



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

(11) PI 0822972-4 B1



(22) Data do Depósito: 02/12/2008

(45) Data de Concessão: 17/01/2023

(54) Título: MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA, MÉTODO DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO, MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE UM MECANISMO DE PERFURAÇÃO EM UMA PLATAFORMA DE PERFURAÇÃO E APARELHO

(51) Int.Cl.: E21B 44/00.

(73) Titular(es): NATIONAL OILWELL VARCO, L.P..

(72) Inventor(es): AGE KYLLINGSTAD.

(86) Pedido PCT: PCT GB2008051144 de 02/12/2008

(87) Publicação PCT: WO 2010/063982 de 10/06/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 31/05/2011

(57) Resumo: MÉTODO E APARELHO PARA REDUÇÃO DE ATRITO, um método para amortecimento das oscilações de atrito em uma coluna de perfuração, tal método compreendendo as etapas de: (a) amortecimento das referidas oscilações de atrito utilizando um mecanismo de perfuração na parte superior da referida coluna de perfuração; e (b) controle da velocidade de rotação do referido mecanismo de perfuração utilizando um controlador PI; caracterizado pelo fato de que a etapa (C) ajusta o referido controlador PI, de modo que o referido mecanismo de perfuração absorve a maior parte da energia torsional da referida coluna de perfuração em uma frequência que é ou está próxima às das referidas oscilações de atrito.

"MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA, MÉTODO DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO, MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE UM MECANISMO DE PERFURAÇÃO EM UMA PLATAFORMA DE PERFURAÇÃO E APARELHO"

[0001] O presente Pedido de Patente de Invenção relaciona-se a um método para amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta em uma coluna de perfuração, a um método para perfuração de um poço, a um método para estimar a velocidade rotacional instantânea da estrutura inferior do poço, a um mecanismo de perfuração para uso em perfuração de poço, a um controlador eletrônico para uso com um mecanismo de perfuração e a um método de atualização do mecanismo de perfuração em uma plataforma de perfuração.

[0002] A perfuração de um poço de gás e/ou óleo envolve a criação de um poço de extensão considerável, frequentemente de até muitos quilômetros verticalmente e/ou horizontalmente, no momento em que a produção começa. Uma coluna de perfuração compreende uma broca de perfuração em sua extremidade inferior e extensões de tubos de perfuração que são aparafusados conjuntamente. Toda a coluna de perfuração é movida por um mecanismo de perfuração em sua superfície, o qual, por sua vez, gira a broca para alargar o poço. O mecanismo de perfuração é tipicamente uma mesa rotativa ou um "top drive" (dispositivo de direção superior), cada um deles sendo essencialmente um volante pesado conectado à parte superior da coluna de perfuração.

[0003] A coluna de perfuração é uma estrutura extremamente fina com relação à extensão do poço e durante a perfuração a coluna é torcida várias vezes por causa do torque

na plataforma, entre aproximadamente 500 e 10.000 Nm. A coluna de perfuração também apresenta um comportamento dinâmico complicado, compreendendo vibrações axiais, laterais e torcionais. Medições simultâneas de rotação de perfuração na superfície e na broca revelaram que a coluna de perfuração geralmente se comporta como um pêndulo torcional, isto é, a parte superior da coluna de perfuração gira com uma velocidade angular constante, enquanto a broca de perfuração realiza uma rotação com velocidade angular variada, compreendendo uma parte constante e uma vibração torcional sobreposta. Em casos extremos, a parte torcional se torna tão grande que a broca periodicamente atinge uma paralisação completa, durante a qual a coluna de perfuração é torcida até que a broca gire outra vez de forma repentina em uma velocidade angular que é muito mais alta do que a velocidade angular medida na superfície. Este fenômeno é conhecido como oscilação da vibração torcional agarra e solta.

[0004] As oscilações da vibração torcional agarra e solta foram estudadas por mais de duas décadas e é reconhecido como uma das principais fontes de problemas, tais como desgaste excessivo da broca, falhas prematuras de ferramentas e baixa taxa de perfuração. Uma das razões para tal fato são as altas velocidades de pico que ocorrem durante a fase de deslocamento. As altas velocidades de rotação, por sua vez, levam a efeitos secundários, como as forças e acelerações axiais e laterais extremas.

[0005] Um grande número de estudos e artigos tem abordado o problema das oscilações da vibração torcional agarra e solta. Muitos estudos se centraram na detecção do movimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta

e no controle das oscilações através de meios operacionais, tais como adição de redutores de fricção de perfuração, mudança da velocidade de rotação ou do peso sobre a broca. No entanto, embora estes paliativos ajudem algumas vezes, eles são ou insuficientes ou representam um custo excessivamente alto.

[0006] Alguns estudos também recomendaram a aplicação de controles inteligentes de "top drive" para amortecer e evitar as oscilações da vibração torcional agarra e solta. No IADC/SPE 18049 foi demonstrado que a realimentação de torque a partir de um sensor exclusivo de torque de coluna pode efetivamente consertar as oscilações da vibração torcional agarra e solta através do ajuste da velocidade em resposta às variações de torque medidas. Em Jansen. J. D et al. Active Damping of Self-Excited Torsional Vibrations in Oil Well Drillstrings (Amortecimento Efetivo de Vibrações Torcionais Auto-Excitadas em Colunas de Perfuração de Poços de Óleo), 1995, Journal of Sound and Vibrations (Jornal de Sons e Vibrações), 179(4), 647-668, foi sugerido que a desvantagem desta abordagem é a necessidade de uma medição nova e direta do torque da coluna, a qual já não está disponível. A Patente dos Estados Unidos 5 117 926 divulgou esta medição como outro tipo de realimentação, com base na corrente do motor (torque) e na velocidade. Este sistema esteve disponível comercialmente por muitos anos sob a marca registrada SOFT TORQUE®. A principal desvantagem deste sistema é a de que ele é um sistema de controle em cascata que utiliza a realimentação de torque em série com um controlador de velocidade rígido. Isso eleva o risco de instabilidade a frequências mais altas do que a frequência

de oscilações da vibração torcional agarra e solta.

[0007] A IADC/SPE 28324, intitulada Application of High Sampling Rate Downhole Measurements for Analysis and Cure of Stick-Slip in Drilling (Aplicação de Medidas em Poços com Altas Taxas de Amostragem para Análise e Reparo de oscilações da vibração torcional agarra e solta em Perfurações), divulgou o controle de um processo de perfuração que utiliza equipamento de direção, incluindo um PID (controle derivativo-integral-proporcional), um motor, uma caixa de engrenagem e uma mesa rotativa. O PID tenta manter a velocidade rotativa desejada da coluna de perfuração e é sugerido que o PID pode ser ajustado para evitar as oscilações da vibração torcional agarra e solta. No entanto, o resultado de uma simulação mostra um amortecimento insatisfatório das oscilações da vibração torcional agarra e solta e chegou-se à conclusão no estudo que o PID, como um sistema de servo-controle, é demasiado simples para evitar as oscilações da vibração torcional agarra e solta.

[0008] Os aspectos do presente Pedido de Patente de Invenção têm por base a percepção de que um controlador PI ou PID pode, de fato, ser utilizado para obter um amortecimento significativo das oscilações da vibração torcional agarra e solta através de um mecanismo de perfuração. Em particular, percebemos que um controlador PI ou PID pode ser ajustado para assegurar a energia de onda torcional de amortecimento eficiente a, e/ou próxima à frequência das oscilações da vibração torcional agarra e solta.

[0009] Em contraste com alguns sistemas anteriores, o presente Pedido de Patente de Invenção é passivo

no sentido de que nem o torque da coluna nem o torque do "drive" (direção) são necessários em um circuito de realimentação. Conseqüentemente, o amortecimento pode ser alcançado sem a necessidade de sensores adicionais para medir o torque da coluna, o que, de outra forma, aumentaria a complexidade e o custo.

[0010] De acordo com certos aspectos do presente Pedido de Patente de Invenção é fornecido um método de amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta em uma coluna de perfuração, tal método compreendendo as etapas de:

(a) amortecimento das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta utilizando um mecanismo de perfuração na parte superior da referida coluna de perfuração; e

(b) controle da velocidade de rotação do referido mecanismo de perfuração utilizando um controlador PI;

caracterizado pelo fato de que a etapa (c) ajusta o referido controlador PI, de modo que o referido mecanismo de perfuração absorve a maior parte da energia torcional da referida coluna de perfuração em uma frequência que é ou está próxima às das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta. O mecanismo de perfuração pode compreender um "top drive" ou uma mesa rotativa, por exemplo. Deve-se observar que o controlador PI pode ser ajustado uma vez (por exemplo, ao encontrar as oscilações da vibração torcional agarra e solta pela primeira vez ou antes da perfuração), e nas ocorrências subsequentes das oscilações da vibração torcional agarra e solta o controlador PI pode ser utilizado novamente sem a necessidade de ser reajustado. Outra possibilidade é a de que

o controlador PI seja reajustado cada vez que uma oscilação da vibração torcional agarra e solta for encontrada, ou mesmo periodicamente, durante a fase de oscilação da vibração torcional agarra e solta da perfuração. Em uma aplicação, o controlador PI é ajustado antes de ser utilizado para controlar o mecanismo de perfuração para amortecer as oscilações da vibração torcional agarra e solta. Por exemplo, o controlador pode ser ajustado após encontrar as oscilações da vibração torcional agarra e solta ou pode ser ajustado periodicamente durante a perfuração do poço, na medida em que a coluna de perfuração aumente. Uma possibilidade é de que o ajuste aconteça na medida em que cada seção de 30m da tubulação de perfuração seja adicionada à coluna de perfuração.

[0011] Em algumas aplicações, as referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta compreendem ondas torcionais que se propagam ao longo da referida coluna de perfuração, e a etapa (c) compreende o ajuste do termo-I do referido controlador PI para ser dependente em um período aproximado das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta e da inércia efetiva do referido mecanismo de perfuração, através do qual o referido mecanismo de perfuração tem um coeficiente de reflexão dependente da frequência das referidas ondas torcionais, cujo coeficiente de reflexão está substancialmente a um mínimo da, ou próximo à referida frequência das oscilações da vibração torcional agarra e solta. Deve-se observar que não é essencial que a frequência de absorção de pico do mecanismo de perfuração atinja precisamente a frequência das oscilações da vibração torcional agarra e solta (que, em algumas aplicações, é de

frequência fundamental). Devido ao modo como o controlador PI é ajustado, o mecanismo de perfuração possui uma largura de banda de frequência de absorção que é de uma largura (p.ex., $\sim 0,4\text{Hz}$) e magnitude (p.ex., menor que a reflexão a 85%) suficientes, de modo que o amortecimento ainda é efetivo, mesmo se as duas frequências não forem precisamente alcançadas. Isso representa uma vantagem significativa do método. Tipicamente, a frequência fundamental das oscilações da vibração torcional agarra e solta encontradas na prática situa-se na faixa de $0,1\text{Hz}$ (período de 10s) a $0,5\text{Hz}$ (período de 2s) e a frequência de absorção de pico causada pelo controlador PI pode estar dentro de 50% da frequência fundamental.

[0012] Em algumas aplicações, o ponto mais baixo da curva do coeficiente de reflexão-frequência possui um valor entre aproximadamente 50% (0,5) e 90% (0,9). Foi constatado que coeficientes de reflexão superiores a aproximadamente 90% podem fazer com que o mecanismo de perfuração se torne muito "rígido", reduzindo a chance de amortecer com êxito as oscilações da vibração torcional agarra e solta. Por outro lado, foi constatado que um coeficiente de reflexão inferior a aproximadamente 50% faz com que o mecanismo de perfuração se torne muito "suave" e o desempenho de perfuração pode ser prejudicado, uma vez que o mecanismo de perfuração responde a mudanças muito pequenas no torque da coluna de perfuração, resultando em altas variações de velocidade.

[0013] A largura de banda de absorção é inversamente proporcional à inércia efetiva J do mecanismo de perfuração. Portanto, na medida em que a inércia efetiva

de um mecanismo de perfuração aumenta, é preferível, embora não essencial, que um período de oscilação da vibração torcional agarra e solta aproximado seja estimado ou medido de forma mais precisa para assegurar que a frequência de maior amortecimento seja uma frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta real.

[0014] Em algumas aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de ajuste do referido termo-I, de acordo com $I = \omega_s^2 J$ onde ω_s é uma frequência angular estimada ou aproximada das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta e J é a inércia efetiva do referido mecanismo de perfuração. ω_s pode, naturalmente, ser expresso em termos de outros parâmetros nesta fórmula, assim como o período ou frequência.

[0015] Em outras aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de medição do referido período aproximado das oscilações da vibração torcional agarra e solta para utilização no ajuste do referido termo-I. Em determinadas aplicações, esta medição pode ser realizada automaticamente por um PLC, por exemplo. Neste caso, o período aproximado pode ser determinado utilizando a geometria de coluna de perfuração ou poder ser determinado por observação computacional do torque de "drive". Outra possibilidade é que o período aproximado seja estimado por um perfurador, por exemplo, determinando com um cronômetro o tempo das oscilações de torque mostradas no console do perfurador, ou simplesmente ouvindo as mudanças na intensidade do(s) motor(es) do mecanismo de perfuração e determinando o tempo do período deste modo. O perfurador pode inserir o período de oscilações da vibração torcional agarra e solta aproximado

em um console para ser processado por um PCL, para ajustar o termo-I do controlado PI.

[0016] Em algumas aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de ajuste do termo-P do referido controlador PI para ser da mesma ordem de grandeza que a impedância característica ζ , da referida coluna de perfuração. Dessa forma, o coeficiente de reflexão do mecanismo de perfuração pode ser reduzido ainda mais, aumentando o efeito de amortecimento.

[0017] Em outras aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de ajuste do referido termo-P de tal modo que o referido coeficiente de reflexão não desaparece completamente, e por meio do qual o modo fundamental das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta é impedido de se dividir em dois novos modos com frequências diferentes.

[0018] Em algumas aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de ajuste do referido termo-P como $P = \zeta / a$ onde a é um fator de mobilidade que permite o ajuste do referido termo-P durante a perfuração, por meio do qual a absorção de energia das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta pelo referido mecanismo de perfuração pode ser aumentada ou reduzida. O fator de mobilidade pode ser ajustado automaticamente por um controlador (p.ex., PLC) e/ou pode ser ajustado manualmente por um perfurador. Dessa forma, a suavidade do mecanismo de perfuração pode ser ajustada para alcançar um equilíbrio entre o amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta e o desempenho de perfuração.

[0019] Em alguns aspectos, o método compreende,

ainda, a etapa de aumento do referido fator de mobilidade, se a magnitude das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta não desaparecer ou for reduzida substancialmente. Dessa forma, a suavidade do mecanismo de perfuração é aumentada (isto é, torna-se mais responsiva a variações de torque menores).

[0020] Em outros aspectos, o método compreende, ainda, a etapa de redução do referido fator de mobilidade, uma vez que a magnitude das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta tenha substancialmente desaparecido ou sido reduzida, por meio do qual a eficiência de perfuração é aumentada sem reparação ou aumento em magnitude das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta. Dessa forma, a suavidade do mecanismo de perfuração é reduzida (isto é, torna-se menos responsiva a variações de torque menores).

[0021] Em outras aplicações, o referido controlador PI é separado de um controlador de velocidade do mecanismo de perfuração, o método compreendendo, ainda, a etapa de contorno do referido controlador de velocidade do mecanismo de perfuração com o referido controlador PI durante o amortecimento das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta. O controlador PI pode ser fornecido em uma plataforma de perfuração separada do mecanismo de perfuração, quer sobre uma nova plataforma ou como uma atualização de uma plataforma existente no campo. Em uso, quando ocorrerem as oscilações da vibração torcional agarra e solta, o PLC pode ativar o controlador de velocidade exclusivo do mecanismo de perfuração, (quer automaticamente ou sob o controle de um perfurador) para controlá-lo, conforme

especificado acima.

[0022] Em outras aplicações, o referido mecanismo compreende o referido controlador PI, o método compreendendo, ainda, as etapas de ajuste do referido controlador PI quando ocorrerem as referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta, e deixando o referido controlador PI normalmente não ajustado. Em tais aplicações, o controlador PI pode ser parte de um controlador de velocidade exclusivo em um mecanismo de perfuração, tal como um "top drive". O controlador PI pode ser fornecido como um software instalado em um PLC ou em outro mecanismo de controle por computador no momento da fabricação. Em uso, o controlador PI é utilizado continuamente, mas somente precisa ser ajustado como descrito acima quando ocorrerem as oscilações da vibração torcional agarra e solta. Este ajuste pode ser ativado automaticamente pelo software de controle remoto de perfuração (p.ex., o console do perfurador dentro ou fora do local) e/ou pode ser controlado pelo perfurador utilizando o console do perfurador.

[0023] Em algumas aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de estimativa de velocidade rotacional instantânea da estrutura inferior do poço na extremidade inferior da referida coluna de perfuração, através da combinação da conformidade torcional conhecida da referida coluna de perfuração com as variações de um torque de "drive" do referido mecanismo de perfuração. Esta é uma característica opcional particularmente útil do presente Pedido de Patente de Invenção e o resultado pode ser mostrado no console do perfurador ou, de outro modo, ajudar o perfurador a visualizar o que está acontecendo no poço.

[0024] Em outras aplicações, as variações do torque do "drive" são expressas somente em uma frequência fundamental das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta, através da qual a referida etapa de estimativa é simplificada de tal modo que pode ser implementada pelo PLC e realizada em tempo real. As variações do torque do "drive" compreendem um espectro de frequência que torna o sinal de torque de "drive" difícil de analisar. Percebemos que isso é suficiente apenas para analisar o componente de frequência fundamental das variações de torque de "drive" e que isso permite que a análise seja realizada em tempo real com um PLC, por exemplo.

[0025] Em algumas aplicações, a referida etapa de estimativa compreende uma passagem de banda que filtra o sinal de torque de "drive" com um filtro de passagem de banda localizado em uma frequência aproximada das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta. Isso ajuda a remover a maior parte das frequências mais altas e mais baixas no sinal de torque. A frequência aproximada pode ser determinada conforme descrito acima.

[0026] Em determinados aspectos, a referida estimativa de velocidade rotacional instantânea compreende a determinação da velocidade de perfuração utilizando uma conformidade estática total da coluna de perfuração e um parâmetro de fase, e a determinação da soma de (i) um sinal filtrado de passagem baixa, representando uma velocidade de rotação do referido mecanismo de perfuração e (ii) a referida velocidade de perfuração.

[0027] Em outras aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de determinação da referida estimativa

periodicamente e a apresentação da referida estimativa no console do perfurador, através do qual um perfurador é equipado com uma substancial estimativa de tempo real da velocidade rotacional instantânea da referida estrutura inferior do poço.

[0028] Em algumas aplicações, o método compreende, ainda, a etapa de determinação da gravidade das oscilações da vibração torcional agarra e solta como a taxa de amplitude da velocidade dinâmica do poço sobre a velocidade rotacional média do referido mecanismo de perfuração, no qual a gravidade das oscilações da vibração torcional agarra e solta é utilizável para fornecer um sinal de saída que indica a gravidade oscilações da vibração torcional agarra e solta naquele momento.

[0029] De acordo com outro aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção, é fornecido um método de perfuração de um poço, tal método compreendendo as etapas de: (a) rotação de uma coluna de perfuração com um mecanismo de perfuração, de modo a girar uma broca de perfuração até a extremidade inferior da referida coluna de perfuração, através da qual a superfície do solo é perfurada, e (b) resposta à detecção de oscilações da vibração torcional agarra e solta da referida coluna de perfuração utilizando um controlador PI para controlar o referido mecanismo de perfuração, cujo controlador PI foi ajustado por um método de acordo com quaisquer das reivindicações 1 a 11. Deve-se observar que o controlador PI pode ser ajustado uma vez (por exemplo, após encontrar as oscilações da vibração torcional agarra e solta pela primeira vez) e nas ocorrências subsequentes de oscilações da vibração torcional agarra e

solta o controlador PI pode ser utilizado sem reajuste. Naturalmente, outra possibilidade é que o controlador PI seja reajustado cada vez que uma oscilação da vibração torcional agarra e solta for encontrada, ou mesmo durante a progressão da oscilação da vibração torcional agarra e solta. O método de ajuste do PI deve, portanto, ser utilizado seletivamente durante a perfuração para responder às oscilações da vibração torcional agarra e solta. Em outros momentos, o controlador PI pode ser deixado sem ajuste, de modo que o controlador de velocidade do mecanismo de perfuração adquira um comportamento rígido padrão (isto é, com um coeficiente de reflexão aproximadamente igual a 1).

[0030] Ainda de acordo com outro aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção, é fornecido um método para estimar a velocidade rotacional instantânea da estrutura inferior do poço na extremidade inferior de uma coluna de perfuração, tal método compreendendo as etapas de combinação de uma conformidade torcional conhecida da referida coluna de perfuração com variações de um torque de "drive" do referido mecanismo de perfuração. Tal método pode ser realizado quer dentro ou fora do local, quer durante a perfuração ou após uma sessão de perfuração de um poço. Tal método fornece uma ferramenta de análise de perfuração para determinar se o aspecto de ajuste do controlador PI do presente Pedido de Patente de Invenção pode melhorar o desempenho de perfuração. Conseqüentemente, o software para executar este método pode ser fornecido separadamente do software para executar o método de ajuste. O software de estimativa da velocidade rotacional pode ser fornecido no controlador de um novo mecanismo de perfuração (isto é,

incluído no momento da fabricação), como uma atualização de um mecanismo de perfuração existente (p. ex., realizado quer no local ou remotamente, utilizando uma conexão de satélite com um sistema computacional na plataforma de perfuração), ou como um produto de programa computacional (p. ex., em um CD-ROM ou como um download a partir de um site) para instalação por um operador de plataforma.

[0031] Em determinados aspectos, o método de estimativa da velocidade rotacional compreende, ainda, as etapas de estimativa conforme especificado acima.

[0032] De acordo com outro aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção, é fornecido um mecanismo de perfuração para uso na perfuração de um poço, tal mecanismo de perfuração compreendendo um controlador eletrônico contendo um controlador PI e uma memória com instruções executáveis armazenadas que, quando executadas, fazem com que o referido controlador eletrônico ajuste o referido controlador PI de acordo com as etapas de ajuste estabelecidas acima.

[0033] Ainda de acordo com outro aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção, é fornecido um controlador eletrônico para uso com um mecanismo de perfuração para a perfuração de um poço, tal controlador eletrônico compreendendo um controlador PI e uma memória com instruções executáveis armazenadas que, quando executadas, fazem com que o referido controlador eletrônico ajuste o referido controlador PI de acordo com as etapas de ajuste estabelecidas acima. Tal controlador eletrônico é útil para atualizar plataformas de perfuração existentes ou onde seja desejável ou necessário que o controlador eletrônico seja

separado do mecanismo de perfuração.

[0034] De acordo com outro aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção, é fornecido um método de atualização de um mecanismo de perfuração em uma plataforma de perfuração, tal método compreendendo as etapas de atualização das instruções executáveis para um controlador eletrônico na referida plataforma de perfuração, cujo controlador eletrônico é utilizado para controlar a operação do referido mecanismo de perfuração, caracterizado pelo fato de que as referidas instruções executáveis compreendem instruções para a execução de um método de ajuste conforme estabelecido acima. Tal atualização pode ser realizada no local ou pode ser realizada remotamente, utilizando uma conexão de satélite, por exemplo.

[0035] Determinadas aplicações deste Pedido de Patente de Invenção não estão limitados a nenhuma característica individual particular aqui divulgada, mas incluem combinações entre si distintas das da técnica precedente em suas estruturas, funções e/ou resultados obtidos. As características deste Pedido de Patente de Invenção foram amplamente descritas, de modo que as descrições detalhadas apresentadas a seguir possam ser mais bem entendidas e para que as contribuições deste Pedido de Patente de Invenção para a técnica possam ser mais bem apreciadas. Há, obviamente, aspectos adicionais do Pedido de Patente de Invenção descritos abaixo que podem ser incluídos na matéria objeto das reivindicações deste Pedido de Patente de Invenção. Aqueles especializados na técnica que possuem o benefício deste Pedido de Patente de Invenção, seus ensinamentos e sugestões apreciarão o fato de que as

concepções desta divulgação podem ser utilizadas como uma base criativa para projetar outras estruturas, métodos e sistemas para a execução e prática do presente Pedido de Patente de Invenção. As reivindicações deste Pedido de Patente de Invenção devem ser lidas para incluir quaisquer dispositivos ou métodos legalmente equivalentes que não se afastem do espírito e escopo do presente Pedido de Patente de Invenção.

[0036] O presente Pedido de Patente de Invenção reconhece e aborda os problemas previamente mencionados e as necessidades há muito sentidas e fornece uma solução para estes problemas e uma abordagem satisfatória destas necessidades em várias possíveis aplicações e seus equivalentes. Para aqueles com habilidade na técnica que possuem os benefícios das realizações, ensinamentos, divulgações e sugestões deste Pedido de Patente de Invenção, outros objetivos e vantagens serão apreciados a partir da descrição seguinte de determinadas aplicações exclusivas, dadas para fins de divulgação, quanto tomadas em conjunto com os desenhos que as acompanham. Os detalhes nestas descrições não se destinam a impedir o objeto desta patente de reivindicar este Pedido de Patente de Invenção, não importa como os outros possam disfarçá-lo posteriormente por variações em forma, alterações ou adições de melhorias vindouras.

[0037] Deve-se compreender que as várias aplicações do presente Pedido de Patente de Invenção podem incluir uma, algumas ou todas as melhorias e/ou vantagens técnicas e/ou elementos divulgados, enumerados e/ou descritos nas reivindicações deste Pedido de Patente de Invenção.

[0038] Para um melhor entendimento do presente Pedido de Patente de Invenção, referências serão feitas agora, apenas a título de exemplo, com relação aos desenhos anexos, no qual:

A figura 1 é uma visualização lateral esquemática de um equipamento de perfuração utilizando um método de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção;

A figura 2 é um diagrama de bloco esquemático de um PLC, compreendendo um controlador de velocidade de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção;

A figura 3 é um gráfico de frequência versus coeficiente de reflexão, mostrando uma comparação entre um mecanismo de perfuração que utiliza um controlador de velocidade de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção e um controlador de velocidade padrão;

A figura 4A é uma imagem da primeira tela disponível no console do perfurador para configuração e controle do método de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção;

A figura 4B é uma imagem da segunda tela disponível no console do perfurador que ilustra o torque do "drive" em tempo real e uma estimativa da velocidade de rotação de perfuração da estrutura inferior do poço na Fig. 1;

As figuras 5 e 6 são gráficos ilustrando os resultados de uma simulação computacional delineando um método de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção;
e

As figuras 7 e 8 são gráficos ilustrando os resultados de um teste de um método de acordo com o presente

Pedido de Patente de Invenção.

[0039] Com relação à Figura 1, um equipamento de perfuração 10 controla uma operação de perfuração utilizando uma coluna de perfuração 12 que compreende extensões de tubulações de perfuração 14 aparafusadas em conjunto de ponta a ponta. O equipamento de perfuração 10 pode ser qualquer tipo de equipamento de perfuração petrolífero, de mineração, geotérmico ou utilitário, incluindo: plataformas flutuantes e plataformas de terra, plataformas móveis e de inclinação, plataformas submersíveis e semi-submersíveis, navios de perfuração e plataforma auto-elevatória. Uma coluna de perfuração típica possui uma extensão entre 0 e 5 km e possui em sua parte mais baixa uma quantidade de anéis de perfuração ou tubulação de perfuração pesada (HWDP). Os anéis de perfuração têm espessura mais grossa do que a tubulação de perfuração, a fim de resistir ao empenamento sob as forças de compressão: a tubulação de perfuração pode ter um diâmetro externo de 127 mm e uma espessura de parede de 9 mm, enquanto que um anel de perfuração pode ter um diâmetro externo de 10 até 250 mm e uma espessura de parede de 85 mm, por exemplo.

[0040] Uma estrutura inferior do poço (BHA = bottom hole assembly) 16 é posicionada na extremidade inferior de uma coluna de perfuração 12. Uma BHA típica compreende um transmissor MWD 18 (que pode ser, por exemplo, um sistema de telemetria com fio, um sistema de telemetria por pulso de perfuração (NT: mud pulse telemetry system = técnica de envio de dados de perfuração codificados através de pulsos de pressão crescentes e decrescentes), um sistema de telemetria eletromagnético, um sistema de telemetria acústico ou um sistema de telemetria de tubulação com cabo),

centralizadores 20, uma ferramenta direcional 22 (que pode ser uma sonda ou um anel montado), estabilizadores (fixos ou variáveis) e uma broca de perfuração 28, que em uso é girada por um "top drive" através de uma coluna de perfuração 12.

[0041] O equipamento de perfuração compreende um mecanismo de perfuração 30. A função do mecanismo de perfuração 30 é girar a coluna de perfuração 12 e, por meio dela, a perfuração 28 na extremidade inferior. Atualmente, a maior parte dos equipamentos de perfuração utiliza "top drives" para girar a coluna de perfuração 12 e a broca 28 para realizar a perfuração. No entanto, alguns equipamentos de perfuração utilizam uma mesa rotativa e o presente Pedido de Patente de Invenção é igualmente aplicável para tais equipamentos. O presente Pedido de Patente de Invenção é também igualmente útil em perfurações de qualquer tipo de poço, p. ex., reto, fora de padrão, horizontal e vertical.

[0042] Uma bomba 32 é colocada na superfície e, em uso, bombeia o fluido da perfuração através da coluna de perfuração 12 e através da broca de perfuração 28 e serve para resfriar e lubrificar a broca durante a perfuração e para devolver o cascalho para a superfície no espaço anular formado entre a coluna de perfuração e o poço (não mostrado).

[0043] As informações e dados de perfuração são exibidos no console do perfurador 34 que compreende uma tela sensível ao toque 36 e um aparelho de controle do usuário, p.ex., um teclado (não mostrado) para controlar, pelo menos, parte do processo de perfuração. Um PLC digital 38 envia para e recebe dados do console 34 e do "top drive". Em particular, o perfurador é capaz de definir um comando de velocidade e um limite de torque para o "top drive" controlar a velocidade

na qual a broca de perfuração 28 gira.

[0044] Com relação à Figura 2, o PLC 38 compreende uma memória flash não-volátil 40 (ou 5 outras memórias, tais como um RAM apoiado por bateria). A memória armazena instruções executáveis que, quando executadas, realizam a função de um controlador de velocidade 42 para o "top drive". O controlador de velocidade 42 compreende um controlador PI com anti-finalização que funciona conforme descrito em maiores detalhes logo abaixo. Nesta aplicação, o controlador de velocidade 42 é separado e distinto com relação ao "top drive". No entanto, é possível fornecer a funcionalidade do controlador de velocidade, conforme descrito aqui, como parte de um controlador de velocidade integrado e exclusivo de um "top drive". Tal funcionalidade integrada pode ser fornecida ou no momento da fabricação ou pode ser parte de uma atualização de software realizada em um "top drive", quer dentro ou fora do local. Em outras aplicações, o PLC pode ser um PLC análogo.

Ajuste do Controlador PI

[0045] A coluna de perfuração 12 pode ser considerada como uma linha de transmissão de ondas torcionais. Uma variação do torque de fricção na broca de perfuração 28 ou em qualquer outro lugar ao longo da coluna gera uma onda torcional que se propaga para cima e é particularmente refletida em descontinuidades geométricas. Quando a onda transmitida alcança o "top drive", ela é parcialmente refletida para a coluna de perfuração 12. Para um "top drive" com um controlador de velocidade rígido e/ou de inércia alta a reflexão é quase total, de modo que apenas uma pequena quantidade de energia é absorvida pelo "top

drive".

[0046] Para quantificar o amortecimento induzido pelo "top drive", um coeficiente de reflexão complexo r para ondas torcionais na interface "top drive" / coluna de perfuração pode ser definido conforme segue:

$$r = \frac{\zeta - Z}{\zeta + Z} \quad (1)$$

onde ζ é a impedância característica para ondas torcionais e Z é a impedância do "top drive". A impedância característica é proporcional ao momento transversal polar de inércia da tubulação e varia grosso modo como a 4ª potência do diâmetro da tubulação. Observe que o coeficiente de reflexão é uma função complexa onde, em geral, tanto a magnitude quanto a fase variam com a frequência. Se o controlador de velocidade é rígido (isto é, $|Z| \gg \zeta$), então, o coeficiente de reflexão se aproxima de -1 e quase 100% da energia de onda torcional é refletida à coluna de perfuração 1 pelo "top drive".

[0047] Uma representação complexa da impedância de um "top drive" pode ser determinada conforme segue. Se a anti-finalização do controlador de velocidade é negligenciada (a qual é uma função não-linear que limita o torque) o torque do "drive" do "top drive" pode ser escrito como:

$$T_d = P(\Omega_{set} - \Omega) + I \int (\Omega_{set} - \Omega) dt \quad (2)$$

onde P e I são os fatores de proporção e integração, respectivamente, do controlador de velocidade e Ω é a velocidade real do "drive" de saída (em rad/s) e Ω_{set} é o ponto de ajuste da velocidade do "drive" (em rad/s). O torque do "drive" é, na prática, a soma do torque do motor multiplicado pela taxa de transmissão n_g (velocidade do motor / velocidade

de saída, > 1). Observe que o controle de velocidade aqui se refere ao eixo de saída do "top drive". É mais comum que o controle de velocidade se refira ao eixo do motor; nesse caso, os valores correspondentes de P e I para o controle da velocidade do motor seria, então, um fator $1 / n_g^2$ mais baixo que acima.

[0048] Desprezando as perdas de transmissão, a equação de movimento do eixo de saída do "top drive" é:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_d - T \quad (3)$$

onde J é a inércia efetiva do "top drive" (incluindo os motores do "drive" e engrenagem) e T é o torque externo da coluna. Combinando as equações (2) e (3) e aplicando a transformada de Fourier, tem-se a seguinte equação de movimento:

$$(i\omega J + P + \frac{I}{i\omega})\Omega = (P + \frac{I}{i\omega})\Omega_{set} - T \quad (4)$$

[0049] Para simplificar, os mesmos nomes das variáveis foram utilizados, como nas equações com base em tempo, embora Ω , Ω_{set} e T representem agora amplitudes complexas. O fator de tempo implícito é $\exp(i\omega t)$, onde $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do "top drive". Se assumirmos que não há realimentação em cascata através da velocidade estabelecida (conforme o encontrado em sistemas de realimentação de torque), a amplitude de velocidade estabelecida desaparece e a equação acima é simplificada para:

$$T = -(i\omega J + P + \frac{I}{i\omega})\Omega \quad (5)$$

[0050] A taxa negativa $-T / \Omega$ é chamada de impedância da extremidade superior Z da coluna:

$$Z = i\omega J + P + \frac{I}{i\omega} \quad (6)$$

[0051] Esta impedância pode ser facilmente generalizada para um controlador PID ideal, através da adição de um novo termo $i\omega D$ a ele, onde D é o termo derivativo do controlador. Um termo- D positivo (normal) irá aumentar a inércia efetiva do "top drive", enquanto um fator negativo irá reduzi-lo. Na prática, devido à diferenciação de tempo da velocidade medida ser um processo de direção de ruídos que melhora o ruído de alta frequência, o termo- D em um controlador PID é normalmente combinado com um filtro de passagem baixo. Este filtro introduz um eixo de fase que torna a impedância efetiva mais complicada e isso, portanto, aumenta o risco de criar instabilidades em algumas frequências, conforme exemplificado abaixo. Assim, embora o controlador PID com um termo- D possa ser utilizado para realizar o aspecto de ajuste do presente Pedido de Patente de Invenção, isso não é recomendado.

[0052] Combinando as equações (1) e (6), tem-se a seguinte expressão para o coeficiente de reflexão, válido para "top drives" de velocidade controlada do tipo PI:

$$r = -\frac{P - \zeta + i \cdot (\omega J - \frac{I}{\omega})}{P + \zeta + i \cdot (\omega J - \frac{I}{\omega})} \quad (7)$$

[0053] Sua magnitude tem uma igualdade mínima de:

$$|r|_{\min} = \frac{|P - \zeta|}{P + \zeta} \quad (8)$$

onde os termos imaginários desaparecem, isto é, quando a frequência angular do "top drive" se iguala a $\omega = \sqrt{I/J}$. Para controladores de velocidade rígidos padrão esta frequência é normalmente maior que a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta (vide Fig. 3 e descrição associada). No entanto, descobrimos que o ajuste do termo-I do controlador PI também ajusta a frequência de absorção de pico das ondas torcionais pelo "top drive". Em particular, o termo-I pode ser ajustado de modo que a absorção máxima de energia das ondas torcionais ocorra em ou próxima à frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta ω_s (i.e, quando a magnitude do coeficiente de reflexão é mínima), conforme segue:

$$I = \omega_s^2 J \quad (9)$$

[0054] Esta realização é significativa visto que, como uma primeira etapa para alcançar um bom amortecimento, o termo-I do controlador PI é dependente apenas da frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta e da inércia efetiva do "top drive". Uma vez que a inércia efetiva é rapidamente determinada, quer antes da operação ou a partir das figuras especificadas pelo fabricante, e visto que a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta pode ser rapidamente determinada durante a perfuração, isso torna o ajuste do controlador PI objetivo, enquanto obtém uma boa absorção de energia pelo "top drive" das oscilações da vibração torcional agarra e solta.

[0055] Esta primeira etapa de ajuste do controlador de velocidade é uma boa primeira etapa em direção a um amortecimento efetivo das oscilações da vibração

torcional agarra e solta. No entanto, o amortecimento pode ser melhorado. Em particular, o termo-I não ajustado do controlador de velocidade ainda é bastante alto, isto é, $P \gg \zeta$, mantendo o coeficiente de reflexão próximo a -1. Descobrimos que para obter um amortecimento suficiente das oscilações da vibração torcional agarra e solta, o termo-P do controlador de velocidade deve ser diminuído, de modo que seja da mesma ordem de magnitude da impedância característica ζ . No entanto, também descobrimos que não é desejável que o coeficiente de reflexão desapareça completamente, porque isso mudaria radicalmente a dinâmica da coluna de perfuração 12 e o modo do pêndulo se dividiria em dois novos modos, cada um com uma frequência diferente. Além disso, um controlador de velocidade extremamente suave que absorvesse quase toda a energia das ondas incidentes criaria flutuações de velocidade muito altas no "top drive", em resposta às variações de torque da perfuração. Isso pode reduzir a eficiência da perfuração.

[0056] Descobrimos que o termo-P pode ser selecionado como um múltiplo não inteiro da impedância característica ζ da coluna de perfuração, o qual pode ser expresso como $P = \zeta / a$, onde a é um fator de mobilidade normalizado (adimensional) menor que a unidade que é ajustável por computador ou pelo operador dentro de determinados limites, conforme descrito abaixo. Uma vez definido o termo-I para fazer a parte imaginária da equação (7) desaparecer, definir o termo-P conforme descrito faz com que o mínimo do coeficiente de reflexão (i.e., a absorção do pico de energia pelo "top drive") na frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta ω_s , se torne:

$$|r|_{\min} = \frac{1-a}{1+a} \quad (10)$$

[0057] Ao permitir o ajuste do fator de mobilidade a , a quantidade de energia refletida para a coluna de perfuração 12 pode ser controlada, dentro de limites. Estes limites podem ser definidos permitindo apenas uma determinada faixa de valores para a , tais como de 0,05 a 0,33. Isso corresponde a uma faixa de magnitude de r_{\min} de cerca de 0,9 a 0,5. Acredita-se que esta faixa permite que o amortecimento seja controlado, de modo que as oscilações da vibração torcional agarra e solta possam ser inibidas. Se o controlador de velocidade 42 for muito mais rígido do que isso (i.e., com um coeficiente de reflexão maior que cerca de 0,9) percebemos que muito da energia torcional das oscilações de energia é refletida na coluna de perfuração (12). Além disso, se o controlador de velocidade (42) for muito suave (i.e., com um coeficiente de reflexão menor que cerca de 0,5) percebemos que o desempenho de perfuração (p.ex., em termos de ROP) pode ser afetado.

[0058] Um controlador de velocidade padrão é projetado para manter a velocidade do motor constante e P e I reais constantes com relação ao eixo do moto. Um motor de "drive" típico com uma potência nominal de 900 kW e uma inércia de motor de $J_m = 25\text{kgm}^2$ é tipicamente controlado por um controlador de velocidade do motor de $P_m = 500 \text{ Nms}$. O fator-I do controlador de velocidade é mais comumente determinado de forma indireta, como o fator-P dividido por uma integração de tempo constante de normalmente $\tau_i = 0,3\text{s}$. Como exemplo, considere uma direção com um motor conectado ao eixo de saída com uma transmissão tendo uma inércia de J_g

= 250kgm^2 e uma taxa de transmissão de $n_g = 5,32$. A inércia de "drive" efetiva é, então, $J_d = J_g + n_g^2 J_m = 960\text{kgm}^2$. Os fatores do controlador de velocidade efetivos relativos ao eixo de saída são semelhantemente $P = n_g^2 P_m \approx 14000\text{Nms}$ e $I = P / \tau_i \approx 47000\text{Nm}$. Em comparação, a impedância característica para uma tubulação de 5 polegadas com $\zeta \approx 340\text{ Nms}$ é apenas 2,4% da parte real da impedância de "drive".

[0059] A Figura 3 é um gráfico 48 de magnitude do coeficiente de reflexão $|r|$ versus a frequência e mostra a diferença entre um controlador de velocidade rígida padrão (curva 50) e um controlador de velocidade ajustado de acordo com o presente Pedido de Patente de Invenção (curva 52). O último é calculado com um fator de mobilidade de $a = 0,25$ e um termo-I fornecendo amortecimento máximo a $0,2\text{Hz}$ (período de oscilação da vibração torcional agarra e solta de 5s). Nesta frequência, a reflexão é reduzida de cerca de $0,993$ (controlador PI padrão) para $0,6$ (controlador PI ajustado conforme acima), o que representa uma dramática melhoria no amortecimento pelo "top drive" na frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta.

[0060] Vale ressaltar o fato de que em ambos os casos, o coeficiente de reflexão permanece abaixo de 1, mas se aproxima desse limite uma vez que a frequência se aproxima quer de zero ou infinito. Por conseguinte, o controlador PI padrão nunca fornece um amortecimento negativo que possa de outro modo amplificar os componentes de vibração torcional. No entanto, o amortecimento é insatisfatório e distante da relativamente estreita banda de absorção a $1\text{-}2\text{Hz}$. Em contraste, o controlador PI ajustado fornece uma banda de

absorção comparativamente ampla, com menos de 80% de reflexão entre cerca de 0,1Hz e 0,4Hz. Há, inclusive, um substancial efeito de amortecimento remanescente ($|r|=0,965$) a 0,6 Hz, que é três vezes a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta e se aproxima da segunda frequência de ressonância da coluna de perfuração.

[0061] A inércia efetiva J do mecanismo de perfuração, a impedância característica ζ e a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta ω_s alteram a largura de banda de absorção da curva de reflexão-frequência na Fig. 3. Em particular, a largura de banda de absorção é inversamente proporcional à taxa de $\omega_s J / \zeta$. Para um mecanismo de perfuração com uma grande inércia efetiva e/ou uma tubulação de perfuração delgada, tornar esta taxa mais ampla (p.ex., maior que 5), faz com que a largura de banda de absorção diminua. Neste caso, torna-se mais importante assegurar que o período de oscilação da vibração torcional agarra e solta estimado seja determinado de forma mais precisa (se possível), de modo que a frequência de amortecimento máximo esteja tão próxima quanto possível da frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta real.

[0062] A redução na magnitude do coeficiente de reflexão e no amortecimento positivo correspondente sobre toda a banda de frequência é muito importante e é alcançado somente com um controlador PI único. Isso está em contraste com outros métodos ativos que utilizam ciclos em série de realimentação em cascata com um controlador de velocidade padrão, ou que dependem de alguns parâmetros medidos, tais como torque de coluna ou "drive", para fornecer um sinal de realimentação para o PLC. Os filtros utilizados nas funções

de realimentação em cascata podem ser adequados para amortecer as oscilações da vibração torcional agarra e solta fundamentais, mas eles podem causar instabilidades e amortecimento negativo em frequências mais altas.

[0063] Na prática, o termo-P para o controlador de velocidade ajustado pode ser determinado conforme segue:

$$P = \frac{\zeta}{a} = \frac{GI_p}{ca}$$

onde G é o módulo de cisalhamento da coluna de perfuração (cujo valor típico é $80 \times 10^9 \text{Nm}^{-2}$), I_p é o momento transversal polar de inércia da coluna de perfuração (cujo valor típico é $12,2 \times 10^{-6} \text{m}^4$) e c é a velocidade das ondas torcionais na coluna de perfuração (cujo valor típico é 3192ms^{-1}).

[0064] Para determinar o termo-I na prática, há duas variáveis a serem avaliadas: (a) a frequência angular ω_s das oscilações da vibração torcional agarra e solta, e (b) a inércia efetiva J do "top drive". A última é relativamente objetiva para esta determinação e pode tanto ser calculada a partir dos valores teóricos da inércia de transmissão, da taxa de transmissão e da inércia do rotor do motor, quanto pode ser encontrada experimentalmente realizando um teste de aceleração quando o "top drive" estiver desconectado da coluna. Uma formula típica para o cálculo da inércia do "top drive" é:

$$J_{TD} = J_{TD0} + n_m n_{gear}^2 J_{MR}$$

onde J_{TD0} é a inércia do "top drive" com o motor desacoplado (cujo valor típico é 100kg m^{-2}), n_{gear} é a taxa de transmissão (>1) n_m dos motores ativos (cujo valor padrão é 1), e J_{MR} é a inércia do rotor do motor (cujo valor típico é $18,2 \text{kg m}^{-2}$).

[0065] Há vários modos pelos quais a frequência angular ω_s pode ser estimada, incluindo: (i) cálculos a partir da geometria da coluna, (ii) por medição manual (p.ex., utilizando um cronômetro) e (iii) por determinação automática no software PLC. Uma vantagem importante do aspecto de ajuste do PI o presente Pedido de Patente de Invenção é a de que o efeito de amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta ainda é obtido, mesmo se a estimativa do período de oscilação da vibração torcional agarra e solta utilizada para ajustar o controlador PI não for muito precisa. Por exemplo, a Fig. 3 mostra um amortecimento máximo ocorrendo a uma frequência de 0,2Hz. Mesmo se a frequência de oscilações da vibração torcional agarra e solta real for mais baixa ou mais alta que isso, ainda haverá um bom efeito de amortecimento ($r \sim 0,8$) obtido entre aproximadamente 0,09Hz e 0,4Hz. Conseqüentemente, os métodos utilizados para estimar o período de oscilação da vibração torcional agarra e solta não precisam ser particularmente precisos.

(i) Geometria da Coluna

[0066] É possível empregar uma abordagem teórica para determinar o período de oscilação da vibração torcional agarra e solta, utilizando parâmetros da coluna de perfuração disponíveis no local no livro de registro. Um livro de registro é compilado no local para cada coluna de perfuração e compreende um registro detalhado das propriedades de cada seção da coluna de perfuração (p.ex., OD, ID, tipo de tubulação), uma seção sendo definida como uma extensão (p.ex., 300m) do mesmo tipo de tubulação de perfuração.

[0067] A seguir, assume-se que a coluna de perfuração 12 consiste de uma seção de tubulação de perfuração

com extensão 1 com uma impedância de broca agrupada em sua extremidade inferior, representada por Z_b . Esta impedância pode ser uma impedância de inércia reativa pura ($i\omega J_b$, onde J_b é a inércia da estrutura inferior do poço) ou pode ser uma constante real, representando o amortecimento agrupado (positivo ou negativo) na broca de perfuração 28. As equações de torque na parte superior e na broca representam as duas condições de limitação. Pode ser demonstrado que estas duas condições de limitação podem ser escritas de acordo com a seguinte equação matriz:

$$\begin{bmatrix} \zeta + Z_d & \zeta - Z_d \\ (\zeta - Z_b)e^{-ikl} & (\zeta + Z_b)e^{ikl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Omega^+ \\ \Omega^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde k é o número de onda e Z_d é a impedância do mecanismo de perfuração.

[0068] Existem soluções não triviais para este sistema de equações, caso o determinante da matriz do sistema desapareça, isto é, quando

$$e^{i2kl} = \frac{(\zeta - Z_d)(\zeta - Z_b)}{(\zeta + Z_d)(\zeta + Z_b)} = r_d r_b \quad (12)$$

[0069] Aqui, os coeficientes de reflexão no "drive" r_d e na parte inferior da coluna de perfuração r_b foram introduzidas conforme segue:

$$r_d = \frac{\zeta - Z_d}{\zeta + Z_d} \quad r_b = \frac{\zeta - Z_b}{\zeta + Z_b}$$

[0070] Observe que o coeficiente de reflexão $r_d \approx -1$ do "top drive" para um controlador de velocidade rígido ($|Z_d| \gg \zeta$) e o coeficiente de reflexão r_b da broca igualam a unidade para um extremidade inferior livre ($Z_b = 0$).

[0071] As raízes da equação (12) podem ser

escritas como:

$$i2kl = \ln(r_d r_b) = \ln|r_d r_b| + i(n2\pi + \alpha_d + \alpha_b) \quad (13)$$

onde n é um inteiro não-negativo e α_d e α_b são as justificações (ângulos de fase) dos coeficientes de reflexão complexos r_d e r_b , respectivamente. As frequências de ressonância angular correspondentes são:

$$\omega_n = (\alpha_d + \alpha_b + n2\pi - i \ln|r_d r_b|) \frac{c}{2l} \quad (14)$$

[0072] Uma vez que, em geral, as magnitudes e fases do coeficiente de reflexão são dependentes de frequência, a equação acima é transcendente, sem soluções analíticas explícitas. No entanto, isso pode ser resolvido numericamente por um PC ou outro computador.

[0073] O termo imaginário da equação supracitada representa o amortecimento dos eigenmodes (modos normais de vibração do sistema de oscilação). Se $|r_d r_b| < 1$, a parte imaginária da raiz é positiva, representando, dessa forma, um amortecimento positivo e normal e fazendo com que o fator de tempo $\exp(i\omega_n t)$ diminua com o tempo. Em contrapartida, se $|r_d r_b| > 1$, o amortecimento se torna negativo, fazendo com que uma pequena amplitude cresça exponencialmente com o tempo.

[0074] Como exemplo, considere um caso com um controlador de velocidade completamente rígido ($|r_d| = -1$ e $\alpha_d = \pi$) girando uma coluna de perfuração, compreendendo uma inércia finita da parte inferior do poço ($Z_b = i\omega J_b$, $|r_b| = 1$ e $\alpha_b = -2 \tan^{-1}(\omega J_b / \zeta)$). Então, a frequência mais baixa (oscilação da vibração torcional agarra e solta teórica) ω_s se torna:

$$\omega_s = \left(\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega_s J_b}{\zeta} \right) \right) \frac{c}{2l} \quad (15)$$

[0075] Sem a inércia extra da estrutura inferior do poço, esta expressão se reduz a $\omega_s = \pi c / (2l)$. Observe que a frequência de ressonância diminui na medida em que a inércia J_b aumenta. Em casos extremos, quando $\omega_s J_b \gg \zeta$, a fórmula acima pode ser reescrita como $\omega_s \approx 1/\sqrt{J_b C}$, onde $C = 1 / (GI_p)$ é a conformidade estática da coluna. Esta é a fórmula conhecida para a frequência natural de inércia agrupada e sistema de molas.

[0076] Descobrimos que isso é útil para estudar a relação entre a amplitude de velocidade da extremidade inferior $\Omega_s \equiv \Omega(x=l)$ e o torque superior correspondente $T_s \equiv T(x=0)$. A partir da equação acima, pode ser mostrado que essa taxa é

$$\frac{\Omega_s}{T_s} = \frac{r_d \exp(-ikl) + \exp(ikl)}{\zeta (r_d - 1)} = -i \frac{\sin(kl)}{\zeta} - \frac{(1+r_d) \cos(kl)}{(1-r_d)\zeta} \quad (16)$$

[0077] Utilizando-se do fato de que a impedância característica pode ser escrita como $\zeta \equiv kl / (\omega C)$, a amplitude de velocidade do poço pode ser expressa por

$$\Omega_s = -\frac{\sin(kl)}{kl} C \cdot i\omega T_s - \frac{(1+r_d) \cos(kl)}{(1-r_d)kl} C\omega T_s \quad (17)$$

[0078] Observe que o segundo termo desaparece se o controlador de velocidade for muito rígido ($r \approx -1$) ou quando $kl \approx \pi / 2$. No entanto, se um controlador de velocidade suave for utilizado e houver uma inércia alta próxima à broca, de modo que kl para a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta seja significativamente menor que π

/2, então, o segundo termo pode ser significativo e não deve ser omitido.

[0079] A teoria supracitada pode ser generalizada para colunas com muitas seções e também para casos com amortecimento distribuído. Se um termo de amortecimento linear for incluído, a generalização faz com que os números de onda e as impedâncias características sejam complexos e não puramente reais. Se a coluna consiste de m seções uniformes, a solução de onda geral consiste de amplitudes de velocidade complexas $2m$, representando pares de ondas de propagação para cima e para baixo. A continuidade da torção e velocidade angular através dos limites de seção pode ser expressa pelas condições de limitação interna $2(m-1)$, que contribuem para as duas condições finais na equação (11). As raízes deste sistema de equações são aquelas frequências que tornam a matriz do sistema singular. Embora seja possível encontrar uma expressão analítica para o determinante do sistema, as soluções são encontradas numericamente por um PC ou outro computador no local. A IADC/SPE 15564 fornece um exemplo de um modo de fazer isso, e seus conteúdos estão aqui incorporados por referência para todos os fins.

[0080] A Figura 4 mostra uma tela típica 50 disponível no console do perfurador que permite ao perfurador acionar um PC para estimar um novo período de oscilação da vibração torcional agarra e solta com base na geometria da coluna. Em particular, uma tabela 52 representa as seções da coluna de perfuração, incluindo BHA, tubulação de perfuração pesada (HWDP) e as seções de tubulação de perfuração 1 a 6. Os campos disponíveis para cada seção são: extensão, diâmetro externo e diâmetro interno. O perfurador primeiramente

determina, a partir do livro de registro local, em quantas seções a coluna de perfuração está dividida. Neste exemplo, a coluna de perfuração possui oito seções. Para cada seção, o perfurador insere valores nos três campos. Um botão 54 permite que o perfurador acione um novo período de oscilação da vibração torcional agarra e solta a ser estimado com base na geometria da coluna inserida na tabela 52. Em particular, a tabela estabelece a equação matriz de 2×2 , acima mencionada, e o PL (não mostrado) utiliza um método numérico para encontrar as raízes da matriz que tornam a matriz singular. A menor raiz é o resultado 56 do período de oscilação da vibração torcional agarra e solta na tela 50.

(ii) Estimativa Manual

[0081] Para determinar o período de oscilação da vibração torcional agarra e solta manualmente, o perfurador pode observar o torque do "drive" conforme mostrado no console do perfurador 34 e determinar o período medindo o período de variação do torque de "drive" com um cronômetro. Isso é rapidamente feito, uma vez que cada período tem normalmente de 2s a 10s. Um método alternativo é que o perfurador ouça a mudança de intensidade no motor do "top drive" e determine o tempo do período deste modo. Conforme acima mencionado, tais métodos devem ser suficientes uma vez que a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta estimada não tenha de estar particularmente próxima à frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta real, a fim de que as oscilações da vibração torcional agarra e solta sejam amortecidas.

(iii) Estimativa Automática

[0082] Estimativa automática significa que o

software PLC estima o período ou frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta a partir de medições feitas durante a perfuração. Em particular, o sinal de torque do "top drive" é filtrado por um filtro de passagem de banda que transmite frequências na faixa de 0,1Hz a 0,5Hz (i.e. um período entre 2s e 10s), isto é, o filtro favorece o componente de oscilação da vibração torcional agarra e solta e suprime todos os outros componentes de frequência. O PLC, então, detecta o período entre cada novo zero até a passagem do sinal de torque filtrado e utiliza estes valores em um filtro de suavização recursivo para obter uma estimativa de período precisa e estável. O filtro de suavização final é congelado quando a gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta (vide abaixo) cai abaixo de um valor crítico baixo ou quando o método de ajuste é ativado.

[0083] Para ajudar o estimador de período a rapidamente encontrar o período preciso, o operador pode ou colocar um valor de início real ou pegar um valor teórico calculado a partir da coluna atual (determinado conforme a seção Geometria da Coluna acima).

[0084] Em uso, o controlador PI ajustado é ativado quando há uma movimentação de oscilação da vibração torcional agarra e solta significativa (conforme determinado pelo perfurador ou pelo software). No entanto, a estimativa de frequência da oscilação da vibração torcional agarra e solta (medição de período) acontece antes que o controlador PI ajustado seja realmente utilizado para controlar o mecanismo de perfuração. Uma vez completo, o estimador de período é desligado quando o controlador PI está ligado, por que o período natural das oscilações da vibração torcional agarra

e solta pode mudar ligeiramente quando o controle de velocidade suave é utilizado.

[0085] Parece não haver a necessidade de reajuste muito frequente da frequência estimada, porque a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta natural varia ligeiramente com a extensão da coluna de perfuração. É uma boa ideia, no entanto, atualizar automaticamente o período a cada conexão, isto é, quando outros 30 m de tubulações de perfuração forem adicionados à coluna de perfuração. Para tanto, é possível utilizar análises de sensibilidade teórica para prever como o período de oscilação da vibração torcional agarra e solta aumenta com a extensão da coluna de perfuração. Uma maneira de fazer isso (mas não a única maneira) é encontrar os períodos teóricos para duas extensões de colunas (L e L+200 m, por exemplo) e, em seguida, utilizar interpolação para o aumento causado pela adição de uma seção de 30 m, a fim de atualizar o período estimado.

[0086] Estimativa da Gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta e da Velocidade Instantânea da Broca

[0087] Um aspecto adicional do presente Pedido de Patente de Invenção é fornecido como um conjunto de instruções executáveis no software PLC que permite a quantificação das variações de velocidade da broca e uma estimativa da velocidade de rotação instantânea da broca. 'Velocidade da broca' significa a velocidade de rotação da BHA, excluindo a contribuição do motor de perfuração opcional. Este aspecto do presente Pedido de Patente de Invenção pode ser fornecido separadamente ou em combinação com o aspecto de ajuste do controlador PI do presente Pedido de Patente de Invenção.

[0088] Esta estimativa é obtida através da combinação da conformidade torcional conhecida C da coluna de perfuração e das variações do torque de "drive". Em geral, uma vez que o torque não é um sinal rigorosamente periódico, mas na maioria das vezes possui uma vasta gama de frequências, um cálculo preciso é extremamente complicado e não é, portanto, adequado para implementação em um PLC. No entanto, percebemos que uma vez que a movimentação de oscilações da vibração torcional agarra e solta é dominada por uma frequência de oscilações da vibração torcional agarra e solta fundamental, é possível obter estimativas razoavelmente boas com base apenas nestas frequências.

[0089] A equação principal é a (17) acima, que descreve uma boa aproximação para a amplitude de velocidade complexa em função do torque da coluna superior. Os dois termos nesta expressão devem ser tratados de forma diferente, porque eles representam componentes harmônicos compreendendo uma diferença de fase de 90 graus. Enquanto o fator imaginário $i\omega T_s$ deve ser tratado como o derivativo de tempo do torque filtrado por passagem de banda, o fator de termo real ωT_s pode ser aproximado como o produto do torque filtrado por passagem de banda e pela frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta. Uma vez que o filtro de passagem de banda suprime todas as frequências exceto a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta, é possível substituir a integração de tempo direta pela aproximação com base na integração. Esta aproximação tem como base o fato de que $i\omega \approx -\omega_s^2 / (i\omega)$, onde $1 / (i\omega)$ representa a integração de tempo. Esta aproximação favorece a frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta e suprime os harmônicos

mais altos. As versões de divisão de tempo de (17), adequadas para a implementação no PLC 38 são:

$$\Omega_b = -\frac{\sin(kl)}{kl} C \cdot \frac{dT_{bp}}{dt} - \frac{(1+r_d)\cos(kl)}{(1-r_d)kl} C \omega_s T_{bp} \approx \frac{\sin(kl)}{kl} C \cdot \omega_s^2 \int T_{bp} dt \quad (18)$$

[0090] Aqui, o parâmetro de fase é $kl = \omega_s l / c$. Na última aproximação, a aproximação integral para a derivação de tempo é utilizada e o segundo termo é omitido.

[0091] Embora a fórmula acima tenha como base uma coluna de seção única, simulações demonstraram que ela também fornece boas estimativas para colunas de multisseções, se a conformidade C total da coluna for utilizada:

$$C = \sum_{j=1}^m \frac{l_j}{I_{p,j} G} \quad (19)$$

[0092] Uma versão do algoritmo implementado no PLC (38), para estimar tanto a velocidade instantânea da BHA quanto a gravidade das oscilações da vibração torcional agarra e solta, compreende as seguintes etapas:

1. Estimar o torque da coluna através da correção dos efeitos de inércia (subtrair a inércia efetiva do motor vezes a aceleração angular) e através da utilização da taxa de transmissão para escalá-la corretamente;
2. Filtrar a passagem de banda do torque estimado, com o filtro de passagem de banda centralizado na frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta estimada/observada. O filtro deve ser de 2ª ordem ou superior, mas pode ser preferivelmente implementado no PLC como uma série de filtros IIR recursivos de 1ª ordem;
3. Calcular a conformidade estática total da coluna de perfuração utilizando a equação (19) acima referida;
4. Calcular o parâmetro de fase $kl = \omega_s l / c$, onde ω_s é a

frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta angular determinada;

5. Calcular a velocidade de perfuração dinâmica utilizando ou a versão precisa ou aproximada da equação (18) acima referida;

6. Calcular a "gravidade de oscilação da vibração torcional agarra e solta" σ , que é a amplitude de oscilação da vibração torcional agarra e solta normalizada, determinada como a taxa de amplitude da velocidade de perfuração dinâmica sobre a velocidade rotacional média do "top drive";

7. Encontrar a velocidade instantânea como a soma da velocidade do "top drive" filtrada por passagem baixa e a velocidade de perfuração dinâmica estimada. Reduzir a zero se a velocidade estimada se tornar negativa;

8. Esquematizar os dados resultantes em um gráfico (p.ex., RPM versus tempo);

9. Repetir as etapas 1 a 8 para fornecer uma estimativa de tempo real substancial da velocidade da broca.

[0093] Prevê-se que este método pode ser realizado apenas onde a estimativa de velocidade da BHA é resultante ou apenas onde a gravidade de oscilação da vibração torcional agarra e solta é resultante.

[0094] Com relação à etapa 6, uma forma possível de estimar a gravidade de oscilação da vibração torcional agarra e solta é utilizar a seguinte fórmula, onde $LP()$ denota a filtragem de passagem baixa:

$$\sigma = \frac{\sqrt{2 \cdot LP(\Omega_b^2)}}{\Omega_{set}} \quad (20)$$

[0095] Como o método acima referido leva em consideração o coeficiente de reflexão, ele se aplica para ambos os controles de velocidade, padrão e ajustado. Durante

os transientes de aceleração, quando a velocidade do "top drive" é significativamente alterada, o estimador não é confiável, uma vez que pode produzir grandes erros. Não obstante, acreditamos que esta é uma ferramenta útil para avaliar as condições de perfuração, quer automaticamente no software, quer através do mostrador para análise por um perfurador.

[0096] A taxa de amplitude da velocidade dinâmica em relação à velocidade média do "top drive" é uma medição direta e quantitativa da movimentação de oscilação da vibração torcional agarra e solta, mais adequada que o torque dinâmico ou a amplitude de torque relativa. Mesmo que a velocidade estimada da broca não seja altamente precisa, ela fornece uma entrada valiosa para que o perfurador monitore isso em um gráfico de tendências que dará ao operador informações mais explícitas sobre o que está acontecendo com a broca.

Interface do Usuário

[0097] Uma interface de usuário é fornecida para um console do perfurador 34 que compreende uma interface gráfica (vide Figs. 4A e 4B) que provê o operador com informações diretas sobre o status da oscilação da vibração torcional agarra e solta. A oscilação da vibração torcional agarra e solta é indicada por três diferentes indicadores:

- Um indicador de "luz de tráfego" 58 na Fig 4A com 3 níveis de oscilação da vibração torcional agarra e solta: uma luz verde para pequenas amplitudes (0-30%), uma luz de advertência amarela, se as oscilações de velocidade forem significantes (30-70%) e, finalmente, uma luz vermelha, se amplitudes ainda maiores forem estimadas. Este valor de

porcentagem tem por base a gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta, conforme anteriormente determinado.

- A gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta é esquematizada em um gráfico 62 de torque versus tempo na Fig. 4B para observar como a oscilação da vibração torcional agarra e solta se desenvolveu em um período de tempo especificado.

- A velocidade instantânea da broca, estimada em um gráfico 64 de velocidade instantânea da broca versus tempo na Fig. 4B, fornece uma impressão direta e visual do status das oscilações da vibração torcional agarra e solta da perfuração.

[0098] Conforme mencionado acima, a tela 50 requer que o operador insira uma descrição aproximada da coluna, em termos de um registro simplificado. Este registro aceita até 8 seções diferentes, onde a extensão, o diâmetro interno e a massa por unidade de extensão são especificadas. Estas informações são utilizadas para calcular tanto a frequência teórica estimada para o modo mais baixo como a conformidade estática da coluna de perfuração nesta frequência.

[0099] O operador pode deixar o controlador PI ajustado ligado ou desligado. No modo desligado, o controlador de velocidade do "drive" padrão é utilizado. Quando o ajuste está ativado, este controlador de velocidade é extrapolado pelo controlador PI ajustado 42, que é implementado no PLC 38. Se o controlador do "drive" no "top drive" é um modelo digital moderno, também é possível alterar o próprio controlador de velocidade do "drive", ao invés de extrapolá-lo. No entanto, se o método de extrapolação for escolhido, isso é obtido enviando um comando de alta

velocidade do PLC 38 para o controlador de velocidade no "top drive" e controlando dinamicamente o limite de torque de saída. Em perfurações normais, este limite de torque é utilizado como um limite de segurança para prevenir danos à coluna, se a coluna subitamente travar. No modo de controle ajustado, quando o PLC 38 controla dinamicamente o limite de torque, este limite é substituído por um limite de software correspondente no PLC 38.

[00100] O operador também pode alterar o fator de prevenção ou mobilidade a dentro de limites preestabelecidos através de botões 60 tipicamente entre 0,05 e 0,33. Um fator alto implica um controle de velocidade mais suave e menor probabilidade de a movimentação de oscilação da vibração torcional agarra e solta começar ou persistir. A desvantagem de um fator alto é uma flutuação maior da velocidade do "top drive" em resposta às alterações inofensivas no nível de torque da coluna. Pode ser necessário escolher um fator alto para reparar oscilações da vibração torcional agarra e solta graves, mas o operador pode reduzir o fator quando a perfuração suave for restaurada.

[00101] Prevê-se que a decisão de ativar e desativar o controlador de velocidade ajustado pode ser tomada pelo PLC (38) ou por outro controlador eletrônico. Tal controlador pode monitorar a estimativa instantânea da velocidade da broca, conforme estabelecido acima. Quando um padrão de período de oscilação da vibração torcional agarra e solta for observado, o controlador pode ativar o ajuste. Além disso, o controlador pode aumentar gradualmente o fator de mobilidade ou prevenção para aumentar a suavidade do "top drive", se as oscilações da vibração torcional agarra e solta

não forem reduzidas em magnitude dentro de um período predeterminado, p.ex., 2 minutos. Uma vez que as oscilações da vibração torcional agarra e solta tenham sido reduzidas ou tenham substancialmente desaparecido, o controlador pode reduzir gradualmente o fator de mobilidade ou prevenção (p.ex., reduzir para $a = 0,1$) para melhorar a eficiência da perfuração.

Teste HIL (Hardware-in-the-Loop)

[00102] Recentemente, o método de ajuste PI foi testado extensivamente nas assim chamadas simulações de Hardware In the Loop (HIL). Nestes testes, os programas PLC são executados em um PLC físico conectado por meio de interface ao modelo de simulação de tempo real de um "drive" e de uma coluna de perfuração.

[00103] O modelo de simulação a ser utilizado para o teste HIL do método de ajuste possui as seguintes características:

1. O "drive" é modelado como um controlador de velocidade PI padrão, com torque e limitações de potência e anti-finalização. O torque ou controlador atual é perfeito no sentido de que o torque atual é considerado para ser compatível com o torque estabelecido sem nenhum atraso.
2. O modelo pode lidar com uma pluralidade de motores de "drive" conectados ao eixo de saída por uma engrenagem.
3. A coluna de perfuração é modelada como uma série de elementos de molas e inércia agrupadas, provenientes de qualquer livro de registro. A extensão de grade utilizada na maioria dos exemplos abaixo é de aproximadamente 28 m, que é a extensão típica de uma plataforma tripla. Assim, os 3200m de extensão da coluna utilizados abaixo consistem de 114

elementos.

4. O torque de fricção estática é calculado para cada elemento com base na força de contato teórica, sendo uma função de peso e inclinação, curvatura e tensão. O efeito de WOB e do torque da broca também são incluídos.

5. O torque de fricção dinâmico dependente de velocidade é modelado como uma soma de três termos. O primeiro termo é uma variante de sinal suave da fricção da Coluna, o segundo representa uma fricção estática extra de início e o terceiro é um termo de amortecimento linear independente da força de contato. Para simular a instabilidade com a amplitude de oscilação crescente da perfuração suave, este coeficiente de amortecimento deve ser negativo.

[00104] O modelo foi primeiramente desenvolvido como um modelo Simulink no ambiente Matlab. Ele foi posteriormente implementado com a caixa de ferramentas Simulation Module (Módulo de Simulação) no ambiente National Instrument Lab View e executado em uma poderosa plataforma de PC. Embora este PC não se utilize de um sistema operacional em tempo real (TR), sua alta potência torna o modelo TR válido para todos os fins práticos.

[00105] O programa de simulação Lab View é conectado ao PLC, ao assim chamado cartão SimbaPro PCI profibus DP (DP = Distributed Peripherals/Periféricos Distribuídos), que pode simular todos os nós dos DP's conectados ao PLC. O tempo de atualização é estabelecido em 10ms (100Hz), que está dentro do ciclo de tempo do PLC (tipicamente de 20ms).

[00106] Os resultados do teste HIL são mostrados na Figura 5. A coluna utilizada é uma coluna de 3200m de

extensão, similar à coluna utilizada no campo de teste (vide abaixo). O período teórico para o modo mais baixo é de 5,2s. A Fig. 5 mostra um gráfico 72 de torque e velocidade para a coluna de perfuração (linha 72) e para o "top drive" (linha 74) durante um período de 150s, incluindo um intervalo de 5s onde a velocidade do "top drive" é acelerada a partir de zero até 100 rpm. O controle de velocidade ajustado é ativado em 30s após o início da rotação. As oscilações da vibração torcional agarra e solta constantes são estabilizadas rapidamente após o início. O período de oscilação da vibração torcional agarra e solta se estabiliza em torno de 5,3s. Isso é ligeiramente maior que o período do pêndulo teórico, mas o período estendido é consistente com o fato de que o intervalo de adesão é substancial. Observe que a velocidade do "top drive" é quase constante durante esta parte do controle de velocidade.

[00107] Quando o controle de velocidade ajustado é ativado, a velocidade do "top drive" (linha 78) mostra temporariamente uma variação dinâmica pronunciada 79 em resposta às variações de torque amplas. Mas depois de alguns períodos, o movimento de oscilação da vibração torcional agarra e solta desaparece e a velocidade do "top drive", bem como a velocidade da broca, se torna suave. Quando o controle de velocidade ajustado é desativado novamente, a amplitude da velocidade de perfuração (linha 76) começa a crescer, até que o movimento de oscilação da vibração torcional agarra e solta total seja desenvolvido. Esta instabilidade é uma consequência do amortecimento negativo incluído no modelo de torque da coluna.

[00108] A Figura 6 mostra os resultados 80 destas

mesmas simulações, mas agora com foco na gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta estimada pelo PLC (linha 87) e na velocidade instantânea da broca (linha 84) – observe que o gráfico inferior é uma continuação do gráfico superior e mostra a diferença entre a velocidade simulada (linha 84) e a velocidade estimada (linha 86). A velocidade estimada da broca é razoavelmente boa durante as condições constantes, mas possui um erro significativo durante o início. Apesar disso, a velocidade estimada da broca é capaz de prover o perfurador com um número útil de variações de velocidade de perfuração. A eficácia do controlador de velocidade ajustado é claramente ilustrada pela linha 87 da gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta: quando o controlador de velocidade ajustado está em uso, a gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta cai para quase zero. Uma vez que o controlador ajustado é desligado, a gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta novamente volta a aumentar.

Teste de Campo

[00109] O ajuste foi testado em campo, durante a perfuração de um longo poço não padronizado. A coluna possuía aproximadamente 3200 m de extensão, com uma tubulação de perfuração de 5,5 polegadas. Infelizmente, o teste terminou após um período relativamente curto de condições de oscilações da vibração torcional agarra e solta graves, quando a broca PDC perfurou uma formação mais suave. A nova formação tornou a broca menos agressiva com menor amortecimento negativo, removendo, assim, a fonte principal de oscilações da vibração torcional agarra e solta.

[00110] A Fig. 7 mostra um exemplo onde o

movimento de oscilações da vibração torcional agarra e solta é desenvolvido durante a rotação com um controlador de velocidade rígida padrão. Dois gráficos 90 são mostrados: um do torque do "drive" versus tempo e outro de velocidade da broca versus tempo. Alguns comentários sobre estes gráficos são dados abaixo:

- Os dados foram registrados a partir do PLC a uma taxa de amostragem de aproximadamente 9 Hz.
- O torque "TD corrigido" (linha 92) é o torque estimado da coluna e se iguala ao torque medido do "drive", corrigido para efeitos de inércia.
- O torque TD corrigido, bem como a velocidade da broca, é estimado pelo pós-processamento dos dados registrados, utilizando os métodos descritos acima.
- O controlador de velocidade padrão do "top drive" é muito rígido, por que as variações da velocidade medida (linha 94) mal podem ser vistas após o desligamento do controle de velocidade ajustado e o rpm do "top drive" é virtualmente constante. As pequenas acelerações correspondentes são a razão por que o torque de "drive" medido quase coincide com o torque da coluna corrigido pela inércia durante este período.
- As oscilações de torque de alta frequência (a 1.1 Hz), vistas durante a primeira parte da linha 96 quando o ajuste está acionado, provavelmente se originam a partir de uma ressonância no modo mais elevado da coluna de perfuração. Estas vibrações parecem ser independentes do tipo de controlador de velocidade utilizado, mas elas desaparecem quando a oscilação da vibração torcional agarra e solta é

desenvolvido desenvolvida.

- O fator de prevenção (linha 98) é o fator a de mobilidade estabelecido pelo operador, conforme mencionado acima.
- O período oscilações da vibração torcional agarra e solta observado é de aproximadamente 5,2s, que está em boa conformidade com o período teórico para esta coluna particular.

[00111] Outro exemplo de sucesso no reparo do movimento da oscilação da vibração torcional agarra e solta e mostrado na Fig. 8. Nesta figura, um gráfico similar 100 ao gráfico (90) é mostrado:

- A velocidade "TD estabelecida" (linha 102) é a velocidade de comando enviada ao "drive". Quando o ajuste está acionado, este nível é elevado de modo que o controlador de velocidade extrapolada do "drive" sempre tenta aumentar o torque além do limite dinâmico do novo controlador de velocidade. Neste caso, o aumento da velocidade é um pouco menor, fazendo com que a velocidade dinâmica seja diminuída pelo controlador de velocidade do "drive". Esta diminuição vai reduzir o efeito de amortecimento sob o controlador PI ajustado.
- Quando o ajuste está acionado, o fator de mobilidade (linha 104) é de aproximadamente 15%. Isso é um pouco baixo demais, porque as oscilações da vibração torcional agarra e solta não são reparadas antes que o operador aumente este fator para 106.
- Após o movimento de oscilação da vibração torcional agarra e solta ter desaparecido a cerca de 4310s, as oscilações de 1,1 Hz reaparecem com uma amplitude similar àquelas observadas anteriormente. Mas agora, as vibrações são vistas

também na velocidade medida.

- Dados adicionais, não incluídos aqui, mostram que a amplitude das oscilações de 1,1 Hz diminui, mas não desaparece completamente quando o fator de mobilidade é aumentado ainda mais. Isso significa que, mesmo que a impedância do "top drive" seja a inércia dominada nesta frequência, o controlador PI suave também possui algum efeito de amortecimento nas oscilações do modo mais elevado.

[00112] Em resumo, é descrito um método de ajuste do controlador PI para inibir oscilações da vibração torcional agarra e solta prejudiciais. O sistema compreende um controlador de velocidade de "drive" do tipo PI sendo ajustado de modo que efetivamente amortee as oscilações torcionais na ou próxima à frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta. É passivo no sentido de que ele não requer medidas de torque da coluna, correntes ou torque de "drive", como os sistemas alternativos fazem. As características de amortecimento de um mecanismo de perfuração ajustado caem na medida em que a frequência se afasta da frequência de oscilação da vibração torcional agarra e solta, mas o amortecimento jamais cai abaixo de zero, significando que o mecanismo de perfuração nunca irá amplificar as vibrações torcionais dos modos mais elevados. O método é adequado para implementação em um PLC controlando um mecanismo de perfuração. O controlador PI ajustado pode ser implementado ou no próprio PLC ou, alternativamente, calcular as constantes P e I do controlador de velocidade e passar para o controlador de velocidade digital interno dos motores do "top drive". O presente Pedido de Patente de Invenção também inclui outros aspectos úteis, incluindo uma

tela de interface de usuário, determinação automática da frequência de oscilações da vibração torcional agarra e solta, estimativa da velocidade instantânea da broca e cálculo da gravidade da oscilação da vibração torcional agarra e solta. Os últimos dois tem como base a geometria da coluna de perfuração e o sinal de torque medido.

[00113] Em conclusão, portanto, vê-se que o presente Pedido de Patente de Invenção e suas aplicações aqui divulgadas e aquelas cobertas pelas reivindicações em apenso são bem adaptadas para realizar os objetivos e obter os resultados estabelecidos. Determinadas alterações podem ser feitas na matéria objeto sem se afastar do espírito e escopo deste Pedido de Patente de Invenção. Entende-se que mudanças são possíveis dentro do escopo deste Pedido de Patente de Invenção e que este objetiva, ainda, que cada elemento ou etapa referido em qualquer das seguintes reivindicações seja entendido como se literalmente referente à etapa e/ou a todas as etapas ou elementos equivalentes. As seguintes reivindicações se destinam a cobrir o presente Pedido de Patente de Invenção tão amplamente quanto legalmente possível, em qualquer forma que ela possa ser utilizada. O presente Pedido de Patente de Invenção aqui reivindicado é novo e original em conformidade com a U.S.C. 35 § 102 e satisfaz as condições de patenteabilidade no § 102. O presente Pedido de Patente de Invenção aqui reivindicado não é óbvio em conformidade com a U.S.C. 35 § 103 e satisfaz as condições de patenteabilidade no § 103. Esta especificação e as reivindicações que seguem estão em conformidade com todas as exigências da U.S.C. 35 § 112. Os inventores podem valer-se da Doutrina de Equivalentes para determinar e avaliar o escopo

deste Pedido de Patente de Invenção e das reivindicações que seguem, uma vez que elas dizem respeito ao aparelho não substancialmente partindo do, mas de fora do escopo literal do Pedido de Patente de Invenção, conforme estabelecido nas reivindicações seguintes. Todas as patentes, aplicações de patente e estudos científicos aqui identificados são totalmente incorporados neste documento para todos os fins.

Legenda da Figura

Figura 2

2A) CONTROLADOR DO TOPDRIVE (DISPOSITIVO DE DIREÇÃO SUPERIOR)

PLC

2B) APARELHO DE CONTROLE DO USUÁRIO.

REIVINDICAÇÕES

1. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", tendo um método de amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta em uma coluna de perfuração, em que as oscilações da vibração torcional agarra e solta compreendem ondas de torção que se propagam ao longo da dita coluna de perfuração, tal método prevendo as etapas: a) amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta utilizando um mecanismo de perfuração (30) na parte superior da coluna de perfuração (12); b) controle da velocidade de rotação do mecanismo de perfuração (30) utilizando um controlador PI; caracterizado por c) ajuste do controlador PI, de modo que o mecanismo de perfuração (30) absorva a maior parte da energia torcional da coluna de perfuração (12) em uma frequência que seja ou esteja próxima à frequência das oscilações da vibração torcional agarra e solta, pelo ajuste do termo-I do controlador PI para ser dependente em um período aproximado das oscilações da vibração torcional agarra e solta e da inércia efetiva do mecanismo de perfuração (30), de acordo com $I = \omega s^2 J$ onde ωs é uma frequência angular estimada ou aproximada das oscilações da vibração torcional agarra e solta e J é a inércia efetiva do mecanismo de perfuração (30) através do qual o mecanismo de perfuração (30) possui um coeficiente de reflexão dependente da frequência das ondas torcionais, cujo coeficiente de reflexão está a um mínimo de ou próximo à frequência de oscilações da vibração torcional agarra e solta; d) em que a frequência angular fundamental aproximada ou estimada das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta é determinada

por medição automática, por exemplo, por um PLC, utilizando a geometria da coluna de perfuração (12) ou observação por computador do torque de acionamento.

2. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por prever, ainda, a etapa de medição do período aproximado das oscilações da vibração torcional agarra e solta para uso no ajuste do termo-I.

3. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com as reivindicações 1 ou 2, caracterizado por prever, ainda, a etapa de ajuste do termo-P do controlador PI para ser da mesma ordem de magnitude que a impedância característica ζ da coluna de perfuração (12).

4. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com a reivindicação 3, caracterizado por prever, ainda, a etapa de ajuste do termo-P de tal modo que o coeficiente de reflexão não desapareça completamente, através do qual um modo fundamental das oscilações da vibração torcional agarra e solta é impedido de se dividir em dois novos modos com frequências diferentes.

5. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com as reivindicações 3 ou 4, caracterizado por prever, ainda, a etapa de ajuste do termo-P como $P = \zeta/a$ onde "a" é o fator de mobilidade que permite o ajuste do termo-P durante a perfuração, através do qual a absorção de energia das oscilações da vibração torcional agarra e solta pelo mecanismo de perfuração (30) pode ser aumentada ou reduzida.

6. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com a reivindicação 5, caracterizado por prever, ainda, a etapa de aumento do fator de mobilidade se a magnitude das oscilações da vibração torcional agarra e solta não desaparecer ou for reduzida.

7. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com as reivindicações 5 ou 6, caracterizado por prever, ainda, a etapa de redução do fator de mobilidade uma vez que a magnitude das oscilações da vibração torcional agarra e solta tenha desaparecido ou sido reduzida, através do qual a eficiência da perfuração é aumentada sem a reaparição ou aumento em magnitude das oscilações da vibração torcional agarra e solta.

8. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado por o controlador PI ser separado de um controlador de velocidade (42) do mecanismo de perfuração (30), o método prevendo, ainda, a etapa de extrapolação do controlador de velocidade (42) do mecanismo de perfuração (30) com o controlador PI durante o amortecimento das oscilações da vibração torcional agarra e solta.

9. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado por prever, ainda, as etapas de ajuste do controlador PI quando ocorrerem as oscilações da vibração torcional agarra e solta e, do contrário, deixando o controlador PI sem ajuste.

10. "MÉTODO DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO" o qual emprega o método como definido na reivindicação 1, contendo as etapas: a) rotação de uma coluna de perfuração (12) com um mecanismo de perfuração (30), de modo a girar uma broca de perfuração (28) na extremidade inferior da coluna de perfuração (12), através do qual a superfície do solo é perfurada; caracterizado por b) resposta à detecção de oscilações da vibração torcional agarra e solta da coluna de perfuração (12) utilizando um controlador PI para controlar o mecanismo de perfuração (30), cujo controlador PI foi ajustado por um método como definido na reivindicação 1.

11. "APARELHO" para a realização do método como definido na reivindicação 1, tendo um mecanismo de perfuração (30) para uso na perfuração de um poço, caracterizado por prever um controlador eletrônico (34, 36, 38, 40, 42) que ajuste o controlador PI conforme as etapas do método como definido na reivindicação 1.

12. "APARELHO", para a realização do método como definido na reivindicação 1, de acordo com a reivindicação 11, tendo um controlador eletrônico (34, 36, 38, 40, 42) para uso com um mecanismo de perfuração (30) para a perfuração de um poço caracterizado por prever um controlador PI e uma memória (40) com instruções executáveis armazenadas que, quando executadas, fazem com que o controlador eletrônico (34, 36, 38, 40, 42) ajuste o controlador PI conforme as etapas do método como definido na reivindicação 1.

13. "MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE UM MECANISMO DE PERFURAÇÃO EM UMA PLATAFORMA DE PERFURAÇÃO", o qual emprega o método como definido na reivindicação 1, prevendo as etapas

de atualização das instruções executáveis para um controlador eletrônico (34, 36, 38, 40, 42) na plataforma de perfuração, cujo controlador eletrônico (34, 36, 38, 40, 42) é utilizado para controlar a operação do mecanismo de perfuração (30) caracterizado por as instruções executáveis compreenderem instruções para a execução de um método como definido na reivindicação 1.

14. "MÉTODO PARA REDUÇÃO DE OSCILAÇÕES DA VIBRAÇÃO TORCIONAL AGARRA E SOLTA", de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por o coeficiente de reflexão mínimo ter um valor entre 0,5 (50%) e 0,9 (90%); pela frequência angular fundamental aproximada ou estimada das referidas oscilações da vibração torcional agarra e solta ser determinada por medição automática, por exemplo, por PLC, usando: (i) a geometria da coluna de perfuração na qual a frequência angular fundamental das oscilações da vibração torcional agarra e solta ω_s é estimada: (1) usando um PC ou outro computador para resolver numericamente $\omega_s = \left(\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega_s J_b}{\zeta} \right) \right) \frac{c}{2l}$, em que J_b é a inércia da estrutura inferior do poço, ζ é a impedância característica da coluna de perfuração, c é a velocidade das ondas de torção na coluna de perfuração e l é o comprimento da coluna de perfuração; ou (2) dividindo a coluna de perfuração em seções m uniformes com uma impedância da broca concentrada em sua extremidade inferior, de modo que a solução geral de onda de
$$\begin{bmatrix} \zeta + Z_d & \zeta - Z_d \\ (\zeta - Z_b)e^{-ikl} & (\zeta + Z_b)e^{ikl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Omega^+ \\ \Omega^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$
 em que Z_d é a impedância do mecanismo de perfuração, Z_b é a impedância da broca concentrada e k é o número de onda, consista em amplitudes de

velocidade complexas $2m$, representando pares de ondas de torção de propagação ascendente e descendente; expressar a continuidade da velocidade angular e torção através dos limites de seções m uniformes por condições de limite internas $2(m-1)$, adicionando, assim, às duas condições finais na equação
$$\begin{bmatrix} \zeta + Z_d & \zeta - Z_d \\ (\zeta - Z_b)e^{-ikl} & (\zeta + Z_b)e^{ikl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Omega^+ \\ \Omega^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$
 estabelecer as condições de limite internas $2(m-1)$ como uma equação matricial homogênea $2m \times 2m$; e usar um PC ou outro computador no local para encontrar as raízes deste sistema de equações como aquelas frequências que tornam a matriz do sistema singular, em que a menor raiz é a frequência angular fundamental das oscilações da vibração torcional agarra e solta; ou (ii) observação por computador do torque do drive ao: filtrar um sinal de torque do mecanismo de perfuração com um filtro passa-faixa que passa frequências na faixa de 0,1Hz a 0,5Hz, em que o componente da vibração torcional agarra e solta é favorecido e todos os outros componentes de frequência são suprimidos; usar o PLC para detectar o período entre cada novo cruzamento ascendente de zero do sinal de torque filtrado; e usar os valores de cruzamento ascendente zero em um filtro de suavização recursivo para obter uma estimativa estável e precisa da frequência da vibração torcional agarra e solta.

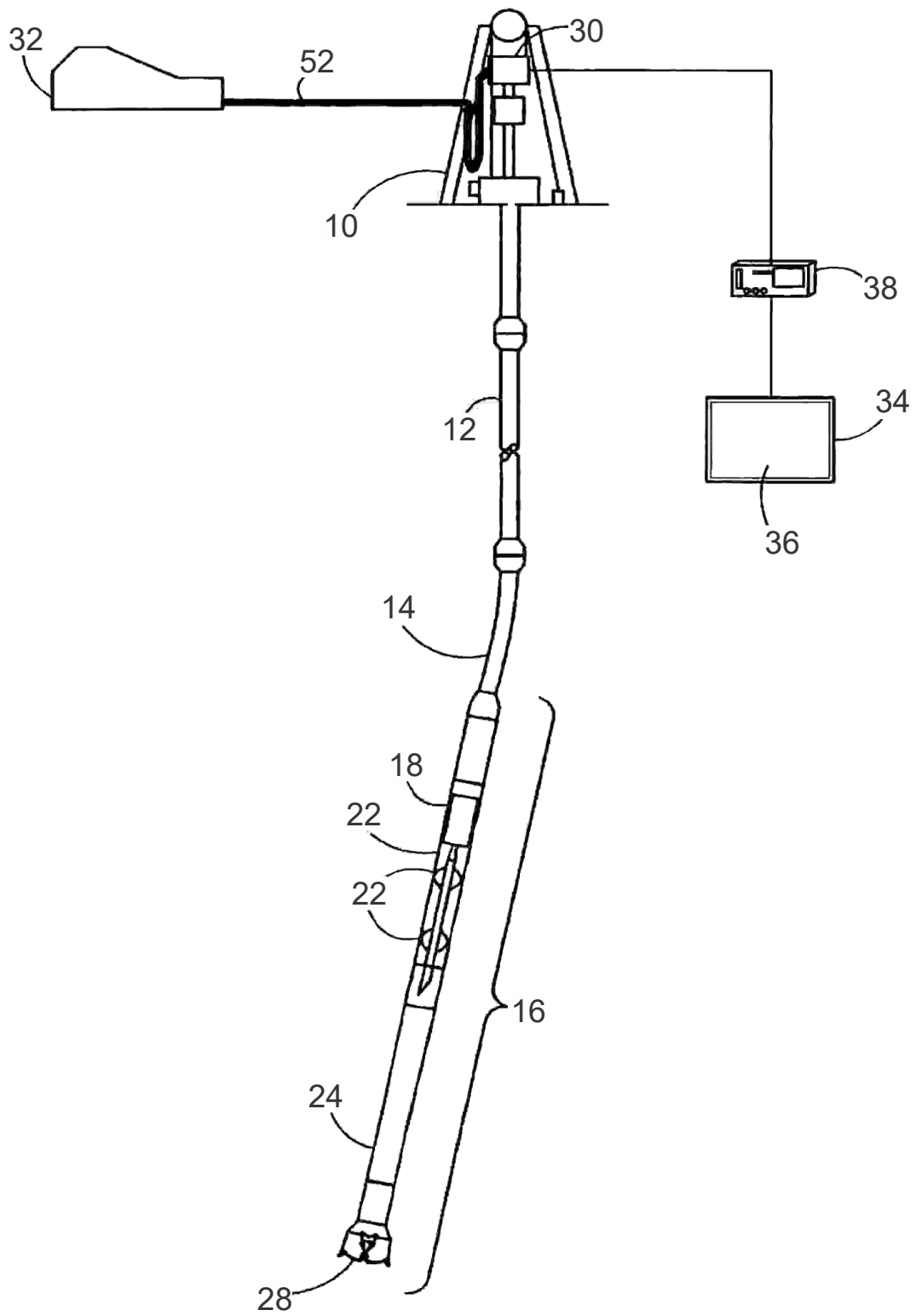


FIG. 1

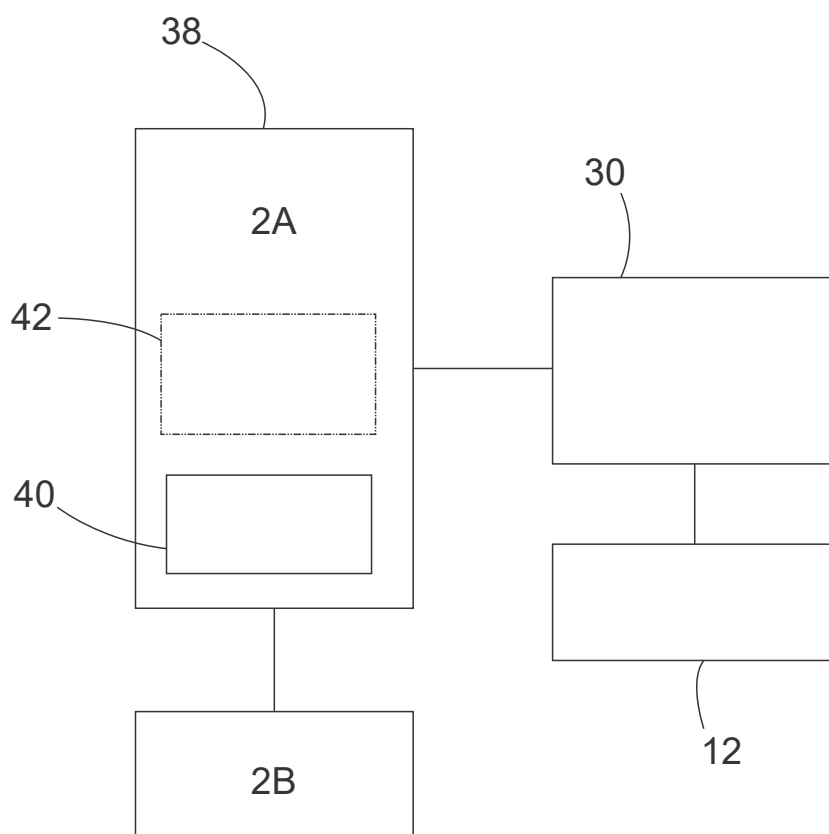


FIG. 2

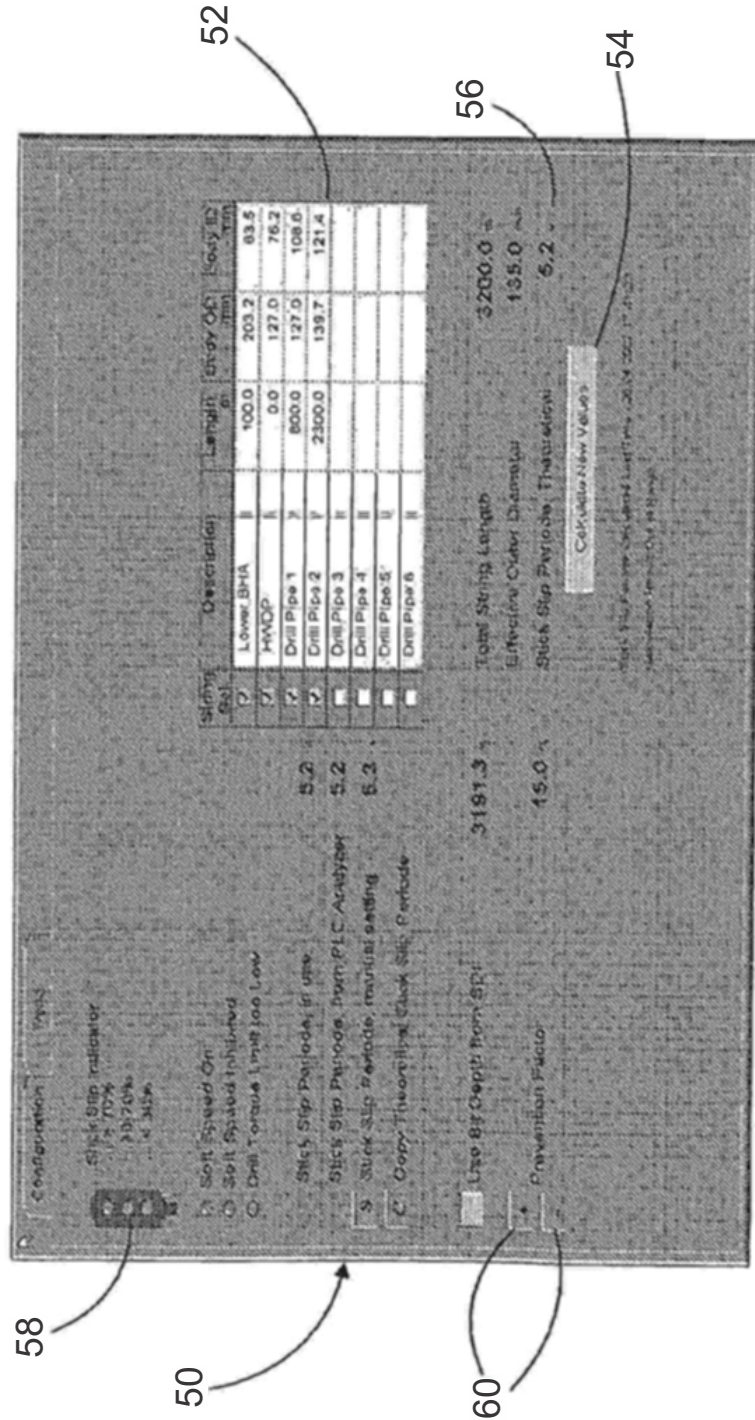


FIG. 4A

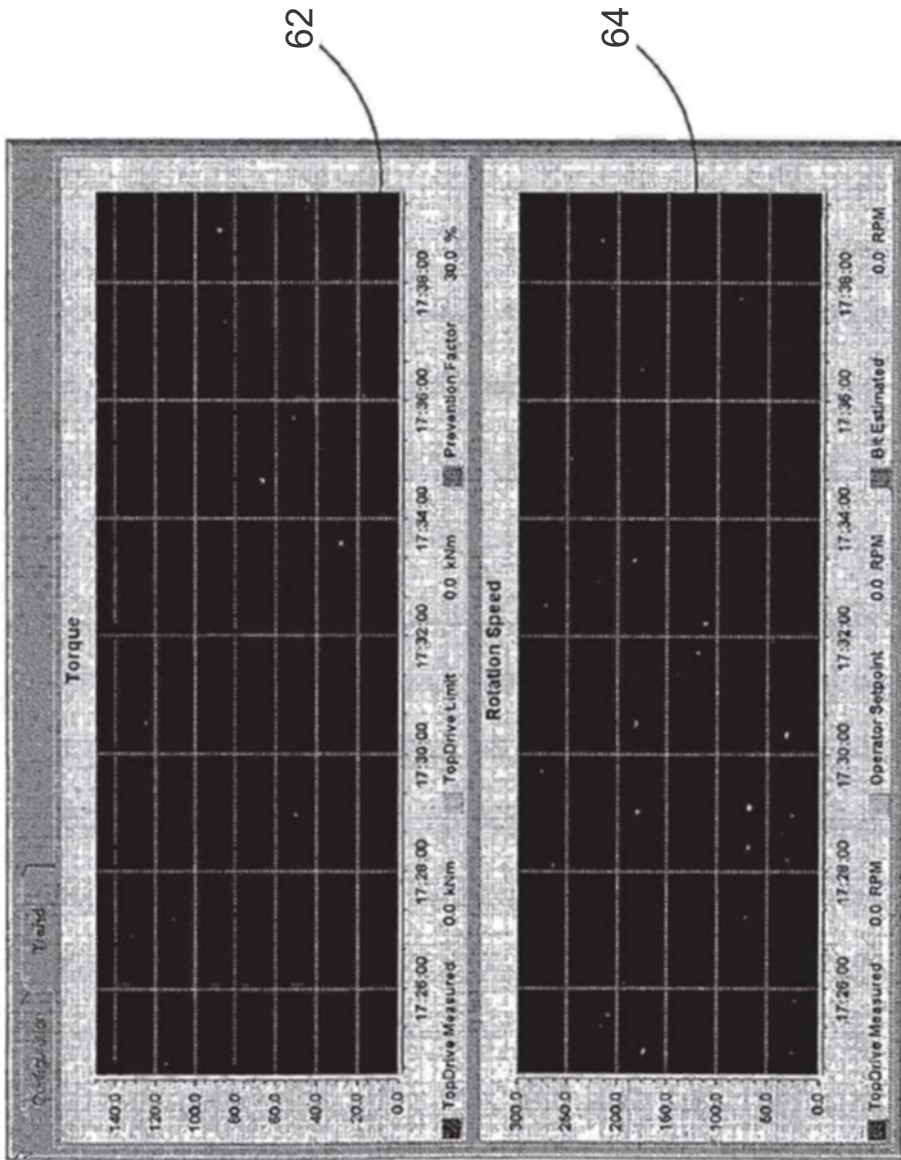


FIG. 4B

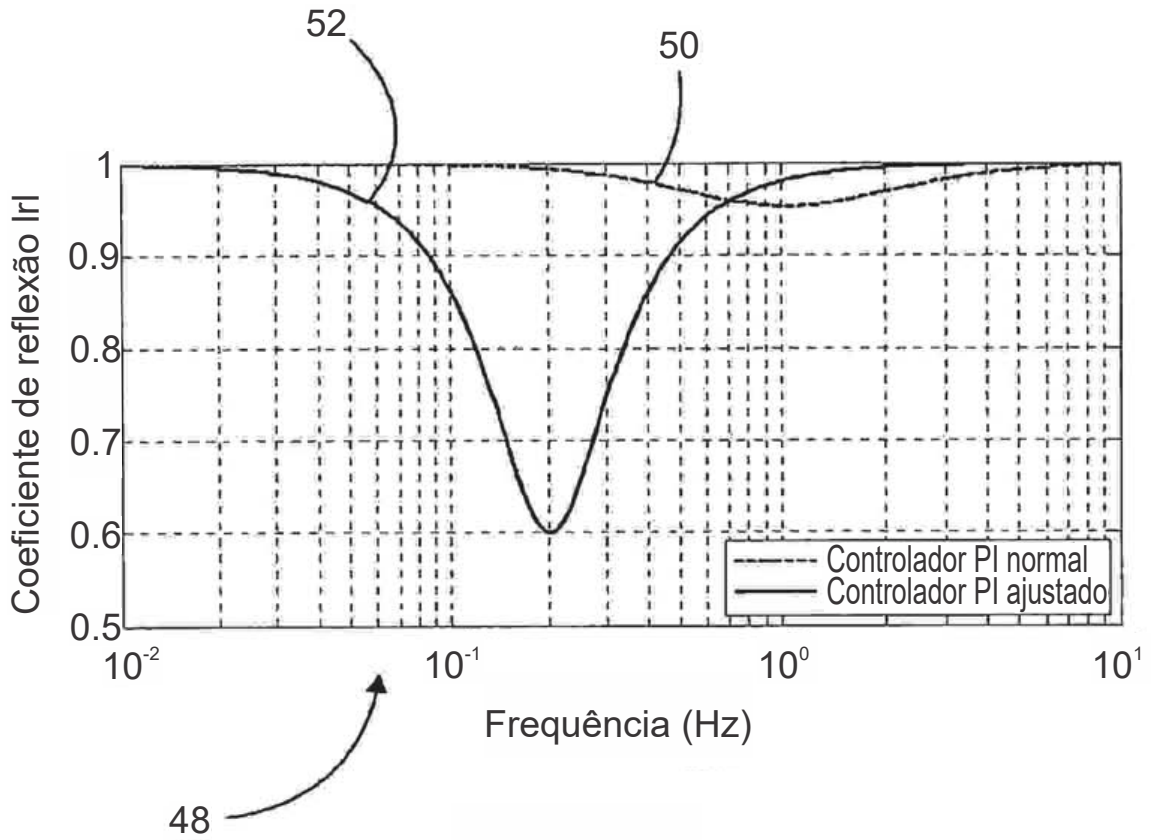


FIG. 3

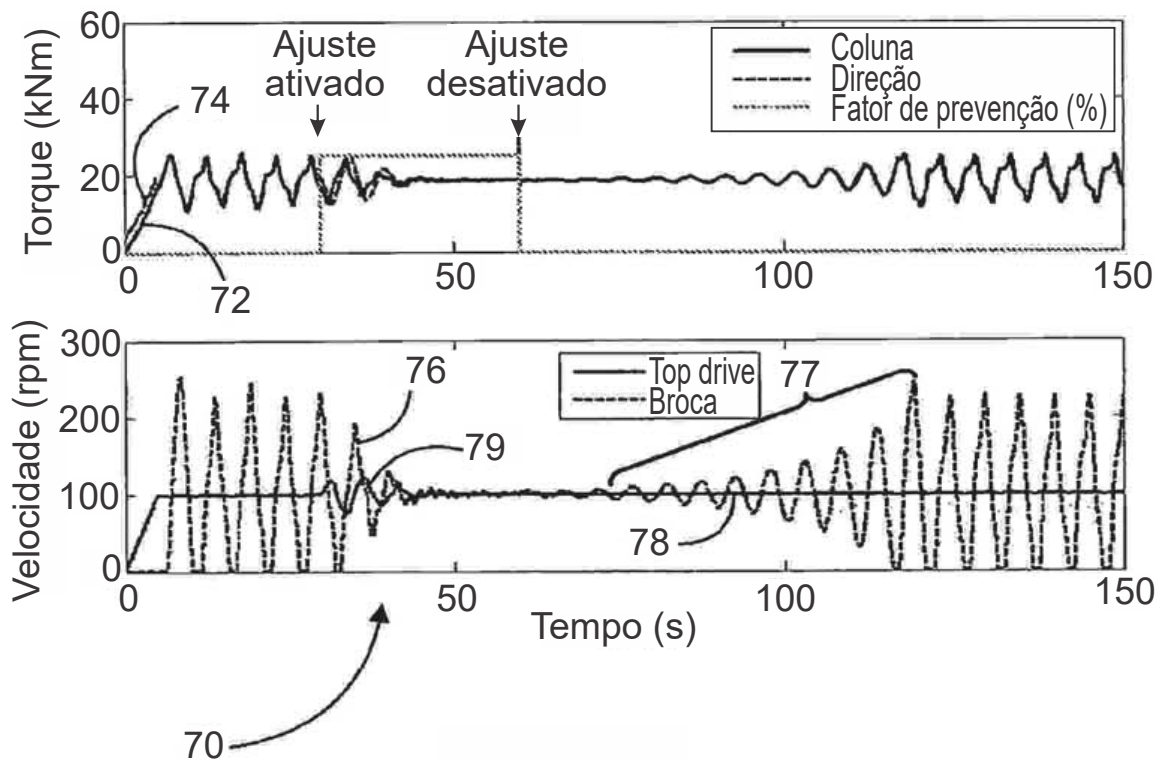


FIG. 5

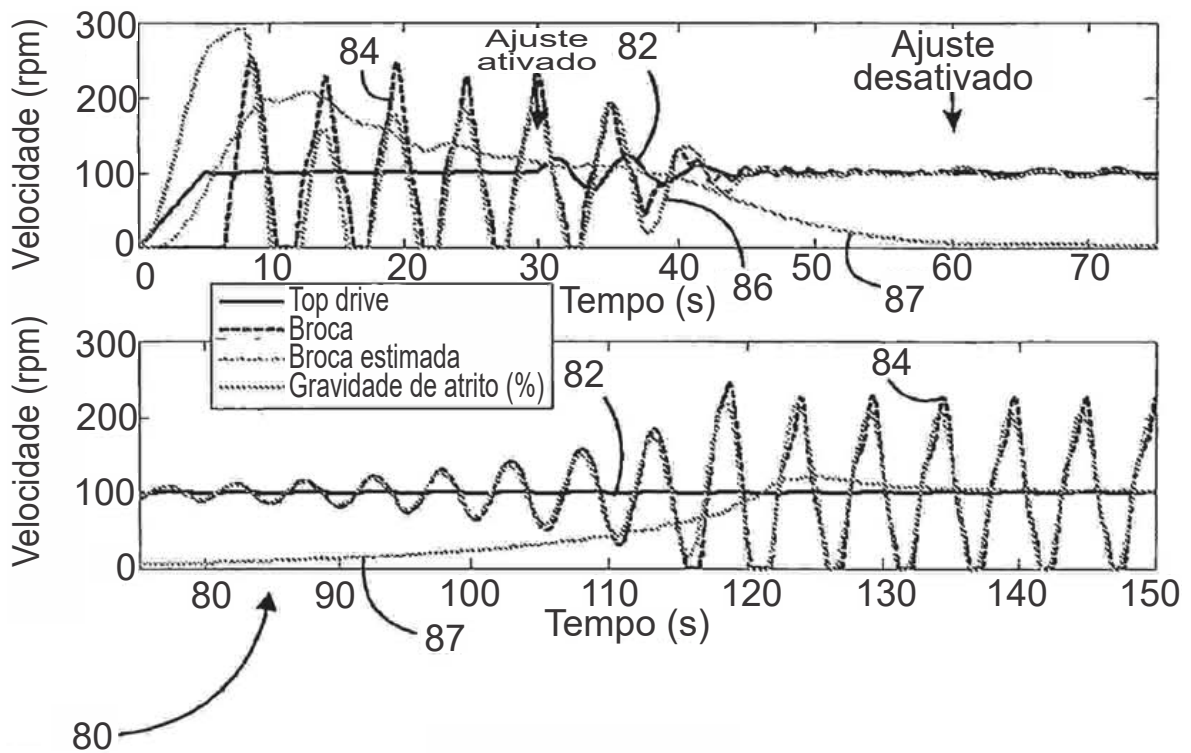


FIG. 6

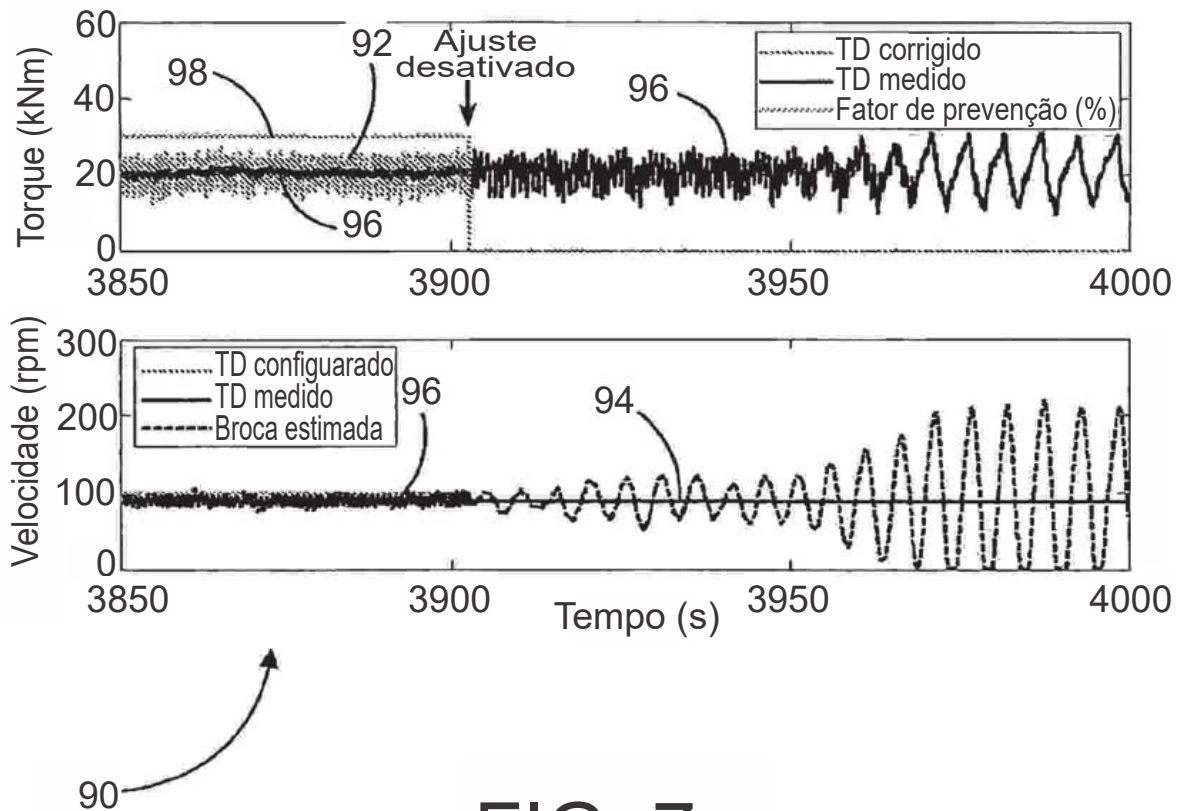


FIG. 7

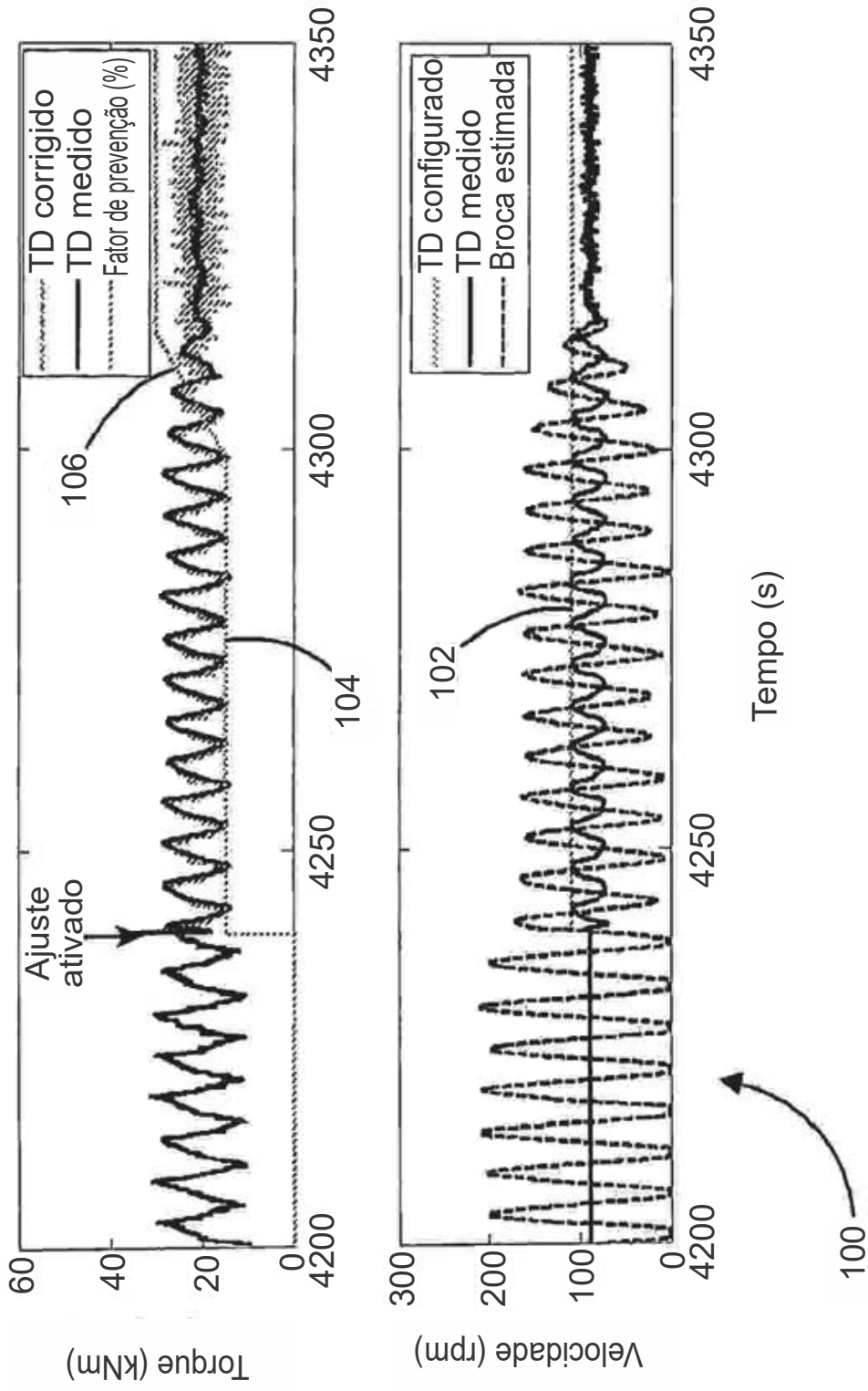


FIG. 8