



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

**(11) PI 0907488-0 B1**



**(22) Data do Depósito: 06/02/2009**

**(45) Data de Concessão: 04/08/2020**

---

**(54) Título:** APARELHO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, MÉTODO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, E, MÉTODOS DE LIQUEFAÇÃO DE UMA CORRENTE DE HIDROCARBONETO

**(51) Int.Cl.:** F25J 1/02.

**(30) Prioridade Unionista:** 08/02/2008 EP 08101424.3.

**(73) Titular(es):** SHELL INTERNATIONALE RESEARCH MAARTSCHAPPIJ B.V.

**(72) Inventor(es):** CLIVE BEEBY; MARIA ISABEL PARRA-CALVACHE.

**(86) Pedido PCT:** PCT EP2009051353 de 06/02/2009

**(87) Publicação PCT:** WO 2009/098278 de 13/08/2009

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 05/08/2010

**(57) Resumo:** APARELHO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, MÉTODO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, E, MÉTODOS DE LIQUEFAÇÃO DE UMA CORRENTE DE HIDROCARBONETO  
Método e aparelho para o resfriamento de um trocador de calor criogênico, empregando um controlador programável que recebe sinais de entrada representando sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas em um processo selecionado, e produz sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas no processo selecionado. O controlador programável pode executar um programa de computador que compreende uma rede de pelo menos três módulos. Os módulos na rede estão interligados tal como um sinal ativador recebido por um segundo e um terceiro módulo dos pelo menos três módulos corresponde a um sinal de comunicação que é gerado quando o primeiro módulo dos pelo menos três módulos atinge um alvo predeterminado para este módulo.

APARELHO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, MÉTODO PARA RESFRIAR UM TROCADOR DE CALOR CRIOGÊNICO, E, MÉTODOS DE LIQUEFAÇÃO DE UMA CORRENTE DE HIDROCARBONETO

[001] A presente invenção refere-se a um método e aparelho para o resfriamento de um trocador de calor criogênico.

[002] Em várias formas de realização aqui divulgadas especificamente, o trocador de calor criogênico é adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural.

[003] Em outro aspecto, a presente invenção se refere a um método de liquefação como uma corrente de hidrocarboneto.

[004] Vários tipos de trocadores térmicos criogênicos são conhecidos. Tais trocadores térmicos criogênicos podem ser usados em métodos de liquefação de uma corrente de gás natural para produzir gás natural liquefeito (LNG). Em um tal caso, o trocador de calor criogênico é geralmente capaz de receber a corrente de hidrocarboneto para ser liquefeita, para a troca de calor da corrente de hidrocarboneto em contato com pelo menos um refrigerante de evaporação parcial, desse modo pelo menos parcialmente liquefazendo a corrente do hidrocarboneto, e descarregar a pelo menos corrente de hidrocarboneto parcialmente liquefeita.

[005] Dependendo do tipo de hidrocarbonetos na corrente, e o nível de pressão sob a qual a corrente de hidrocarboneto passa através do trocador de calor criogênico, uma temperatura típica em que, por exemplo, o gás natural começa a liquefazer, pode ser de  $-135^{\circ}\text{C}$ .

[006] No entanto, antes de estar pronto para a operação normal de esfriamento e/ou liquefação da corrente de hidrocarboneto, o trocador de calor criogênico precisa ser resfriado, por exemplo, como parte de uma rotina de início da usina.

[007] A fim de evitar danos ao trocador de calor criogênico,

incluindo, por exemplo, vazamentos que possam resultar da expansão térmica e distribuições de contração ao longo do trocador de calor criogênico, os operadores e os fabricantes de tais trocadores térmicos criogênicos tipicamente recomendam evitar tanto quanto possível ultrapassar uma certa taxa de temperatura máxima especificada de mudança durante um tempo.

[008] Por outro lado, de modo a minimizar o período improdutivo ou produtivo sub-ideal do trocador de calor criogênico, os operadores tipicamente necessitam resfriar o seu trocador de calor criogênico na taxa mais alta possível.

[009] A patente US 4.809.154 descreve um sistema de controle automatizado para o controle das instalações de produção de gás natural liquefeito do tipo refrigerante misturado, em que os parâmetros funcionais são otimizados. A otimização é executada pelo ajuste dos parâmetros, incluindo o inventário de refrigerante misturado, composição, relação de compressão, e as velocidades da turbina do compressor para atingir o valor mais elevado de produção do produto para cada unidade de energia consumida pela instalação.

[0010] Com mais detalhes, o sistema controlador de processo da patente US 4.809.154 é implementado em um sistema de computador de processamento paralelo, possibilitando o controle paralelo dos processos a serem executados em múltiplos processadores tendo acesso a uma armazenagem comum, em que os valores representativos do estado corrente de cada sensor e cada controlador associado com a instalação de produção são armazenados. Para gerenciar os processos de controle paralelos, uma fila de retorno é mantida, assim como uma tabela de prioridade, que é usada para resolver as contenções entre os circuitos paralelos do processo de operação.

[0011] O sistema controlador de processo da patente US 4.809.154 pode funcionar de forma satisfatória para otimizar ou manter a quantidade ou qualidade ideal do gás liquefeito sendo produzido, enquanto o processo de liquefação funciona. No entanto, o sistema controlador de

processo da patente US 4.809.154 não é adequado para o controle do trocador de calor criogênico durante o resfriamento inicial na partida, porque isso requer uma sequência de etapas a serem efetuados, as quais não podem ser manipuladas usando o sistema de tabelas de prioridade e as filas de petição e retorno.

[0012] A presente invenção fornece um aparelho para o resfriamento de um trocador de calor criogênico adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como um corrente de gás natural, em que o trocador de calor criogênico é disposto para receber a corrente de hidrocarboneto a ser liquefeita e um refrigerante, para trocar calor entre a corrente de hidrocarboneto e o refrigerante, assim pelo menos parcialmente liquefazendo a corrente de hidrocarboneto, e descarregar a pelo menos corrente de hidrocarboneto parcialmente liquefeita e o refrigerante gasto que passou através do trocador de calor criogênico, o aparelho compreendendo:

- um circuito de recirculação do refrigerante para recircular o refrigerante gasto de volta para o trocador de calor criogênico, o circuito de recirculação do refrigerante compreendendo pelo menos um compressor, uma válvula de reciclo do compressor, um refrigerador e uma primeira válvula JT;

- um controlador programável disposto para:

- (i) receber sinais de entrada que representam os sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas;

- (ii) produzir sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas; e,

- (iii) executar um programa de computador, o programa de computador compreendendo uma rede de pelo menos três módulos, em que um ou mais dos pelo menos três módulos recebem uma representação de um ou mais dos sinais de entrada e produzem as representações de um ou mais dos sinais de controle;

- e em que os pelo menos três módulos são cada um disposto

para:

(a) esperar até que um sinal de ativação seja recebido; e,  
(b) iniciar a execução de uma sequência predeterminada de uma ou mais instruções legíveis de computador após a recepção do sinal de ativação pelo menos até que um alvo predeterminado do módulo para este módulo seja atingido;

e que os módulos na rede estão interligados de tal forma que o sinal de ativação recebido por um segundo e um terceiro módulo dos pelo menos três módulos corresponde a um sinal de comunicação que é gerado sobre o primeiro módulo dos pelo menos três módulos que alcançam o alvo predeterminado para este módulo.

[0013] Em outro aspecto, a invenção fornece um método para o resfriamento de um trocador de calor criogênico adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural, compreendendo as etapas de:

- fornecer um trocador de calor criogênico disposto para receber a corrente de hidrocarboneto a ser liquefeita e um refrigerante, para trocar calor entre a corrente do hidrocarboneto e o refrigerante, desse modo pelo menos parcialmente liquefazendo a corrente do hidrocarboneto, e descarregar a pelo menos corrente de hidrocarboneto parcialmente liquefeita e o refrigerante gasto que passou através do trocador de calor criogênico;

- fornecer um circuito de recirculação de refrigerante para recircular o refrigerante gasto de volta ao trocador de calor criogênico, o circuito de recirculação do refrigerante compreendendo pelo menos um compressor, uma válvula de reciclo do compressor, um refrigerador e uma primeira válvula JT;

- ativar um controlador programável que:

(i) recebe sinais de entrada que representam os sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas;

(ii) produz sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas; e,

(iii) executa um programa de computador, o programa de computador compreendendo uma rede de pelo menos três módulos, em que um ou mais dos pelo menos três módulos recebem uma representação de um ou mais dos sinais de entrada e produzem representações de um ou mais dos sinais de controle;

e em que cada um dos pelo menos três módulos:

(a) espera até que um sinal de ativação seja recebido; e,

(b) inicia a execução de uma sequência predeterminada de uma ou mais instruções legíveis de computador após receber do sinal de ativação pelo menos até que um alvo modular predeterminado para este módulo seja atingido;

e em que um sinal de comunicação é gerado sobre o primeiro módulo dos pelo menos três módulos que alcança o alvo predeterminado para este módulo, em que o sinal de comunicação é passado para um segundo e um terceiro módulo dos três ou mais módulos onde o sinal de comunicação atua como o sinal de ativação para o segundo e o terceiro módulos.

[0014] Após o trocador de calor criogênico ter sido esfriado com o método como definido acima e/ou utilizando os aparelhos acima definidos, a corrente de hidrocarboneto pode ser liquefeita em uma ou mais etapas, incluindo a troca de calor da corrente de hidrocarboneto no trocador de calor criogênico, de modo a produzir um produto de hidrocarboneto liquefeito.

[0015] A presente invenção será agora ilustrada por meio de exemplo apenas, e com referência às formas de realização e aos desenhos esquemáticos não limitativos acompanhantes em que:

a Fig. 1 mostra esquematicamente uma disposição de trocador de calor criogênico de acordo com uma forma de realização;

a Fig. 2 mostra esquematicamente uma disposição de trocador

de calor criogênico de acordo com outra forma de realização;

a Fig. 3 mostra esquematicamente um diagrama de blocos de módulos para o resfriamento automático do trocador de calor criogênico da Fig. 1 ou Fig. 2;

a Fig. 4 mostra esquematicamente uma disposição de trocador de calor criogênico principal de acordo com outra forma de realização da invenção como usada em um teste;

a Fig. 5 mostra esquematicamente o alinhamento da Fig. 4 que ilustra as temperaturas e pressões monitoradas;

a Fig. 6 mostra um diagrama de blocos dos módulos como usados no teste em conjunto com o alinhamento da Fig. 4; e,

a Fig. 7 mostra esquematicamente uma estrutura alternativa de módulo que pode ser incorporada no diagrama de blocos da Fig. 6.

[0016] Para o propósito desta descrição, um único número de referência será atribuído a uma linha (conduto), assim como uma corrente carregada nesta linha (conduto). Os mesmos números de referência se referem aos componentes, correntes ou linhas (condutos) similares.

[0017] São descritos os métodos e aparelhos que empregam um controlador programável que recebe sinais de entrada que representam os sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas em um processo selecionado, e produz sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas no processo selecionado. O controlador programável pode executar um programa de computador que compreende uma rede de pelo menos três módulos.

[0018] Uma tal divisão em módulos facilita ainda mais a flexibilidade e a facilidade de gerenciamento do processo de resfriamento, e a manutenção do controlador programável. Vários módulos podem manipular uma ou mais válvulas e possui pelo menos um alvo modular claramente definido. Os módulos podem operar de forma independente um do outro, mas pode haver

variáveis comuns monitoradas por diversos módulos que podem ser afetados pela ação de mais do que um módulo. Este tipo de abordagem modular que emprega módulos independentemente executáveis, torna a invenção adequada para automatizar o resfriamento de qualquer tipo de trocador de calor, incluindo aqueles dos assim chamados tipo bobina enrolada e tipo placa de quilha.

[0019] Um ou mais dos pelo menos três módulos recebem uma representação de um ou mais dos sinais de entrada e produzem representações de um ou mais dos sinais de controle. Os pelo menos três módulos são cada um disposto para:

(a) esperar até que um sinal de ativação seja recebido; e,

(b) iniciar a execução de uma sequência predeterminada de uma ou mais instruções legíveis de computador após a recepção do sinal de ativação pelo menos até um alvo predeterminado do módulo para que o módulo seja alcançado.

[0020] Um sinal de comunicação é gerado o qual marca se o módulo atingiu ou alcançou o alvo modular predeterminado. O sinal de comunicação pode ser gerado pelo próprio módulo, em outras partes do controlador programável, ou pode compreender, por exemplo, um sinal de sensor que indica que uma condição predeterminada ou em torno do trocador de calor criogênico foi atingida. O alvo modular predeterminado pode ser um resultado intermediário para o módulo, caso em que o módulo pode continuar a executar mais instruções legíveis por computador, por exemplo, para atingir um alvo modular adicional. Alternativamente, o sinal de comunicação pode ser a marcação da conclusão da execução do módulo.

[0021] Os módulos na rede estão interligados de tal maneira que o sinal de ativação recebido por um segundo e um terceiro módulo dos pelo menos três módulos corresponde a um sinal de comunicação que é gerado quando o primeiro módulo dos pelo menos três módulos atingiu o alvo

predeterminado para este módulo.

[0022] Esta forma de interligação dos módulos leva em conta o controle de um processo sequencial em que pelo menos uma determinada tarefa necessita ser concluída antes de iniciar uma ou mais de outras tarefas, e em que as pelo menos duas tarefas necessitam ser realizadas uma após a outra, enquanto outras tarefas necessitam ser realizadas simultaneamente.

[0023] Não há nenhuma necessidade de prioridade de manejo das várias tarefas, pois cada módulo espera até que receba um sinal de ativação antes de poder começar a cumprir a sua tarefa, e isso gera um sinal de comunicação após a conclusão de sua tarefa. A conclusão da tarefa pode ser representada pelo sinal de comunicação que marca a realização de um alvo predeterminado associado com a tarefa para este módulo.

[0024] Qualquer sinal que marca a conclusão do alvo modular predeterminado pode ser transmitido e/ou ser recebido por um ou mais dos próximos módulos que podem depois trabalhar em uma ou mais das próximas tarefas do processo sequencial. Quando o sinal de comunicação for recebido por dois ou mais dos próximos módulos, os dois ou mais dos próximos módulos estão prontos para iniciar a execução de suas instruções legíveis de computador em paralelo um com o outro.

[0025] Para os propósitos de interpretação das presentes reivindicações e relatório descritivo, o sinal de comunicação pode ser gerado após atingir o alvo ou pode ser qualquer sinal que possa ser inferido em que o módulo atingiu o alvo predeterminado.

[0026] Ficará entendido que o segundo e/ou o terceiro sinais de comunicação podem ser gerados quando o segundo e/ou o terceiro módulos tiverem alcançado os seus respectivos alvos modulares, em que o segundo e o terceiro sinais de comunicação podem atuar como sinal(s) de ativação para um ou mais módulos subsequentes ou ser utilizados de outra forma no procedimento.

[0027] A tarefa em um módulo selecionado pode ter que ser realizada enquanto é ligada por alguma restrição em uma ou mais das variáveis controladas enquanto estas uma ou mais variáveis controladas não são controladas pelo módulo selecionado em questão, mas, por exemplo, por um outro módulo simultaneamente ativo. Em um tal caso, a execução da tarefa do módulo selecionado automaticamente experimentará um atraso se mais adiante a execução de sua tarefa levar a uma violação da referida restrição. Este atraso pode terminar quando o outro módulo, que influencia a variável controlada, avança na execução de sua tarefa de tal forma que a restrição é retirada ou deslocada dando espaço para o módulo selecionado em questão avançar ainda mais na execução de sua tarefa.

[0028] Assim, um efeito da estrutura da rede proposta dos módulos que envolvem módulos independentes que operam em paralelo uns com os outros por meio do quais uma ação de controle de um dos módulos é restrita por uma variável que é influenciada pela manipulação de uma ou mais variáveis manipulada por outro módulo, é que as tarefas do módulo são quase sequencialmente executadas quando necessário e se possível simultaneamente. Isto torna este tipo de rede de módulo excelentemente adequado para uma operação tal como o resfriamento de um trocador de calor criogênico dentro de certas restrições.

[0029] Uma opção adicional para a interligação de pelo menos dois dos módulos é que um sinal de conteúdo é gerado em um módulo que é recebido por um outro módulo e provoca uma mudança na operação do módulo diferente da partida deste módulo. Por exemplo, o sinal de conteúdo pode ativar uma mudança de parâmetro no outro módulo quando uma determinada condição for alcançada no primeiro módulo que faz com que o sinal de conteúdo seja gerado.

[0030] A rede de módulos pode ser de tal forma que o sinal de ativação que marca o início da execução das instruções predeterminadas para

um módulo particular, pode ser o sinal de ativação recebido por este módulo, por meio do qual pode ser qualquer número natural. Por exemplo, um módulo selecionado pode necessitar esperar para, por exemplo, três outros módulos atingirem os seus alvos após o que o sinal de comunicação é gerado, antes que ele possa começar a executar sua sequência de instruções legíveis por computador. Em um tal caso, pode ter que esperar até que tenha recebido três sinais de comunicação atuando como sinais de ativação, e assim o sinal de ativação relevante, que marca o início da execução da sequência predeterminada de instruções para um módulo particular, é neste exemplo precedido por dois sinais de ativação mais no princípio.

[0031] O controlador programável pode estar incorporado em um sistema de controle distribuído (DCS), em que, por exemplo, os módulos fornecem uma saída através de um servidor de interface, tal como um OLE (ligação e incorporação de objetos), para o controle de processo (OPC) que pode se comunicar entre o programa de computador e vários blocos de interface que podem estar presentes no DCS. Em uma tal disposição, o DCS pode retomar o controle das variáveis manipuladas (tais como as válvulas selecionadas) sem esperar pelo controlador programável para transferir o controle como pode ser desejado durante as situações de emergência ou coisa parecida.

[0032] Os inventores associados com o presente pedido de patente têm contemplado que o tipo atualmente divulgado de controlador programável é de maneira ideal adequado para a automação do resfriamento de um trocador de calor criogênico adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural.

[0033] O resfriamento automatizado de um trocador de calor criogênico vantajosamente facilita o resfriamento do trocador de calor criogênico na taxa mais alta possível, sem exceder a taxa máxima especificada de mudança de temperatura. Quando se resfria o trocador de

calor criogênico sob controle manual, um operador tipicamente tem de manter uma margem mais ampla entre a taxa de mudança de temperatura e a máxima especificada.

[0034] Além disso, a experiência revelou que em cerca de 30 % do tempo, a taxa máxima especificada de mudança de temperatura é ultrapassada inadvertidamente, devido à complexidade da operação. Graças à automação como aqui descrita, se espera que este percentual seja reduzido significativamente. Os inventores estimam que a ultrapassagem da taxa máxima de mudança de temperatura pode ser reduzida em cerca de 12 % do tempo, ou pelo menos do que 15 % do tempo.

[0035] Além do mais, os métodos e aparelhos aqui divulgados também podem ser usados para evitar um ou mais gradientes de temperatura espacial no ou em torno do trocador de calor criogênico de exceder um valor máximo recomendado.

[0036] As vantagens dos métodos e aparelhos aqui descritos são mais acentuadas para o resfriamento nos trocadores térmicos criogênicos contra-correntes, de preferência usando um refrigerante externo, em que a evaporação dos fluxos refrigerantes contra-correntemente em relação à corrente ou correntes que devem ser esfriadas no trocador de calor criogênico em contato com o refrigerante de evaporação, do que para o resfriamento dos trocadores térmicos criogênicos co-correntes.

[0037] Os métodos e aparelhos aqui divulgados fazem uso das chamadas variáveis manipuladas e variáveis controladas. Além disso, há também, opcionalmente, uma ou mais variáveis monitoradas.

[0038] No relatório descritivo e nas reivindicações o termo ‘Variável manipulada’ é usado para se referir às variáveis que estão sujeitas às ações de controlo pelo controlador programável, e o termo ‘variáveis controladas’ é usado para se referir às variáveis que devem ser mantidas pelo controlador programável em um valor predeterminado (mais adiante referido como “ponto

de fixação”) ou dentro de uma faixa predeterminada (“faixa de fixação”). O ponto de fixação ou faixa de fixação não deve ser uma entidade fixa. De fato, muitas vezes estará sujeito a alterações (calculado durante o resfriamento, ou como uma sequência predeterminada ao longo do tempo). Como uma variável controlada, uma ‘variável monitorada’ é medida e opcionalmente registrada, mas em contraste com uma variável controlada, não deve ser mantida pelo controlador programável em um ponto de fixação ou dentro de uma faixa de fixação. No entanto, as variáveis monitoradas podem servir como entrada para o controlador programável para que possa tomar decisões com base nestas variáveis monitoradas, ou para gerar sinais de comunicação, ou, por exemplo, dar origem ao controlador programável para emitir um sinal de alerta ou para fazer uma pausa e/ou abortar o procedimento automático.

[0039] Preferivelmente, a uma ou mais variáveis controladas compreendem uma taxa de alteração na temperatura ao longo do tempo de um ou mais de: temperatura do refrigerante do lado de sucção da primeira válvula JT; temperatura do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT; temperatura da corrente de hidrocarboneto em um ponto dentro do trocador de calor criogênico; e, temperatura da corrente de hidrocarboneto a jusante do trocador de calor criogênico. Isto fornece uma indicação direta que facilita ainda mais o resfriamento do trocador de calor criogênico sem exceder a taxa máxima especificada de mudança de temperatura.

[0040] Em lugar de, ou em combinação com a taxa de mudança na temperatura, a uma ou mais variáveis controladas podem compreender um gradiente de temperatura selecionado em ou ao redor do trocador de calor criogênico. Isso facilita o resfriamento do trocador de calor criogênico sem ultrapassar um gradiente de temperatura espacial máximo especificado. Um gradiente de temperatura espacial adequado para manter dentro de um máximo predeterminado é o gradiente de temperatura entre um tubo refrigerante e a parede da estrutura.

[0041] Como será observado pela pessoa versada na técnica, a taxa de mudança de temperatura máxima e/ou o gradiente de temperatura espacial máximo é geralmente dependente do tipo e/ou projeto específico do trocador de calor que está sujeita ao processo de resfriamento. As recomendações específicas sobre tais valores podem ser fornecidas pelo fabricante.

[0042] Quando o trocador de calor criogênico compreende um lado da estrutura para a evaporação do refrigerante e um lado do tubo para o auto-resfriamento do refrigerante, o gradiente de temperatura espacial selecionado pode refletir o diferencial de temperatura entre um lado da estrutura do trocador de calor criogênico e um lado do tubo contendo refrigerante.

[0043] Existem outros gradientes de temperatura preferidos a serem usados, por exemplo, em alinhamentos em que a jusante do refrigerante e a montante da primeira válvula JT um separador de líquido/vapor é fornecido no circuito de recirculação do refrigerante, para receber um refrigerante parcialmente condensado e separar a corrente de refrigerante parcialmente condensado em uma fração pesada de refrigerante líquido e uma fração leve de refrigerante gasoso e para descarregar a fração pesada de refrigerante líquido através de uma saída de líquido e a fração leve de refrigerante gasoso através de uma saída de gás, em que as frações são passadas pelo trocador de calor criogênico em que a primeira válvula JT é disposta para controlar a passagem de uma destas frações, preferivelmente a fração leve de refrigerante.

[0044] O gradiente de temperatura espacial selecionado pode em um tal alinhamento refletir um ou mais do: diferencial de temperatura entre o refrigerante gasto e o refrigerante entre a saída de gás e a entrada do refrigerante gasoso do trocador de calor criogênico; e, diferencial de temperatura entre o refrigerante gasto e o refrigerante entre a saída de líquido e a entrada do refrigerante líquido do trocador de calor criogênico.

[0045] Outras possíveis variáveis controladas incluem as variáveis

indicativas das condições de operação de um ou mais compressores, tais como as condições de onda. Um assim chamado parâmetro de desvio de onda pode ser determinado com base nos dados do sensor para quantificar o desvio entre a onda e as condições reais de operação do compressor. Os dados de sensor típicos que são levados em conta para a determinação do parâmetro de desvio de onda incluem o fluxo através do estágio de compressor relevante e a pressão de admissão e descarga do estágio relevante.

[0046] Para automaticamente esfriar um trocador de calor criogênico, a um ou mais variáveis manipuladas podem compreender um ou ambos de: uma primeira regulagem de válvula JT que representa uma medida da quantidade de abertura da primeira válvula JT; e, uma regulagem da válvula de reciclo do compressor que representa uma medida da quantidade de abertura da válvula de reciclo do compressor. A quantidade de abertura da primeira válvula JT afeta muito diretamente a taxa de esfriamento do trocador de calor criogênico, porque é um dos fatores que determinam o efeito Joule-Thomson que a válvula JT possui sobre a corrente de refrigerante quando ele passa através da válvula JT, que determina o poder de esfriamento do refrigerante. A quantidade de abertura da válvula de reciclo do compressor também afeta a taxa de esfriamento do trocador de calor criogênico porque também influencia o efeito JT na primeira válvula JT porque é uma forma de controlar a pressão e a taxa de fluxo do refrigerante.

[0047] Naturalmente, existem outras variáveis manipuladas que podem controlar a pressão e/ou a taxa de fluxo do refrigerante, tais como a velocidade do compressor. Assim, a velocidade do compressor também pode ser usada como uma das variáveis manipuladas. No entanto, em contraste com a velocidade, uma válvula é um item muito adequado para manipular em uma sequência de controle que tem um efeito relativamente imediato sobre a pressão.

[0048] Os métodos e aparelhos aqui divulgados podem ser utilizados

em um método de liquefação de uma corrente de hidrocarboneto tal como uma corrente de gás natural. Em um tal caso, o resfriamento do trocador de calor criogênico é seguido pela operação normal em que a corrente de hidrocarboneto é esfriada no trocador de calor criogênico até que ele seja liquefeito, preferivelmente, seguido pelo sub-esfriamento no trocador de calor criogênico ou em um subsequente trocador de calor.

[0049] É desejável liquefazer uma corrente de gás natural por várias razões. Como um exemplo, o gás natural pode ser armazenado e transportado por longas distâncias mais rapidamente como um líquido do que na forma gasosa, porque ele ocupa um volume menor e não precisa ser armazenado em uma pressão elevada.

[0050] Geralmente, o gás natural compreendendo predominantemente metano, entra em uma usina de LNG em pressões elevadas e é pré-tratado para produzir uma carga de alimentação purificada adequado para a liquefação em temperaturas criogênicas. O gás purificado é processado através de uma pluralidade de estágios de esfriamento usando trocadores térmicos para progressivamente reduzir a sua temperatura até que a liquefação seja alcançada. O gás natural líquido é depois ainda opcionalmente esfriado, e expandido através de um ou mais estágios de expansão na pressão atmosférica final adequada para o armazenamento e transporte. O vapor ocorrido subitamente de cada estágio de expansão pode ser usado como uma fonte de gás combustível da usina.

[0051] É observado que a US 2006/0213223 A1 divulga uma usina de liquefação e método para a produção de gás natural liquefeito. O controle da usina pode ser total ou parcialmente automatizado, tal como mediante o uso de um computador apropriado, um circuito lógico programável (PLC), usando esquema de circuito fechado e circuito aberto, utilizando o controle proporcional, integral, derivado (PID). No entanto, a US 2006/0213223 não ensina um programa de computador ou um algoritmo como descrito no

presente pedido.

[0052] Como esquematicamente mostrado na Fig. 1, é fornecido um trocador de calor criogênico 1 disposto para receber, através do conduto 2 e da entrada da corrente de hidrocarboneto 7, a corrente de hidrocarboneto que deve ser liquefeita, de modo a trocar o calor entre a corrente de hidrocarboneto e pelo menos um refrigerante de evaporação parcial 3. Como resultado da troca de calor, a corrente de hidrocarboneto pode ser pelo menos parcialmente liquefeita. A corrente de hidrocarboneto preferivelmente pelo menos parcialmente liquefeita é descarregada através da saída da corrente de hidrocarboneto 8 no conduto 4. Na forma de realização como estabelecida, o conduto 2 e o conduto 4 se conecta através de um lado do tubo 29. No entanto, outros tipos de trocadores térmicos são possíveis.

[0053] O trocador de calor criogênico 1 compreende uma entrada de refrigerante 5 para um refrigerante externo e uma saída de refrigerante 6 para o refrigerante gasto que passou através do trocador de calor criogênico. Um circuito de recirculação do refrigerante 10 é fornecido para recircular o refrigerante gasto de volta para a entrada 5. O circuito de recirculação do refrigerante 10 compreende, pelo menos, um compressor 11, uma válvula de reciclo do compressor 12, um refrigerador 13, e uma primeira válvula Joule-Thompson (primeira JT) 14.

[0054] Nas formas de realização práticas da invenção, uma válvula JT pode ser usada em combinação com um expensor. No entanto, em particular durante o resfriamento do trocador de calor, a válvula JT é preferivelmente usada para controlar o esfriamento.

[0055] Nas formas de realização práticas da invenção, o compressor pode consistir de uma pluralidade de estágios de compressão, por exemplo, 15 estágios de compressão ou mais. Um número destes estágios, por exemplo, 15 destes estágios, pode ser fornecido na forma de um compressor axial ou compressor de centrífuga em um invólucro. Cada estágio pode compreender

uma válvula de reciclo aplicada, e/ou uma válvula de reciclo única pode ser compartilhada por qualquer número de estágios subsequentes. Vários compressores ou invólucros de compressor podem ser dispostos em série um após o outro para formar uma fileira de compressores. Cada invólucro (ou estágio de compressor) pode ser seguido por qualquer número de refrigeradores opcionais (ou interrefrigeradores), e tambores de tombo para remover qualquer líquido do vapor comprimido antes de passar o vapor comprimido no próximo estágio de compressão. Após o último estágio de compressão, a corrente de refrigerante comprimida pode ser esfriada.

[0056] No entanto, para o propósito de ilustrar a presente invenção, um compressor esquematicamente simplificado colocado em alinhamento é mostrado nas Figs. 1 e 2, com apenas um compressor desenhado em uma válvula de reciclo.

[0057] Em operação, o refrigerante gasto (pelo menos parcialmente evaporado) é retirado do trocador de calor 1 através de uma saída 6, e pelo menos uma parte é passada para uma entrada de sucção do compressor 11 através do conduto 25.

[0058] A parte gasosa da corrente de refrigerante gasto no conduto 25 é comprimida para produzir um corrente de refrigerante comprimida 16 que é subsequentemente esfriada em um ou mais refrigeradores, aqui representado como refrigerador 13, desse modo pelo menos parcialmente condensando a corrente de refrigerante comprimida 16 para formar pelo menos uma corrente de refrigerante parcialmente condensada 17. A pelo menos uma corrente de refrigerante parcialmente condensada 17 é ampliada sobre a primeira válvula JT 14 e subsequentemente levado para o trocador de calor 1 através de uma entrada 5.

[0059] Como mostrado na Fig. 1, a corrente de refrigerante flui co-correntemente com a corrente de hidrocarboneto (da esquerda para a direita) através de um trocador de calor 1. No entanto, o fluxo pode ser disposto

contra-correntemente ao invés disso, tal como é o caso, por exemplo, na Fig. 2.

[0060] Na figura. 2, uma disposição alternativa de trocador de calor criogênico é apresentada que compreende os mesmos elementos como a forma de realização da Fig. 1, e, além disso, inclui um lado do tubo refrigerante 15 para o auto-resfriamento do refrigerante. Tanto a corrente de hidrocarboneto 2 quanto o refrigerante são submetidos a troca térmica em contato com a evaporação do refrigerante no trocador de calor 1. A corrente de refrigerante comprimido 16 é subsequentemente esfriada em um ou mais refrigeradores, aqui representados como refrigerador 13, seguido pelo esfriamento no trocador de calor 1, através do lado do tubo 15, pelo menos assim parcialmente condensando a corrente de refrigerante comprimida 16 para formar pelo menos a corrente de refrigerante parcialmente condensada 17. Pelo menos a corrente de refrigerante parcialmente condensada auto-esfriada 17, é removida do trocador de calor na saída 18 e levada através da primeira válvula JT 14 antes que ela seja passada através da entrada 5, no trocador de calor 1, onde é deixada para pelo menos parcialmente evaporar.

[0061] Opcionalmente, um sistema de preparação de refrigerante pode ser fornecido que é capaz de mudar o inventário do refrigerante, em particular no caso de um refrigerante misturado.

[0062] Os inventores verificaram que a sequência de etapas e tarefas pelas quais um trocador de calor criogênico é melhor resfriado, pode de forma ideal ser automatizada usando um controlador programável como aqui descrito, em que uma ou mais de:

- uma taxa de alteração na temperatura do refrigerante no lado de sucção da primeira válvula JT;
- uma taxa de alteração na temperatura do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT;
- uma taxa de alteração na temperatura da corrente de

hidrocarboneto em um ponto dentro do trocador de calor criogênico;

- uma taxa de alteração na temperatura da corrente de hidrocarboneto a jusante do trocador de calor criogênico;

- um primeiro diferencial de temperatura na corrente de refrigerante através da primeira válvula JT (diferença na temperatura do refrigerante no lado de sucção da primeira válvula JT e do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT);

- um gradiente de temperatura que reflete o diferencial de temperatura entre o refrigerante gasto (na ou próximo da saída 6 ou conduto 25) e o refrigerante na entrada 5 do trocador de calor criogênico 1;

- um gradiente de temperatura que reflete o diferencial de temperatura entre um lado da estrutura do trocador de calor criogênico 3 e um lado do tubo de contendo refrigerante (tal como o lado do tubo 15);

- uma pressão de sucção na corrente de refrigerante em um lado de sucção do compressor;

são utilizados como variáveis controladas, enquanto:

- a regulagem da primeira válvula JT, por exemplo, que representa uma medida da quantidade de abertura da primeira válvula JT ( $X_{14}$ ) ou do fluxo através da primeira válvula JT; e/ou

- uma regulagem da válvula de reciclo do compressor, por exemplo, que representa uma medida da quantidade de abertura da válvula de reciclo do compressor ( $X_{12}$ ) ou do fluxo através da válvula de reciclo;

são utilizadas como variáveis manipuladas. Quando um sistema de preparação for fornecido, as válvulas de preparação dos componentes de refrigerante também podem ser utilizadas como variáveis manipuladas.

[0063] Além disso, uma ou mais de:

- uma ou mais temperaturas absolutas em um ou mais locais no ou em torno do trocador de calor criogênico; e,

- pressão de descarga do compressor;
- podem ser usadas como variável controlada.

[0064] A Figura 3 mostra um diagrama de blocos esquemático contendo uma estrutura de módulo de exemplo do programa de computador no controlador programável para o método e aparelho de resfriamento automático. Um primeiro módulo 201 define as condições iniciais. O módulo 201 pode conter uma interface gráfica com um resumo dos avisos e modos de informação. Pode conter informação sobre as condições iniciais críticas e não críticas. Em caso de ocorrência de uma condição crítica, o módulo termina o programa de computador, desse modo interrompendo o procedimento. O procedimento pode ser retomado e/ou reiniciado após a condição crítica ter sido resolvida, manualmente por um operador ou pela execução de um procedimento de controle automatizado para restaurar a condição inicial. No caso de uma condição inicial não crítica, o módulo de 201 emite um aviso. Este módulo pode ainda iniciar o monitoramento das variáveis críticas. O alvo do módulo é atingido quando todas as variáveis críticas estão dentro das faixas predeterminadas. A ativação final pode então ser gerada.

[0065] Exemplos de condições iniciais críticas são:

- a primeira válvula JV 14 não é suficientemente fechada (por exemplo, mais de 0,1 % aberta ou outro número adequado);
- a pressão no circuito refrigerante é mais baixa do que a descarga do compressor 11;
- o compressor 11 não está em linha e em execução, como pode ser determinado através da medição da velocidade do compressor (por exemplo, o compressor funcionando pelo menos a 3400 rpm ou outra velocidade adequada), e a verificação de que as válvulas de sucção e descarga nos compressores estão abertas;
- a pressão do refrigerante é muito elevada (por exemplo, acima de 20 barg, por exemplo, ou outra estimativa adequada);

- a palheta guia de entrada do compressor (IGV) é aberta.

[0066] Exemplos de condições iniciais não críticas são:

- várias temperaturas reais, por exemplo, temperatura do refrigerante diretamente a montante e diretamente a jusante da primeira válvula JV 14, e/ou diferenciais de temperatura;

- as válvulas de reciclo do compressor não estão totalmente abertas (por exemplo, menos do que 99 % aberto ou qualquer outro valor adequado); e,

- a pressão do refrigerante comprimido abaixo de um valor mínimo predeterminado (pois isso pode desnecessariamente atrasar os processos de resfriamento). Um valor mínimo tipicamente adequado é de 18 barg.

[0067] Claramente, o módulo 201 pode ser precedido por um ou mais outros módulos, por exemplo, módulos relacionados com o resfriamento para um nível de temperatura intermediário ou semelhante, e ele pode começar após a recepção de um ou mais sinais de ativação.

[0068] Assim que o sinal de comunicação é gerado, pode ser emitido e recebido pelo módulo 202, que possui um primeiro alvo modular que se abre a partir da primeira válvula JT 14. Isto pode envolver um algoritmo que leva em conta qualquer comportamento não linear da válvula JT. Logo que uma tendência de esfriamento é detectada, a válvula será fechada parcialmente para evitar uma taxa de esfriamento muito elevada.

[0069] O sinal de comunicação do módulo 202 (ou um sinal correspondente) ativa o módulo 203, que depois começa por simplesmente esperar algum tempo. O propósito é esperar pelo aparelho estabilizar após a primeira ação crítica do módulo 202. O tempo de espera pode depender da condição final do módulo 202.

[0070] Um sinal correspondente ao sinal de comunicação do módulo 203 é recebido por dois módulos (204, 205), que são conseqüentemente

ativados simultaneamente.

[0071] O módulo 204 ainda abre a primeira válvula JT 14. Em particular, na forma de realização da Fig. 2, o forte esfriamento pode causar a condensação do refrigerante. Pouco antes que a condensação ocorra, os movimentos da válvula são preferivelmente diminuídos, e o momento em que a condensação é detectada a válvula pode ser fechada parcialmente para evitar uma taxa de esfriamento muito elevada que de outra maneira seria motivada por um aumento repentino na taxa de fluxo devido à condensação (um aumento de 100 tpd em 10 se vê que não é comum). Depois que a condensação é detectada, a abertura da válvula pode ser normalizada e contínua até que o efeito JT da abertura da válvula seja diminuído. Este é o alvo do módulo.

[0072] O efeito JT pode ser monitorado durante a outra abertura da válvula JT, por exemplo, com base em uma diferença de temperatura entre a temperatura do refrigerante a montante da válvula JT e a temperatura do refrigerante a jusante da válvula JT. Uma hipótese pode ser feita de que o efeito JT está presente se a diferença de temperatura excede a 8°C.

[0073] A condensação pode ser detectada pelo adiamento tanto da temperatura quanto da medição do fluxo na válvula JT. Para o refrigerante que flui através da primeira válvula JT 14, a temperatura do refrigerante a jusante da válvula JT 14 pode ser usada e/ou o fluxo através da válvula JT, que por sua vez pode ser estimado pela determinação de um diferencial de pressão sobre a válvula JT 14.

[0074] Nas formas de realização preferidas, o módulo não pode fechar a válvula JT 14 mais do que uma abertura mínima correspondente à abertura no início deste módulo.

[0075] As mudanças no efeito JT após outra abertura da válvula JT podem ser reduzidas. No entanto, ao mesmo tempo a pressão do refrigerante é aumentada quando o módulo 205 for o módulo 205 que está executando suas

instruções ao mesmo tempo tal como o módulo 204. O módulo 205 manipula a válvula de reciclo 12 para alcançar um desvio de onda alvo do compressor (ou o número de estágios de compressão). Este módulo monitora o desvio de onda do compressor 11, e fecha a válvula de reciclo 12 se o desvio de onda excede um desvio máximo predeterminado. Um desvio máximo predeterminado adequado é de 0,3.

[0076] Se existirem múltiplas válvulas de reciclo, por exemplo, em múltiplos estágios de compressor, cada válvula de reciclo pode ser manipulada individualmente (mas simultaneamente), levando em conta um parâmetro de desvio de onda aplicado com relação ao estágio correspondente através do qual cada válvula de reciclo particular controla a recirculação.

[0077] Visto que o fechamento da válvula de reciclo 12 afeta a pressão de sucção do compressor, esta pressão é preferivelmente monitorada pelo módulo 205 para não ir abaixo de um limite recomendado, tal como, por exemplo, 1,8 barg. O fechando da válvula de reciclo diminui a pressão de sucção igualmente. Portanto, o fechamento da válvula de reciclo é feito de forma condicional para evitar fazer com que a pressão de sucção vá para baixo do valor alvo determinado. O objetivo é manter uma elevação (aumento) sobre a pressão de descarga mediante o fechamento das válvulas de reciclo continuamente enquanto se monitora o desvio de onda. Quando o desvio de onda está abaixo do nível mínimo considerado (por exemplo, 0.1), então a atividade do módulo é interrompida. No entanto o desvio de onda é monitorado em todo o procedimento completo de resfriamento final, e as válvulas de reciclo fechadas quando permitido pelo desvio de onda e a pressão de sucção está dentro de uma faixa predeterminada.

[0078] Quando a temperatura do trocador de calor criogênico 1 alcançou a sua temperatura de operação, um sinal de comunicação é gerado nos módulos de 204 e 205, que é recebido pelo módulo 206. Para um trocador de calor que é utilizado para resfriar o metano suficientemente para ser

liquefeito, uma temperatura de operação pode ser  $-160^{\circ}\text{C}$ . Neste caso, visto que ambos os módulos que precedem o módulo final 206 geram seu sinal de comunicação em resposta da mesma condição (isto é, a temperatura do trocador de calor criogênico atingiu uma temperatura de operação predeterminada), um sinal de ativação único correspondente que marca dita condição e é passado para o módulo em questão é considerado um sinal que corresponde aos sinais de comunicação de ambos os módulos do módulo em questão.

[0079] O módulo 206 totalmente fecha a válvula de reciclo 12, tanto quanto possível, contanto que o desvio de onda não o interrompa a partir da ocorrência. Se o desvio de onda ainda impede o fechamento da válvula de reciclo, neste caso o valor da onda é muito baixo (tipicamente abaixo de 0,1), uma mensagem de aviso pode ser gerada e emitida para alertar o operador que um ajuste IGV pode ser necessário. Um movimento IGV possui um efeito semelhante como a do fechamento da válvula de reciclo 12. Entretanto, qualquer movimento IGV pode ser forçado pelo peso molecular do refrigerante de passagem, que deve ultrapassar um valor mínimo predeterminado. Um peso molecular mínimo MR típico é de 24 g/mol. Obviamente, este sinal de aviso pode não ser uma opção útil se nenhum IGV estiver presente no compressor em uso.

[0080] Visto que um movimento IGV é considerado ser um último recurso, foi contemplado apenas para alertar o operador para a possível necessidade de um movimento IGV em vez de tentar executar qualquer movimento IGV sob o controle do procedimento automático como aqui descrito.

[0081] Em alguns casos, o módulo 206 pode ser supérfluo e, portanto, omitido, desse modo contanto totalmente com o módulo 205.

[0082] Assim que a válvula de reciclo é completamente fechada ou suficientemente fechado, um sinal de comunicação é gerado e, como

mostrado na Fig. 3 para o presente exemplo, recebido pelo módulo 207.

[0083] O módulo 207 pode ser de um módulo final que pode ser programado para entregar o controle a um operador e/ou apresentar uma saída de status ou gerar um sinal de alerta ao operador para informar o operador que a operação normal do trocador de calor criogênico pode prosseguir, ou coisa parecida. No entanto, o módulo 207 também pode ser um módulo de partida para um subsequente procedimento de controle, por exemplo, controle de operação normal tal como o controle de processo avançado conforme descrito, por exemplo, na Pat. US 7.266.975 e/ou Pat. US 6.272.882, ou qualquer outro tipo de módulo.

[0084] Na parte superior do controle sequencial acima descrito para o resfriamento do trocador de calor, pode ser construída em alguns limites de anulação para uma ou mais das variáveis monitoradas e/ou controladas. A travessia de um destes limites por uma ou mais das variáveis monitoradas pode resultar na emissão de um sinal de advertência para alertar um operador, ou interromper o resfriamento, ou o aborto do resfriamento, ou uma combinação destes.

[0085] Exemplos típicos de tais limites de anulação são:

- uma taxa de temperatura máxima predeterminada de mudança em qualquer temperatura selecionada, adequadamente uma ou mais de uma temperatura do produto de hidrocarboneto em uma localização no lado do tubo 29 e/ou no conduto 4; a temperatura do refrigerante gasto; a temperatura do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT 14 ou no lado de sucção do mesmo (particularmente após o auto-resfriamento); qualquer temperatura lateral da estrutura no trocador de calor 1;

- um gradiente de temperatura espacial máxima predeterminado, refletindo uma diferença de temperatura específica entre dois pontos espacialmente separados ou em torno do trocador de calor, adequadamente a diferença de temperatura entre o refrigerante na entrada 5

e/ou a jusante da primeira válvula JT 14 e o refrigerante gasto ao redor da saída 6 ou no conduto 25; e, a diferença de temperatura entre o refrigerante ou corrente de hidrocarboneto em um lado do tubo e uma temperatura local no lado da estrutura do trocador de calor.

[0086] O circuito de recirculação do refrigerante pode circular um refrigerante de componente único, tal como metano, etano, propano, ou nitrogênio; ou um refrigerante misturado de múltiplos componentes, às vezes referido simplesmente como refrigerante misturado (MR), baseado em dois ou mais componentes. Estes componentes podem ser preferivelmente selecionados do grupo compreendendo nitrogênio, metano, etano, etileno, propano, propileno, butano e pentano.

[0087] O circuito de refrigerante pode envolver qualquer número de linhas ou correntes separadas de refrigerante para esfriar diferentes correntes de hidrocarboneto, e qualquer número de elementos ou aspectos comuns, incluindo compressores, refrigeradores, expansores, etc. Algumas correntes de refrigerante podem ser comuns e algumas podem ser separadas. Em uma forma de realização particular da presente invenção, o método descrito de resfriar um trocador de calor criogênico é parte de um método de liquefação de uma corrente de hidrocarboneto tal como o gás natural a partir de uma corrente de alimentação. Da mesma forma, o aparelho como aqui descrito pode ser usado em um tal método de liquefação de uma corrente de hidrocarboneto.

[0088] A corrente de hidrocarboneto pode ser qualquer corrente adequada contendo hidrocarboneto, preferivelmente contendo metano, a ser liquefeita, mas é geralmente estabelecida a partir de uma corrente de gás natural obtida dos reservatórios de gás natural ou petróleo. Como uma alternativa, a corrente de gás natural também pode ser obtida de outra fonte, também incluindo uma fonte sintética tal como um processo Fischer-Tropsch.

[0089] Geralmente o gás natural é compreendido substancialmente de

metano. Preferivelmente a corrente de alimentação compreende pelo menos 60 % molar de metano, mais preferivelmente pelo menos 80 % molar de metano.

[0090] Uma corrente de alimentação de hidrocarboneto pode ser liquefeita mediante a sua passagem através de vários estágios de esfriamento. Qualquer número de estágios de esfriamento pode ser usado, e cada estágio de esfriamento pode envolver um ou mais trocadores térmicos, assim como opcionalmente uma ou mais etapas, níveis ou seções. Cada estágio de esfriamento pode envolver dois ou mais trocadores térmicos, em série ou em paralelo, ou uma combinação dos mesmos.

[0091] Vários tipos de trocadores térmicos adequados capazes de esfriar e liquefazer uma corrente de alimentação de hidrocarboneto são conhecidos na técnica e a presente invenção pode ser aplicada a qualquer um deles.

[0092] Várias disposições de trocadores térmicos adequados capazes de esfriar e liquefazer uma corrente de alimentação tal como uma corrente de hidrocarboneto tal como o gás natural são conhecidas na técnica, incluindo as disposições de refrigerante misturado único (SMR), disposições de refrigerante misturado duplo (DMR), disposições de refrigerante misturado com propano (C3-MR), disposições baseadas em três ou mais ciclos e disposições em cascata incluindo aquelas com um ciclo de sub-esfriamento. A presente invenção pode ser aplicada a qualquer trocador de calor em qualquer uma de tais disposições, e outras disposições adequadas, com algumas pequenas modificações que estão ao alcance da pessoa versada na técnica.

[0093] Em várias disposições, o esfriamento e liquefação da corrente de alimentação de hidrocarboneto envolvem dois (ou mais) estágios de esfriamento compreendendo um estágio de pré-esfriamento e um estágio de esfriamento principal. Tipicamente, o estágio de pré-esfriamento esfria a corrente de hidrocarboneto para abaixo de 0°C, tipicamente entre -80 e -30°C,

e o segundo estágio, que pode ser referido como um estágio criogênico principal, esfria para abaixo de  $-100^{\circ}\text{C}$  para liquefazer a corrente de hidrocarboneto.

[0094] Dependendo da fonte, o gás natural pode conter quantidades variáveis de hidrocarbonetos mais pesados que o metano tais como etano, propano, butano e pentano, assim como alguns hidrocarbonetos aromáticos. A corrente de gás natural também pode conter não hidrocarbonetos tais como  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outros compostos de enxofre, e assim por diante.

[0095] Se desejável, as correntes de hidrocarboneto podem ser pré-tratadas antes de usá-las na presente invenção. Esse pré-tratamento pode compreender a remoção de todos os componentes indesejáveis presentes tais como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , ou outras etapas tais como o pré-esfriamento, a pré-pressurização ou coisa parecida. Como estas etapas são bem conhecidas da pessoa versada na técnica, elas não são aqui debatidas mais adiante.

[0096] Além disso, a pessoa versada na técnica facilmente entenderá que após a liquefação, o gás natural liquefeito pode ser ainda processado, se desejável. Como um exemplo, o LNG obtido pode ser despressurizado por meio de uma válvula Joule-Thomson, ou por meio de um turbo-expansor criogênico.

[0097] A presente invenção pode envolver um ou mais ou outros circuitos de refrigerantes, por exemplo, em um estágio de pré-esfriamento. Quaisquer outros ou novos circuitos de refrigerante podem, opcionalmente, ser conectados e/ou concomitantes com o circuito de refrigerante para esfriar a corrente de hidrocarboneto.

[0098] A Figura 4 mostra um tipo maior de trocador de calor criogênico 100, incorporado em um sistema de vários trocadores térmicos de pré-esfriamento, servido por um tal novo circuito de refrigerante, e outro equipamento, como pode ser observado em uma usina de liquefação de hidrocarboneto. O novo circuito de refrigerante pode doravante referido como

o “circuito de refrigerante de pré-esfriamento” ou “ciclo de refrigerante de pré-esfriamento”. Da mesma forma, os itens tais como compressores e o refrigerante também podem ser referidos como “compressor de refrigerante de pré-esfriamento” ou “refrigerante de pré-esfriamento”.

[0099] O trocador de calor criogênico 100 desta forma de realização será mais adiante referido como o trocador de calor criogênico principal 100, para distingui-lo de quaisquer outros trocadores térmicos presentes na forma de realização. O trocador de calor criogênico principal 100 compreende uma extremidade quente 33, uma extremidade fria 50 e um ponto médio 27. A parede do trocador de calor criogênico principal 100 define um lado da estrutura 110. No lado da estrutura 110 são localizados:

- um primeiro lado do tubo 29 que se estende da extremidade quente 33 até a extremidade fria 50, preferivelmente se estende entre uma entrada da corrente de hidrocarboneto 7 e uma saída da corrente de hidrocarboneto 8;

- um segundo lado do tubo 28 que se estende da extremidade quente 33, preferivelmente a partir de uma entrada de refrigerante gasoso 49a na extremidade quente 33, até o ponto médio 27; e,

- um terceiro lado do tubo 15 que se estende da extremidade quente 33, preferivelmente a partir de uma entrada de refrigerante líquido 49b na extremidade quente 33, até a extremidade fria 50.

[00100] Uma fileira de compressor de refrigerante, como aqui mostrada simbolicamente compreendendo o primeiro e o segundo compressores 30 e 31, é fornecida para comprimir o refrigerante. Cada um destes compressores é munido com várias válvulas de reciclagem, que são aqui esquematicamente representadas pelas válvulas de reciclagem 130 e 131 em uma linha de reciclo que se conecta à descarga do compressor, a jusante do respectivos refrigeradores, com a entrada de sucção de baixa pressão.

[00101] O primeiro compressor de refrigerante 30 é acionado por um

motor adequado, por exemplo, uma turbina a gás 35, que é dotada com um motor auxiliar 36 para dar a partida, e o segundo compressor de refrigerante 31 é acionado por um motor adequado, por exemplo, uma turbina a gás 37 munida com um motor auxiliar (não mostrado). Alternativamente, os compressores 30 e 31 podem ser movidos em um único eixo de um motor compartilhado.

[00102] Durante a operação normal após o trocador de calor criogênico principal ter sido resfriado, uma corrente de alimentação de hidrocarboneto rica em metano preferivelmente gasosa é fornecida em pressão elevada através do fornecimento do conduto 20 ao primeiro lado do tubo 29 do trocador de calor criogênico principal 100 na sua extremidade quente 33. A corrente de alimentação de hidrocarboneto passa pelo primeiro lado do tubo 29 onde é esfriado, liquefeito e opcionalmente sub-esfriado, em contato com um refrigerante misturado (MR) que evapora no lado da estrutura 110 que forma o refrigerante gasto. A corrente de hidrocarboneto liquefeito resultante é removida do trocador de calor criogênico principal 100 em sua extremidade fria 50 através do conduto 40. O fluxo da corrente de hidrocarboneto através do sistema pode ser controlado, por exemplo, utilizando uma válvula parada 44 fornecida no conduto 40.

[00103] A corrente 40 pode opcionalmente ser passada através de um sistema instantâneo final adequado, em que a pressão é reduzida para a pressão de armazenamento e/ou transporte. Finalmente, a corrente de hidrocarboneto liquefeita é passada como a corrente do produto para o armazenamento onde ela é armazenada como um produto líquido, ou de modo opcional, diretamente ao transporte.

[00104] Durante a operação normal, e durante o resfriamento do trocador de calor criogênico principal, o refrigerante gasto é removido do lado da estrutura 110 do trocador de calor criogênico principal 100 na sua extremidade quente 33 através do conduto 25, e passado para o tambor de

tombo 56.

[00105] Um conduto de ajuste de preparação do refrigerante 65 também alimenta no tambor de tombo 56 para opcionalmente adicionar inventário de refrigerante à corrente de refrigerante gasto. A adição dos vários componentes de refrigerante é controlada por uma ou mais válvulas, tipicamente uma válvula por componente. Aqui, estas válvulas são esquematicamente representadas como válvula 66.

[00106] A fração evaporada 55 do refrigerante gasto, que sai da parte superior do tambor de tombo 56, é comprimida, nos compressores de refrigerante 30 e 31, para obter uma corrente de refrigerante comprimida, que é removida através do conduto 32. Outras disposições do compressor de refrigerante são possíveis.

[00107] Entre os dois compressores de refrigerante 30 e 31, o calor de compressão é removido do fluido que passa através do conduto 38 no refrigerador de ambiente 23, que pode compreender um refrigerador de ar e/ou um refrigerador de água e/ou qualquer outro tipo de refrigerador de ambiente. Da mesma forma, um interrefrigerador (não mostrado) pode ser fornecido entre dois estágios de compressor sucessivos de um compressor.

[00108] A corrente de refrigerante comprimida no conduto 32 é esfriada no refrigerador de ar 42 e parcialmente condensada em um ou mais trocadores térmicos pré-esfriados (mostrados são 43 e 41) em contato com um ciclo de refrigerante pré-esfriado que será descrito com maiores detalhes mais abaixo. Os trocadores térmicos pré-esfriados 41, 31 podem estar operando em pressões diferentes entre si e/ou estar utilizando diferentes composições de refrigerante.

[00109] A corrente de refrigerante parcialmente condensada 39 é então passada e deixada em um separador de líquido/vapor através de um dispositivo de entrada, aqui representado como recipiente separador 45 e dispositivo de entrada 46. No recipiente separador 45, a corrente de

refrigerante parcialmente condensada é separada em uma, neste ponto líquido, fração de refrigerante pesada (HMR) e uma, neste ponto gasoso, fração de refrigerante leve (LMR). Estas correntes podem cada uma ser individualmente controlada por meio de uma válvula JT ou coisa parecida, a primeira válvula JT 58 para controlar a corrente de refrigerante em vapor (leve) e uma segunda válvula JT 51 para controlar a corrente de refrigerante líquida (pesada).

[00110] A fração de refrigerante pesada líquida é removida do recipiente separador 45 através do conduto 47, e a fração de refrigerante leve gasosa é removida através do conduto 48. A fração de refrigerante pesada é sub-esfriada no segundo lado do tubo 28 do trocador de calor criogênico principal 100 para obter uma corrente de refrigerante pesada sub-esfriada 54. A corrente de refrigerante pesada sub-esfriada é removida do trocador de calor criogênico principal 100 através do conduto 54, e deixada expandir em um dispositivo de expansão que compreende a segunda válvula JT 51. O dispositivo de expansão pode ainda compreender um expansor dinâmico (não mostrado) em série com a segunda válvula JT 51, que não deve ser operada durante todo o processo de resfriamento do trocador de calor criogênico principal.

[00111] A corrente de refrigerante pesada sub-esfriada é, na pressão reduzida, introduzida através do conduto 52 e bico 53 no lado da estrutura 110 do trocador de calor criogênico principal 100 em seu ponto médio 27. A corrente de refrigerante pesada é deixada evaporar-se no lado da estrutura 110 em pressão reduzida, esfriando assim os fluidos nas laterais do tubo 29, 28 e 15.

[00112] A fração de refrigerante leve gasosa removida do recipiente separador 45 através de conduto 48 é passada para o terceiro lado do tubo 15 no trocador de calor criogênico principal 100 onde é esfriada, liquefeita e sub-esfriada para obter um a corrente de refrigerante leve sub-esfriada 57. A corrente de refrigerante leve sub-esfriada é removida do trocador de calor

criogênico principal 100 através do conduto 57, e deixada expandir em um dispositivo de expansão que compreende a primeira válvula JT 58. Na pressão reduzida ela é introduzida através do conduto 59 e bico 60 no lado da estrutura 110 do trocador de calor criogênico principal 100 na sua extremidade fria 50. A corrente de refrigerante leve é deixada evaporar no lado da estrutura 110 em pressão reduzida, esfriando assim os fluidos nos lados do tubo 29, 28 e 15.

[00113] Opcionalmente (não mostrado), uma corrente lateral opcional pode ser extraída da corrente de refrigerante leve gasosa 48, que pode ser esfriada, liquefeita e sub-esfriada em contato com uma ou mais de outras correntes frias em um ou mais de outros trocadores térmicos diferentes do trocador de calor criogênico 100. Por exemplo, ela pode ser esfriada, liquefeita e sub-esfriada em contato com o vapor instantâneo frio gerado a partir da corrente 40 em um sistema instantâneo final opcional. A corrente lateral sub-esfriada opcional pode ser recombinada com a corrente de refrigerante leve no conduto 57 ou 59 em cujo caso ela necessita de um meio expensor auxiliar tal como uma primeira válvula JT auxiliar. É feita referência à Pat. US 6.272.882 com relação a uma descrição mais detalhada de uma tal opção.

[00114] Os trocadores térmicos pré-esfriados 41, 43 são operados usando um refrigerante de pré-esfriamento, que pode ser um refrigerante de componentes misturados ou um refrigerante de único componente. Para este exemplo, o propano foi utilizado. O propano evaporado é comprimido no compressor de pré-esfriamento 127 acionado por um motor adequado, tal como uma turbina a gás 128. A válvula de reciclo do compressor de refrigerante de pré-esfriamento 129 é também é fornecida, aqui simbolicamente mostrada em uma linha que se conecta com a entrada de sucção em baixa pressão do compressor do primeiro estágio com o nível de pressão intermediário. No entanto, uma linha de reciclagem pode ser

opcionalmente fornecida através de todos ou uma seleção de estágios de compressão.

[00115] O propano comprimido é então condensado no refrigerador de ar 130, e o propano comprimido condensado, em pressão elevada, é depois passado através dos condutos 135 e 136 para os trocadores térmicos 43 e 41 que estão dispostos em série um com o outro. O propano condensado é deixado expandir em uma pressão intermediária sobre a válvula de expansão 138, antes de entrar no trocador de calor 43. Lá, o propano em parte se evapora em contato com o calor do refrigerante de múltiplos componentes no conduto 32, e a fração gasosa evaporada resultante é passada através do conduto 141 para uma entrada de pressão intermediária do compressor de propano 127. A fração líquida é passada através do conduto 145 para o trocador de calor 41. Antes de entrar no trocador de calor 41, o propano é deixado expandir em uma válvula de expansão de baixa pressão 148. O propano evaporado é passado através do conduto 150 para uma entrada de sucção do compressor de propano 127.

[00116] Tal como a pessoa versada na técnica conhece, os tambores de tombo ou coisa parecida podem ser fornecidos em qualquer conduto que conecta a um sistema de sucção do compressor para evitar a alimentação de uma fase não gasosa ao compressor. Um economizador também pode ser fornecido.

[00117] No presente exemplo, dois trocadores térmicos de pré-esfriamento foram mostrados operando em dois níveis de pressão. No entanto, qualquer quantidade de calor dos trocadores térmicos de pré-esfriamento e níveis de pressão correspondentes pode ser empregada.

[00118] O ciclo de refrigerante de pré-esfriamento também pode ser usado para obter a corrente de hidrocarboneto 20, por exemplo, como se segue. A alimentação de hidrocarboneto, no presente exemplo uma alimentação de gás natural, é passada em pressão elevada através do conduto

de fornecimento 90. A alimentação de gás natural, que tipicamente é uma mistura de múltiplos componentes de metano e componentes mais pesados, é parcialmente condensada em pelo menos um trocador de calor 93.

[00119] No presente exemplo, este trocador de calor opera aproximadamente no mesmo nível de pressão como o trocador de calor de pré-esfriamento 43, utilizando uma corrente lateral 137 do refrigerante de pré-esfriamento extraída do conduto 135. Embora não representado na Fig. 4, o conduto 137 se conecta ao conduto 137a. Antes de entrar no trocador de calor 93, o refrigerante de pré-esfriamento é deixado expandir sobre a válvula 139 na pressão intermediária aproximada. A fração gasosa evaporada resultante é passada através dos condutos 140a e 140 ao conduto 141 onde é recombinação com a fração gasosa extraída do trocador de calor de pré-esfriamento 43. A fração líquida do refrigerante de pré-esfriamento é extraída do trocador de calor 93 no conduto 151 e alimentada no trocador de calor 91 após expansão sobre a válvula 152 ao redor da pressão baixa. O refrigerante de pré-esfriamento evaporado é depois levado ao conduto 150 através dos condutos 153a e 153.

[00120] É observado que os trocadores térmicos 43 e 93 e/ou trocadores térmicos 41 e 91 podem ser fornecidos na forma de trocadores térmicos combinados compreendendo lados separados para o gás natural e para o refrigerante no conduto 32.

[00121] A alimentação parcialmente condensada 92 é introduzida, por exemplo, através de um dispositivo de entrada de 94, em um separador de gás/líquido 95, que pode ser fornecido, por exemplo, na forma de uma coluna de purificação ou similar. Na coluna de purificação 95, a alimentação parcialmente condensada é separada para obter uma corrente superior gasosa enriquecida com metano 97 e uma corrente inferior líquida esvaziada de metano 115.

[00122] A corrente superior gasosa 97 é passada através do conduto 97

através de trocador de calor 91 para um separador suspenso 102. No trocador de calor 100, a corrente superior gasosa é em parte condensada em contato com o refrigerante de pré-esfriamento no conduto 151, e a corrente superior parcialmente condensada é introduzida no separador suspenso 102 através do dispositivo de entrada 103. No separador suspenso 102, a corrente superior parcialmente condensada é separada em uma corrente gasosa 20 (que é substancialmente pobre de componentes  $C_{5+}$  e/ou relativamente ricas em metano quando comparado com a corrente de alimentação) e uma corrente inferior líquida 105. A corrente gasosa 20 forma a alimentação de hidrocarboneto em pressão elevada no conduto 20.

[00123] Pelo menos parte da corrente inferior líquida 105 pode ser introduzida através do conduto 105 e bico 106 na coluna de purificação 95 como refluxo. O conduto 105 é munido com uma válvula de controle de fluxo (não mostrado) e/ou bomba 108.

[00124] Se houver menos de refluxo requerido do que há líquido na corrente superior gasosa parcialmente condensada 105, o excedente pode ser transferido para o conduto 20 em um conduto de desvio (não mostrado) e uma válvula de controle de fluxo (não mostrada). Em caso em que muito pouco refluxo está disponível, um meio de refluxo externo, adequadamente butano, pode ser adicionados a partir de uma fonte externa (não mostrada), adequadamente no conduto 105.

[00125] A corrente inferior enriquecida com  $C_{3+}$  líquida é removida da coluna de purificação 95 através do conduto 115. Aqui ela pode ser retirada do processo, enviada para uma fileira de fracionamento e/ou armazenamento/transporte e/ou uma caldeira de recozer em qualquer forma conhecida da pessoa versada na técnica.

[00126] Antes de sua operação normal como descrito acima, o trocador de calor criogênico principal deve ser resfriado até a temperatura de operação. Os métodos e aparelhos atualmente divulgados conseguem um resfriamento

automatizado do trocador de calor criogênico principal. Isto foi demonstrado de acordo com o que segue.

[00127] Várias temperaturas, taxas de mudança de temperatura e diferenciais de temperatura em vários pontos em torno do trocador de calor criogênico principal podem ser monitoradas pelo controlador programável durante o processo de resfriamento. Isto permite o controlador programável determinar a evolução do perfil de temperatura ao longo do tempo. A Figura 5 mostra os pontos em torno do trocador de calor criogênico principal 100 onde em um teste os sensores de temperatura (TR20; TR25; TR33; TR40; TR47; TR48; TR52; TR54; TR57; TR59) e os sensores de temperatura diferencial (TDR2547; TDR2548; TDR2715; TDR5254; TDR5759) foram fornecidos além de outros sensores de temperatura e diferencial de temperatura que não serão debatidos aqui, visto que eles foram considerados de menor relevância para a automação descrita.

[00128] A fila na Fig. 5 corresponde à fila da Fig. 4, mas os números de referência foram omitidos no interesse de destacar os números de referência correspondentes aos vários sensores que são mostrados. Os sensores de temperatura são marcados pela “TR”, seguidos de um número que corresponde ao número de referência atribuído ao componente, ou corrente ou linha (conduto), onde o sensor é fornecido. Para os sensores de diferencial de temperatura, o código TDR é utilizado seguido por dois números de dois dígitos correspondentes aos números de referência atribuídos aos componentes, correntes ou linhas (condutos) entre os quais o sensor diferencial é fornecido. Os sensores de temperatura e os sensores de temperatura diferencial geram sinais de sensores que podem ser recebidos e controlados pelo controlador programável, que pode usar um ou mais destes como variáveis controladas.

[00129] Na parte superior do trocador de calor criogênico principal 100, as temperaturas nos condutos 57 e 59, a montante e a jusante da primeira

válvula JT 58, foram monitoradas usando sensores de temperatura TR57 e TR59. A diferença entre estas temperaturas também foi monitorada, que pode ser usada para determinar o efeito real de JT sobre a primeira válvula JT.

[00130] A diferença entre a temperatura da estrutura no ponto médio 27 foi medida e a temperatura na lateral do tubo 15 a 27 no ponto médio foi determinada (TDR2715). Além disso, a temperatura da estrutura perto da extremidade quente 33 foi medida utilizando TR33, assim como a temperatura do refrigerante gasto retirado do trocador de calor no conduto 25 (TR25).

[00131] A temperatura de entrada da fração de refrigerante líquida pode ser medida utilizando TR47, a temperatura de entrada da corrente de hidrocarboneto imediatamente a montante do trocador de calor criogênico principal 100 pode ser medida utilizando TR20, e a temperatura da corrente degradada de hidrocarboneto imediatamente a jusante do trocador de calor criogênico principal 100 pode ser medida utilizando TR40.

[00132] Todas as medições de temperatura estabilizam e são confiáveis quando se está à frente do fluxo. Assim, as medidas podem ser não confiáveis às vezes, por exemplo, quando o gás estagnado volta ao sensor de temperatura no início do resfriamento. O monitoramento depende das condições iniciais, das condições de pressão, por exemplo.

[00133] A temperatura que indica o fim do resfriamento é a temperatura da linha degradada do produto de hidrocarboneto TR40. No entanto, esta medida pode não ser confiável no início do resfriamento quando o fluxo de hidrocarboneto for extremamente baixo. Portanto, no início do resfriamento outra temperatura, adequadamente a temperatura LMR TR59 a jusante da primeira válvula JT 58, pode ser monitorada em seu lugar. No entanto, no final do resfriamento a temperatura de referência será TR40.

[00134] Várias pressões e os diferenciais de pressão, em vários pontos da linha, podem ser monitorados pelo controlador programável durante o

processo de resfriamento. Os sensores de pressão mais relevantes (PR32; PR54; PR55; PR57; PR150) são indicados na Figura 5, utilizando PR seguido de um número que corresponde ao número de referência atribuído ao componente ou linha (conduto), onde o sensor é fornecido. As pressões mais importantes a serem monitoradas incluem a pressão de sucção do compressor de pré-resfriamento PR150 no conduto 150, a pressão de sucção do compressor de refrigerante misturado 30 (PR55) no conduto 55; e, a pressão de descarga do compressor de refrigerante misturado PR32 no conduto 32.

[00135] Estes sensores de pressão geram sinais de sensor que podem ser recebidos e monitorados pelo controlador programável, que pode usar um ou mais destes como variáveis controladas.

[00136] A pressão na linha após um tempo desligado pode afetar o processo de esfriamento, especialmente se a linha tenha sido totalmente reciclada durante dias. Pequenas mudanças, enquanto se tem uma pressão elevada, podem ter grandes consequências no esfriamento global do trocador de calor criogênico principal 100. Adicionalmente, PR57 e PR54 (pressão do tubo LMR e HMR a montante da primeira (58) e segunda (51) válvulas JT, respectivamente) podem ser monitoradas antes do resfriamento. Qualquer manipulação da válvula pode ter dinâmicas mais rápidas se estas pressões forem muito elevadas, assim como a condição inicial do sistema deve ter um nível de pressão que seja mais baixo do que um valor predeterminado de pressão máxima inicial (no teste foi utilizado 20 barg).

[00137] As taxas de fluxo podem ser calculadas para as correntes LMR e HMR, de modo a serem usadas como uma variável controlada ou pelo menos uma variável a ser monitorada. Tais cálculos podem basear-se no diferencial de pressão e abertura da válvula nominal da primeira (58) ou segunda (51) válvula JT, respectivamente. Por isso, as medições das pressões antes da primeira e segunda válvula JT nos circuitos tanto LMR quanto HMR (PR57 e PR54, respectivamente) e da pressão de sucção (PR55) do circuito de

refrigerante antes de ir para os compressores, podem ser utilizadas.

[00138] O desvio padrão das medições de fluxo para as pequenas aberturas da válvula JT pode ser bastante grande, o que pode levar a erros se for utilizado como variável monitorada. Um modelo linear dos fluxos LMR e HMR foi calculado como o modelo Linear dos Quadrados Mínimos de todas as medições com aberturas de válvula elevadas. Com base neste modelo, os fluxos estimados serão fornecidos por:

$$F_{\text{LMR}} = K_{\text{LMR}} \cdot X_{58} \cdot \sqrt{PR57 - PR55}; \text{ e,}$$

$$F_{\text{HMR}} = K_{\text{HMR}} \cdot X_{51} \cdot \sqrt{PR54 - PR55}$$

em que  $F_{\text{LMR}}$  ( $F_{\text{HMR}}$ ) representa a taxa de fluxo no conduto LMR 48 (conduto HMR 47);  $X_{58}$  ( $X_{51}$ ) representa a quantidade de abertura da primeira (segunda) válvula JT 58, resp. 51, e  $K_{\text{LMR}}$  ( $K_{\text{HMR}}$ ) representa a constante do modelo linear dos quadrados mínimos que corresponde à inclinação. Um modelo linear dos quadrados mínimos foi observado para satisfazer a precisão desejada. No entanto, outros tipos de funções podem ser utilizados em seu lugar. Em particular, uma função quadrática pode ser estimada para o HMR, enquanto que para o fluxo LMR uma forma característica que se parece com uma função de raiz quadrada foi encontrada.

[00139] Imediatamente antes de executar o resfriamento automático, o trocador de calor criogênico principal 100 foi primeiro pré-esfriado, sob controle manual, para uma temperatura entre cerca de  $-25^{\circ}\text{C}$  e cerca de  $-35^{\circ}\text{C}$ . Outras tarefas que foram concluídas neste estágio, para o momento sendo manualmente, mas estas também podem ser automatizadas e incorporadas na estrutura do módulo como atualmente divulgada, incluem:

- o controle de nível em qualquer coluna de extração de NGL em linha (líquido de gás natural, tipicamente consistindo de moléculas tendo massa comparável ao propano e superior) (por exemplo, coluna de purificação);

- o controle de temperatura da corrente 20;

- a despressurização do circuito de refrigerante, notavelmente as laterais do tubo 15, 28;

- o descongelamento de gás/controles da mistura fria de gás, usado para esfriar os tubos do circuito de refrigerante para a temperatura entre cerca de  $-25^{\circ}\text{C}$  e cerca de  $-35^{\circ}\text{C}$ .

[00140] Outro resfriamento do trocador de calor criogênico principal para a temperatura de operação abaixo de cerca de  $-155^{\circ}\text{C}$ , aqui para uma temperatura de operação de cerca de  $-160^{\circ}\text{C}$ , foi obtido usando o método e aparelho de resfriamento automático. O outro resfriamento pode ser a seguir referido como “resfriamento final”.

[00141] A Figura 6 esquematicamente mostra a estrutura do módulo que foi usada no teste. O módulo 301 define as condições iniciais aproximadamente da mesma maneira como descrito acima para o módulo 201. Exemplos das condições iniciais críticas são:

- a presença de um excesso de componentes pesados na alimentação de hidrocarboneto (por exemplo, na linha 20) se o fluxo de hidrocarboneto for manipulado (geralmente um máximo de 0,08 % molar de  $\text{C}_{5+}$  é tolerado);

- a primeira e segunda válvulas JT (58, 51) não suficientemente fechadas (no teste um valor de mais do que 1 % aberta foi utilizado);

- a pressão no circuito de refrigeração (LMR e HMR) é mais baixa do que a descarga do compressor 31;

- um ou mais compressores de refrigeração 30, 31, e o compressor de refrigerante de pré-esfriamento 127 não está em linha e em operação (como, por exemplo, monitorado pela velocidade do compressor);

- as válvulas de sucção e descarga nestes compressores não são abertas;

- a pressão do refrigerante na descarga do compressor 31 é

demasiada elevada (o teste utilizou um máximo de 20 barg);

- a pressão de sucção do compressor de refrigerante de pré-esfriamento 127 fora de uma janela de pressão predeterminada (adequadamente uma janela em torno de aproximadamente 0,5 barg);

- qualquer válvula IGV presente não é suficientemente fechada.

[00142] Exemplos das condições iniciais não críticas são:

- TDR5759 muito pequeno (um valor mínimo típico recomendado no caso de um trocador de calor de bobina enrolada é de 25°C);

- uma ou mais válvulas de reciclo de compressor de refrigerante (por exemplo, 130, 131) não são suficientemente abertas (o teste utilizado menos do que 99 % abertas);

- pressão de descarga do compressor 31 abaixo de um valor mínimo predeterminado (o teste utilizou 18 barg).

[00143] Um sinal que corresponde ao sinal de comunicação do módulo 301 dispara 308. O módulo 302 também é ativado pelo mesmo sinal que corresponde ao sinal de comunicação do módulo 301.

[00144] O módulo 302 marca o primeiro módulo em uma sub-rede de módulos, aqui sendo os módulos 303, 304, 305 e 309 a 312. Em consequência, a sub-rede inteira dos módulos descritos abaixo irá operar em paralelo e simultaneamente com o módulo 308.

[00145] O módulo 302 em si mesmo primeiro abre a primeira válvula JT 58 quase da mesma maneira como aquele módulo 202 primeiro abre a válvula JT 14.

[00146] O módulo 303 é ativado pelo módulo 302, e ele espera algum tempo, quase da mesma forma como descrito acima para o módulo 203. Os módulos 305, 305, 309 e 310 ativam em um sinal que corresponde ao sinal de comunicação do módulo 303.

[00147] O módulo 304 ainda abre a primeira válvula JT 58

aproximadamente da maneira como descrito para a válvula JT 14 no módulo 204.

[00148] O módulo 305 ajusta a válvula de reciclo do compressor (ou válvulas) 131 quase da mesma forma como descrito acima para o módulo 205 que ajusta a válvula de reciclo 12.

[00149] No entanto, além disso, existe um módulo 309, que opera no mesmo nível na rede como módulo 305, que fecha a válvula de reciclo do compressor 130, preferivelmente em resposta quando uma temperatura predeterminada indicativa da temperatura do trocador de calor criogênico principal atinge um valor predeterminado. O fechamento da válvula de reciclo do compressor 130 é forçado pelo desvio de onda, que é em parte influenciado pelos módulos 304 e 310 a 312. Assim, na verdade, o módulo 309 maximiza a pressão do refrigerante tanto quanto possível enquanto mantém um desvio de onda permitido.

[00150] Preferivelmente, a temperatura predeterminada é a temperatura TR57 e o valor predeterminado é tal que é certo que as frações de LMR e HMR auto-esfriadas que circulam nos condutos 57 e 52 são totalmente condensadas de tal forma que o fechamento das válvulas de reciclo não produz efeitos inesperados sobre a taxa de esfriamento. Por exemplo, o valor da temperatura predeterminada pode ser  $-135^{\circ}\text{C}$ , mas depende dos constituintes do refrigerante de múltiplos componentes utilizado. Naturalmente, um desvio de onda muito baixo forma um refreamento ou fechamento das válvulas de reciclo. Uma mensagem pode ser gerada para o operador que um movimento IGV pode ser necessário em vez disso.

[00151] Além disso, o módulo 309 pode conter instruções executáveis por computador para fechar a válvula de reciclo 130 antes que a temperatura alcance o valor predeterminado, mas a ativada por outras situações de urgência. Tal outra situação de urgência pode, por exemplo, ocorrer se o desvio de onda do compressor 30 tiver um valor acima de um valor máximo

predeterminado (tipicamente 0,3). O desvio de onda excessivo pode ser a causa da vibração física do compressor e, portanto, as válvulas de reciclo 130 são fechadas mesmo se a temperatura predeterminada ainda não foi alcançada.

[00152] O módulo 310 controla a primeira abertura da segunda válvula JT 51. É aberta o suficiente de modo que uma tendência de esfriamento seja estabelecida que é mais rápida do que com apenas os movimentos da primeira válvula JT (58). A primeira abertura da segunda válvula JT 51 envolve um algoritmo que leva em conta o comportamento não linear da válvula mediante a primeira abertura. O módulo tenta manter a taxa de esfriamento inicial abaixo do limite máximo, neste esfriamento menos rápido do que 28°C/h. No entanto, devido ao comportamento não linear das válvulas JT na abertura inicial (descrita acima), isso pode não ser possível. Neste caso, o processo continua com a taxa mínima de esfriamento possível que corresponde à taxa de esfriamento alcançada na abertura mínima observável da válvula JT. Condições para o início deste módulo é a presença de um perfil claro de temperatura, que pode ser entendido como um perfil onde a taxa de alteração da temperatura de TR54 é normalizada e resfriada. Portanto, este módulo é ativado simultaneamente com o módulo 304. Tomado juntamente com o módulo 311 (que é ativado pelo módulo 310 conforme descrito abaixo), esta combinação de módulos opera no mesmo nível da rede como o módulo 304.

[00153] Para estabelecer uma tendência aumentada de esfriamento, o módulo 310 abre a segunda válvula JT em intervalos de tempo predeterminados, por exemplo, a cada minuto, até que uma mudança de temperatura de esfriamento seja detectada (no teste, até uma taxa de esfriamento mais rápida do que 0,1°C/h, foi detectada). Depois se fecha a válvula 51 em uma pequena quantidade. Então existe uma outra verificação no esfriamento para verificar que a segunda válvula JT 51 não é fechada novamente ou que o esfriamento não é muito rápido. Se for muito rápido,

outro fechamento da segunda válvula JT ocorrerá. Se a tendência de esfriamento parou, então se abre a válvula até que uma tendência de esfriamento seja estabelecida novamente. O sinal de comunicação é gerado após atingir uma tendência de esfriamento estável dentro de uma faixa predeterminada.

[00154] O sinal de comunicação do módulo 310 é recebido pelo módulo 311 e também ativa o módulo 312. O módulo 311 ainda move a segunda válvula JT 51. Três casos são levados em consideração:

i) acima da faixa de condensação, o controle é feito na posição da segunda válvula JT;

ii) pouco antes que a condensação ocorra no refrigerante pesado no conduto 54, todos os movimentos da válvula JT são retardados;

iii) quando a condensação for detectada a segunda válvula JT 51 é fechada um pouco, para evitar uma taxa de esfriamento elevada causada pelo fluxo condensado. Assim que a condensação do refrigerante pesado no conduto 54 for detectada, o fluxo do refrigerante pesado será controlado em um ponto de fixação remoto que se estabelece usando um controlador de fluxo. A taxa de mudança da temperatura de TR54 e a temperatura em TR25 determinarão a etapa no ponto de fixação do controlador de fluxo. O alvo final da temperatura tanto para TR54 quanto para TR 25 irá interromper as ações da válvula.

[00155] O módulo 311 termina quando a temperatura superior, por exemplo, em TR57 ou TR40, atinge o seu valor alvo. Qualquer contribuição do refrigerante pesado para a taxa de esfriamento a partir de então será reduzida, a não ser que a preparação do refrigerante seja ajustada.

[00156] O ajuste de preparação é controlado pelo módulo 312, que como mencionado acima, é ativado para iniciar simultaneamente com o módulo 311 com base no sinal de comunicação gerado no módulo 310. O módulo manipula a preparação para:

- aumentar a pressão de descarga do compressor 31 ao longo de uma elevação para uma pressão de operação alvo (no teste, 30 barg);
- mover a composição de refrigerante para uma composição alvo, que pode ser um alvo final para a operação normal do trocador de calor criogênico principal 100 ou um alvo intermediário.

[00157] A composição alvo de refrigerante pode ser alterada durante o processo de resfriamento. Pode alterar gradualmente ou por etapas após uma variável controlada alcançar um valor predeterminado. Por exemplo, ela pode alterar assim que a temperatura TR57 ir abaixo de um valor predeterminado de -135°C ou -140°C.

[00158] Durante o teste, o nitrogênio foi uma parte especial da preparação. A preparação com nitrogênio é preferivelmente feita apenas quando houve uma oportunidade, por exemplo, quando a pressão de sucção do compressor MR 30 é baixa (por exemplo, abaixo de 2,0 barg). Isso ocorre porque a pressão de fornecimento de nitrogênio durante o teste foi apenas de cerca de 2 barg.

[00159] O módulo 312 foi fornecido com alguns robustez no caso de falha na obtenção de uma medida confiável no inventário do metano na corrente de MR (por exemplo, devido a falha de comunicação entre o instrumento e a DCS, ou devido a falha de sensor), que foi observada ser bastante comum. Em um tal caso, em vez de ser medido diretamente, a composição de metano foi estimada a partir das composições do C<sub>2</sub> (etano), C<sub>3</sub> (propano) e N<sub>2</sub>, por assumir que o equilíbrio foi metano.

[00160] A sub-rede inteira como descrito acima (contendo módulos 303, 304, 305 e 309 a 312) como um todo é executada em paralelo com o módulo 308 que ajusta um ou mais válvulas de reciclo do compressor de refrigerante pré-esfriado, aqui na forma da válvula de reciclo do primeiro estágio 129 que controla a corrente de reciclo através do primeiro estágio de compressão do compressor 127. O objetivo do módulo é manter uma pressão

de sucção na pressão de sucção do refrigerante de pré-esfriamento (no conduto 150 da Fig. 4) dentro de uma faixa predeterminada, por exemplo, de 0,25 a 0,50 barg, mas sem reduzir o desvio de onda muito perto da linha de controle. A baixa pressão irá garantir que a temperatura do gás de alimentação de hidrocarboneto que vai para dentro do trocador de calor criogênico principal 100 (por exemplo, através do conduto 20) possui um valor razoável. Portanto, a temperatura no conduto 20 em si não necessita ser monitorada ou utilizada como condição para o controle deste módulo.

[00161] Adicionalmente, a temperatura de descarga do compressor de refrigerante de pré-esfriamento 127 (no conduto 135) não foi monitorada, visto que o procedimento de resfriamento automático utilizado no teste não ofereceu uma capacidade para manipular qualquer variável que possa ser usada para melhorar a situação de uma temperatura de descarga elevada do compressor de refrigerante de pré-esfriamento 127. No entanto, isto pode ser implementado sem se afastar do escopo da invenção.

[00162] Pode ser formado em alguns limites de superação, para uma ou mais das variáveis monitoradas. A passagem de um destes limites (isto é, excedendo um valor máximo e/ou mínimo predeterminado) por uma ou mais das variáveis monitoradas, pode resultar na emissão de um sinal de aviso para alertar um operador, ou interromper o resfriamento, ou o aborto do resfriamento, ou uma combinação destes.

[00163] Exemplos típicos de tais limites de superação são:

- uma taxa de alteração de temperatura máxima predeterminada (por exemplo, 28°C/hora) em qualquer temperatura selecionada, adequadamente uma ou mais de uma temperatura do produto de hidrocarboneto em um local na lateral do tubo 29 e/ou no conduto de descarga de 40; a temperatura do refrigerante gasto (por exemplo, na extremidade quente inferior da lateral da estrutura 33 ou no conduto 25); a temperatura do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT 58 ou a segunda

válvula JT 51, ou no lado de sucção da mesma; qualquer temperatura lateral da estrutura no trocador de calor 1;

- um gradiente de temperatura espacial máxima predeterminado, que reflete uma diferença de temperatura máxima especificada entre dois pontos espacialmente separados ou em torno do trocador de calor (por exemplo, uma diferença de temperatura máxima de 28°C), adequadamente a diferença de temperatura TDR2547 entre o refrigerante leve a montante do trocador de calor criogênico principal 100 e o refrigerante gasto (também possível: TDR3347, não mostrado); a diferença de temperatura TDR2548 entre o refrigerante pesado a montante do trocador de calor criogênico principal 100 e o refrigerante gasto (também é possível: TDR3348, não mostrado); TDR2715 e TDR5759;

- um teor máximo predeterminado (0,08 % molar) de componentes pesados na corrente de alimentação de hidrocarboneto que deve congelar no trocador de calor criogênico principal 100;

- válvulas de sucção e descarga nos compressores de refrigeração fechados;

- uma pressão de estrutura superior máxima especificada (5 barg) na extremidade fria do trocador de calor criogênico principal;

- detecção de um erro;

- existência de erros de comunicação no sistema de controle.

[00164] Claramente, outros limites de superação podem ser usados, por exemplo, no caso de outros tipos de trocadores térmicos criogênicos sendo usados.

[00165] A Tabela I abaixo mostra todas as variáveis usadas no teste como variável manipulada, enquanto a Tabela II abaixo mostra todas as variáveis usadas no teste como variáveis controladas ou variáveis monitoradas para tomada de decisão.

Tabela I: variáveis manipuladas

Descrição da variável	Símbolo de referência	Observações opcionais
-----------------------	-----------------------	-----------------------

Ponto de fixação do fluxo HMR		Por exemplo, fluxo através da segunda válvula JT 51
Posição da segunda válvula JT (51)	X51	Controles da taxa de esfriamento
Abertura da válvula de preparação de metano	X66	Controles de pressão de refrigerante e composição MR
Abertura da válvula de preparação de N <sub>2</sub>		
Abertura da válvula de preparação de etano		
Abertura da válvula de preparação de propano		
posição da válvula de reciclo (130) do compressor 30	X130	
Válvula de reciclo do primeiro estágio do compressor 31	X131	Usado para controlar a pressão de descarga MR
Válvula de reciclo do segundo estágio do compressor 31		
Válvula de reciclo do primeiro estágio (129) do compressor de pré-esfriamento 127	X129	Usado para controlar a pressão de sucção do refrigerante de pré-esfriamento
Abertura da primeira válvula JT (58)	X58	

Tabela II: variáveis controladas e monitoradas

Descrição da variável	Símbolo de referência	Observações opcionais
Fluxo HMR		por exemplo, fluxo através da segunda válvula JT 51; usado para determinar se a condensação ocorre
Fluxo LMR		por exemplo, fluxo através da segunda válvula JT 58; usado para determinar se a condensação ocorre
Pressão do tubo do circuito LMR	PR57	Usada para calcular o fluxo de LMR
Pressão do tubo de circuito HMR	PR54	Usada para calcular o fluxo de HMR
Pressão de descarga MR	PR32	Variável do processo; monitorada para alcançar a composição MR alvo
Pressão de sucção PR	PR150	Variável do processo
Pressão de sucção MR	PR55	Variável do processo
Inventário de N <sub>2</sub> (%)		Monitorado para alcançar a composição MR alvo
Inventário de metano		
inventário de etano		
Inventário de propano		
Temperatura a jusante da primeira válvula JT 58	TR59	Usada como variável de apoio para determinar o final do processo de resfriamento
Temperatura a montante da primeira válvula JT 56	TR57	Variável do processo
Temperatura inferior do trocador de calor criogênico	TR33	Variável do processo para o monitoramento da taxa de esfriamento
Temperatura da corrente de hidrocarboneto a montante do trocador de calor criogênico	TR20	Variável do processo
Temperatura a montante da segunda válvula JT 51	TR54	Variável do processo para o monitoramento da taxa de esfriamento
Temperatura superior do trocador de calor criogênico	TR40	Variável do processo, indica o final do processo de resfriamento
Compressor do parâmetro de desvio de onda 30		Variáveis do processo
Primeiro estágio do parâmetro de desvio de onda do compressor 31		
Segundo estágio do parâmetro de desvio de onda do compressor 31		

[00166] O processo automatizado para o resfriamento final do trocador de calor criogênico principal como descrito acima gradualmente reduziu a temperatura total do trocador de calor criogênico principal através da manipulação do fluxo de refrigerante misturado, a composição e a primeira e segunda válvulas JT que em parte determinam a relação de compressão intermitente através destas válvulas JT.

[00167] Embora não aplicado no teste, foi contemplado ainda incorporar a estrutura do módulo da Fig. 6 (ou uma similar para outro alinhamento ou trocador de calor) em uma rede de módulo maior que compreende outros módulos precedentes, ou módulos subsequentes, ou ambos. Um exemplo de incorporação com módulos subsequentes é mostrado na figura. 7.

[00168] A Fig. 7 mostra uma estrutura de módulo com algumas tarefas pós-resfriamento. Estas podem, por exemplo, ser tarefas intermediárias que necessitam ser completadas antes que um sistema automático de controle do processo para a operação normal possa assumir o controle. Por exemplo, o módulo 401 manipula a válvula degradada 44, com o objetivo de elevar o fluxo através do conduto 20 e 40 e da lateral do tubo de hidrocarboneto 29.

[00169] Outras variáveis manipuladas relevantes neste estágio incluem todas as variáveis manipuladas do estágio de resfriamento como descrito acima, acrescidas possivelmente do IGV e quaisquer válvulas de reciclo do compressor de refrigerante de pré-esfriamento que não foram incluídas como variável manipulada na automação do resfriamento.

[00170] Preferivelmente, a manipulação de LMR e HMR é feita com base no controle de fluxo ao invés da abertura de válvula.

[00171] Além disso, qualquer corrente de refluxo em uma extração de NGL em linha pode ser incluída como variável manipulada. No entanto, espera-se que o controle de nível normal possa assumir a direção após a taxa de alimentação de hidrocarboneto ter alcançado a sua faixa de operação

normal.

[00172] Outros módulos podem, portanto, estar em paralelo com o módulo 401. Como um exemplo, o módulo 402 foi representado, mas também poderia ser incluído um módulo para elevar qualquer seção de fracionamento que possa ser fornecida a jusante de qualquer coluna de extração de NLG para receber e ainda fracionar os líquidos de NLG extraídos. A pessoa de habilidade na técnica deve ser capaz de resolver quais variáveis manipuladas e controladas podem ser utilizadas, dependendo do tipo de alinhamento e equipamentos utilizados.

[00173] Os aparelhos e métodos aqui descritos podem ser aplicados aos trocadores térmicos criogênicos assim que um trocador de calor criogênico necessite ser resfriado antes da operação. Isto pode ser, por exemplo, o resfriamento inicial, ou o resfriamento após uma operação de manutenção ou após um erro: a razão pela qual o trocador era mais quente do que a temperatura de operação não é importante para a aplicação do assunto objeto aqui descrito.

[00174] A pessoa versada na técnica compreenderá que a presente invenção pode ser realizada de muitas maneiras diferentes, sem se afastar do escopo das reivindicações anexas. A invenção foi descrita com particularidade, incluindo a provisão de valores alvos para determinadas variáveis controladas. No entanto, será evidente para a pessoa versada na técnica que estes valores foram escolhidos em conexão com o alinhamento específico e equipamento utilizado para o teste. Tais detalhes podem necessitar de ser otimizados quando a invenção for realizada em outro alinhamento usando outro equipamento e, portanto, não devem ser considerados como limitativos do escopo da presente invenção.

## REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho para resfriar um trocador de calor criogênico (1) adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como um corrente de gás natural, em que o trocador de calor criogênico (1) é disposto para receber a corrente de hidrocarboneto a ser liquefeita e um refrigerante, para trocar calor entre a corrente de hidrocarboneto e o refrigerante, assim pelo menos parcialmente liquefazendo a corrente de hidrocarboneto, e descarregar pelo menos a corrente de hidrocarboneto parcialmente liquefeita e o refrigerante gasto que passou através do trocador de calor criogênico (1), o aparelho, caracterizado pelo fato de que compreende:

- um circuito de recirculação do refrigerante (10) para recircular o refrigerante gasto de volta para o trocador de calor criogênico (1), o circuito de recirculação do refrigerante (10) compreendendo pelo menos um compressor (11), uma válvula de reciclo do compressor (12), um refrigerador (13) e uma primeira válvula JT (14); e,

- um controlador programável disposto para:

(i) receber sinais de entrada que representam os sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas;

(ii) produzir sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas; e,

(iii) executar uma rede de pelo menos três módulos, em que um ou mais dos pelo menos três módulos recebem uma representação de um ou mais dos sinais de entrada e produzem as representações de um ou mais dos sinais de controle; e,

em que cada um dos pelo menos três módulos é disposto para:

(a) esperar até que um sinal de ativação seja recebido; e,

(b) iniciar a execução de uma sequência predeterminada de uma ou mais instruções legíveis por computador após a recepção do sinal de ativação pelo menos até que um alvo predeterminado do módulo para este

módulo seja atingido;

e que os módulos na rede estão interligados de tal forma que o sinal de ativação recebido por um segundo e um terceiro módulo dos pelo menos três módulos corresponde a um sinal de comunicação que é gerado sobre o primeiro módulo dos pelo menos três módulos que alcançam o alvo predeterminado para o primeiro módulo.

2. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o segundo e terceiro módulos que operam em paralelo um com o outro, por meio dos quais uma ação de controle de um destes módulos é forçada por uma variável que é influenciada pela manipulação de uma ou mais variáveis manipuladas por pelo menos o outro do segundo e terceiro módulos.

3. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que uma ou mais variáveis controladas compreendem uma taxa de alteração na temperatura ao longo do tempo.

4. Aparelho de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a taxa de alteração da temperatura ao longo do tempo compreende um ou mais da: temperatura do refrigerante no lado de sucção da primeira válvula JT (14); temperatura do refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT (14); temperatura da corrente de hidrocarboneto em um ponto dentro do trocador de calor criogênico (1); temperatura da corrente de hidrocarboneto a jusante do trocador de calor criogênico (1).

5. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que uma ou mais variáveis controladas compreendem um diferencial de temperatura espacial selecionado no ou ao redor do trocador de calor criogênico (1).

6. Aparelho de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que o diferencial de temperatura espacial selecionado reflete um ou mais dos seguintes diferenciais de temperatura: o diferencial de

temperatura entre o refrigerante gasto e o refrigerante em uma entrada de refrigerante (5) do trocador de calor criogênico (1); o diferencial de temperatura entre o refrigerante no lado de sucção e o refrigerante no lado de descarga da primeira válvula JT (14).

7. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que o trocador de calor criogênico (1) compreende um lado da estrutura para a evaporação do refrigerante e um lado do tubo para o resfriamento do refrigerante.

8. Aparelho de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que o diferencial de temperatura espacial selecionado reflete o diferencial de temperatura entre um lado da estrutura do trocador de calor criogênico (1) e um lado do tubo contendo refrigerante.

9. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que a jusante do refrigerador (13) e a montante da primeira válvula JT (14) um separador de líquido/vapor é fornecido no circuito de recirculação do refrigerante (10), para receber um refrigerante parcialmente condensado e separar a corrente de refrigerante parcialmente condensada em uma fração refrigerante pesada líquida e uma fração de refrigerante leve gasosa para descarregar a fração de refrigerante pesada líquida através de uma saída de líquido e a fração de refrigerante leve gasosa através de uma saída de gás, cujas frações são passadas para o trocador de calor criogênico (1), em que a primeira válvula JT (14) é disposta para controlar a passagem de uma destas frações, preferivelmente a fração de refrigerante leve.

10. Aparelho de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que a jusante do refrigerador (13) e a montante da primeira válvula JT (14) um separador de líquido/vapor é fornecido no circuito de recirculação do refrigerante (10), para receber um refrigerante parcialmente condensado e separar a corrente de refrigerante parcialmente condensada em

uma fração refrigerante pesada líquida e uma fração de refrigerante leve gasosa para descarregar a fração de refrigerante pesada líquida através de uma saída de líquido e a fração de refrigerante leve gasosa através de uma saída de gás, e em que o diferencial de temperatura espacial selecionado reflete um ou mais do: diferencial temperatura entre o refrigerante gasto e o refrigerante entre a saída de gás e uma entrada de refrigerante gasoso do trocador de calor criogênico (1); e, diferencial de temperatura entre o refrigerante gasto e o refrigerante entre a saída do líquido e uma entrada do refrigerante líquido do trocador de calor criogênico (1).

11. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 10, caracterizado pelo fato de que uma ou mais variáveis controladas compreendem um ou ambos de: uma primeira diferença de temperatura na corrente de refrigerante através da primeira válvula JT (14); e, uma pressão de sucção na corrente de refrigerante em um lado de sucção do compressor (11).

12. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, caracterizado pelo fato de que uma ou mais variáveis manipuladas pelo menos compreendem um ou ambos de: um primeiro ajuste da válvula JT (14) que representa uma medida da quantidade de abertura da primeira válvula JT (14); e, qualquer ajuste de pressão que controla a pressão do refrigerante a montante da primeira válvula JT (14).

13. Aparelho de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que o ajuste da pressão compreende um ajuste da válvula de reciclo do compressor (12) que representa uma medida da quantidade de abertura da válvula de reciclo do compressor (12).

14. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 13, caracterizado pelo fato de que o trocador de calor criogênico (1) compreende uma entrada de corrente de hidrocarboneto (7) e uma saída de corrente de hidrocarboneto (8) para a corrente de hidrocarboneto, e uma ou mais entradas de refrigerante separadas e uma saída de refrigerante (6) para o

refrigerante e o refrigerante gasto, respectivamente.

15. Método para resfriar um trocador de calor criogênico (1) adaptado para liquefazer uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

- fornecer um trocador de calor criogênico (1) disposto para receber a corrente de hidrocarboneto a ser liquefeita e um refrigerante, para trocar calor entre a corrente de hidrocarboneto e o refrigerante, desse modo pelo menos parcialmente liquefazendo a corrente do hidrocarboneto, e descarregar a pelo menos corrente de hidrocarboneto parcialmente liquefeita e o refrigerante gasto que passou através do trocador de calor criogênico (1);

- fornecer um circuito de recirculação de refrigerante (10) para recircular o refrigerante gasto de volta ao trocador de calor criogênico (1), o circuito de recirculação do refrigerante (10) compreendendo pelo menos um compressor (11), uma válvula de reciclo do compressor (12), um refrigerador (13) e uma primeira válvula JT (14);

- ativar um controlador programável que

(i) recebe sinais de entrada que representam os sinais de sensor de uma ou mais variáveis controladas;

(ii) produz sinais de controle para controlar uma ou mais variáveis manipuladas; e,

(iii) executa uma rede de pelo menos três módulos, em que um ou mais dos pelo menos três módulos recebem uma representação de um ou mais dos sinais de entrada e produzem representações de um ou mais dos sinais de controle;

e em que cada um dos pelo menos três módulos

(a) espera até que um sinal de ativação seja recebido; e,

(b) inicia a execução de uma sequência predeterminada de uma ou mais instruções legíveis por computador após receber do sinal de ativação

pelo menos até que um alvo modular predeterminado para este módulo seja atingido;

e em que um sinal de comunicação é gerado sobre o primeiro módulo dos pelo menos três módulos que alcança o alvo predeterminado para este módulo, em que o sinal de comunicação é passado para um segundo e um terceiro módulo dos três ou mais módulos onde o sinal de comunicação atua como o sinal de ativação para o segundo e o terceiro módulos.

16. Método de liquefação de uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

- resfriar um trocador de calor criogênico (1) adaptado para liquefazer a corrente de hidrocarboneto de acordo com o método como definido na reivindicação 15; e,

- subsequentemente liquefazer a corrente de hidrocarboneto em uma ou mais etapas, incluindo pelo menos a troca de calor da corrente de hidrocarboneto no trocador de calor criogênico (1).

17. Método de liquefação de uma corrente de hidrocarboneto, tal como uma corrente de gás natural, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

- resfriar um trocador de calor criogênico (1) adaptado para liquefazer a corrente de hidrocarboneto usando um aparelho como definido em qualquer uma das reivindicações de 1 a 14; e,

- subsequentemente liquefazer a corrente de hidrocarboneto em uma ou mais etapas, incluindo pelo menos a troca de calor da corrente de hidrocarboneto em um trocador de calor criogênico (1).

Fig. 1

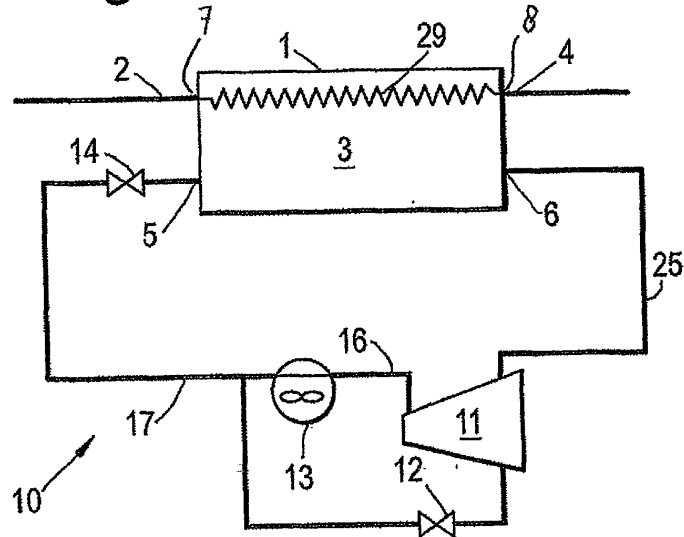


Fig. 2

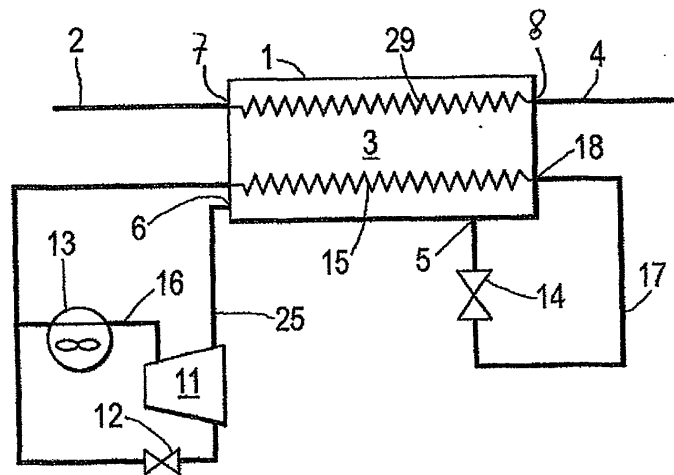
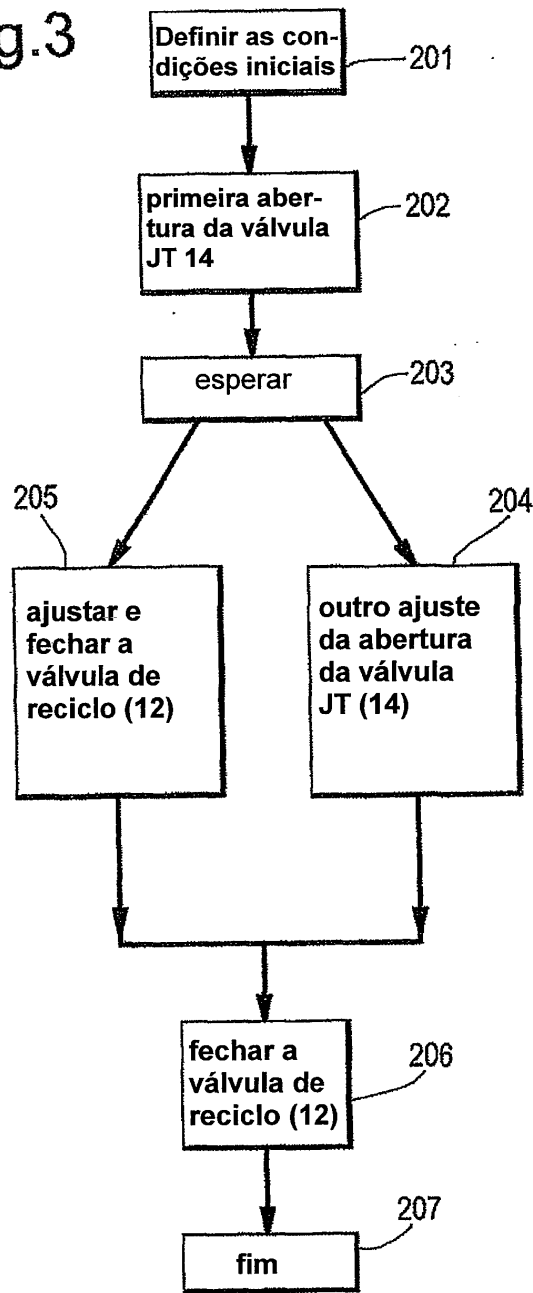


Fig.3



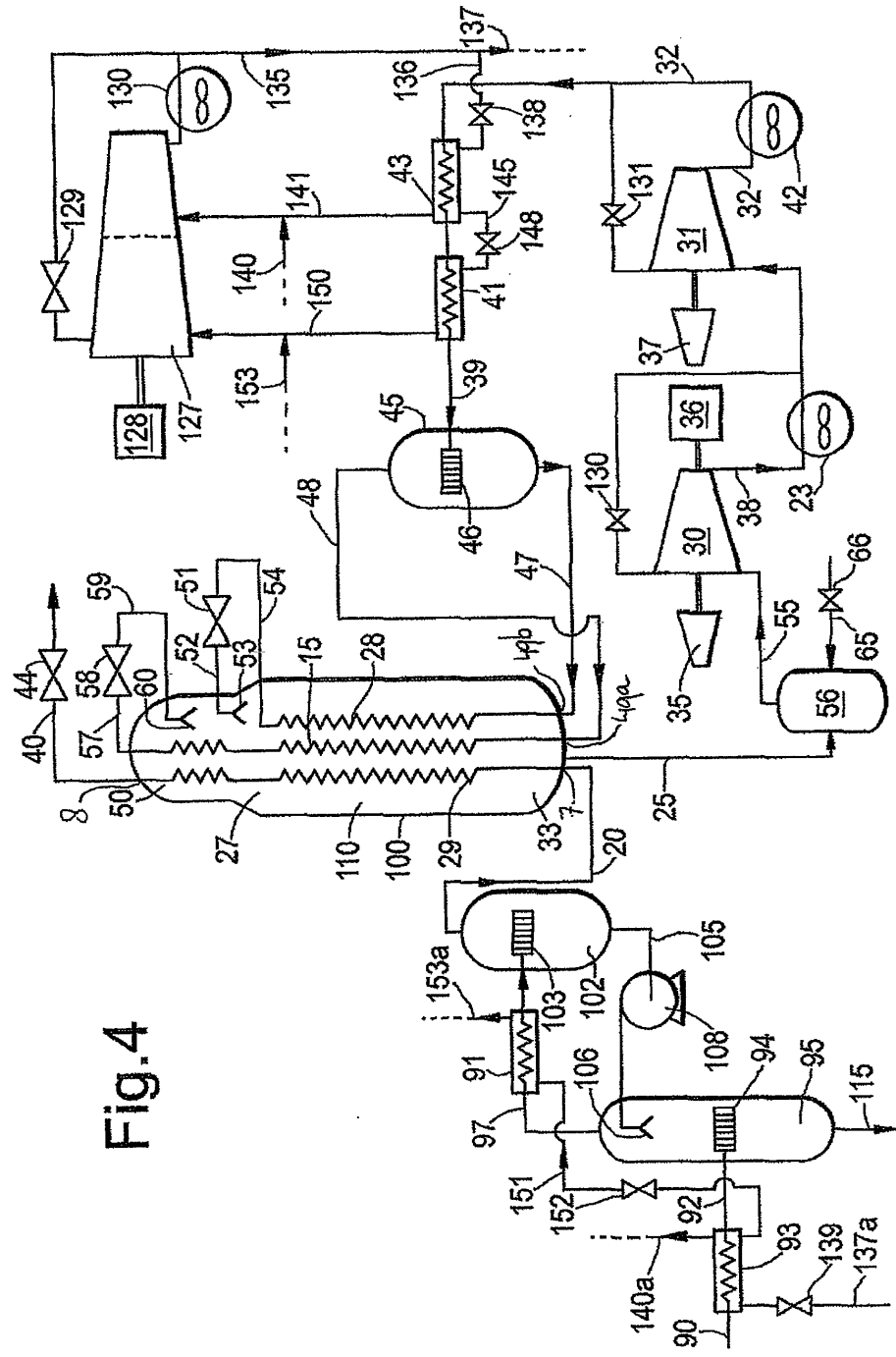


Fig.4



Fig.6

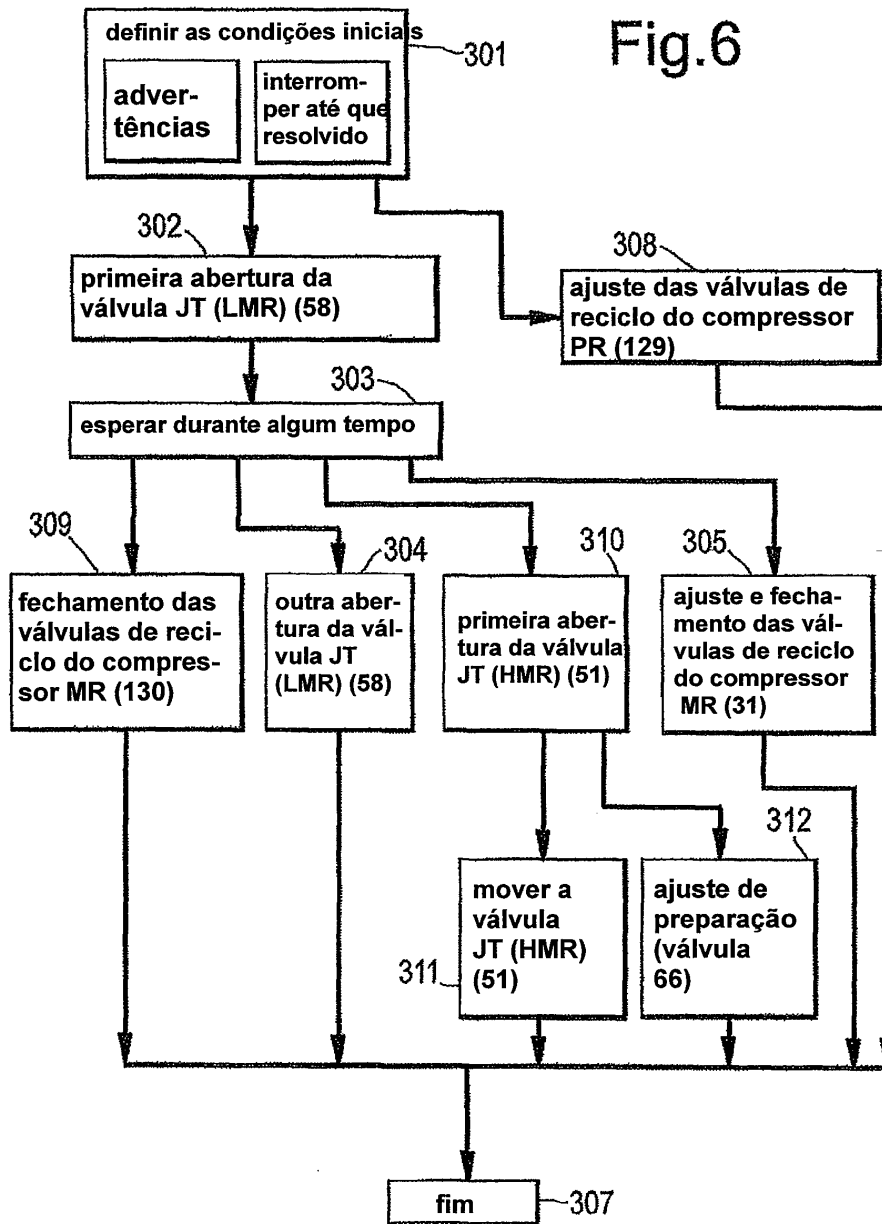


Fig.7

