



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

**(11) PI 0706347-4 B1**



**(22) Data do Depósito: 09/01/2007**

**(45) Data de Concessão: 06/11/2018**

**(54) Título:** MÉTODO PARA A SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DE AR

**(51) Int.Cl.:** F25J 3/04.

**(30) Prioridade Unionista:** 12/01/2006 US 11/330,341.

**(73) Titular(es):** PRAXAIR TECHNOLOGY, INC..

**(72) Inventor(es):** HENRY EDWARD HOWARD.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2007000538 de 09/01/2007

**(87) Publicação PCT:** WO 2008/051259 de 02/05/2008

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 04/07/2008

**(57) Resumo:** MÉTODO PARA A SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DE AR. Um método para realizar separação criogênica de ar no qual ar de alimentação é processado em três correntes. As três correntes estão em pressões diferentes. Uma das três correntes é turbo-expandida para gerar refrigeração. A outra das duas correntes é condensada para efetuar vaporização de produto pressurizado.

## “MÉTODO PARA A SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DE AR”

### Campo técnico

[1] Esta invenção é relativa genericamente a separação criogênica de ar e, mais particularmente, a separação criogênica de ar na qual ar de alimentação é condensado para vaporizar uma corrente de produto pressurizado.

### Técnica fundamental

[2] Sistemas de separação criogênica de ar rotineiramente utilizam o que é muitas vezes referido como bombeamento líquido para pressurização de produto. Bombeamento líquido se refere a uma compressão mecânica direta de um produto líquido criogênica seguido por vaporização contra um fluido de condensação quente. Neste processo a refrigeração contida no produto liquefeito bombeado é impressa através de troca de calor indireta ao fluido de compensação/condensação. Tal abordagem é particularmente útil para finalidades de pressurização de produto especializado. Em particular, a despesa com compressores de oxigênio e aspectos de segurança relacionados podem ser evitados através de bombeamento de oxigênio líquido. Tem havido interesse aumentado em processos que empregam bombeamento líquido completo. Em tais processos oxigênio é bombeado líquido diretamente para a pressão de saída (tubulação) e vaporizado dentro do processo. A vantagem de tais processos deriva da eliminação completa do compressor de oxigênio. As complicações associadas com bombeamento de oxigênio completo derivam das correntes de ar de pressão muito elevada requeridas para liquefação. Estas correntes de ar de alta pressão criam um desencontro termodinâmico dentro do trocador de calor primário e daí consumo de energia adicionado.

[3] Em diversos casos ar é fluido de compensação preferido para vaporizar o oxigênio líquido bombeado. Uma complicação associada com o bombeamento líquido de oxigênio completo deriva do fato que pressões de ar

acima do ponto crítico, 547 libras por polegada quadrada absoluta (psia) (38 kg/cm<sup>2</sup>) são muitas vezes requeridas para vaporizar o oxigênio líquido. Em pressões de oxigênio abaixo do ponto crítico de oxigênio (737 psia – 52 kg/cm<sup>2</sup>) substanciais ineficiências de troca de calor são incorridas. Como uma consequência, existe espaço substancial para melhoramento em termos de abordagem de projeto de troca de calor. Além disto, foi descoberto que processos de oxigênio bombeado líquido não são tipicamente receptivos para produção líquida variável.

#### Sumário da invenção

[4] Um método para separação criogênica de ar que compreende:

A. Comprimir uma primeira corrente de ar de alimentação para uma primeira pressão, resfriar a primeira corrente de ar de alimentação comprimida, turbo-expandir a primeira alimentação de corrente de ar comprimida resfriada e passar a primeira corrente de ar de alimentação turbo-expandida para o interior de uma planta de separação criogênica de ar que compreende no mínimo uma coluna;

B. Comprimir uma segunda corrente de ar de alimentação para uma segunda pressão, condensar a segunda corrente de ar de alimentação comprimida e passar a segunda corrente de ar de alimentação comprimida condensada para o interior da planta de separação criogênica de ar para;

C. Condensar uma terceira corrente de ar de alimentação em ainda uma pressão menor do que a primeira pressão e passar a terceira corrente de ar de alimentação condensada para o interior da planta de separação criogênica de ar;

D. Separar o ar de alimentação por meio de retificação criogênica dentro da planta de separação criogênica de ar para produzir no mínimo um de oxigênio e nitrogênio.

[5] Como aqui utilizado o termo “coluna” significa uma coluna ou zona de destilação ou fracionamento, isto é, uma coluna de contato ou zona de

contato na qual fases líquida e vapor são contatadas em contracorrente para efetuar separação de uma mistura fluida, como por exemplo, contatando as fases vapor e líquido em uma série de bandejas ou placas espaçadas verticalmente, montadas dentro da coluna e/ou sobre elementos de recheio, tais como recheio estruturado ou randômico. Para uma discussão adicional de colunas de destilação ver o Chemical's Engineer's Handbook, fifth edition, editado por R. H. Perry e C. H. Chilton, McGraw-Hill Book Company, Nova Iorque, Seção 13, The Continuous Distillation Process. Uma coluna dupla compreende uma coluna de pressão mais elevada que tem sua extremidade superior em relação de troca de calor com a extremidade inferior de uma coluna de pressão mais baixa.

[6] Processos de separação por contato de líquido e vapor dependem da diferença em pressões de vapor dos componentes. O componente de pressão de vapor mais elevada (ou mais volátil ou de baixa ebulição) irá tender a concentrar na fase vapor enquanto o componente de pressão de vapor mais baixa (ou menos volátil ou de alta ebulição) irá tender a concentrar na fase líquida. Condensação parcial é o processo de separação por meio do qual resfriamento de uma mistura de vapor pode ser utilizado para concentrar os componentes voláteis na fase vapor e com isto os componentes menos voláteis na fase líquida. Retificação ou destilação contínua é o processo de separação que combina vaporizações e condensações parciais sucessivas como obtidas por um tratamento em contracorrente de fases vapor e líquido. O contato em contracorrente de fases vapor e líquido é genericamente adiabático e pode incluir contato integral (em estágios) ou diferencial (contínuo) entre as fases. Arranjos de processo de separação que utilizam os princípios de retificação para separar misturas são muitas vezes denominados de maneira intercambiável colunas de retificação, colunas de destilação ou colunas de fracionamento. Retificação criogênica é um processo de retificação realizado no mínimo em partes em temperaturas em ou

abaixo de 150 Kelvin.

[7] Como aqui utilizado o termo “troca de calor indireta” significa trazer os dois fluidos em relação de troca térmica sem qualquer contato físico ou mistura dos fluidos um com o outro.

[8] Como aqui utilizado o termo “ar de alimentação” significa uma mistura que compreende de maneira primária oxigênio, nitrogênio e argônio, tal como o ar ambiente.

[9] Como aqui utilizados, os termos “porção superior” e “porção inferior” de uma coluna significam aquelas seções da coluna respectivamente acima e abaixo do ponto médio da coluna.

[10] Como aqui utilizados, os termos “turbo-expansão” e “turbo-expansores” significam, respectivamente, método e aparelho para escoamento de fluido de alta pressão através de uma turbina para reduzir a pressão e a temperatura do fluido, gerando com isto refrigeração.

[11] Como aqui utilizado, o termo “planta de separação criogênica de ar” significa a coluna ou colunas nas quais ar de alimentação é separado por meio de retificação criogênica para produzir nitrogênio, oxigênio e/ou argônio, bem como tubulação de interconexão, válvulas, trocadores de calor e similares.

[12] Como aqui utilizado, o termo “compressor” significa uma máquina que aumenta pressão de um gás por meio de aplicação de trabalho.

[13] Como aqui utilizado, o termo “sub-resfriamento” significa resfriar um líquido para estar em uma temperatura mais baixa do que a temperatura de saturação daquele fluido para a pressão existente.

#### Breve descrição do desenho

[14] A única figura é uma representação esquemática de uma configuração preferencial dos sistema de separação criogênica de ar desta invenção.

Descrição detalhada

[15] A presente invenção é um processo bombeado melhorado de oxigênio líquido associado com uma planta de separação criogênica de ar que emprega no mínimo uma coluna para separação de ar e emprega no mínimo um turbo-expansor para a produção de refrigeração. Em particular a presente invenção proporciona a utilização de no mínimo duas correntes de ar de compensação ou de condensação para facilitar vaporização de oxigênio. Em sua configuração a mais preferencial a vaporização do oxigênio bombeado ocorre dentro do trocador de calor primário e o trabalho de turbo-expansão do eixo é utilizado para a compressão do gás de expansão. O gás de liquefação primário é preferivelmente comprimido em um compressor de ar de reforço separador e dedicado.

[16] A invenção será descrita em maior detalhe com referência ao desenho. Fazendo referência agora à figura, a corrente de ar de alimentação 1 é comprimida em um compressor de ar de diversos estágios com resfriamento intermediário 100 até uma pressão substancialmente elevada dentro da faixa desde 5 até 15 bar a. O compressor 100 pode ser um compressor de engrenagem integral com inter-resfriamento com remoção de condensado (não mostrado). Corrente de ar de alimentação comprimido 2 é então direcionada para dispositivo de purificação 110. O processo 110 pode compreender diversas operações unitárias que incluem, porém não estão limitadas a, resfriamento com água com contato direto, resfriamento baseado em refrigeração, contato direto com água resfriada, separação de fase e/ou absorção. Em adição, a corrente 2 é desidratada e purificada de contaminantes de alto ponto de ebulição, por exemplo, hidrocarbonetos, dióxido de carbono e similares. Este processo pode ser realizado por meio de uma combinação de adsorção oscilante de temperatura e pressão. O processo 110 produz uma corrente de ar seco limpo 3 que é em seguida dividido em três porções.

[17] Uma primeira porção (aproximadamente 65 até 70%) de corrente 3 é tomada como a primeira corrente de ar de alimentação 4 que é direcionada para o compressor de reforço carregado da turbina 121. A corrente de ar parcialmente reforçada e resfriada 5 (aproximadamente 5 até 20 bar a) é ainda comprimida por meio de dispositivo de compressão 130 para uma primeira pressão dentro da faixa desde 20 até 60 bar a/. A primeira corrente de ar de alimentação resultante 6 é resfriada no trocador de calor primário 200 para uma temperatura dentro da faixa de 125 até 190 K e em seguida expandida no turbo-expansor 122. A descarga da turbina 8 é então direcionada para a porção inferior da coluna 300 como alimentação primária gasosa de ar. A coluna 300 é a coluna de pressão mais elevada de uma coluna dupla que também inclui a coluna de pressão mais baixa 310. Na configuração da invenção ilustrada na figura, a planta de separação criogênica de ar compreende colunas 300 e 310.

[18] Uma segunda porção (20 até 25%) da corrente 3 é tomada como segunda corrente de ar de alimentação 20. Esta corrente é ainda comprimida no compressor 140, que pode compreender diversos estágios de compressão com resfriamento intermediário, para uma segunda pressão que pode ser maior do que a primeira pressão e está dentro da faixa desde cerca de 25 até 70 bar. Corrente comprimida e resfriada 21 é ainda resfriada no trocador de calor 200 e sai substancialmente condensada e sub-resfriada como corrente 22. Esta corrente pode então ter a pressão reduzida por meio da válvula 400 e direcionada para a coluna de pressão mais elevada 300 por meio de correntes 23, 24 e 25. Uma porção desta corrente também pode ser passada para o interior da coluna de pressão mais baixa 310 em correntes 26 e 27 por meio de válvula de expansão secundária 420.

[19] Uma terceira porção (5 até 10%) de corrente de ar 3 é tomada como terceira corrente de ar de alimentação 30 em uma pressão menor do que a primeira pressão. A corrente 30 é preferivelmente direcionada para o

trocador de calor 200 no qual esta corrente é resfriada, condensada e sub-resfriada e sai como corrente 31. A corrente 31 é então direcionada para dispositivo de redução de pressão 410 (se necessário) saindo como corrente 32 e então direcionada como a alimentação para o sistema de coluna por meio de corrente 24.

[20] As colunas 300 e 310 representam colunas de destilação nas quais vapor e líquido são contatados em contracorrente para efetuar uma separação baseada em transferência de massa de gás/líquido das respectivas correntes de alimentação. As colunas 300 e 310 empregarão preferivelmente recheio estruturado ou derrubado, ou bandejas, ou uma combinação deles.

[21] Correntes de ar 8 e 25 são direcionadas para a coluna de pressão moderada 300. A coluna 300 serve para separar as respectivas correntes em uma corrente de topo rica em nitrogênio e corrente de fundo rica em oxigênio. A condensação do gás de topo 50 é efetuada pelo condensador principal 220. O calor latente de condensação é com isto impresso ao fluido de fundo rico em oxigênio da coluna 310. A corrente líquida rica em nitrogênio resultante 51 é então utilizada como um líquido de refluxo para ambas, a coluna de pressão moderada como corrente 56 e para a coluna de pressão mais baixa 310 como corrente 55. Um líquido enriquecido em oxigênio 40 é também retirado da coluna 300 e então direcionado através da válvula de redução de pressão 430 antes de penetrar na coluna 310 como corrente 41. A coluna 310 opera em uma pressão na faixa de 1,1 até 1,5 bar a. Líquido rico em nitrogênio 52 é primeiro sub-resfriado no trocador de calor 210 e sai como corrente 53 que pode ser dividida em uma corrente líquida produto 54 e corrente líquida refluxo 55 como mencionado anteriormente. Dentro da coluna 310 correntes 55, 27 e 41 são ainda separadas em correntes de topo ricas em nitrogênio 60 e 70 e em líquido de fundo rico em oxigênio 80. Correntes ricas em nitrogênio 60 e 70 são retiradas da porção superior da coluna de pressão mais baixa 310 e aquecidas para temperatura ambiente por

meio de troca de calor indireta dentro dos trocadores de calor 210 e 200 sequencialmente, emergindo em seguida como correntes de nitrogênio de pressão mais baixa aquecidas 62 e 72, respectivamente. A corrente 62 pode ser tomada como uma correntes de nitrogênio co-produto e comprimida como necessário. A corrente 72 pode ser utilizada como um fluido de purga/varredura para finalidades de regenerar sistemas adsorventes que podem fazer parte do dispositivo de pré-tratamento 110 e/ou descarregados para a atmosfera.

[22] Um líquido rico em oxigênio 80 é extraído da porção inferior da coluna de pressão mais baixa 310. Esta corrente é então comprimida por meio de uma combinação de carga de gravidade e por bomba mecânica 440. A corrente de oxigênio líquido bombeada 81 pode então ser dividida em uma corrente líquida de produto 84 (e direcionada para armazenagem não mostrado) e corrente 82. A corrente 82 sofre vaporização e aquecimento dentro do trocador de calor 200 e emerge como corrente gasosa de pressão elevada 83 tipicamente a uma pressão dentro da faixa desde 10 até 50 bar. Em uma configuração preferencial condensar a terceira corrente de ar de alimentação 30/31 inicia condensação em uma temperatura mais baixa do que a temperatura de ponto de bolha de corrente de oxigênio bombeada 82. Condensar a segunda corrente de ar de alimentação 21/22 preferivelmente inicia a condensação (ou pseudo-condensação se de pressão supercrítica) a uma temperatura acima da temperatura do ponto de bolha da corrente 82. Fazendo assim, a energia total consumida pelos compressores 100, 140 e 130 é reduzida substancialmente. Existem inúmeras modificações ao sistema de coluna básico como mostrado na figura. A coluna dupla termicamente articulada em duas pressões pode ser utilizada para recuperar ao mesmo tempo oxigênio de pureza elevada e baixa. Em adição, ao recuperar o oxigênio de pureza elevada uma coluna lateral pode ser incorporada no projeto para efetuar a recuperação de argônio em um estado cru ou refinado

(como líquido ou gás). Diversas opções de troca de calor auxiliares podem ser empregadas com a configuração básica. Um exemplo poderia incluir o resfriamento da corrente 40 contra as correntes 61 e 71 antes da entrada na coluna 310. Se uma coluna lateral de argônio é incorporada no sistema de coluna, o líquido rico em oxigênio 40 pode ser utilizado para refrigerar o condensador de argônio. Outros métodos de destilação criogênica de ar poderiam ser utilizados em conjunto com a presente invenção. Estes incluem colunas simples bombeadas com calor em adição a ciclos de oxigênio de baixa pureza que empregam uma coluna de baixa pressão refervida pela condensação (parcial ou de outra forma) de ar de alimentação de pressão moderada.

[23] Com relação à compressão da extremidade quente o dispositivo de compressão 140, 130 e o reforço de turbina 121 podem ser incorporados no todo ou em parte em uma máquina de engrenagem integrada combinada. Tal máquina poderia reduzir o número de motores de acionamento independentes ou dispositivos requeridos para o processo. A utilização de tal máquina poderia ainda possibilitar serviços de compressão separados e distintos.

[24] Correntes de liquefação de ar 20 e 30 foram utilizadas para ilustrar a intenção genérica da presente invenção. Deveria ser entendido que mais do que um nível de pressão pode ser empregado (para condensação em temperaturas) ao mesmo tempo acima e abaixo da temperatura do ponto de bolha da corrente 82 (oxigênio líquido bombeado).

[25] A disposição das correntes de ar líquidas 22 e 31 mostrada nas figuras não quer significar ser limitativa. Qualquer número de combinações são previstos. Por exemplo, a corrente 31 pode ser direcionada para as colunas 310 ou 300 em todo ou em parte por meio de conduto que é separado daquele que está sendo utilizado para transmitir corrente de ar líquido em pressão mais elevada 22. De maneira similar, a corrente de ar líquido de

pressão elevada pode ser direcionada em todo ou em parte para qualquer coluna 300 e 310. A corrente 30 não precisa ser derivada diretamente da saída do dispositivo de pré-tratamento. Alternativamente, ela pode ser derivada de uma localização entre estágios do dispositivo de compressão 140. O objetivo seria obter uma corrente de ar de pressão suficiente para condensar a uma temperatura abaixo do ponto de bolha da corrente 82.

[26] Dispositivo de compressão de reforço mecanizado externamente 130 pode ser relocado para um ponto a montante do compressor 121 (e a jusante da purificação 110). Por exemplo, a corrente e 4 poderia ser comprimida diretamente por meio do dispositivo compressor 130 antes de entrar nas unidade turbina de reforço 120. Alternativamente, dispositivo de compressão 130 pode ser excluído do processo ou contornado de maneira periódica.

[27] Como indicado, dispositivo de compressão 100 pode compreender diversos estágios de compressão inter- resfriados. Como tal, a pressão da corrente 2 pode ser selecionada de modo que uma corrente e de ar seco e limpo (corrente 3) é produzida em uma pressão comparável àquela que existe na base da coluna 300. Em tal arranjo uma quarta corrente de ar pode ser extraída e resfriada através do trocador de calor 200 até próximo à saturação e diretamente para a coluna 300. Tal abordagem poderia ser vantajosa para uma planta com necessidades de produção global de líquido mais baixa.

[28] É conhecido da técnica de separação de ar incluir diversas correntes de turbo-expansão. Tais arranjos podem ser incorporados na presente invenção. Por exemplo, uma porção de corrente 6 poderia ser extraída antes do nível de temperatura da corrente 7 e expandida até uma pressão próxima daquela da coluna 300. Tal corrente poderia então ser ainda mais resfriada até próximo da saturação no trocador de calor 200 e direcionada para a base da coluna 300 ou combinada com a descarga da

corrente 100 da descarga do expensor 122, corrente 8. Alternativamente correntes de ar podem ser expandidas para a coluna de baixa pressão 310.

[29] Como uma alternativa adicional, correntes adicionais menores de oxigênio líquido ou nitrogênio líquido podem ser bombeadas independentemente daquela corrente de oxigênio primária e em seguida vaporizadas no trocador de calor 200, (em série com a corrente de oxigênio primária). O elemento chave da invenção ainda sendo uma corrente de condensação secundária que apresenta uma temperatura de condensação abaixo daquela da corrente de oxigênio primária 82 representando mais do que metade do escoamento total de oxigênio aquecido.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para a separação criogênica de ar, caracterizado pelo fato de compreender:

A. Comprimir uma primeira corrente de ar de alimentação (4) para uma primeira pressão, resfriar a primeira corrente de ar de alimentação comprimida, turbo-expandir a primeira corrente de ar de alimentação comprimida resfriada (7) e passar a primeira corrente de ar de alimentação turbo-expandida para o interior de uma planta de separação criogênica de ar que compreende no mínimo uma coluna;

B. Comprimir uma segunda corrente de ar de alimentação (20) para uma segunda pressão, que é maior do que a primeira pressão, condensar a segunda corrente de ar de alimentação comprimida, e passar a segunda corrente de ar de alimentação comprimida condensada (22) para o interior da planta de separação criogênica de ar;

C. Condensar uma terceira corrente de ar de alimentação (30) em ainda uma pressão menor do que a primeira pressão e passar a terceira corrente de ar de alimentação condensada (32) para o interior da planta de separação criogênica de ar;

D. Separar o ar de alimentação por meio de retificação criogênica dentro da planta de separação criogênica de ar para produzir um produto compreendendo oxigênio líquido (80) e bombear o oxigênio líquido (80) para produzir uma corrente de oxigênio líquido pressurizado (81); e

E. Vaporizar a corrente de oxigênio líquido pressurizado (81) passando a corrente de oxigênio líquido pressurizado (81) em troca de calor indireta (200) com a segunda corrente de ar de alimentação (20) e a terceira corrente de ar de alimentação (30), deste modo causando a condensação da segunda corrente de ar de alimentação (20) e da terceira corrente de ar de alimentação (30).

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo

fato de a planta de separação criogênica de ar compreender uma coluna de pressão mais elevada (300) e uma coluna de pressão mais baixa (310).

3. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de a primeira corrente de ar de alimentação (4) ser passada para o interior da coluna de pressão mais elevada (300).

4. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de no mínimo algo da segunda corrente de ar de alimentação (20) ser passado para o interior da coluna de pressão mais elevada (300).

5. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de no mínimo algo da terceira corrente de ar de alimentação (30) ser passado para o interior da coluna de pressão mais elevada (300).

6. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de a segunda corrente de ar de alimentação (20) começar condensação a uma temperatura acima da temperatura do ponto de bolha da corrente de oxigênio líquido pressurizado (81).

7. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de a terceira corrente de ar de alimentação (30) começar condensação em uma temperatura mais baixa do que a temperatura de ponto de bolha da corrente de oxigênio líquido pressurizado (81).

Figura 1

