



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

(11) PI 0804350-7 B1



(22) Data do Depósito: 16/10/2008

(45) Data de Concessão: 24/04/2019

(54) Título: MÉTODO PARA CONTROLE AUTÔNOMO DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO QUÍMICA PARA POÇOS DE PETRÓLEO E DE GÁS

(51) Int.Cl.: E21B 33/068.

(30) Prioridade Unionista: 02/11/2007 US 11/934.513.

(73) Titular(es): NATIONAL COUPLING COMPANY, INC.

(72) Inventor(es): ROBERT E. SMITH IV; MAURICE SLOT; RICHARD R. WATSON.

(57) Resumo: MÉTODO PARA CONTROLE AUTÔNOMO DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO QUÍMICA PARA POÇOS DE PETRÓLEO E DE GÁS. E divulgado um programa de controle para um sistema de medição de deslocamento positivo que mede o tempo exigido para o deslocamento de um pistão livre em um cilindro de volume conhecido para determinar uma vazão média durante o curso completo do pistão. O sistema também pode medir e registrar as pressões de entrada e de saída ou a pressão diferencial entre a entrada e a saída de fluido. O programa de controle posiciona uma válvula quadridirecional que pode funcionar como um orifício de medição ajustável em resposta à vazão média de fluido medida e/ou às mudanças nas pressões de entrada e de saída para alcançar a vazão desejada. No fim de cada curso, a válvula quadridirecional é reposicionada para inverter o fluxo de fluido através do cilindro de medição. O sistema pode revisar os ajustes de posição da válvula tanto para o curso direto quanto para o curso invertido com base no tempo medido exigido para um curso completo em uma certa posição de válvula. Desta maneira, o sistema compensa de forma automática e iterativa mudanças nas propriedades do fluido e (...).

"MÉTODO PARA CONTROLE AUTÔNOMO DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO QUÍMICA PARA POÇOS DE PETRÓLEO E DE GÁS"

Referência Cruzada a Pedidos Relacionados: Nenhuma.

Declaração Relativa Pesquisa ou Desenvolvimento com Patrocínio Federal: Nenhuma.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

1. Campo Técnico

Esta invenção diz respeito a sistemas de injeção química para poços de petróleo e de gás. Mais particularmente, ela diz respeito a sistemas de controle autônomo para a injeção de agentes de tratamento químico em fase líquida em poços submarinos.

2. Descrição da Tecnologia Relacionada incluindo informação divulgada sob 37 CFR 1.97 e 1.98

Uma variedade de agentes químicos é injetada em poços de hidrocarbonetos para o controle de corrosão, hidratos, asfaltenos, parafinas, incrustação e congêneres. Tipicamente, estes agentes químicos estão na fase líquida e são bombeados para dentro do poço em uma velocidade selecionada usando um sistema de injeção química. Para poços submarinos, o suprimento químico e a bomba podem ficar localizados em uma plataforma de produção, e são comumente conectados na cabeça do poço por meio de um cabo umbilical. Se a medição do agente químico for realizada somente na superfície, qualquer vazamento no cabo umbilical ou em seus conectores dará uma indicação errônea da quantidade de agente químico que é injetada no poço. Além do mais, cada poço submarino pode exigir seu próprio sistema de injeção na plataforma e na conexão do cabo umbilical.

Certos sistemas de medição da tecnologia anterior empregam um orifício variável – um orifício ajustável que permite o controle remoto do fluxo em cada poço. Outros sistemas de medição da tecnologia anterior se baseiam no controle de fluxo compensado por pressão – um regulador de pressão ajustável e um orifício fixo podem manter um fluxo constante em cada poço.

Freqüentemente, a medição de fluxo em uma grande faixa é necessária durante a vida útil do poço. A medição no orifício é limitada em relação à faixa e é sujeita à cobertura com filme, obstrução e propriedades de fluido diferenciadas.

Contaminação por particulados em longas linhas de injeção de produtos químicos é inevitável e pode obstruir os pequenos orifícios necessários para medição e controle. Filtros nas linhas são uma complicação a mais que afeta a confiabilidade do sistema, aumentando os custos de capital e exigindo manutenção periódica (o que aumenta os custos operacionais).

A patente US 6.973.936 de Richard R. Watson divulga um sistema de injeção de fluido que controla a distribuição de fluido de uma linha de suprimento para um poço sele-

60
cionado em uma taxa ajustável. Um pistão livre divide um cilindro em primeira e segunda câmaras. Uma válvula multiposições compreende uma primeira posição para passar fluido da linha de suprimento para dentro da primeira câmara para deslocar fluido da segunda câmara de volta, por meio da válvula, para um ponto de injeção, e uma segunda posição para 5 passar fluido da linha de suprimento para a segunda câmara para deslocar fluido da primeira câmara de volta, por meio da válvula, para o ponto de injeção. Um sistema de controle em comunicação com um sensor de posição determina o tempo de deslocamento do pistão livre para posições selecionadas e ajusta seletivamente uma abertura variável de válvula para ajustar a vazão, alterna entre a primeira e a segunda posições e, periodicamente, aumenta a 10 abertura da válvula para limpeza.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

A presente invenção pode ser incorporada em um programa de controle para um sistema de medição de deslocamento positivo de fluido que mede o tempo exigido para o deslocamento de um pistão livre em um cilindro de volume conhecido para determinar uma 15 vazão média durante um curso completo do pistão. O sistema também pode medir e registrar as pressões de entrada e de saída da pressão diferencial entre a entrada e a saída do fluido. O controlador pode assumir os comandos de vazão de uma cápsula de controle submarina cliente e ajustar a vazão pela abertura parcial de uma válvula quadridirecional toda vez que a válvula for invertida.

20 O programa de controle posiciona precisamente uma válvula quadridirecional que pode funcionar como um orifício de medição ajustável em resposta à vazão média medida e/ou às mudanças nas pressões de entrada e de saída para alcançar a vazão desejada. Na conclusão de cada curso, a válvula quadridirecional é reposicionada para inverter o fluxo de líquido através do cilindro de medição.

25 O sistema pode revisar ajustes de posição de válvula armazenados tanto para o curso direto quanto para o curso invertido com base no tempo medido exigido para um curso completo em uma posição de válvula atualmente armazenada. Desta maneira, o sistema compensa iterativamente todas as mudanças nas propriedades de fluido e na pressão do fluido. Certas modalidades da invenção compreendem adicionalmente um ciclo de limpeza 30 opcional que abre progressivamente a válvula de maneira gradual e pode, se necessário, abrir completamente a válvula em ambas as direções do fluido a fim de limpar uma obstrução do orifício da válvula. Descobriu-se que construção de vedação de corte ou de válvula tipo porta são os desenhos mais adequados para operação confiável quando fluidos em alta pressão são contaminados com material particulado rígido. O procedimento de operação 35 padrão para desobstruir uma válvula bloqueada deste tipo é movê-la para as posições completamente aberta e completamente fechada. Isto permite que os particulados acumulados passem e que os elementos de vedação sejam varridos para longe ou cortem todas as obs-

truções restantes. O emprego desta construção de válvula para a válvula quadridirecional de duas posições e o controle do atuador da válvula em resposta ao tempo de curso do cilindro resulta no preciso controle de fluxo com excelente resistência a contaminação.

A atuação da válvula de controle quadridirecional de duas posições pode ser realizada com um motor de passo convencional que aciona um parafuso de esferas para converter rotação em movimento linear. Descobriu-se que esta combinação dá precisão muito alta à posição linear da válvula. Esta precisão permite que a válvula seja parcialmente aberta, criando, assim, um orifício de precisão toda vez que a válvula for deslocada.

À medida que a válvula é deslocada para admitir fluxo ao primeiro lado e, então, ao outro lado do pistão do cilindro, a vazão é regulada pelo orifício de precisão criado pela válvula parcialmente aberta. Em certas modalidades, é incluído um tempo de contato depois que o pistão do cilindro completa seu deslocamento e que o fluxo foi interrompido. Isto fornece o preciso controle do volume dos produtos químicos injetados no fluxo contínuo de produção do poço de petróleo ou de gás em um certo período de tempo.

Um sistema de acordo com a invenção pode ser projetado para acomodar todos os produtos químicos atualmente usados para o controle de corrosão, hidratos, asfaltenos, parafinas e incrustação em poços de hidrocarboneto. Mudanças na viscosidade ou na densidade do fluido não exigem a recalibração do sistema de medição de deslocamento positivo. Dados de verificação podem ser transmitidos à cápsula de controle submarino cliente.

O uso de uma pluralidade de sistemas de acordo com a invenção pode fornecer a garantia do fluxo de produtos químicos de tratamento para múltiplos poços submarinos a partir de um único cabo umbilical.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

A figura 1 é um diagrama esquemático de um aparelho de injeção química da tecnologia anterior que pode ser controlado pelo método da presente invenção.

A figura 2 é uma vista seccional transversal da válvula de controle usada no aparelho da figura 1 em uma primeira posição.

A figura 3 é uma vista seccional transversal da válvula de controle mostrada na figura 2 em uma segunda posição.

A figura 4 é uma vista seccional transversal ampliada de uma parte da válvula mostrada na figura 2.

A figura 5 é um diagrama esquemático de um sistema de injeção química modificado para uso com a presente invenção.

A figura 6 é um fluxograma que representa as etapas de um método de acordo com uma modalidade da invenção.

A figura 7 é um gráfico do fluxo produzido por uma válvula de controle representativa em particular em função do número de passos feitos por um motor de passo que aciona o

atuador da válvula.

A figura 8 é um fluxograma que representa as etapas de um método de acordo com uma segunda modalidade da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

A figura 1 ilustra esquematicamente detalhes de um corpo de medição 12 interconectado com um sistema de controle 14 e uma válvula multiposições 16 acionada pelo atuador 45 em um sistema de injeção química 10. O corpo de medição 12 tem um furo 20 para conter fluido químico a ser distribuído em um poço. Um pistão livre axialmente móvel 22 no furo 20 divide o corpo de medição 12 em primeira e segunda câmaras 24, 26 com volume variável. O pistão livre 22 veda o corpo de medição 12 com um elemento de vedação, tal como o anel O 25. Convencionalmente, o corpo de medição 12 e o pistão livre 22 compreendem um conjunto de cilindro e pistão, como mostrado. Os primeiro e segundo orifícios de entrada – saída 28, 30 são fornecidos para passar fluido para dentro e para fora das primeira e segunda câmaras 24, 26. A linha de suprimento 33 fornece fluidos químicos em alta pressão por meio da válvula multiposições 16 até o corpo de medição 12.

Em uma primeira posição de válvula mostrada na figura 1, conceitualmente ilustrada pelo alinhamento dos segmentos de linha paralelos 18 com as linhas 31 e 33, o fluido passa da linha de suprimento 33, por meio da válvula multiposições 16, da linha 29 e do orifício de entrada – saída 30, e para dentro da câmara 26. À medida que o fluido passa para dentro da câmara 26, a pressão do fluido impele o pistão livre 22 na direção da extremidade 34 do corpo de medição 12, diminuindo o volume da primeira câmara 24 e deslocando o fluido para fora por meio do orifício de entrada – saída 28. O fluido que sai pelo orifício 28 passa através da linha 27, de volta através da válvula 16, e para fora através da linha 31 até um ponto de injeção no poço.

Em uma segunda posição (não mostrada), que pode ser conceitualmente visualizada pelo deslizamento das linhas de fluxo cruzadas 15 na válvula 16 para a esquerda para alinhar com as linhas 31 e 33, o fluido passa da linha de suprimento 33, através da válvula multiposições 16, da linha 27, do orifício de entrada – saída 28, e para dentro da câmara 24. À medida que o fluido passa para dentro da câmara 24, a pressão do fluido impele o pistão livre 26 na direção da extremidade 26 do corpo de medição 12, diminuindo o volume da câmara 26 e deslocando o fluido para fora por meio do orifício de entrada – saída 30. O fluido que sai pelo orifício 30 passa através da linha 29 de volta, através da válvula 16, e para fora através da linha 31 para o mesmo ponto de injeção no poço. Assim, invertendo repetidamente a direção da válvula multifunções 16 depois que o pistão livre 22 alcançou uma posição selecionada, o fluido pode passar continuamente da linha 33 para a linha 31 até o ponto de injeção no poço.

Sensores de posição 38 e 40 são incluídos para detectar a posição do pistão livre

22. Sensores de posição 38, 40 estão em comunicação com o sistema de controle 13, como representado pelas linhas tracejadas 39, 41 por meio de dispositivo convencional, tais como um sinal por fios, por fibra ótica ou sem fios. Quando o pistão livre 22 alcançar posições selecionadas, os sensores de posição 38, 40 sinalizam o sistema de controle 14, em resposta ao que o sistema de controle 14 pode inverter seletivamente a posição da válvula multiposições 16 para inverter a direção do deslocamento do pistão livre 22.

Em virtude de as posições selecionadas ser conhecidas, o deslocamento relativo do pistão livre 22 também é conhecido, correspondente a um deslocamento volumétrico conhecido do fluido do corpo de medição 12, computado como o produto do deslocamento do pistão livre 22 e da área seccional transversal do furo 20. O sistema de controle 14 inclui um cronômetro interno para sincronizar o deslocamento do pistão livre 22 entre as posições selecionadas, da forma sinalizada pelos sensores de posição 38, 40. Portanto, também é conhecida uma vazão volumétrica que pode ser computada como o deslocamento volumétrico dividido pelo tempo de deslocamento. A válvula multiposições 16 inclui uma abertura variável de válvula discutida a seguir em conjunto com as figuras 2 – 4, para controlar o fluxo entre a linha de suprimento 33 e o corpo de medição 12. O sistema de controle 14 ajusta seletivamente a abertura variável da válvula em resposta ao tempo de deslocamento do pistão livre 22. Se o tempo de deslocamento for muito grande, indicando uma vazão menor do que a vazão desejada, o sistema de controle 14 pode aumentar a abertura variável da válvula para aumentar a vazão. Inversamente, se o tempo de deslocamento for muito curto, indicando uma vazão maior do que a vazão desejada, o sistema de controle 14 pode diminuir seletivamente a abertura da válvula para reduzir a vazão. Desse modo, a vazão da distribuição de fluido no poço é controlada.

Da forma mostrada na figura 1, preferivelmente, as posições selecionadas do pistão livre 22 são as posições do pistão livre 22 tendo alcançado ambas as extremidades 34, 36 do corpo de medição 12. As posições selecionadas do pistão livre 22 podem ser, alternativamente, qualquer lugar ao longo da faixa de deslocamento do pistão livre 22, e não precisa ser nas extremidades 34, 36 do corpo de medição 12. Em modalidades típicas, como ilustrado, os sensores de posição 38, 40 estão, substancialmente, na mesma posição axial das posições selecionadas. Sensores de posição convencionais, tais como pinos carregados por mola, ou sensores de proximidade magnéticos ou infravermelhos, podem ser usados. Em outras modalidades, concebivelmente, os sensores de posição podem não precisar estar axialmente alinhados com as posições selecionadas. Um sensor de posição pode compreender adicionalmente um transdutor de pressão 49 opcional ou um transdutor de fluxo 42. Válvulas de orifício opcionais, tais como podem compreender os elementos de vedação 43, 44 no pistão livre 22, podem ser incluídas para vedar os orifícios de entrada – saída 28, 30 quando o pistão livre alcançar as extremidades 34, 36. Isto pode diminuir mais dramaticamente

mente a pressão na linha 31 e, desse modo, fornecer uma indicação mais distinta de que o pistão livre 22 alcançou a extremidade do seu deslocamento. Uma indicação como esta pode fornecer um substituto para confirmar ou substituir os sensores de posição 38 e 40.

Os termos "primeira posição" e "segunda posição" em relação à válvula 16 dizem respeito, no geral, à direção resultante do fluxo, em vez de uma posição fixa dos componentes da válvula 16, em virtude de, no geral, haver um grau de ajustabilidade em cada uma das duas posições, tal como para ajustar a vazão. A figura 2 mostra uma vista detalhada da modalidade preferida da válvula multiposições 16 na primeira posição da válvula, parcialmente aberta para limitar o fluxo através da válvula. A figura 3 mostra uma vista detalhada da válvula 16 preferida na segunda posição da válvula, também parcialmente aberta. A figura 4 mostra com detalhes mais próximos uma parte da válvula tipo porta 16 na primeira posição da válvula da figura 2.

Particularmente, em relação à figura 2, ao diagrama esquemático da figura 1 e à vista mais próxima da figura 3, a válvula multiposições é indicada, no geral, em 16, com um corpo 17. Uma porta 50 fica posicionada em uma cavidade 52 no corpo 17. A porta 50 tem um furo 54 que, na posição mostrada, está em comunicação com um orifício de entrada 32 e com uma primeira passagem de fluxo 56 que se estende através do corpo 17 até um primeiro orifício de troca 57. Assim, nesta posição, fluido químico suprido pela linha de suprimento 33 supradiscutida escoar para dentro do corpo 17 através do orifício de entrada 32, através do furo da porta 54 e através da primeira passagem de fluxo 56, saindo através do primeiro orifício de troca 57 até a linha 29. Como exposto, o fluido passa através da linha 29 para dentro do corpo de medição 12, e outro fluido passa do corpo de medição 12, através da linha 27, de volta para a válvula 16. Então, o fluxo passa de volta para dentro do corpo 17, através do segundo orifício de troca 59, para o interior de uma segunda passagem de fluxo 58, passa ao redor da porta 50 para dentro de uma passagem de saída 53, e para fora através de um orifício de saída 55. Finalmente, o fluxo para fora através do orifício de saída 55 passa através da linha 31 até o ponto de injeção no poço, como exposto.

Na figura 3, o furo da porta 54 é posicionado, ao contrário, em comunicação com o orifício de entrada 32 e com a segunda passagem de fluxo 58. Assim, o fluxo da linha 33 passa através do orifício de entrada 32 para dentro da passagem de entrada 51, através do furo da porta 54, e através da segunda passagem de fluxo 58, saindo através do segundo orifício de troca 59 até a linha 27. Como exposto, o fluido passa através da linha 27 para dentro do corpo de medição 12, e outro fluido passa do corpo de medição 12, através da linha 29, de volta para a válvula 16. Então, o fluido passa de volta para dentro do corpo 17 através do primeiro orifício de troca 57, para dentro da primeira passagem de fluxo 56, para dentro da passagem de saída 53, e para fora através do orifício de saída 55. Finalmente, o fluxo para fora através do orifício de saída 55 passa através da linha 31 até o ponto de inje-

ção no poço. Assim, como descrito em relação à figura 1, o fluxo entre a válvula 16 e o corpo de medição 12 pode ser invertido movendo a válvula entre as primeira e segunda posições de válvula mostradas, respectivamente, na figura 2 e na figura 3, mas em cada caso, o fluxo líquido é da linha 33 até a linha 31 até o ponto de injeção no poço.

Na modalidade mostrada nas figuras 2 – 4, o motor de passo 45 aciona um parafuso de esferas 48 para mover axialmente a porta 50 na cavidade 52, ajustando o tamanho do caminho do fluxo definido entre o furo da porta 54 e a primeira passagem de fluxo 56, desse modo, ajustando o fluxo em uma vazão desejada. A porta 50 pode mover-se axialmente para trocar entre a primeira posição da válvula da figura 2 e a segunda posição da válvula da figura 3. Versados na técnica percebem dispositivos alternativos para mover o portão, diferentes do motor de passo 45.

O dispositivo de efeito Hall usando na percepção de movimento e nas chaves de limite de movimento podem oferecer maior confiabilidade em ambientes extremos. Uma vez que não há partes em movimento envolvidas no sensor ou ímã, a expectativa de vida útil típica é aumentada, se comparado com chaves eletromecânicas tradicionais. Adicionalmente, o sensor e o ímã podem ser encapsulados em um material protetor apropriado. O dispositivo de efeito Hall, quando apropriadamente embalado, é imune à poeira, sujeira, lama e água. Estas características tornam o dispositivo de efeito Hall particularmente preferido em um sistema de acordo com a presente invenção para a percepção da posição do pistão, se comparado com dispositivos alternativos, tais como percepção ótica e eletromecânica.

Controle do fluxo em uns poucos galões por dia em queda de pressão de diversas centenas libras por polegada quadrada exige um orifício muito pequeno de apenas poucos milésimos de uma polegada. A válvula usada em uma modalidade preferida em particular da invenção é uma válvula com vedação de corte tipo porta com uma taxa de rejeição de 2.880:1. Esta válvula fornece o pequeno orifício exigido e inverte o fluxo para cada carga de deslocamento positivo para que a obstrução seja evitada.

Certos sistemas da tecnologia anterior usavam filtros para evitar a obstrução de pequenos orifícios de controle de fluxo por particulados, mas, tipicamente, estes filtros precisam passar por manutenção submarina, o que é altamente oneroso. Dispositivos da tecnologia anterior também usavam orifícios capilares, que têm maior área, para uma dada restrição do fluxo, e estes podem ser feitos para ajustar seu diâmetro do furo por meio de uma rosca de parafuso afunilada casada para que as vazões possam ser mudadas, e uma abertura maior temporária pode ser usada para fornecer a limpeza de contaminação. Com cada uma destas soluções, a medição de uma ampla faixa de vazões é uma tarefa necessária separada que exige onerosa instrumentação de fluxo. O fluxo não pode ser precisamente medido pela perda de pressão através de um orifício de restrição desconhecida, como na situação com obstrução parcial por particulado. A presente invenção pode incluir dispositivo

para criar o pequeno orifício casado com uma válvula tipo porta quadridirecional que é constantemente deslocada para evitar a obstrução, e também pode ser completamente aberta para permitir que o particulado passe. Além do mais, o sistema fornece medição muito precisa do fluxo que é imune à obstrução parcial ou à mudança das propriedades do fluido ou cobertura do orifício com filme – todas as condições que estão presentes e podem destruir medidores convencionais que se baseiam em uma queda de pressão através de um orifício.

Os transdutores de pressão 49 e 49' podem fornecer ao controlador mais informação com a qual se estabelece o grau de abertura da válvula, mas eles não podem medir ou verificar a vazão. A medição e a verificação da vazão são fornecidas por circuitos de sincronia e sensores de posição no cilindro de deslocamento positivo.

Se o cilindro de deslocamento deixar de fazer o curso no tempo esperado, uma condição que indica obstrução, o controlador pode acionar a válvula quadridirecional para a posição completamente aberta para permitir que restos passem.

Um orifício não pode ser usado como um dispositivo de medição de fluxo submarino confiável em virtude de ele estar sujeito à obstrução e à cobertura com filme (revestimento) pelos produtos químicos que passam através dele. Os produtos químicos que são medidos em um sistema de injeção química para um poço de hidrocarboneto podem ter características de cobertura com filme como um traço desejado. Dispositivos de medição de fluxo comuns da tecnologia anterior usam uma medição de perda de pressão através de um orifício para indicar o fluxo. Se um sistema de medição de queda de pressão barato não puder ser usado, as alternativas convencionais são onerosas. Adicionalmente, nenhum outro dispositivo de medição, tais como tipo turbina, ultra-sônico, turbilhão ou de massa térmica, pode atender a faixa de um cilindro de deslocamento de acordo com a presente invenção. Todos eles são limitados à faixa total de 100:1 até 200:1. Isto significa que eles podem medir precisamente 1 galão por dia (GPD) (3,79 L por dia) até cerca de 200 GPD (757,09 L por dia). Um sistema de acordo com a presente invenção pode medir 1 GPD (3,79 L por dia) até mais de 3.000 GPD (11.356,24 L por dia). Também, muitos produtos químicos para o tratamento de poço são fluidos não-Newtonianos, isto é, suas viscosidades mudam com a pressão de uma maneira não linear, uma característica que torna a medição precisa de fluxo mais desafiadora para a maior parte das tecnologias de medição da tecnologia anterior, mas que não tem efeito em um sistema que emprega um cilindro de deslocamento positivo.

Agora, em relação à figura 6, uma modalidade preferida em particular da invenção é divulgada na forma de um fluxograma que representa certas etapas de um método para controlar uma válvula em um sistema de injeção química. O sistema de injeção química pode compreender um processador, e um método pode ser implementado como instruções para o processador que podem ser armazenadas em uma mídia de armazenamento.

Da forma representada na figura 6A, o processo pode começar na entrada manual

100 com um operador inserido a vazão desejada do produto químico a ser injetado. A vazão pode ter as dimensões de unidade de volume por unidade de tempo. As vazões para sistemas de injeção química usadas em conjunto com poços de petróleo e de gás na indústria de energia doméstica são freqüentemente expressas em galões por dia (GPD). Em certas modalidades, a inserção da vazão desejada pode ser realizada por um operador situado em uma plataforma de produção em alto-mar, e o comando pode ser transmitido ao controlador na cabeça do poço submarino, ou próximo dela, por meio de um cabo umbilical. O comando também pode ser transmitido por meio de um sistema de telemetria de uma instalação ao largo ou de uma outra unidade em alto-mar.

Em uma modalidade preferida em particular, a inicialização do sistema inclui acionar o atuador da válvula até um limite mecânico pelo comando de um motor de passo que aciona o atuador para caminhar inúmeros passos em uma direção que excede o número de passos previamente determinado para corresponder a todo o deslocamento do atuador. Uma ou mais inversões do atuador, seguidas pela tentativa de deslocamento “direto” em excesso do deslocamento invertido, podem ser usadas para garantir que o atuador fique firme em relação ao limite mecânico. Assim, embora a posição inicial da válvula possa ser desconhecida mediante a inicialização do sistema, uma rotina de inicialização pode ser usada para mover a válvula para uma posição conhecida. No bloco 105, o sistema pode determinar ajustes iniciais de válvula (número de passos) para a posição de válvula tanto direta quanto invertida a partir da vazão desejada inserida em 100, uma curva de fluxo armazenada 115 e dados de posição de atuação da válvula 120 – isto é, o número de passos da posição fechada da válvula até o ponto no qual o orifício da válvula começa a abrir em uma certa direção. Em uma modalidade preferida em particular, a inicialização inclui mover o atuador da válvula da posição de limite mecânico para uma posição fechada “central” definida para ser o ponto médio entre a posição de atuação da válvula “direta” e a posição de atuação de válvula “invertida”. A título de exemplo, usando a curva de fluxo da figura 7, se a vazão desejada for 40 GPD (151,42 L por dia) e a posição de atuação da válvula direta for 33 passos a partir da posição fechada “central”, então o ajuste de válvula direta inicial será 171 passos a partir do centro (138 + 33). Descobriu-se que a posição de atuação da válvula depende da válvula e pode variar de válvula para válvula e/ou mudar depois de manutenção na válvula ou no atuador da válvula. Os ajustes de válvula direta e invertida podem ser carregados em registros designados para esta função.

Os dados da curva de fluxo 115 podem ser na forma de uma curva de fluxo digitalizada, tal como a curva representada na figura 7. Em uma modalidade preferida em particular, os dados de fluxo são tabulados para cada passo de uma válvula atuada por motor de passo. Em outras modalidades, os dados da curva de fluxo podem ser na forma de uma representação matemática – por exemplo, valores de inclinação e de intercepto para uma

curva de fluxo substancialmente linear. No caso de modalidades que usam curvas digitalizadas, o sistema pode compreender dispositivo para interpolação dos pontos de dados usando técnicas de adaptação de curva convencionais.

Em certas modalidades (não mostradas), as entradas iniciais do sistema podem incluir a seleção de uma curva de fluxo em particular que pode estar associada com um produto químico ou com uma mistura de produtos químicos em particular a ser injetados ou com uma certa propriedade do fluido a ser injetado, por exemplo, a gravidade específica do fluido, a viscosidade do fluido, a concentração de um(s) ingrediente(s) ativo(s) em um solvente, ou congêneres. Em ainda outras modalidades, a entrada inicial pode incluir um fator de correção que o sistema pode usar para modificar uma curva de fluxo de uso geral previamente armazenada para uso com um produto químico ou propriedade de produto químico específicos, isto é, a curva de fluxo armazenada pode ser para diluir soluções aquosas, e um fator de correção fornecido permite que o sistema adapte a curva para um fluido com propriedades reológicas substancialmente diferentes. Entretanto, percebe-se que o sistema de acordo com a presente invenção compensará automaticamente fluidos com diferentes propriedades, e adaptar a curva de fluxo a um fluido específico fornece uma vantagem somente nos ajustes iniciais da posição da válvula e nas primeiras poucas computações das correções de ajuste de válvula.

Mediante a inicialização do sistema, a posição do pistão livre 22 no furo 20 pode ser desconhecida. Dessa maneira, mediante inicialização, o sistema pode configurar a válvula para acionar o pistão em um local conhecido. No losango de decisão 125, o sistema pode, primeiro, testar a atuação da chave-limite direto (indicando que o pistão 22 está na extremidade do deslocamento do curso direto). Se a atuação da chave for detectada, o processo pode prosseguir no bloco 130 para a seqüência de curso invertido. Se a chave-limite direto não for atuada (ramificação N no losango 125), o sistema prossegue no bloco 140 com uma seqüência de curso direto (veja figura 6B).

Após a inicialização do sistema, o processo de fluxo normal de ciclos alternados direto e invertido pode começar. Uma seqüência de curso direto representativa é ilustrada no fluxograma da figura 6B, e uma seqüência de curso invertido correspondente é representada na figura 6C.

Agora, em relação à figura 6B, a seqüência de curso direto começa no bloco 200 com o ajuste de válvula do curso direto atual (que pode ser em passos do limite do atuador, da posição central (fechada), ou da posição de válvula mais recente) sendo carregado do registro 202. No bloco 204, a válvula de controle é acionada pelo motor de passo até o ajuste de válvula direta mais atual, e um cronômetro é iniciado (bloco 205). Nesta condição, agora, o sistema está medindo fluido através da válvula de controle 16 da linha de suprimento 33 até a câmara 26 por meio da linha 29. À medida que fluido é bombeado para dentro da

câmara 26, o pistão 22 se move (para a esquerda na figura 5) deslocando fluido na câmara 24, que flui por meio da linha 27, da válvula 16 e da linha 31 até o ponto de injeção do poço. A pressão do fluido na linha de injeção 31 pode ser medida pelo transdutor de pressão 49, enquanto que aquela na linha de suprimento 33 é medida pelo transdutor de pressão 49'.

O programa pode incluir uma ou mais rotinas que testam o movimento do pistão. Por exemplo, uma seqüência de curso direto (figura 6B) é usualmente inserida a partir da conclusão de uma seqüência de curso invertida sinalizada pela atuação da chave-limite reversa 40. O movimento do pistão 22 para longe do limite de curso invertido deve desativar a chave-limite reversa 40. Esta condição pode ser testada no losango 208. Se a chave permanecer ativada (isto é, o pistão ainda estiver na faixa de atuação da chave-limite), o sistema pode esperar por um intervalo de tempo selecionado antes de tomar a ação corretiva. Na modalidade ilustrada, o sistema espera (no losango 210) um intervalo igual a 50 % do tempo de curso esperado (volume do deslocamento do cilindro dividido pela vazão selecionada) e, se a chave-limite invertida permanecer ativada, a válvula pode ser aberta 20 passos adicionais (no bloco 212). De maneira similar, agora, o sistema pode esperar (no losango 216) um intervalo de tempo adicional que, na modalidade ilustrada, é igual ao tempo de curso esperado (agora, cumulativamente, 150 % do tempo de curso esperado) para a chave-limite reversa para desativar (losango 214). Como antes, se o pistão não se mover suficientemente para desativar a chave-limite reversa, a válvula é aberta em 20 passos adicionais (no bloco 218). Na modalidade ilustrada, a abertura progressiva da válvula no caso de nenhum movimento de pistão pode ser repetida nos losangos 220 e 222 com abertura adicional da válvula no bloco 224. Se a chave-limite reversa permanecer ativada (ramificação N no losango 226) e o tempo cumulativo desde que a abertura da válvula alcançou 350 % do tempo de curso esperado (ramificação S no losango 228), um ciclo de descarga (descrito mais completamente a seguir) pode ser iniciado (no bloco 230). Entretanto, se a chave-limite reversa for desativada (ramificações S nos losangos 208, 214, 220 ou 226), o sistema prossegue para o bloco de seqüência de curso direto normal 232.

Enquanto o fluido estiver fluindo, as saídas dos transdutores de pressão 49 e 49' podem ser periodicamente amostradas e uma pressão diferencial (ΔP) pode ser armazenada pelo controlador 14. Em uma modalidade preferida em particular, uma média corrida ΔP é armazenada pelo controlador 14 juntamente com os três valores ΔP mais recentes em uma pilha PEPS. Algoritmos de filtragem adicionais podem ser aplicados para eliminar ou reduzir a influência dos aumentos de pressão que podem ser encontrados durante um curso. Este processo pode ser implementado da forma mostrada na figura 6B no bloco 232, cuja subrotina é executada em um intervalo pré-selecionado medido no losango 238.

No curso normal dos eventos, fluxo de fluido continua até que o pistão 22 alcance o fim do seu curso direto (parede esquerda da cavidade 24 na figura 5) que ativa a chave-

70
limite 38, cuja ativação é detectada no losango 234. Da forma mostrada na figura 6C, o cronômetro é interrompido no bloco 270, e o tempo acumulado no contador do cronômetro é o tempo total que o pistão 22 leva para deslocar em um curso completo. Uma vez que um curso completo desloca um volume conhecido de fluido (da forma determinada pelas dimensões físicas do cilindro 12 e do pistão 22), este volume dividido pelo tempo acumulado produz a vazão média do fluido durante aquele curso direto em particular. No bloco 272, a vazão média medida para o curso é comparada com a vazão desejada que foi inserida pelo operador em 100.

Correções (se houver) no ajuste da válvula do curso direto são computadas no bloco 274. Em uma modalidade preferida em particular, a diferença entre a vazão medida e a vazão desejada é equacionada em um certo número de passos a partir da curva de fluxo armazenada em 115. A correção pode ser retirada diretamente da curva ou computada a partir da derivada primeira da curva. Como exposto, em certas modalidades, o sistema pode interpolar os pontos de dados a fim de determinar a correção.

Da forma mostrada no bloco 276, a correção do ajuste da válvula pode ser adicionalmente refinada por um fator relacionado a uma mudança na média ΔP do curso direto anterior. Em certas modalidades, o fator de correção ΔP pode ser em função (no todo ou em parte) dos valores ΔP selecionados, por exemplo, os três valores ΔP mais recentes na pilha PEPS da modalidade ilustrada. Especialmente em vazões relativamente lentas, uma mudança no ΔP imediatamente antes do fim do curso pode ser mais indicativa do ΔP provável de ser encontrado durante o próximo curso direto.

A correção do ΔP pode ser derivada de valores de vazão empiricamente determinados em várias pressões diferenciais. Em outras modalidades, a correção do ΔP pode ser calculada a partir de uma função que relaciona o fluxo (ou passos do motor do atuador da válvula 45) ao ΔP .

Deve-se detectar que o processo da presente invenção funcionará sem dados do ΔP , isto é, a ausência ou falha de um sensor de pressão 49 não desabilitará o sistema. As correções computadas no bloco 274 compensarão as mudanças no ΔP . O uso da informação do ΔP (no bloco 276) habilita o sistema a fazer melhores prognósticos do ajuste de válvula necessário para produzir a vazão desejada. Entretanto, o processo iterativo irá "zerar" no ajuste correto mesmo sem estes dados.

No bloco 278, o ajuste de válvula revisado a ser usado no próximo curso direto é armazenado no registro (ou em outro dispositivo de armazenamento) projetado para este propósito, e o processo prossegue até a sequência de curso invertido, da forma mostrada no bloco 282 (e nas figuras 6D e 6E). Opcionalmente, no bloco 280, dados relacionados à sequência de curso recém-concluída podem ser registrados antes de prosseguir até a sequência de curso invertido. Exemplos de dados de registro incluem tempo de curso real, e tempo

e número de aberturas adicionais da válvula (por exemplo, blocos 212, 218, 224, 240 e/ou 246), e se um curso de descarga (blocos 230 ou 256) foi exigido. Quaisquer outros parâmetros detectados pelo sistema também podem ser gravados nesta etapa do processo.

Uma vez que o deslocamento completo do pistão livre 22 desloca um volume conhecido de fluido, o tempo que deve ser exigido para um curso completo do pistão 22 na vazão desejada pode ser calculado para produzir um tempo de curso esperado. Da forma mostrada no bloco 236, o tempo de curso decorrido pode ser comparado com o tempo de curso esperado e, se o tempo de curso decorrido exceder o tempo de curso esperado em uma margem selecionada (100 % no exemplo ilustrado), o sistema pode iniciar ação corretiva – abertura progressiva da válvula em incrementos de 20 passos em 200 % do tempo de curso esperado (losango 236) e, novamente, em 300 % do tempo de curso esperado (losango 244). Se o tempo exceder 400 % do tempo de curso esperado (ramificação S no losango 254), um ciclo de descarga (bloco 256) é iniciado na modalidade ilustrada. Em cada uma destas rotinas, leituras do ΔP podem ser feitas e armazenadas (blocos 250 e 260) em um intervalo de tempo selecionado e repetitivo (losangos 248 e 258).

O controle de um curso de movimento “invertido” - isto é, um curso em que a válvula de controle fica posicionada de maneira tal que o caminho do fluxo 15 seja ativo e o fluido flua para dentro da câmara 24 por meio da linha 27 e seja expelido pela câmara 26 e no interior da linha 29 à medida que o pistão 22 se move da esquerda para a direita na figura 5 - é ilustrado nas figuras 6D e 6E. O processo é análogo àquele ilustrado para um curso “direto” nas figuras 6B e 6C e discutido anteriormente. Números de referência para elementos correspondentes nas figuras 6B e 6C diferem em um valor de 100 em relação àqueles das figuras 6D e 6E. O ajuste da válvula de curso invertido atual pode ser armazenado no registro 302 e carregado no controlador no bloco 300. Correções computadas para o ajuste da válvula de curso invertido no bloco 374 e (opcionalmente) no bloco 376 podem ser armazenadas no registro 305 no bloco 378 e usadas para o próximo curso invertido. Na conclusão de um curso “invertido”, o processo retorna à seqüência de curso direto (no bloco 382). Desta maneira, o sistema itera continuamente os ajustes de válvula direta e invertida para fornecer a vazão de fluido solicitada.

Da forma mostrada nos blocos 230 e 256 (figura 6B) e nos blocos 330 e 356 (figura 6D), o sistema pode iniciar um ciclo de descarga no caso em que o tempo de curso decorrido exceder o tempo de curso esperado em uma margem selecionada. Uma causa possível de vazão de fluido menor do que esperado são restos que obstruem ou obstruem parcialmente um orifício na válvula de controle 16. O sistema pode agir para descarregar restos da válvula de controle (ou um conduíte de fluido associado). Um ciclo de descarga de acordo com uma modalidade preferida da invenção é ilustrado no fluxograma da figura 6F. Neste ciclo, primeiro, a válvula de controle é acionada para sua posição completamente aberta em

uma direção (bloco 460) e, então, para sua posição completamente aberta na direção oposta (bloco 465). Descobriu-se na prática que este ciclo é quase sempre bem sucedido para descarregar restos obstrutivos do sistema de injeção química. Seguindo um ciclo de descarga, o sistema pode realizar uma seqüência de inicialização (bloco 470).

A figura 8 é um fluxograma que ilustra uma modalidade alternativa da invenção em que um volume conhecido fixo de produtos químicos é injetado em um intervalo de tempo pré-determinado. Esta modalidade tem vantagem particular naquelas aplicações em que o controle do volume total de produtos químicos injetados em um certo período de tempo é mais importante do que injetar o produto químico em uma velocidade constante.

O processo pode começar na entrada manual 500 com a seleção de uma vazão média pelo operador. Uma vez que um curso completo do pistão 22 desloca um volume conhecido de produtos químicos, no bloco 510, o sistema pode computar o tempo exigido para deslocar o volume de produtos químicos injetados durante um curso completo na vazão selecionada. No bloco 520, o sistema pode ser inicializado como descrito anteriormente a fim de posicionar o pistão 22 no início de um curso. Usando a curva de fluxo armazenada, o ajuste da válvula que deve produzir a vazão selecionada é determinado no bloco 530 a partir da curva de fluxo armazenada em 535. No bloco 540, a válvula é aberta para fornecer um orifício um tanto quanto maior do que aquele exigido para alcançar a vazão selecionada. O valor absoluto do excedente pode ser um aumento percentual selecionado na vazão selecionada (por exemplo, $X + 10\%$ GPD), um aumento incremental selecionado na vazão (por exemplo, $X + 5$ GPD) ou um número pré-selecionado de passos adicionais do motor de passo que posiciona a válvula (por exemplo, posição computada a partir da curva de fluxo + 15 passos).

Um cronômetro pode ser iniciado no bloco 545 e, então, o sistema pode testar o movimento do pistão (no losango 550) pela percepção da desativação da chave-limite previamente ativada. Se o movimento do pistão não for detectado (ramificação N em 550) na modalidade ilustrada, a válvula é aberta em 20 passos adicionais. Este processo pode ser repetido (ramificação A no losango 557) em intervalos de tempo selecionados e, se nenhum movimento de pistão for detectado depois de um tempo cumulativo selecionado (ramificação B em 557), um ciclo de descarga pode ser iniciado no bloco 559 para limpar toda obstrução no orifício da válvula.

Uma vez que o movimento do pistão foi detectado (ramificação S em 550), o sistema pode esperar (em 560) que a chave-limite sinalize que o pistão atingiu o fim de um curso e que o volume conhecido de um curso completo foi injetado no poço. A posição da válvula ajustada em 540 deve resultar em um curso completo que é completado antes que o intervalo de tempo computado em 510 tenha decorrido – isto é, o sistema deve precisar esperar que um “tempo de contato” decorra antes de iniciar um outro curso. No losango 565, o sis-

73

tema testa o fim do intervalo de tempo computado antes da atuação da chave-limite. Se for verdadeiro (ramificação S em 565), existe uma condição de erro (bloco 570) e o sistema pode tomar ação corretiva pela correção do ajuste da válvula usada no bloco 530. Se a chave-limite ainda não estiver ativada depois de um intervalo selecionado (losango 572), a ação corretiva pode incluir um ciclo de descarga (bloco 573), como exposto em relação à figura 6F, e/ou um ajuste para cima da posição armazenada da válvula.

Entretanto, no curso normal dos eventos, o pistão atingirá o fim de um curso (desse modo, atuando a chave-limite) antes do fim do intervalo de tempo computado em 510 (ramificação S em 560). O sistema pode armazenar o tempo da atuação da chave-limite em 575 e, então, esperar (em 580) pelo fim do período de tempo no losango 580.

O tempo que pistão leva para fazer um curso completo (gravado em 575) pode ser usado para computar e armazenar um ajuste de válvula revisado no bloco 585. Então, este ajuste revisado pode ser usado pelo sistema para o próximo curso na mesma direção. Desta maneira, o sistema refina continuamente o ajuste da válvula para compensar todas as mudanças dos parâmetros que podem afetar a vazão – por exemplo, pressão de alimentação, viscosidade, densidade, etc.

No bloco 590, o sistema ordena a um processo correspondente para um curso na direção oposta (que pode começar no bloco 530) e o sistema alterna entre ciclos “direto” e “invertido”, repetindo os ajustes de válvula exigidos.

Embora a invenção tenha sido descrita com detalhes em relação a certas modalidades preferidas, existem variações e modificações de acordo com o escopo e o espírito da invenção descritos e definidos nas seguintes reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para injetar um produto químico em fase líquida em um poço, compreendendo:

inserir uma certa vazão de fluido desejada (100);

5 selecionar uma posição de orifício variável (16) a partir de dados que relacionam posição de orifício à vazão;

dispensar um volume conhecido de fluido (205) passando o fluido através do orifício variável (16);

sincronizar o período exigido para dispensar o volume conhecido de fluido (205);

10 computar a vazão média de fluido durante o período de tempo (272);

comparar a vazão média de fluido computada (272) com a vazão desejada (100);

ajustar a dimensão do orifício variável (16) para minimizar a diferença entre a vazão computada e a vazão desejada (100);

CARACTERIZADO pelo fato de que

15 armazenar uma curva pré-determinada (115) de vazão de fluido em função de uma posição de atuador de orifício variável (16); e

abrir um orifício variável (16) para a posição selecionada para dispensar uma vazão desejado (105).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o
20 volume conhecido de fluido é dispensado movendo uma barreira em um recipiente de fluido (12) em uma distância conhecida.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o recipiente de fluido (12) compreende um cilindro e a barreira de fluido compreende um pistão livre (22) no cilindro.

25 4. Método, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a barreira divide o recipiente em um primeiro compartimento (24) e em um segundo compartimento (26), e mover a barreira compreende deslocar a barreira pelo bombeamento de fluido para o primeiro compartimento.

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a
30 abertura de um orifício variável (16) para dispensar um volume conhecido de fluido compreende selecionar uma posição de atuador de orifício relacionada à dimensão do orifício a partir da curva armazenada (115).

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a
35 abertura de um orifício variável (16) para uma posição inicial compreende interpolar nos pontos da curva armazenada (115).

7. Método, de acordo com a reivindicação 5, **CARACTERIZADO** pelo fato de que ajustar a dimensão do orifício variável (16) compreende usar a curva armazenada (115) para

selecionar uma posição de atuador de orifício (120) que corresponde à diferença entre a vazão média computada e a vazão desejada (100).

8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente armazenar uma função que equaciona a vazão de fluido com um valor relacionado à dimensão do orifício (115).

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que a abertura de um orifício variável (16) para dispensar um volume conhecido de fluido compreende selecionar um valor relacionado à dimensão do orifício usando a função armazenada (105).

10. Método, de acordo com a reivindicação 8, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que ajustar a dimensão do orifício variável (16) compreende usar a função armazenada para selecionar um valor (120) relacionado à dimensão do orifício que corresponde à diferença entre a vazão média de fluido computada (272) e a vazão desejada (100).

11. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente computar um valor esperado do período de tempo (500) exigido para dispensar o volume conhecido de fluido, e abrir completamente (559) o orifício variável (16) se o tempo decorrido a partir da abertura inicial do orifício exceder o valor esperado em uma margem pré-selecionada.

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que a abertura de um orifício variável (16) para uma posição previamente determinada para fornecer a vazão desejada (100) compreende selecionar uma posição de atuador (105) de orifício variável (16) inicial previamente determinada para fornecer a vazão desejada (100) a partir de dados (115) relacionando a posição de atuador (105) de orifício à vazão e mover o atuador de orifício variável (45) para a posição selecionada para dispensar um volume conhecido de fluido movendo uma barreira em um compartimento de fluido a uma distância conhecida;

em que o método compreende adicionalmente:

detectar o movimento da barreira (550);

mover o atuador de orifício variável (16) uma quantidade adicional (555) se o movimento da barreira não for detectado dentro de um intervalo de tempo pré selecionado que é uma função da vazão desejada inserida.

13. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CHARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente:

computar um valor esperado do período de tempo exigido para dispensar o volume conhecido de fluido (510); e

aumentar (555) a dimensão do orifício variável (16) se o tempo decorrido a partir da abertura do orifício exceder o valor esperado em uma margem pré-selecionada.

14. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente:

computar um valor esperado do período de tempo exigido para dispensar o volume conhecido de fluido (510);

5 aumentar (555) a dimensão do orifício variável (16) se o tempo decorrido a partir da abertura do orifício exceder o valor esperado em uma primeira margem pré-selecionada; e
 abrir completamente (559) o orifício variável (16) se o tempo decorrido a partir da abertura inicial do orifício exceder o valor esperado em uma segunda margem pré-selecionada.

10 15. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o orifício é uma válvula variável com uma primeira posição (18) que permite que o fluido escoe em uma primeira direção e uma segunda posição (15) que permite que o fluido escoe em uma segunda direção, e abrir completamente o orifício variável (16) compreende abrir
15 sequencialmente a válvula completamente na primeira direção e abrir a válvula completamente na segunda direção.

Fig. 1

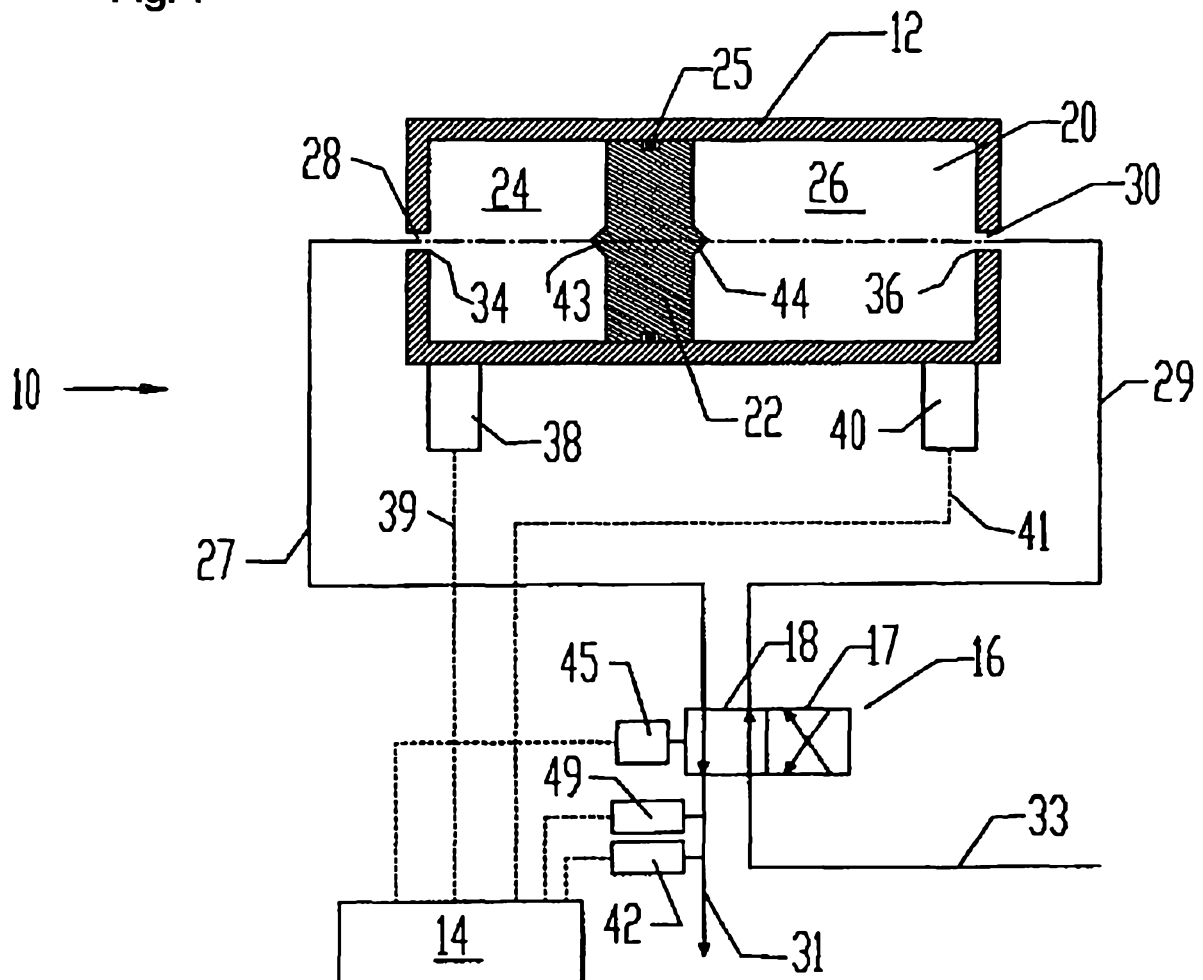
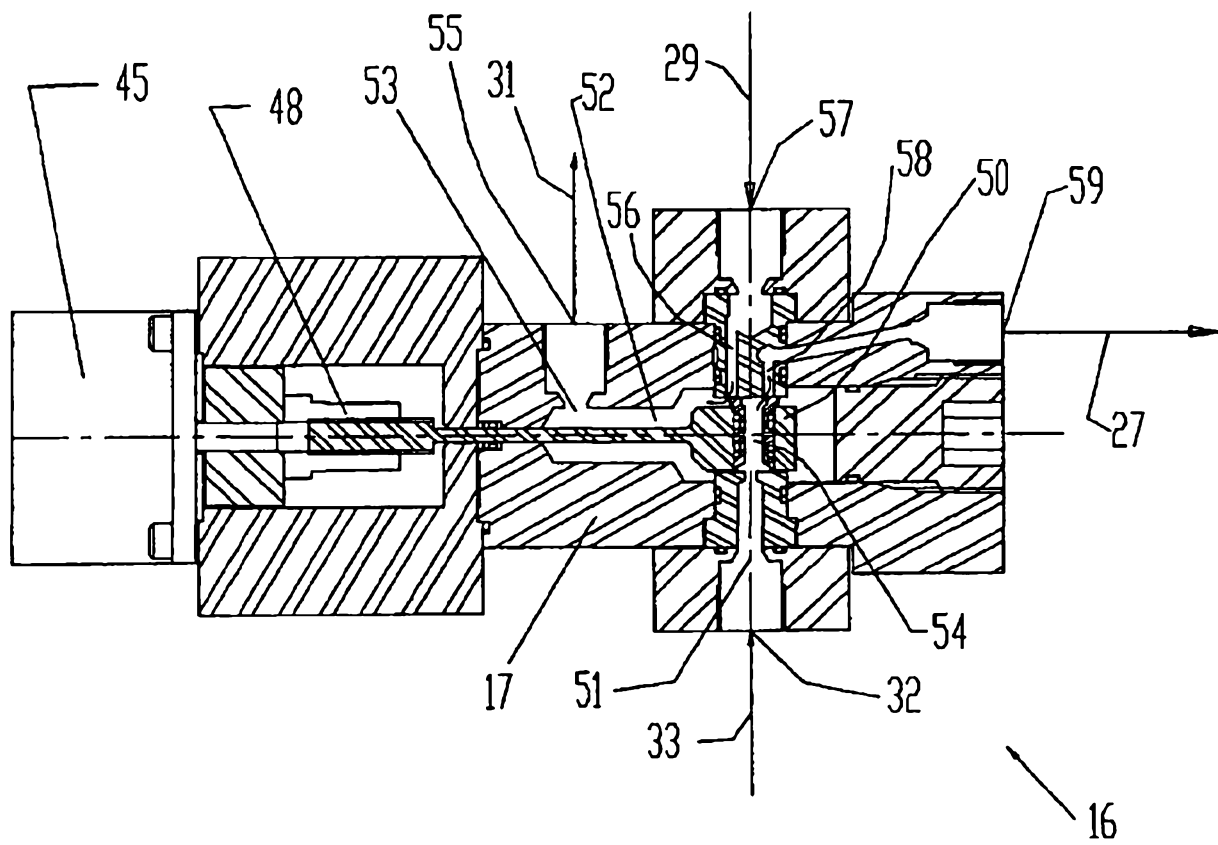


Fig. 3



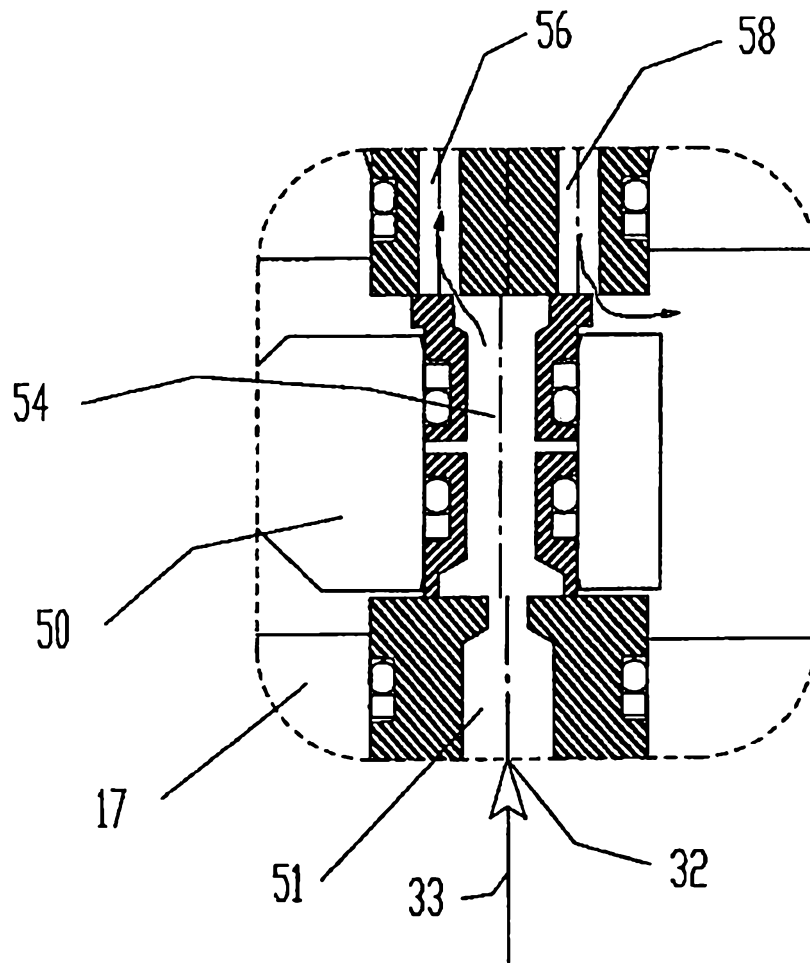


Fig. 4
(Técnica Anterior)

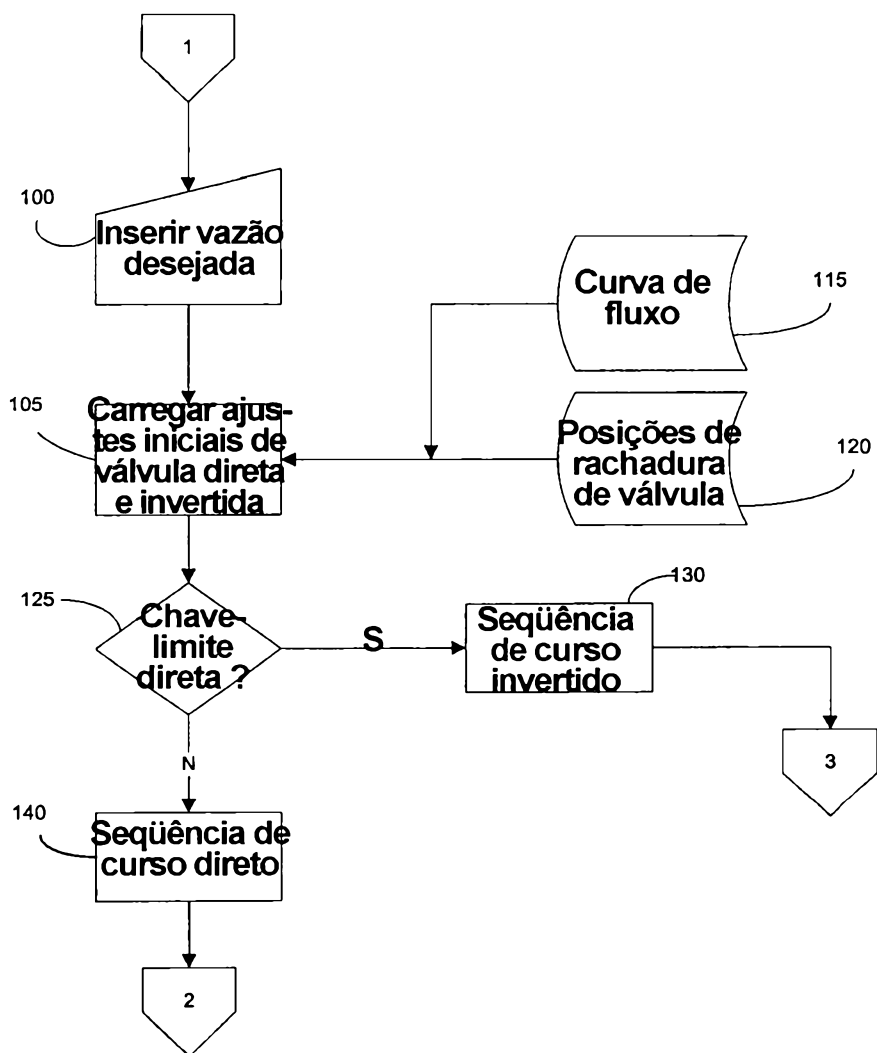


Fig. 6A

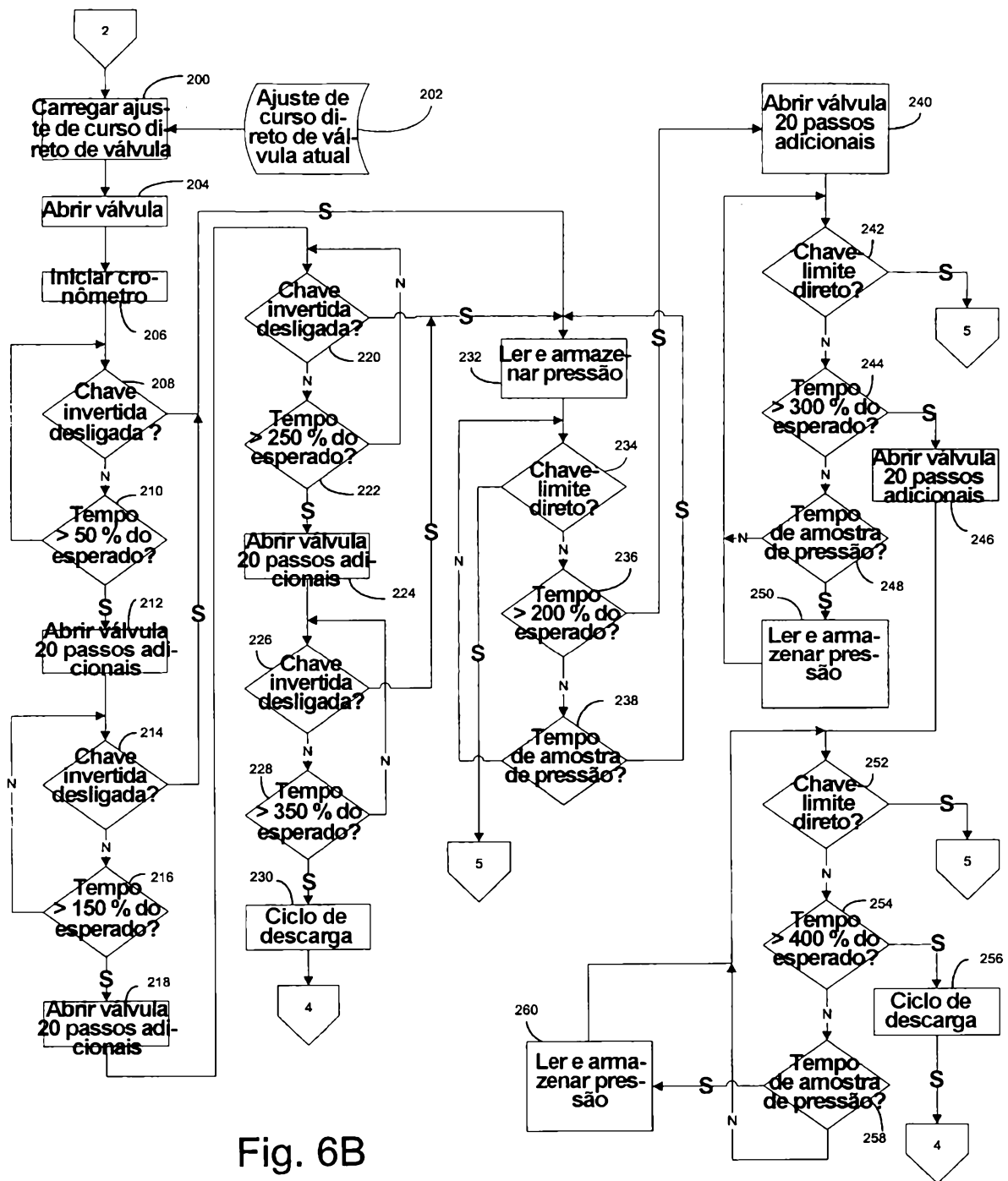


Fig. 6B

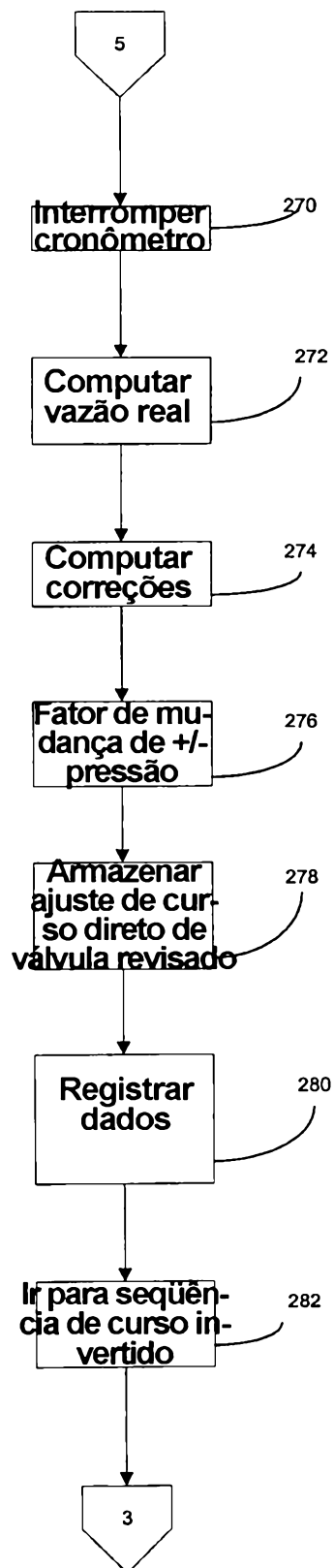
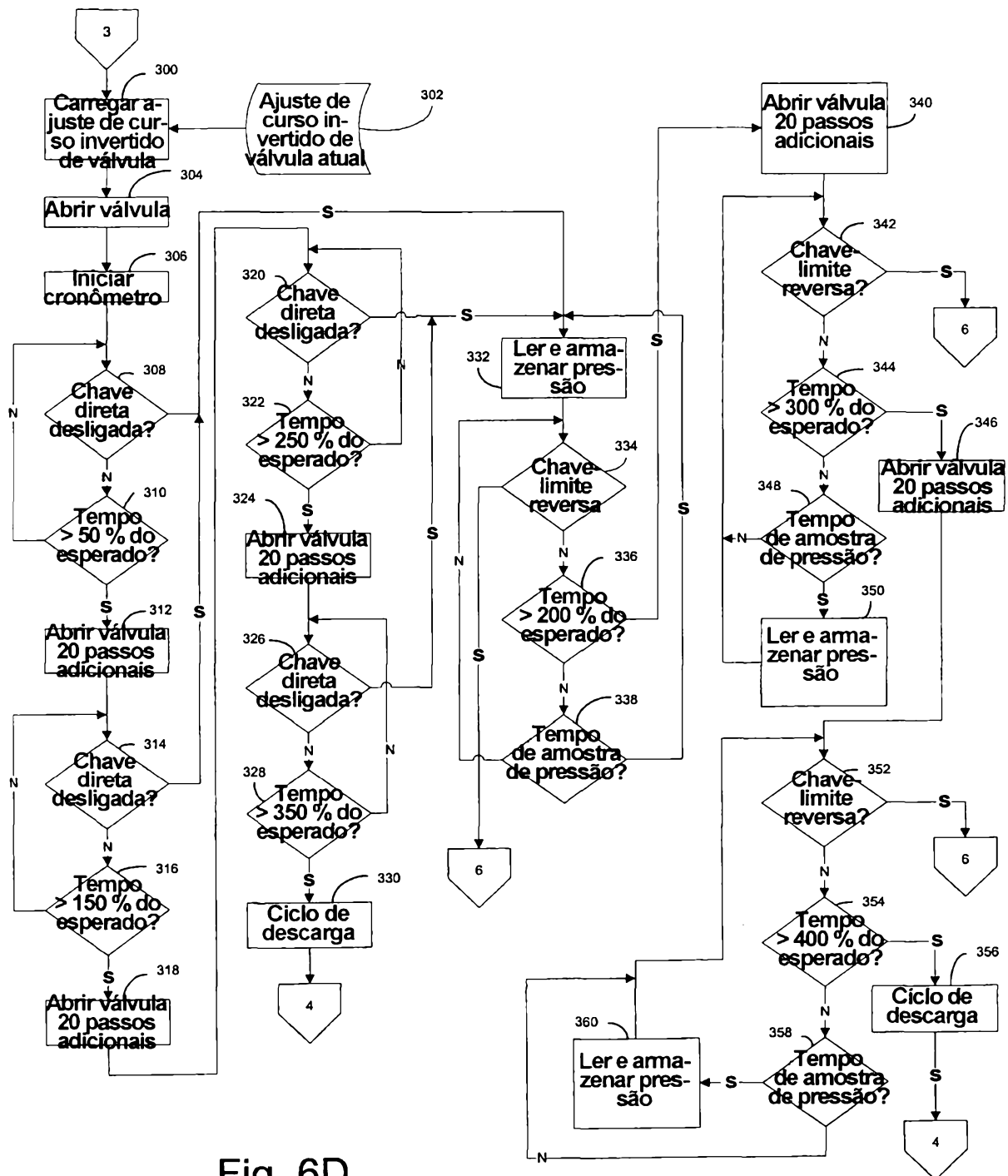


Fig. 6C



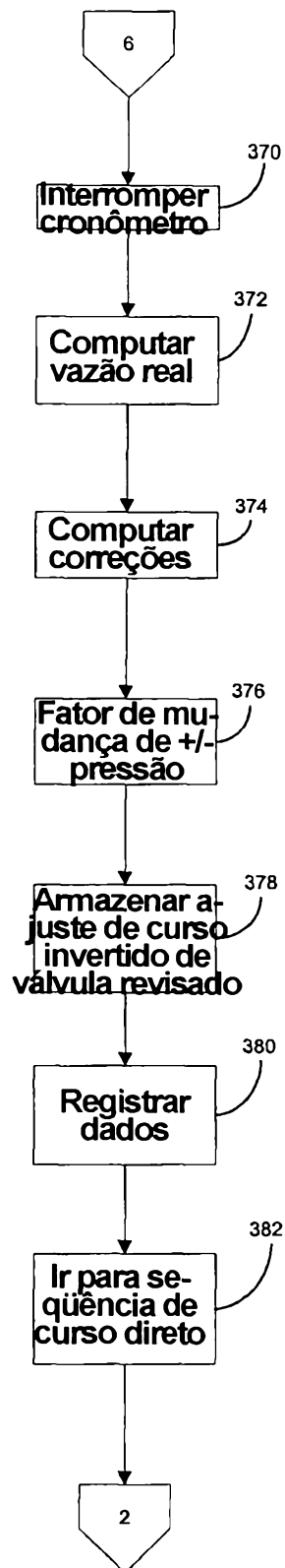


Fig. 6E

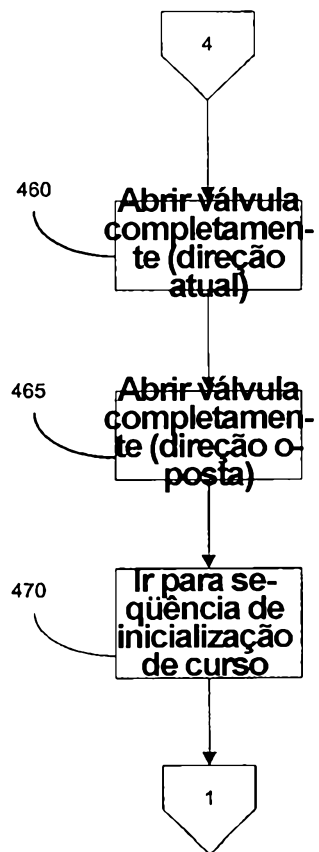


Fig. 6F

Fluxo em função de Passos

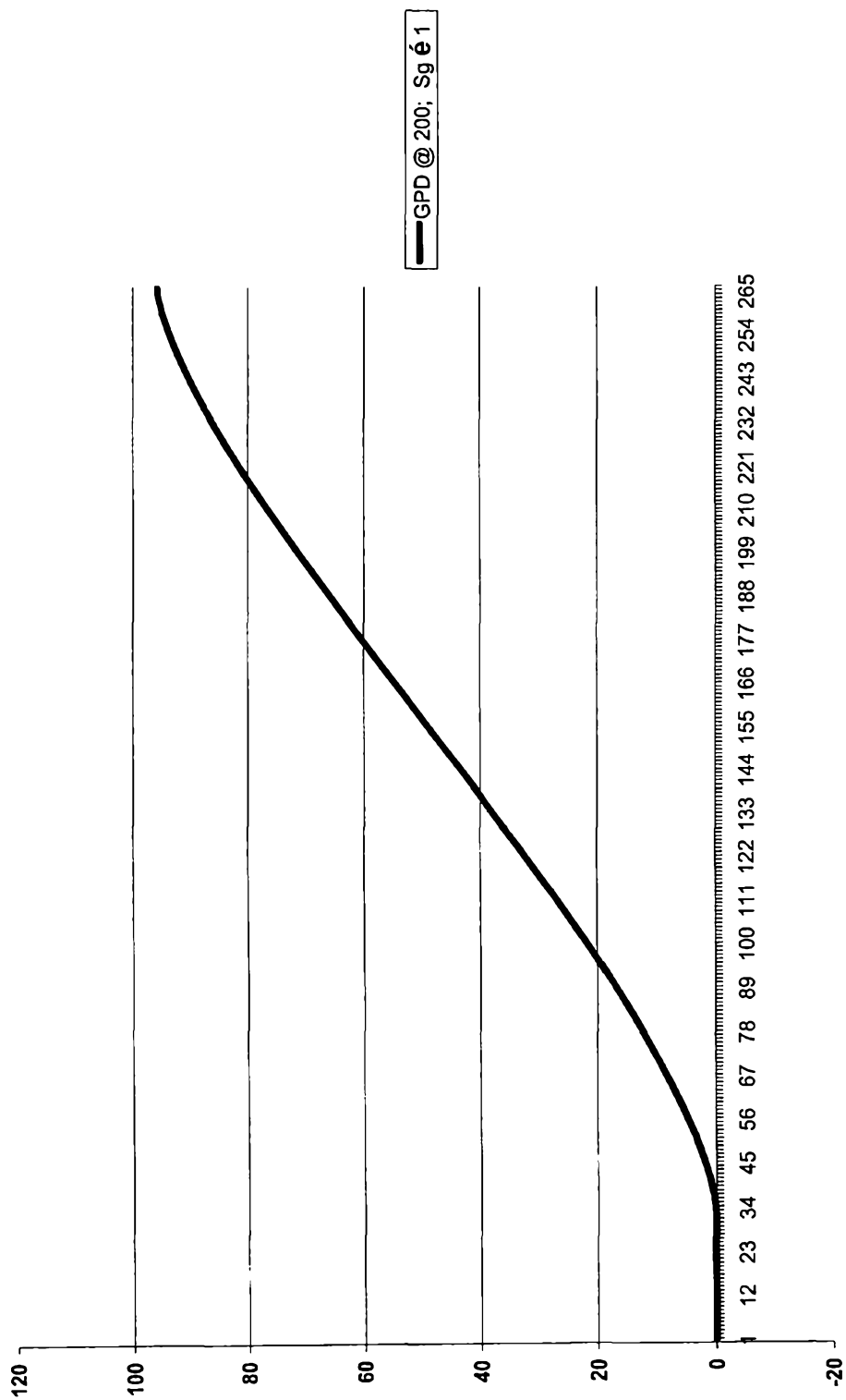


FIG. 7

