho mecânico, preferivelmente em que o trabalho mecânico é transmitido para um gerador elétrico para produzir energia elétrica.

5. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado pelo dito calor ser convertido no dito trabalho mecânico usando um ciclo subcrítico compreendendo:

(a) comprimir um fluido de trabalho líquido a uma pressão abaixo de sua pressão crítica;

- (b) aquecer o fluido de trabalho líquido comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor para formar um fluido de trabalho de vapor;
- (c) expandir o fluido de trabalho aquecido da etapa (b) para gerar trabalho mecânico e reduzir a pressão do fluido de trabalho;
- (d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho líquido resfriado; e
- (e) circular o fluido de trabalho líquido resfriado das etapas (d) a (a) para repetir o ciclo.

6. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado pelo dito calor ser convertido no dito trabalho mecânico usando um ciclo transcrítico compreendendo:

- (a) comprimir um fluido de trabalho líquido acima da dita pressão crítica do fluido de trabalho;
- (b) aquecer o fluido de trabalho comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor;
- (c) expandir o fluido de trabalho aquecido da etapa (b) para gerar trabalho mecânico e reduzir a pressão do fluido de trabalho abaixo de sua pressão crítica;
- (d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho líquido resfriado; e
- (e) circular o fluido de trabalho líquido resfriado das etapas (d) a (a) para repetir o ciclo.

7. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado pelo dito calor ser convertido em trabalho mecânico pelo uso de um ciclo supercrítico compreendendo:

- (a) comprimir um fluido de trabalho a partir de uma pressão acima de sua pressão crítica para uma pressão mais alta;

(b) aquecer o fluido de trabalho comprimido da etapa (a) usando o calor fornecido pela fonte de calor;

(c) expandir o fluido de trabalho aquecido da etapa (b) para gerar trabalho mecânico e reduzir a pressão do fluido de trabalho para uma pressão acima de sua pressão crítica;

(d) resfriar o fluido de trabalho expandido da etapa (c) para formar um fluido de trabalho resfriado acima de sua pressão crítica; e

(e) circular o fluido de trabalho líquido resfriado das etapas (d) a (a) para repetir o ciclo.

8. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado por ser em um ciclo de Rankine que compreende as etapas de:

vaporizar um fluido de trabalho líquido com uma fonte de calor de baixa temperatura;

expandir o vapor resultante através de um dispositivo de expansão para gerar trabalho mecânico;

resfriar o vapor expandido resultante para condensar o vapor em um líquido;

bombar o fluido de trabalho líquido para a dita fonte de calor para repetir o processo.

9. SISTEMA DE CICLO DE RANKINE ORGÂNICO, caracterizado por compreender:

um circuito primário configurado para utilizar um fluido de trabalho que compreende HFC-245fa para converter calor em trabalho mecânico;

sendo que o dito circuito primário é carregado com um fluido de trabalho consistindo em uma mistura de 2- perfluorohepteno e 3- perfluorohepteno.

10. SISTEMA, de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fluido de trabalho consistir em uma mistura de 20% de 2-perfluorohepteno e 80% de 3-perfluorohepteno.

11. SISTEMA, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado por adicionalmente compreender um circuito de troca de calor secundário configurado para transferir calor de uma fonte de calor para o dito circuito primário;

sendo que o dito circuito de troca de calor secundário é carregado com um fluido de trabalho que consiste em uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno.

12. MÉTODO PARA SUBSTITUIR O FLUIDO DE TRABALHO de um Sistema de Ciclo de Alimentação de Rankine Orgânico carregado com um fluido de trabalho contendo HFC-245fa, caracterizado por compreender:

(a) evacuar o fluido de trabalho contendo HFC-245fa do dito Sistema de Ciclo de Rankine Orgânico; e

(b) carregar o dito sistema de Ciclo de Rankine Orgânico com um fluido de trabalho consistindo de uma mistura de 2-perfluorohepteno e 3-perfluorohepteno.

13. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo dito fluido de trabalho consistir em uma mistura de 20% de 2-perfluorohepteno e 80% de 3-perfluorohepteno.

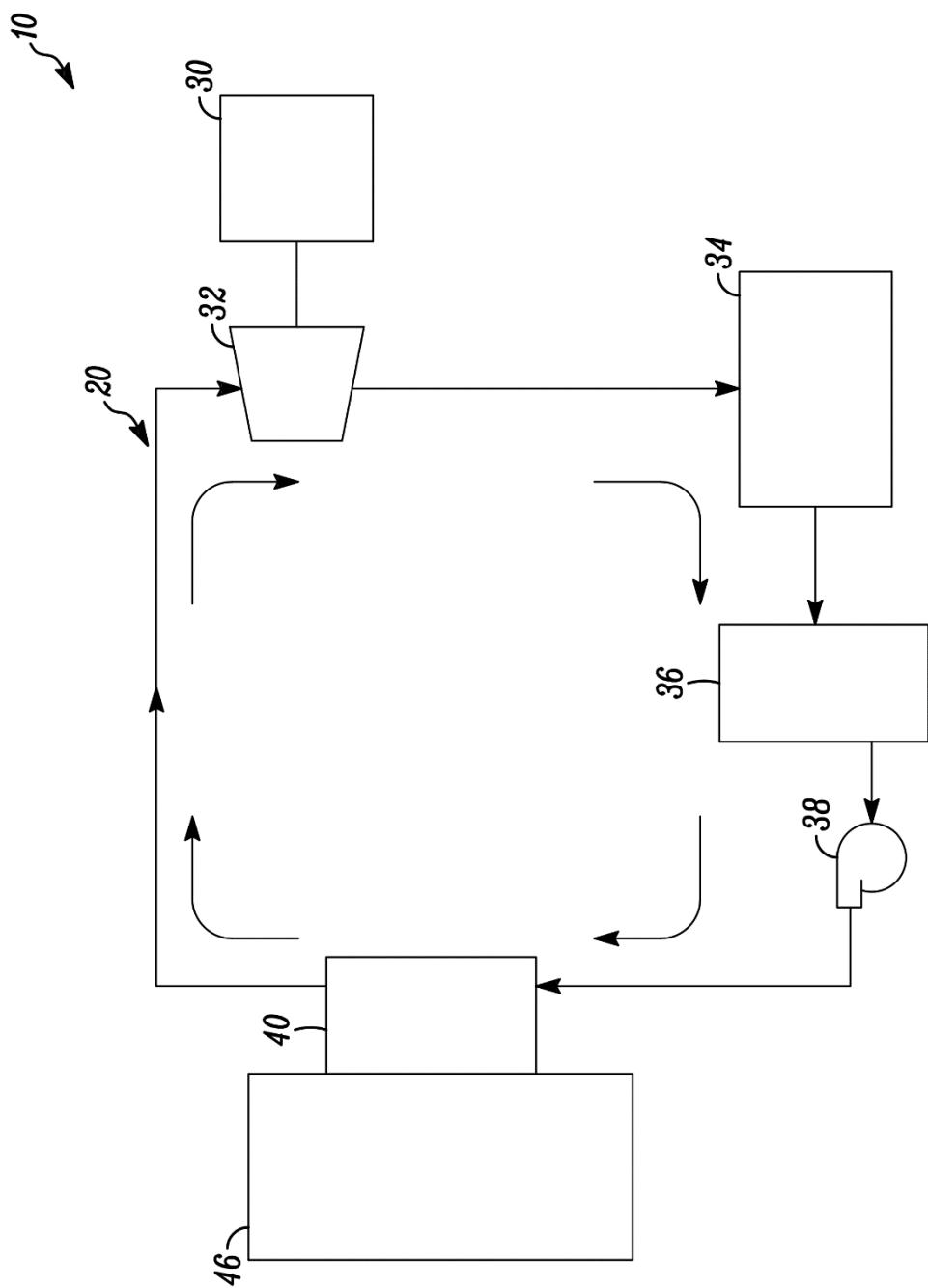


FIG. 1

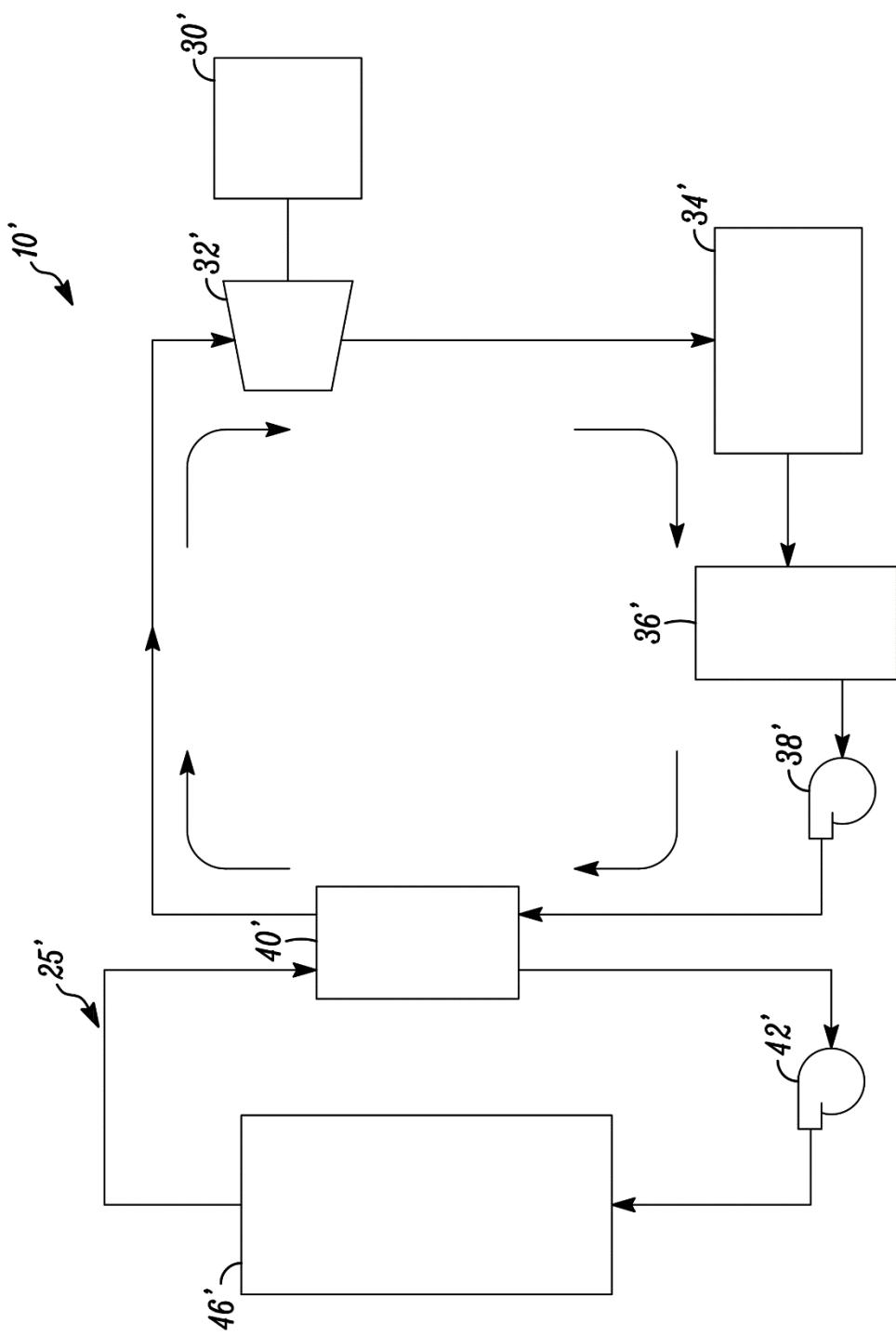


FIG. 2