



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

(11) PI 0918681-6 B1



(22) Data do Depósito: 23/12/2009

(45) Data de Concessão: 25/06/2019

(54) Título: SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE SINAL OU ENERGIA EM FUROS DE POÇO

(51) Int.Cl.: H01F 17/00.

(30) Prioridade Unionista: 02/01/2009 US 61/204,100; 02/02/2009 US 61/206,550.

(73) Titular(es): MARTIN SCIENTIFIC LLC.

(72) Inventor(es): MANFRED G. PRAMMER.

(86) Pedido PCT: PCT US2009069434 de 23/12/2009

(87) Publicação PCT: WO 2010/078197 de 08/07/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 01/07/2011

(57) Resumo: SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE SINAL OU ENERGIA EM FUROS DE POÇO A presente invenção provê um sistema de transmissão de energia e/ou dados e/ou energia de alta frequência adequada para furos de poço, incluindo acopladores de sinal/ energia, segmentos de linha de transmissão, e repetidores de sinal. Sinais e energia são transmitidos entre acopladores e/ou entre acopladores e repetidores através de um acoplamento de ressonância eletromagnética. Em_ pelo menos uma porção do sistema, os segmentos de linha de transmissão formam trajetórias de dados paralelas e os repetidores provêem uma capacidade de cruzamento entre as trajetórias de dado/ energia, daí melhorando significativamente a sua confiabilidade. A_ presente invenção também inclui método de transmissão de dados e/ou distribuição de energia de alta frequência, através de um sistema de transmissão de furo de poço incluindo múltiplas trajetórias de dado/ energia e múltiplos cruzamentos, onde um local de falha em uma trajetória de dados/ energia é desviado, roteando dados e/ou energia para uma trajetória de dado/ energia paralela, através de um acoplamento de ressonância eletromagnética.

"SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE SINAL OU ENERGIA EM FUROS DE POÇO"

Campo da Invenção

[001] A presente invenção se relaciona a sistemas de transmissão de dados, em particular a sistemas de transmissão de dados adequados para uso em furos de poço, tal como uma coluna de furação, usada na exploração de óleo e gás, ou colunas de completação ou revestimento. A presente invenção é especialmente útil para tomar dados ou medições a partir de furos de poço, durante a furação, assim como enviar comandos da superfície para o equipamento de furação no furo de poço, atuadores de furo de poço, ou outros instrumentos de furo de poço. Em adição, a presente invenção também se mostra útil para realizar medições e coleta de dados ao longo de um furo de poço, durante a sua furação.

Histórico da Invenção

[002] Na literatura há um número de livros que descreve processos relacionados à furação de poços de óleo e gás, tais como: "Petroleum Well Construction" de Economides, Watters e Dunn-Norman, John Wiley & Sons, West Sussex, UK 1998; "Applied Drilling Engineering" de Burgoyne, Jr., Chenevert Millhelm and Young Jr., SPE Textbooks Series Vol 2, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX 1991/ ou "Drilling Technology - In Non-Technical Language" de S.Devereux, Penn Well Corp, Tulsa, OK 1999. A presente invenção faz referência a estes livros para prover um entendimento mais completo dos processos de furação geral.

[003] A operação de furação adequada para implementar a presente invenção está mostrada na figura 1. A plataforma de furação 10 move uma coluna de furação 11 composta de um

número de seções interconectadas 30 - as chamadas juntas de tubo. A base da coluna de furação é composta de seções pesadas de tubo 13, os chamados anéis de furação. Em uma operação de furação típica, a plataforma gira a coluna de furação e, portanto, o conjunto de base (BHA) 14, que pode conter vários sistemas de instrumentação, possivelmente um motor de lama ou sistema esterçável rotativo, estabilizadores, centralizadores, anéis de furação, e pastilha de furação. A coluna de furação e todos componentes de furo de poço são vazados, permitindo bombear os fluidos da superfície para a pastilha e de volta à superfície pelo *annulus* externo entre a coluna de furação e a formação com propósito de limpeza e recirculação. A coluna de furação 11, ademais, pode conter seções adicionais de tubos pesados e/ou equipamentos especializados, tais como calcadores de furação (drilling jars).

[004] Os dois sistemas mais comuns são sistema de mesa rotativa e sistema motriz superior (top drive). O sistema de mesa rotativa (mostrado na figura 1) engata a coluna de furação através de uma bucha "Kelly" 16 e "Kelly" 17, que gira a coluna de furação 11, enquanto o "Kelly" 17 fica livre para subir e descer, à medida que o tubo sobe ou desce no furo de poço. À medida que o furo de poço se aprofunda, juntas de tubo 30 são adicionadas ao topo da coluna 11 através de conexões rotativas que provêem resistência mecânica e selagem hidráulica. Um sistema motriz superior não requer o "Kelly" 17, ao invés, todo o mecanismo se move, (sobe ou desce) com o sistema motriz superior da coluna de furação 11. Um sistema motriz superior facilita e acelera o processo de furação, mas, no entanto, é mais caro que o

sistema de mesa rotativa.

[005] A figura 2 mostra uma junta de tubo 30, comumente usada, compreendendo uma junta de ferramenta de caixa 31 no topo, uma seção tubular longa 32, e uma junta de ferramenta tipo "pino" 33 na base. Um comprimento padrão para uma junta de tubo é cerca de 31 pés (9,5 metros), mas são comuns variações de cerca de ± 1 pé. Ambos pino 33 e caixa 31 são equipados com roscas cônicas 34, que, quando unidas, formam uma conexão rotativa. Os dois propósitos primários da conexão são: transmissão de esforços mecânicos, tal como torque, tensão, compressão, entre as juntas 30 e prover uma selagem metal-metal a prova de líquido nos rebordos externos 35. A conexão é tipicamente formada com extensões (línguas) de tubo ou giradores (spinners), um processo que tensiona o pino 33, comprime a caixa 31, e sela os encostos de interface 35, também comprimidos. A carga de selagem por compressão excede as cargas de compressão que a selagem 35 experimenta durante curvamento/ flexão do tubo, para manter intacta a selagem metal-metal. As paredes internas da junta de tubo podem ser revestidas com um composto epóxi de alto desempenho. Este composto é um isolante dielétrico de alta qualidade, que inibe a corrosão do tubo metálico, e reduz as perdas por fricção no fluido. Exemplos comerciais de compostos de revestimento de tubo são TK-236 ou TK-34, providos pela Tuboscope, TX, Houston, E.U..

[006] Os pacotes de instrumentação de furo de poço contidos no BHA 14 coletam informações a respeito da furação, a respeito das formações que vão sendo transpostas, e a respeito dos fluidos contidos nestas formações. Na prática corrente, a maior parte destes dados

é armazenada em uma memória, que será oportunamente recuperada depois de a instrumentação retornar para a superfície. Uma quantidade comprimida e muito pequena de informação, no entanto, é enviada em tempo real à superfície, usando um dos sistemas de telemetria de pulso-lama disponíveis. Tais sistemas induzem pulsos de pressão na coluna de fluido de furação para levar um sinal de furação à superfície, a uma velocidade de cerca de 0,1-15 bits/seg. No entanto, a quantidade de informação disponível em tempo real, que circula através do sistema lama-pulso, é inadequada para operações mais complexas de furação, que requerem a geração e transmissão de uma grande quantidade de dados precisos em tempo real.

[007] Reservatórios comercialmente viáveis tendem a ser muito mais complexos que aqueles explorados no passado e as taxas de recuperação de óleo e gás devem ser constantemente aumentadas, para estender a vida útil dos reservatórios de hidrocarbonetos. Isto também significa que as trajetórias de furos de poço não podem ser pré-planejadas, com base em dados sísmicos ou dados de poços exploratórios. Ao invés, as trajetórias de poço vêm sendo, cada vez mais, determinadas e ajustadas com precisão (ajuste fino) durante o processo de furação. Com tal propósito, dados de avaliação da formação devem ser trazidos à superfície, estudados, e interpretados durante a furação. Os resultados da interpretação podem (ou não) requerer ajustes para as trajetórias, que são comunicadas ao local do equipamento. O equipamento da plataforma, por sua vez, comunica estes ajustes ao equipamento de poço. Um exemplo de dispositivo de imageamento que gera uma grande quantidade de dados, durante

a furação do poço, pode ser encontrado em "Field Testing an Advanced LWD Imaging Resistivity Tool" de Prammer *et al*, SPWLA 48^o Anual Logging Symposium, Austin, TX, 2007. Dado que o processo de furação é relativamente lento, os dados de formação podem ser comprimidos eletronicamente, sendo requerida uma velocidade de transmissão de cerca de 100-10.000 bits/seg (bps). Em adição, o canal de comando da superfície para a instrumentação de poço e sistema de furação requer de tempos em tempos, uma velocidade de transmissão de cerca de 10-1.000 bits/ segundo.

[008] A necessidade de transmitir dados a partir do local do poço confiavelmente já foi reconhecida há muito tempo. Para discussão de tentativas anteriores com respeito a este problema, faz-se referência a PCT/US 2009/00449949 de 22 de Maio de 2009, cujo conteúdo está incorporado nesta, em sua totalidade, por referência.

[009] A PCT/US 2009/00449949, de 22 de Maio de 2009, descreve um sistema de telemetria, com base em elementos acopladores e elementos transmissores colocados em revestimento epóxi fundido (FBE), frequentemente aplicado ao furo interno de um tubo de alto desempenho para proteção à corrosão. Estes elementos transmitem sinais de rádio-frequência, superando a folga entre as juntas de tubo, com base em um acoplamento capacitivo/ dielétrico. O mecanismo de acoplamento é dissipativo, requerendo que cada junta tenha um elemento repetidor de sinal ativo.

[010] Um sistema comercial conhecido como "IntelliPipe" ou "IntelliServ", que pode ser encontrado, por exemplo, na Patente U.S. No 6.670.800 de Hall *et al*, é o chamado sistema de "tubo cabeado" ("wired pipe") (WPS), porque

os sinais passam através de um cabo coaxial blindado, no diâmetro interno da coluna. Detalhes de Hall WPS poderão ser encontrados em "Very High Speed Drill String Communications Network" Report # 41229R14" de Junho de 2005 de D.S.Pixton Doe, Concesssão DOE N° DE-FC26-01NT41229, em www.doe.gov, website do Departamento de Energia U.S..

[011] Como discutido acima, uma coluna de furação é constituída de uma multiplicidade de segmentos de junta de tubo, cada um deles, tipicamente, tendo um comprimento de cerca de 30 a 32 pés, que são acoplados por meio de conexões rotativas. Hall WPS vantajosamente, faz uso de conexões especiais de alto desempenho, chamadas juntas de tubo rotativas de "duplo-rebordo". As juntas de duplo-rebordo são usinadas de acordo com dimensões exatas, de modo que as juntas ferramenta acopladas não apenas engatam o rebordo selador externo, mas também um rebordo interno, formado na face plana do pino 33 e parede posterior plana da caixa 31. Hall WPS usa estas superfícies de contato secundárias para alojar acopladores magnéticos de ferrita (anulares) que transmitem sinais eletromagnéticos, a partir de um segmento do cabo coaxial blindado, que está contido em uma primeira junta de tubo, para o segmento de cabo na junta de tubo vizinha. Quando as juntas rotativas WPS são formadas, pares de elementos acopladores incorporados formam circuitos fechados de alta permeabilidade magnética, i.e. transformadores de núcleo de ferrita. O sinal transmitido vai se atenuando à medida que o mesmo passa pela coluna de furação, através de uma multiplicidade de segmentos de cabo e transformadores, e precisa ser periodicamente recondicionado e trazido de volta para plena potência. Estas tarefas são

executadas por subs repetidores, que são enterrados na coluna de furação em intervalos regulares - 1000 pés a 2000 pés.

[012] Os transformadores Hall WPS usam um material de núcleo de ferrita quebradiça. Os meio-núcleos de ferrita se estendem da face do pino de junta e da parede posterior da caixa de junta. Durante operação de montagem (make-up), se espera que os meio-núcleos de ferrita, voltados uns para os outros, girem entre si, pressionando as respectivas face do pino e a parede posterior. Uma vez que os meio-núcleos de ferrita precisam se mover respectivamente para dentro e para fora da face do pino e parede posterior da caixa, se torna impossível selar hermeticamente os acopladores do ambiente. A intensa pressão de até 30.000 psi (aproximadamente 200 MPa) força o fluido de furação, que se encontra atrás e nos acopladores. O fluido de furação conduz e contém particulados sólidos, tal como areia, barita, particulados metálicos, e carepas de furação de qualquer tamanho atrás dos núcleos de ferrita, que bloqueia e inibe a retração do núcleo de ferrita. Com o núcleo de ferrita bloqueado na posição estendida, o mesmo será destruído pela força de compressão total exercida durante o processo de montagem. No entanto, espera-se que os tubos de furação comerciais suportem centenas a milhares de ciclos de montagem/ desmontagem (make-up/ break-out) (sob condições severas), um número que não será alcançável, se o tubo contiver componentes frágeis expostos, que sofrem uma ação abrasiva repetitiva, como aquela experimentada por transformadores de ferrita Hall.

[013] Ademais, o tubo de furação é comumente exposto a choques mecânicos durante o processo de furação normal.

Por exemplo, quando descem, as juntas de tubo individuais deslizam em uma rampa inclinada do piso da plataforma e/ou conexão rotativa. Quaisquer destes impactos, que os tubos comuns devem suportar, podem provocar um dano exposto ou oculto aos acopladores Hall, que são expostos à face do pino. Um acoplador Hall, embora aparentemente ainda funcional durante verificação nas condições atmosféricas na superfície, é provável que venha a se romper sob a ação combinada de alta temperatura, alta pressão, e ao contato de fluidos agressivos, que são encontrados nos furos de poço. Ademais, uma vez que os transformadores Hall se constituem partes móveis e, por conseguinte, não hermeticamente seláveis, as conexões elétricas e O'rings internos são submetidos à ação corrosiva dos fluidos, que promove a degradação elétrica e mecânica das mesmas, até seu rompimento completo, simplesmente pela acumulação de horas de furação.

[014] Uma meta da presente invenção consiste de um sistema de transmissão de dados que use acopladores não-móveis de sinal, hermeticamente selados, compatíveis com as condições severas de operação, na superfície ou subsolo.

[015] O problema de confiabilidade WPS tem sido amplamente reconhecido (ver, por exemplo, A Patente U.S. N° 2004/0217880A1 de Clark *et al*), onde se calcula que para WPS de 1000 pés de comprimento apresentar um tempo médio desejável entre falhas (MTBF de Mean Time Between Fail) de cerca de 500 horas, cada um dos componentes de tubo de furação deve apresentar um MTBF de cerca de 250.000 horas (28,5 anos), um valor não-realístico para a maior parte dos sistemas eletromecânicos de sistemas de furo de poço autônomos contendo partes móveis, como acopladores Hall.

Clark *et al* descrevem um sistema de encontrar a resolução de problemas (troubleshooting) de WPSs defeituosos. No entanto, o fato de tais sistemas falharem amiúde, e requererem intervenções frequentes e trabalhosas, os tornam inadequados para as condições severas e prementes particulares da furação de poços.

[016] Um objetivo da presente invenção consiste de um sistema de transmissão de dados de tubo cabeado, que propicie alta confiabilidade ao longo de sua vida útil, e obtida a partir de componentes individuais com valores de confiabilidade típicos de componentes elétricos, que operam sob condições severas da furação de poços.

[017] Outro objetivo da presente invenção consiste de um sistema de transmissão de dados que, vindo a falhar, falhe gradualmente, permitindo o prosseguimento da furação, enquanto a falha é detectada, diagnosticada, e informada ao operador, que lhe proporcione a oportunidade de substituir o segmento incluindo o elemento defeituoso, em um momento apropriado, quando a coluna precisa ser removida do furo, por exemplo, quando da substituição da pastilha ou de uma mudança no diâmetro de furo.

[018] Sistemas de tubos cabeados existentes se baseiam em subs repetidores, que periodicamente recuperam o sinal transmitido. Estes subs (10-20 per coluna de furação), no entanto, são complexos, e demandam um aporte financeiro apreciável, requerendo um grande número de células de Lítio primárias "D", como fonte de energia. Estas grandes baterias de Lítio são caras, e trazem um risco apreciável de incêndio durante as fases de transporte, operação, instalação. Outro objetivo da presente invenção consiste da substituição destes

repetidores (caros e perigosos) por elementos menores, mais baratos, e mais seguros com respeito à operação, armazenamento, e transporte.

Sumário da Invenção

[019] Os objetivos e vantagens, acima mencionados, serão providos com um sistema de transmissão de dados/energia de furos de poço, incluindo acopladores de sinal/energia, segmentos de linha de transmissão, e repetidores. Sinais e energia são trocados entre acopladores, ou entre acopladores e repetidores, por ressonância magnética EMR (de Eletromagnetic Resonance). Em pelo menos uma porção do sistema, os segmentos de linha de transmissão formam trajetórias paralelas de dados, e os repetidores provêem capacidade de crossover (crossover) entre as trajetórias de dados. Em razão de EMR e da provisão de elementos de transmissão redundantes, os elementos de transmissão defeituosos são automaticamente isolados da porção operante do sistema de transmissão, que continua operando mesmo na presença de uma ou múltiplas falhas. A presente invenção também inclui métodos para transmitir dados e/ou energia através de um sistema de transmissão de furo de poço, compreendendo múltiplas trajetórias de dados e múltiplas transposições por meio de EMR. As localizações das falhas nas trajetórias de dado/ energia serão desviadas (baipassadas) por uma trajetória paralela através de circuitos de crossover. As características deste sistema serão aparentes na descrição detalhada a seguir.

Descrição Resumida dos Desenhos

[020] A figura 1 traz uma representação esquemática de um ambiente de furação convencional, mostrando vários

componentes de furo de poço;

[021] A figura 2 traz uma vista em perspectiva de uma junta de tubo convencional com conexões rotativas;

[022] A figura 3 traz um desenho conceitual de uma junta de tubo de furação, de acordo com a presente invenção, seccionada paralelamente ao eixo geométrico principal, e incluindo elementos do sistema de transmissão de dados instalado;

[023] A figura 4 traz um desenho conceitual de uma junta curta, de acordo com a presente invenção, seccionada paralelamente ao eixo geométrico principal, e incluindo elementos do sistema de transmissão de dados instalado;

[024] A figura 5 é uma vista em seção transversal da junta de tubo, mostrada na figura 3 ao longo do plano A-A';

[025] A figura 6 traz uma vista denominada "B" nas figuras 3 e 4, mostrando a extremidade do pino;

[026] A figura 7 traz uma vista denominada "C" nas figuras 3 e 4, mostrando a extremidade de caixa repetidora;

[027] A figura 8 traz uma vista denominada "C" nas figuras 3 e 4, com a caixa repetidora removida, e mostrando a parede posterior da caixa;

[028] A figura 9 traz uma vista de seção transversal conceitual planificadas, mostrando a construção do acoplador EMR;

[029] A figura 10 traz uma vista de seção transversal conceitual de uma cadeia de acopladores EMR, que são incorporados ao pino nas caixas repetidoras, e na parede posterior da caixa;

[030] A figura 11 traz o resultado de modelação numérica de dois acopladores EMR acoplados;

[031] A figura 12 traz uma ilustração das várias trajetórias de sinal formadas por duas juntas de tubo unidas, contendo uma caixa repetidora ativa e caixa repetidora passiva;

[032] A figura 13 traz um diagrama de blocos de circuito conceitual dos vários blocos funcionais, em uma caixa repetidora ativa;

[033] A figura 14 traz uma vista em perspectiva da caixa repetidora;

[034] A figura 15 traz um diagrama de blocos conceitual de uma opção de caixa repetidora, incluindo sensores e circuitagem de processamento de sensor;

[035] A figura 16 traz um diagrama de blocos conceitual de circuito de uma porção de caixa repetidora ativa, incluindo um dispositivo de coleta e circuitagem de processamento de energia;

[036] A figura 17 traz um diagrama de blocos conceitual de circuito de uma porção de uma caixa repetidora ativa incluindo uma fonte recarregável e circuitagem de coleta de energia de rádio-frequência;

[037] A figura 18 traz uma vista conceitual de uma coluna de furação contendo vários elementos do sistema de transmissão de dados;

[038] A figura 19 traz um diagrama conceitual de blocos de circuito de sub de comunicação de superfície;

[039] A figura 20 é um diagrama de blocos conceitual de um sub de interface de superfície;

[040] A figura 21 traz um dispositivo de vídeo analisador de espectro, mostrando o espectro de transmissão medida de uma cadeia de 6 acopladores EMR; e

[041] A figura 22 traz uma vista de seção transversal conceitual através do acoplador rotativo.

Descrição Detalhada das Configurações Detalhadas

[042] Na configuração exemplar da invenção, sinais, dados, e/ou energia são transportados de modo redundante através de duas linhas paralelas em cada junta de tubo. Preferivelmente, as linhas de transmissão se encontram tão distantes quanto possível uma da outra, de modo que um evento que destrua uma linha de transmissão não danifique a linha vizinha. A figura 3 traz um desenho conceitual de uma única junta de tubo 30, seccionada paralelamente a seu eixo longitudinal, incluindo duas linhas de transmissão 40, caixa repetidora 50, e dois acopladores de ressonância eletromagnética 61 e 62. A caixa 31 da junta de tubo 30 é furada na parte posterior em cerca de duas polegadas (51 mm) para acomodar a caixa repetidora 50, que aloja acopladores EMR 63 e 64. Ademais, provê-se um número de cavidades tipicamente cilíndricas 51, dentro da caixa repetidora 50, seladas para fora, que podem alojar circuitos eletrônicos e baterias. Cavidades adjacentes 52 podem ser unidas para simplificar conexões elétricas ou acomodar componentes elétricos de formas mais complexas. O acoplador EMR 63 interfaceia o acoplador EMR montado na caixa 61. O acoplador de caixa 61 é eletricamente conectado, via linha de transmissão 40, ao acoplador EMR de pino. Quando da conexão, o pino 33 da junta de tubo adjacente engata a caixa repetidora 50 através dos rebordos 35, de modo que o acoplador EMR de pino da junta de tubo interfaceie o acoplador EMR 63. Assim, o tubo de furação montado contém uma cadeia contínua de linhas de transmissão 40, que se estende

ao longo da seção tubular 32, acopladores EMR 61 e 63, e caixa repetidoras 50 com acopladores EMR 62 e 64. A cadeia é capaz de transmitir dados de telemetria de alta velocidade em ambas direções, via sinais portadores de rádio-frequência, modulados com dados de alta velocidade, e também capaz de transmitir energia de alta-frequência, para energizar repetidores, componentes eletrônicos, sensores, e recarregar baterias recarregáveis nos repetidores e/ou sensores.

[043] O processo de furação posterior de uma caixa de junta de ferramenta está especificado em "Specification for Rotary Drill for Steam Elements" - Especificação API 7^a, 40^a Edição, Novembro de 2001, Figura 16 e Tabela 16, pps 24 e 25, American Institute Petroleum, API, Publishing Series, Washington, DC. O processo de furar juntas de ferramenta e passar um cabo coaxial através de uma junta de ferramenta, e processo de passar um cabo coaxial através de um tubo se encontra em detalhes em "Very High Speed Drill String Communication Network", Report #4122R14 de Junho de 2005, de D.S.Pixton, cujo conteúdo está incorporado nesta, por referência, em sua totalidade.

[044] A maior parte das caixas repetidoras 50 consiste de um dispositivo passivo sem fontes de energia, que transfere sinal/ energia instantaneamente em ambas direções por um acoplador EMR, por RF (rádio-frequência) e linhas de transmissão interna.

[045] Tipicamente, uma de três caixas repetidoras 50 contém um sistema elétrico ativa, que recebe sinais de telemetria, armazena e verifica as informações, e então retransmite as informações moduladas via um sinal portador RF. Estes repetidores ativos também são sintonizados à

frequência operativa, e operam com ressonância eletromagnética. Cada repetidor ativo contém sua fonte de energia, que pode ser uma célula primária ou bateria, bateria recarregável, circuitagem coletora de energia, ou uma combinação destes. Preferivelmente, os repetidores ativos são mais ou menos espaçados ao longo da coluna com uma separação de cerca de 93 pés (cerca de 28 metros), que corresponde a três juntas de tubo. Em operação normal, os repetidores ativos se comunicam com os repetidores vizinhos a uma distância de 28 metros através de cadeia intermediária de linhas de transmissão e repetidores passivos. No entanto, repetidores ativos também podem receber sinais de transmissores distantes, i.e. a uma distância de 56 e/ou 85 metros, um aspecto que permite transpor repetidores ativos não-funcionais.

[046] A figura 4 mostra uma junta curta 39, que consiste de uma junta ferramenta tipo caixa 31 e 32, soldada em um tubo intermediário. A caixa é furada na parte posterior e aloja uma caixa repetidora 50. As linhas de transmissão 40, que conectam acopladores EMR 61 e 62, ficam contidas nos canais de roteamento 41. O propósito da junta curta é a introdução de um repetidor em um local desejado na linha de transmissão, sem requerer a extensão completa de uma junta de tubo. Como será visto, as caixas repetidoras 50 podem implementar funções de sensoriamento, em adição às funções de telemetria.

[047] A necessidade de introduzir tais repetidores ativos também pode surgir, quando elementos de tubo de furação, conforme Hall WPS, forem introduzidos neste sistema. Tais elementos Hall, neste sistema de transmissão, rompem o

efeito EMR, e atenuam significativamente o sinal. Esta atenuação é compensada pela instalação de repetidores ativos acima e/ou abaixo de elemento (ou elementos) tipo Hall.

[048] A figura 5 traz uma vista em seção transversal do tubo 32 e linhas de transmissão 40 ao longo do plano A-A'. As linhas de transmissão são implementadas como cabos axiais flexíveis blindados com aço 42. Preferivelmente, os cabos 42 devem ser do tipo perda baixa, adequada para operar acima de 3 GHz. Cabos com diâmetros em torno de 0,250 pol (6,4 mm) com condutores sólidos ou entrelaçados com diâmetro de cerca de 1 mm, e dielétrico de politetrafluoroetileno (PTFE) sólido são adequados. Os cabos 42 são terminados em cada extremidade por conectores de rádio-frequência de alta temperatura miniatura, tais como conectores SMB ou MCX modificados (não mostrados), que são modificados para permitir a formação de rebordos. Estes conectores são modificados para incluir a formação de rebordos cônicos blindados, que são soldados à conexão blindada externa do cabo. Os conectores se ajustam aos correspondentes furos de montagem nas juntas de ferramenta, onde rebordos internos acoplam os rebordos cônicos, e, assim, aplicam uma pré-carga à blindagem de cabo coaxial. A faixa de impedância característica preferida do cabo coaxial 42 é cerca de 25-100 ohm. A valor de impedância característica preferida do cabo coaxial 42 é cerca de 50 ohm.

[049] Como mostrado na figura 6 (vista "B" nas figuras 3 e 4), a face dos pinos 33 se aloja no acoplador EMR 62, que compreende uma ranhura circular 70 de cerca de 4 a 5 mm de profundidade. As paredes da ranhura 70 são revestidas com camadas eletricamente altamente condutivos 73, tais como um

filme de cobre aplicado por spray a plasma. A espessura de camada deve ser pelo menos três vezes a profundidade da "pele elétrica" (electrical skin) na frequência de ressonância. Nas faixas de frequência de interesse (VHF), uma espessura de camada condutiva de cerca de 0,001" (24,5 µm) é tipicamente suficiente. Na ranhura 71, a uma profundidade de aproximadamente 2 mm abaixo da superfície, é disposta uma antena circular 71, que é implementada usando uma tecnologia de micro-fita de alta-frequência, que consiste de múltiplos segmentos de fio 173, com aproximadamente o mesmo comprimento, e blocos de capacitor 74 e 78. Os segmentos de fio 173 consistem de trilhas de prata sobre cobre eletricamente altamente condutivas, com largura de cerca de 1 a 2 mm e espessura de cerca de 0,001" (24,5 µm), impressas em um laminado multicamada 170, com espessura de cerca de 2-3 mm. Os blocos de capacitor 74 e 78 são dispositivos dispostos superficialmente (SMD de Surface-Mount Devices)) incorporados no laminado. A antena circular 71 é conectada a dois conectores RF de alta temperatura 174 (não mostrados na figura 6), dispostos abaixo da ranhura 70 próximos aos blocos de capacitor 74, quais blocos de capacitor são acoplados a outro conjunto de conectores afixados a cabos coaxiais 40 (também ocultos na vista na figura 6). O conjunto inteiro é encapsulado em um material de encapsulamento de alta temperatura. A ranhura 70 deve ser totalmente preenchida com este material de encapsulamento condutivo dielétrico, que deve ser aplicado preferivelmente sob vácuo ou a uma pressão extremamente baixa.

[050] A antena 71 é dividida em segmentos com um cabo per segmento. Nesta configuração, os segmentos podem quer

(a) ressonar juntos em coerência com o fato de serem fortemente acoplados a outros segmentos no acoplador vizinho, e fortemente acoplados entre si, ou (b) experimentar um fechamento parcial, onde um segmento sai de ressonância e, por conseguinte, de linha, e o segmento remanescente ressona, como se ainda estivesse acoplado a múltiplos segmentos em um acoplador próximo.

[051] A figura 7 traz uma vista superior da caixa repetidora, (vista "C" nas figuras 3 e 4). A caixa repetidora 50 contém sua face externa acoplador EMR 64. O acoplador EMR 64 é similar ao acoplador EMR 62, consistindo de ranhura 70 com antena 71. Eletricamente, a antena 71 é conectada à parte interna da caixa repetidora 50, via canais 172 (não mostrados na figura 7) localizados sob a ranhura 70, próximo dos blocos de capacitor 74.

[052] Como mencionado acima, localizadas dentro da caixa repetidora 50 e seladas da parte externa, se localizam numerosas cavidades cilíndricas 52, que podem alojar circuitos eletrônicos e baterias. No entanto, a maior parte das caixas repetidoras é um dispositivo passivo com fiação entre acopladores EMR 64 (montado na face voltada para fora da caixa repetidora) e 63 (montado na face voltada para dentro da caixa repetidora; não mostrada na figura 7). Um canal de fiação sob acoplador EMR (também não mostrado na figura 7) conecta as cavidades 52, para conduzir sinais de energia. O acoplador EMR 63 localizado na face oposta da caixa repetidora 50 (não mostrado na figura 7) é construído do mesmo modo que o acoplador EMR 64.

[053] A figura 8 mostra o acoplador EMR 61 localizado na parede posterior da caixa 31. Este acoplador EMR 61 é

construído de modo similar ao acoplador EMR tipo pino 62.

[054] Também é possível instalar o presente sistema de transmissão de dados nas juntas de tubo sem usar caixas repetidoras passivas, porque todos acopladores EMR 61, 61, 63, 64 são compatíveis. Por exemplo, é possível interfacear diretamente o acoplador EMR tipo pino 62 com o acoplador EMR tipo caixa 61. Nestas juntas de tubo, a caixa 31 não é furada na parte posterior e mantém suas dimensões originais de duplo rebordo. Uma vantagem desta opção sem repetidor é aumentar a intensidade de sinal através de uma série de juntas de tubo, que, por sua vez, permite maiores distâncias entre repetidores ativos. A principal desvantagem de usar menos ou nenhum repetidor passivo é o requisito logístico adicional de manter e seguir separados as juntas de tubo furadas e não-furadas na parte posterior.

[055] A figura 9 mostra a construção de acopladores EMR 61, 62, 63, 64. A figura 9 é uma vista de seção transversal planejada conceitual através de um acoplador EMR se estendendo de um ângulo de 360°. A ranhura 70, com cerca de 4-5 mm de profundidade, aloja uma pilha de laminado dielétrico 170 com cerca de 2-3 mm de altura.

[056] O dielétrico 170 preferivelmente é fabricado a partir de um laminado PTFE reforçado de fibra de vidro ou cerâmica dielétrica. Tais produtos de laminado são providos pela Arlon, Microwave Materials Division, Rancho Cucamonga, CA 91730. Todas trilhas, preferivelmente, são feitas de cobre, com espessura mínima de pelo menos 0,001" (25,4 µm), e tendo a superfície acabada por imersão em prata. A antena 71 é uma trilha de 1-2 mm de largura localizada na face superior, enquanto o plano terra 172 é localizado na face

interna do dielétrico 170. O dielétrico 170 também aloja conectores RF curtos 174 e vários capacitores montados na superfície 78 e 79. Capacitores cerâmicos adequados de alta temperatura e altamente estáveis e montados na superfície, baseados em materiais dielétrico tipo COG são providos pela NOVACAP Valencia CA 91355. Os conectores RF 174 são conectados a outros conectores RF 176 de gênero oposto, que terminam os cabos coaxiais 40. Os conectores RF cônicos 172 são assentados em recessos cônicos 175. Este arranjo exerce uma tensão pré-carga sobre os cabos coaxiais 40, que mantém os cabos tensos na condição de operação. Conectores RF subminiatura de alta-temperatura adequados, tais como conectores SMB, ou MCX, são providos pela Amphenol, Danbury, CT, 06810. Todas conexões elétricas recebem solda elétrica ou estanho, usando soldador de alta condutividade de alta temperatura sem chumbo.

[057] O propósito dos capacitores 78 é igualar o comprimento elétrico das antenas 71 ao comprimento da ranhura 70. O comprimento da ranhura 70 é determinado pela circunferência do rebordo de conexão do acoplador EMR ao qual está incorporado. Se o comprimento físico da ranhura 70 for igual ao comprimento elétrico da antena 71 (ou múltiplo), um padrão de onda estacionárias, é emitido pela antena 71 em frequências específicas, armazenando uma quantidade relativamente grande de energia eletromagnética. Este armazenamento da energia eletromagnética na mídia dielétrica não-magnética, tal como ar, ou, como nesta, um material dielétrico, é a base do acoplamento por ressonância eletromagnética. Se duas ranhuras 70 forem ligadas para formar uma cavidade fechada ou semifechada, esta cavidade

é preenchida com energia eletromagnética de alta-frequência, sendo que uma porção da mesma é acoplada em qualquer circuito ressonante sintonizado na cavidade. A forma de onda estacionária se caracteriza pelas cristas de voltagens nos blocos de voltagem 74 e descontinuidades de energia nos capacitores série 78. Nos pontos das cristas de voltagem, a energia pode ser capacitivamente acoplada dentro e fora do sistema ressonante. A corrente respeita uma relação de continuidade, que flui continuamente em torno do loop formado pela antena 71, sendo que a corrente oposta flui na direção oposta no plano de terra 172. Escolhendo o número e valores de descontinuidades de voltagem por meio de capacitores de sintonização 78, é possível arranjar o padrão de onda estacionária, na forma de múltiplo inteiro do comprimento de onda que se ajusta no comprimento físico da ranhura 70. Em ressonância, a antena 71 recebe e regenera todos sinais que são supridos à cavidade por meio de conectores 174 e 176, quer a partir da mesma junta de tubo ou de uma adjacente.

[058] Os capacitores 79 acoplam uma porção da energia armazenada na cavidade e antenas 71 dentro e fora das linhas de transmissão 40. O valor dos capacitores 79, portanto, é função da frequência de operação e impedância característica das linhas de transmissão.

[059] Uma blindagem Faraday 77 opcional pode ser instalada a cerca de 1 mm acima da antena 71, fazendo a blindagem flutuar no material encapsulante 76. O propósito da blindagem Faraday 77 é introduzir um valor zero para um vetor de campo-E próximo à superfície do acoplador EMR. A blindagem 77 consiste de fios radialmente orientados - mostrados em seção transversal (i.e. como pontos, na figura

9) que transversam as antenas em 90° e se conectam ao tubo no diâmetro interno da ranhura 70. No diâmetro externo, os fios de blindagem ficam desconectados, para inibir loops de corrente Eddy.

[060] Como os rebordos internos de conexões rotativas de duplo-rebordo não são selantes, pode haver um espaço entre acopladores EMR próximos, que admita um fluido de furação no espaço entre acopladores EMR. Este fluido de furação é substancialmente não-magnéticos, i.e. a ranhura não-magnética 70 já está ajustada ao fluido de furação, mas o fluido de furação pode ser eletricamente condutivo (ou não). No primeiro caso, os fluidos se encontram essencialmente no potencial terra. A blindagem Faraday 77 melhora ainda mais as já boas características de acoplamento dos acopladores EMR, forçando uma condição limite no campo magnético, que iguala ambos fluidos -eletricamente isolante e eletricamente condutivo.

[061] As características eletromagnéticas de um par de acopladores EMR em conexão com fluidos de furação condutivos ou não-condutivos são opostas àquelas dos acopladores Hall WPS. Os acopladores Hall empregam materiais de núcleo magneticamente condutivos e eletricamente isolantes (MCEI de Magnetically Conductive Electrically Insulating), i.e. materiais magnéticos, tais como ferritas, que particularmente mostram uma correspondência ruim com respeito aos fluidos de furação substancialmente não-magnéticos, são forçados pela pressão de fluido para uma folga entre os acopladores. Durante operação de campo, estas pequenas folgas são particularmente inevitáveis, uma vez não é prático manter perfeitamente limpas as superfícies de acoplamento dos

fluidos e sólidos, que compõem as lamelas comerciais. A não-correspondência significativa de impedância rompe o campo eletromagnético, que reflete no resto do circuito como uma reatância variável e incontrollável. Por exemplo, assumindo um material de ferrita com permeabilidade magnética relativa de 100, uma folga não-magnética de apenas 0,5 mm simula um comprimento de trajetória magnética adicional de 50 mm. Isto é aproximadamente o dobro do comprimento da trajetória magnética não espaçada e mudança de indutância L de um fator de cerca de 2. Esta instabilidade é tolerável, desde que a indutância variável L não faça parte de um circuito ressonante L-C, cuja frequência de ressonância varia com o inverso da raiz quadrada da indutância variável. Assim, a frequência de ressonância seria muito sensível à temperatura, pressão, tamanho, e forma da folga formada entre acopladores MCEI, e randomicamente diferente entre acopladores arranjados em série. Em consequência, a impedância presente nos cabos ligados mudaria dramaticamente em função de parâmetros ambientais, e em torno da(s) frequência(s) de ressonância, resultando em reflexões de sinal randômicas e interferência de forma de onda destrutiva e aditiva randômica. Em contraste, prover uma folga em um par de acopladores EMR não-magnéticos não exerce nenhum efeito material sobre a frequência de ressonância de cada antena. A construção relativamente simples hermeticamente selada de estado sólido de cada acoplador EMR garante que a frequência de ressonância seja controlada de projeto, e uniforme em todos acopladores EMR.

[062] O sistema elétrico EMR inteira consistindo da pilha de laminado 170, componentes 71, 78, 79, e conectores 174 e

176, é encapsulada em um polímero de alto desempenho 76 adequado para uso em poços, tal como STYCAST, um epóxi da Emerson & Cumming, Billerica, MA, i.e. poli(eteretereteretona) (PEEK). Um fornecedor de PEEK é a Greene Tweed & Co Inc, TX 77032. Como o acoplamento EMR é mais efetivo em altas frequências, o material de encapsulamento deve apresentar alta qualidade de dielétrico com baixas perdas dielétricas na faixa de frequência HF a UHF. O acoplamento ressonante, em geral, trabalha melhor em uma mídia não-magnética, eletricamente isolante, tal como ar, cerâmicas, epóxi, ou plásticos de alto desempenho. O material de encapsulamento deve se aproximar desta condição, usando um material dielétrico não-magnético com uma constante dielétrica relativa preferivelmente entre 1 a 5 e permeabilidade magnética relativa próxima a UM. No entanto, não são permissíveis materiais magnéticos, tais como aqueles essenciais para a operação de Hall WPS e apresentando permeabilidades magnéticas relativas entre cerca de 10 a diversos milhares. Em frequências abaixo de HF a UHF, i.e. nas frequências de operação Hall WPS, as perdas de condução do Cobre suprimem o efeito EMR. Na faixa de frequência HF a UHF preferida, e, particularmente, em frequências acima de 10 MHz, a presença de material magnético introduz uma perda por histerese elevada, que pode, de novo, suprimir o efeito EMR. Assim, o material não-magnético no acoplador eletromagnético permitiria operação em alta-frequência acima de 10 MHz, o que não seria possível, se o material magnético fosse usado como na técnica anterior.

[063] O encapsulante de epóxi duro 76 preferivelmente é topado com uma camada resiliente de um elastômero adequado

para poços, que, com espessura de cerca de 1 mm, isola o sistema elétrico de acoplador EMR de choques por impacto com a face do pino da parede posterior da caixa. Produtos de elastômero adequados são providos pela Du Pont Performance Elastomers Wilmington, DE, 19809, tal como "Viton Extreme" - um fluoroelastomero tendo uma constante dielétrica relativamente alta em torno de 9-10. A blindagem Faraday 77 reduz significativamente o componente Campo-E na camada elástica e, portanto, tais valores de constante dielétrica relativamente altos não exercem nenhum efeito negativo, tal como desintonizar no acoplador EMR. A superfície exposta do elastômero 72 pode ser revestida com uma camada de resina fluoropolímero PTFE. Um produto PTFE adequado é "Teflon" da Du Pont Wilmington, DE, 19809. O PTFE provê uma superfície acabada lisa, nivelada com a face do componente hospedeiro (pino de junta ferramenta, parede posterior da caixa ou face da caixa repetidora), e devido a suas propriedades autolubrificantes, pode suportar muitos ciclos de montagem/desmontagem. Alternativamente, um selo elastomérico pode ser formado revestindo a parte externa com uma camada PTFE, e impresso o padrão da blindagem Faraday 77 com um epóxi carregado de prata. Este selo pré-fabricado pode ser prensado no polímero epóxi 76 durante o estágio de cura do polímero 76.

[064] Dados e informações são modulados em um sinal portador com uma frequência que faz todos acopladores EMR na trajetória de sinal simultaneamente ressonarem e trocarem energia. A cadeia de acopladores EMR passa sinais eficientemente através de uma janela com uma largura de diversos MHz em torno de frequência de ressonância, e atenua,

em grande extensão, os sinais fora da janela. Esta cadeia também é muito eficiente na seleção de componentes de transmissão de sinal defeituosos, em razão do o elemento defeituoso se caracterizar pelo fato de não ter nenhum EMR ou ressonância fora da janela da banda de passagem ou ressonância de má qualidade, expressa por um fator Q baixo. Tais elementos defeituosos são incapazes de alcançar o EMR na frequência de operação, seja devido a reflexões nas linhas de transmissão 40, por causa de curtos circuitos ou condutores rompidos, capacitores defeituosos 78 ou 79, ou segmentos de fio rompido ou em curto circuito 173. Se não houver ressonância na frequência de operação, os elementos de transmissão defeituosos não apresentam acoplamento EMR e não podem trocar energia com o resto do sistema. Desde que elementos de transmissão de sinal redundante estejam disponíveis na forma de segmentos de fio adicionais 173 com circuitos 74 e 78 e/ou linhas de transmissão 40, o mecanismo de troca de energia e transmissão de sinal automaticamente move os elementos remanescentes em funcionamento. Havendo defeitos no circuito, o padrão de onda estacionária na antena 71 pode passar de modo de comprimento de onda inteiro normal para modos alternativos fracional-inteiro. No caso mais simples de modo regular de um único comprimento de onda em torno da circunferência da ranhura 70, um modo alternativo seria uma ressonância de onda estacionária de meio comprimento de onda em uma metade da antena 71. Os requisitos de continuidade para corrente são atendidos pelo deslocamento de corrente nos capacitores 78 no plano terra 172. Uma análise do circuito mostra que a nova ressonância ocorre na mesma frequência que da ressonância inteiro-completo, que é

essencial para a operação ininterrupta de todo o sistema.

[065] A figura 10 mostra uma seção transversal conceitual através de uma série de acopladores EMR 62, 64, 63, 61. Sinais de energia de alta-frequência que entram e saem, via cabo coaxial 40, passam entre acopladores EMR através de acoplamento de ressonância. Na figura 10 são mostrados (da direita para a esquerda) o acoplador EMR tipo pino montado 62, repetidor externo 63, e acoplador EMR tipo caixa 61. A ranhura 70 tem uma seção transversal trapezoidal, i.e. a ranhura 70 é ligeiramente recortada para fixar o material de encapsulamento 76. Como discutido antes, a ranhura 70 é revestida com uma camada altamente condutiva 73, aplicada por spray. Ranhuras opostas 76 formam cavidades fechadas tendo uma seção transversal aproximadamente retangular, nas quais ocorre o acoplamento de ressonância. Todos elementos nesta cavidade, sintonizados com a frequência de operação, são forçados a ressonar na mesma frequência e coerentemente entre si. Em um sistema que funciona perfeitamente, as linhas de transmissão 40 conduzem cópias redundantes mais menos idênticas dos sinais aplicados aos acopladores EMR. Em um sistema parcialmente defeituoso, os elementos, tendo frequências de ressonância e impedâncias características abnormais, são desacopladas da transferência de energia que ocorre nas cavidades fechadas.

[066] A figura 11 mostra um resultado de modelação numérica correspondente ao arranjo da figura 10. Um par correspondente de acopladores EMR foi modelado via COMSOL Multiphysics, da COMSOL Inc, Burlington, MA, 01803. A figura 11 mostra linhas de potencial magnético constante 177, tal potencial gerado pelo acoplador EMR esquerdo 62, e gerando um

campo eletromagnético dentro da cavidade fechada formada por ranhuras adjacentes 70. Neste modelo, cada ranhura 70 tem profundidade de 4 mm e largura de 6 mm, produzindo uma cavidade de seção transversal de 8 mm por 6 mm. As antenas 71 têm trilhas impressas com largura de 1 mm em um substrato de PTFE, com 2 mm de altura e 2 mm de largura. As antenas de comunicação 51 são espaçadas cerca de 4 mm. O fator de acoplamento fora de ressonância (off-ressonance) k calculado entre as antenas 71 é cerca de 0,1.

[067] Um fator de acoplamento fora de ressonância k de cerca de 0,1 a 0,2 é suficientemente pequeno para satisfazer a condição de acoplamento fraco, que é necessária para uma operação de acoplamento de sinal redundante. A impedância de não-ressonância, i.e. circuitos presumivelmente defeituosos é refletido para os circuitos operacionais com um fator k^2 da ordem de 0,01. Assim, porções desabilitadoras curtas e/ou descontínuas do circuito não afetam materialmente as porções remanescentes de funcionamento do circuito. Outra vantagem de circuitos acoplados por ressonância reside no fato de a ampla janela de ressonância, que excede a largura de banda de uma única antena de Q-alto, de acordo com a presente invenção, não ser penalizada com uma largura de banda estreita. Tipicamente, em frequências de operação em torno de 100 MHz e fatores Q de até 100, podem ser conseguidas janelas de transmissão com uma largura em torno de 10 MHz. Assim, um sistema de transmissão de dados, operando em cerca de 1 MHz e usando uma largura de banda de cerca de 1 MHz, pode operar dentro de $\pm 5\%$ da frequência central da janela de transmissão, que se trata de um aspecto que contribui grandemente para a estabilidade e robustez do sistema. Em particular, deve ser

apreciado que operação de alta-frequência permite uma ressonância de Q alto (EMR). EMR, por sua vez, permite a construção de acopladores nominalmente (fora de ressonância) fracamente acoplados, ainda apresentando transferência de energia e/ou sinal fortes em ressonância. Este efeito pode ser explorado visando a construção de um sistema de transmissão robusto, contendo segmentos de transmissão paralelos redundantes. Danos elétricos e/ou mecânicos em quaisquer de tais segmentos desabilitam EMR para este segmento, i.e. o segmento defeituoso se torna efetivamente desacoplado do resto do sistema, quando o segmento acoplador defeituoso ou o segmento acoplador ligado ao cabo defeituoso não ressona em Q alto em alta-frequência. A porção defeituosa do sistema, portanto, é fracamente acoplada ao resto do sistema, praticamente desacoplada. Um segmento redundante no sistema assume a função do segmento defeituoso. Os sinais e energia, então, fluem exclusivamente pela trajetória redundante. Este processo é automático e não requer nenhuma intervenção ou chaveamento explícito.

[068] A figura 21 mostra o espectro de transmissão medido de uma coluna de seis acopladores EMR em série. A frequência central da janela de passa banda é 108 MHz e a largura de banda disponível cerca de 14 MHz. A queda inclinada em direção às frequências abaixo e acima do passa banda é evidente. Os desvios (blips) fora de banda são ressonâncias espúrias introduzidas por comprimentos finitos dos segmentos de cabo conectante. Tais ressonâncias espúrias ocorrem em qualquer sistema de tubo cabeado devido à quase periodicidade da topologia de circuito, que tende a dispersar, quando

segmentos de tubo de diferentes comprimentos são montados em série. A fonte de atenuação contra frequências fora de banda fortalece o sistema contra interferência eletromagnética e também efetivamente desabilita os elementos de circuito defeituosos, que apresentam um comportamento de ressonância anormal. A atenuação de sinal de energia no passa banda atribuível à cadeia de acopladores EMR é cerca de -4 dB, sendo que cada par de acopladores EMR contribui com cerca de -1 dB, e a cabagem total contribui com cerca de -1 dB. A perda por par de - 1 dB indica que cada par opera com uma eficiência de transmissão de 89% para este caso.

[069] A combinação de transferência de sinal e energia de alta-frequência e alta eficiência na banda larga de frequência é considerada inatingível na presente literatura para sistemas de comunicação de furo de poço. Por exemplo, na recente patente U.S. N° 7.362.235 de Norman, se determina que em sistemas de transmissão de sinal sintonizado em alta-frequência, a faixa de frequência de transmissão é grandemente diminuída, o que torna tais sistemas de alta-frequência inadequados para telemetria de furo de poço. Em contraste, este sistema não apenas transmite sinais e dados de modo robusto e eficiente, mas também transmite energia de alta-frequência que pode ser convertida em voltagem CC, sendo que tal energia pode ser requerida. No exemplo da figura 21, cerca de 40% da energia alta-frequência suprida à cadeia de acopladores EMR por uma extremidade pode ser colhida na extremidade receptora. Uma vez que a energia de alta-frequência disponível na superfície é centenas de Watts, e o sistema elétrico pode operar efetivamente a partir de uma energia tão pequena quanto 1 mWatts, uma cadeia

razoavelmente longa de acopladores EMR pode ser montada e ser útil para conduzir energia.

[070] Como será elaborado adiante em "PROJETO DE ACOPLADOR EMR E FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO" nas condições de campo, a atenuação associada a uma única junta de tubo contendo um único repetidor passivo é cerca de -6dB. No nível de potência de transmissão nominal de 1 mW (0 dBm) e em um nível de entrada mínimo utilizável de receptor de cerca de -80 dBm, uma quantidade de repetidores pode se comunicar a uma distância de até cerca de 372 pés (113 metros), que equivale a quatro juntas de tubo. Assim, o número mínimo de repetidores ativos deve ser instalado como minimamente necessário. Para efeito logístico e visando a compatibilidade com o equipamento de plataforma automatizado, é desejável pré-montar suportes de junta de tubo, i.e. adicionando uma caixa repetidora ativa e duas caixas repetidoras passivas em cada suporte. O número de caixas repetidoras ativas no exemplo de uma coluna de furação de 30.000 pés é 323, e o número de caixas repetidoras passivas 646. Assim, o número de caixas repetidoras é quatro vezes o número mínimo necessário, criando uma rede repetidora ativa triplamente redundante.

[071] A grande margem de sinal pode ser explorada de diversos modos: (a) repetidores podem se comunicar, contornando diversos repetidores defeituosos e podem superar um grande número de várias ocorrências de falha simultâneas; (b) o nível de energia transmitido e a corrente de receptor podem ser reduzidos para conseguir um consumo de energia sub-mW per repetidor, para prover um tempo de vida estendida de bateria e/ou métodos auto-energizados, como será discutido abaixo; (c) o sistema se presta ao uso de sistemas de linha

de transmissão com perdas, tal como fios enterrados de pequeno calibre.

[072] Em uma implementação alternativa, as linhas de transmissão 40 são implementadas como fios finos colocados no revestimento epóxi fundido FBE (de Fusion Bonded Epoxi) do diâmetro interno do tubo. O método de usar fios e eletrodos enterrados está explicado em detalhes na Pedido de Patente PCT/US/09/ 44949 de 22 de Maio de 2009, cujo conteúdo está incorporado nesta, por referência, em sua totalidade. Uma vantagem de usar fios enterrados nas linhas de transmissão é o pequeno custo incremental associado à adição de fios paralelos. Os fios enterrados são passados como fios envernizados, mas, não endurecidos, através das seções tubulares 32, como parte do revestimento FBE. A conexão entre a isolamento de fio não-endurecido e acoplador EMR passa pelas juntas de tubo do interior do furo para a face do pino ou parede posterior da caixa. Esta conexão elétrica é preferivelmente implementada como seção coaxial de linha rígida (hard line), inserida no canal de fio furado e encapsulado no lugar, e hermeticamente selado com materiais como PEEK ou STYCAST em epóxi.

[073] Como discutido acima, a redundância longitudinal, implementada contornando as unidades repetidoras ativas não-operativas, combina com a redundância lateral provida por múltiplas linhas de transmissão paralelas 40. Como mostrado abaixo, ambos repetidores ativos e repetidores passivos randomizam as trajetórias de transmissão entre segmentos de transmissão, de modo que a rede resultante seja uma rede quase-randômica complexa de trajetórias de transmissão intercaladas. Durante operação normal, estas trajetórias

conduzem informações que são redundantes em senso espacial (na direção transversal/ paralela), assim como temporal (na direção longitudinal/ série). No caso de falha, a rede se configura, quer passivamente, pela redistribuição de trajetórias de sinal, ou ativamente, seguindo o algoritmo de repetidor ativo, como será discutido abaixo.

[074] As caixas repetidoras 50 não têm posição angular fixa na caixa de junta de tubo 33. Na verdade, é preferível que a orientação angular das caixas repetidoras 50 e, portanto, acopladores EMR 63, 64 sejam randomizadas. Em adição, a orientação angular de acopladores EMR 61, 62 não é definida. Novamente, é preferível que acopladores EMR 61, 62 assumam uma orientação randômica entre si e com respeito às caixas repetidoras EMR 63 e 64. O resultado é uma rede de trajetórias de sinal semi-randômicas, com as caixas repetidoras 50 provendo funcionalidade de cruzamento e mistura entre as linhas de transmissão 40. A funcionalidade crossover e mistura é essencial para desvio automático de pontos de falha, quando o padrão de radiação de um ou mais acopladores EMR se torna assimétrico, devido a uma falha em uma ou mais ramificações do circuito. A semi-randomicidade da trajetória de sinal restaura a simetria entre as linhas de transmissão 40 e a simetria no padrão de radiação dos acopladores EMR em ambas direções, em poucas conexões distantes do ponto de falha. Esta simetria também permite que acopladores EMR de diferentes construções interfaceiem, de modo contínuo, entre si. Em particular, nos pontos de recepção e injeção de sinal, em ambas extremidades da cadeia de transmissão de dados, é vantajoso converter de transmissão de cabo duplo para cabo simples.

[075] A figura 12 apresenta trajetórias de sinal principal através de um conjunto exemplar consistindo de um dispositivo de injeção de sinal 90, uma junta de tubo 30 (A) instrumentada com uma caixa repetidora ativa 50, enquanto a outra junta de tubo (B), instrumentada com caixa repetidora passiva 50, é um dispositivo de detecção de sinal 95. Para clareza, apenas um capacitor 74 *per* segmento de fio 173 é mostrado e capacitores de sintonização adicionais 78 foram omitidos. Tipicamente, a interface de superfície (sub de comunicação) e sub de interface de furo de poço (sub BHA) devem conter ambos, dispositivos de injeção de sinal 90 e circuitos de detecção de sinal 95, para permitir a transferência de dados bidirecional. Os acopladores EMR 141 ligados aos dispositivos de injeção e detecção interfaceiam as fontes de sinal de 50 ohms e dissipadores de sinal 96, respectivamente. No exemplo mostrado na figura 12, o sinal injetado é selecionado por uma caixa repetidora ativa 50, contendo dois circuitos repetidores 100. Os circuitos repetidores 100 detectam mensagens, que chegam em pacotes de mensagem, verificam a validade da mensagem e, se atendidas certas condições, encaminha os pacotes de forma restaurada e amplificada em ambas direções. O sinal, que segue da esquerda para a direita, transversa junta de tubo 30, caixa repetidora passiva 50, outra junta de tubo 30, e finalmente sendo recebida pelo dispositivo de detecção 95. Nesta implementação, a quantidade de juntas de tubo B com caixas repetidoras passivas é maior que a quantidade de juntas de tubo com caixas repetidoras ativas A.

[076] A figura 13 mostra diagramaticamente e simplificada o sistema elétrico dentro de uma caixa

repetidora ativa 50. Dois repetidores 100 são alojados nas cavidades 52 e ligados à antena 71 com capacitores sintonizadores e acopladores 78 e 79. Os dois repetidores são independentes, e cada repetidor 100 pode funcionar sem o outro repetidor. Em adição, o circuito, em particular, as interfaces de antena 130, é feito de modo que, no caso de falha de componente eletrônico, as antenas 71, correspondentes ao repetidor defeituoso, sejam eletricamente passivamente conectadas entre si, permitindo uma comunicação não-amplificada não-armazenada entre as duas faces da caixa repetidora. Um repetidor consiste dos blocos principais: uma unidade de microprocessador "MPU" 110, Fonte de clock XTAL 112, Front-End RF 120, interface de antena 130, e uma ou mais baterias de Lítio 140. As cavidades são dimensionadas de modo a alojar células primárias de Cloreto de Tionil-Lítio sub AAA, i.e. #10-325-150LR da Eletrochem, Clarence, NY. Para a porção eletrônica, podem ser usados como MPU 110: PIC24F16KA102, da Microchip Technology Inc., Chandler, AZ 85224-6199; Front-End RF 120; TH 71221, da Melexis Microelectronic Systems, B-8900 Ieper, Bélgica; e XTAL 112, ABM3B SMD Crystal, da Abracon Corp, Rancho Santa Margarita, CA, 92688. Estes chips medem 5 mm x 5 mm (MPU e chip RF, ambas em pacotes QFN) e 5 mm x 3 mm (XTAL).

[077] O chip TH 71222 desempenha funções de modulador (Mod), oscilador de referência (RO), amplificador de energia (PA), amplificador de ruído baixo (LNA), estágio de ganho de frequência intermediária (LF), e detecção (Det). A interface de antena executa a correspondência de impedância e provê a comutação entre a trajetória de transmissão do PA para as antenas e da trajetória de recepção das antenas para o LNA. A

potência de saída é ajustada em cerca de 0 dBm (1 mW) em cada direção (+3 dBm total). O nível de sinal de entrada utilizável ficando entre 0 dBm e -90 dBm. A largura de banda disponível do TH 71221 é cerca de 200 kHz e os dados de surto de cerca de 200 kb/s nos modos de modulação ASK e FSK. Um circuito repetidor consome cerca de 12 mA, na recepção e cerca de 24 mA na transmissão a partir da célula de Lítio, com voltagem nominal de 3,6 Volts. Em uma temperatura de operação de cerca de 150°C, uma única célula AAA pode suprir cerca de 400 mAh por centenas de horas. Devido ao fato de a corrente de autodescarga em altas temperaturas, a adição de outra célula sub AAA, leva a quantidade de carga disponível a cerca de 600 mAh.

[078] Para receber e enviar um único pacote de mensagem, por exemplo 250 bytes, um repetidor precisa se manter no modo receptor por cerca de 10 ms, no modo transmissor pelos próximos 10 ms, e no estado quiescente por outros 10 ms, a uma taxa de modulação de surto de 200 kb/s. A emissão máxima de dados brutos nesta taxa de modulação de surto é 33 pacotes *per* segundo ou 66 kb/s, qual limite sendo dado pela largura de banda do chip TH 71221 e não pelo sistema de transmissão de dados *per se*. O tempo de latência *per* repetidor ativo é cerca de 10 ms, i.e. o tempo de latência total em uma coluna de 30.000 pés (i.e. 10 km) é da ordem de três segundos, assumindo 322 repetidores ativos.

[079] Usando uma taxa máxima de transmissão de dados de 66 kb/s e operação alternada de dois repetidores *per* caixa repetidora, um repetidor recebe por 10 ms e transmite por 10 ms a cada 60 ms, resultando uma corrente requerida de 12 mA/6 + 24 mA/6 = 6 mA, implicando um tempo de operação de cerca de

100 horas, quando executado com duas células primárias *per* repetidor. Para a maior parte dos furos de poço, no entanto, tal elevada taxa de dados é desnecessária, sendo que uma taxa muito menor já seria suficiente. Neste sistema de transmissão, a taxa mínima de dados é estabelecida em uma mensagem de 250 bytes a cada segundo, i.e. 2 kb/s. Usando as técnicas descritas para poupar energia, a corrente média *per* repetidor pode ser reduzida a cerca de 0,1 mA, resultando em um tempo de execução que essencialmente é limitado apenas pelas taxas de autodescarga das células de Lítio.

[080] A figura 14 mostra uma vista externa da caixa repetidora montada 50. O acoplador EMR 63 ou 64 hermeticamente selado pode ser visto na face superior. As caixas repetidoras 50 são preferivelmente diferenciadas por faces frontais visíveis codificadas por cor, garantindo que os repetidores ativos sejam enterrados em intervalos apropriados. Opcionalmente, o furo interno pode ser revestido com revestimento FBE 45. A caixa repetidora 50, preferivelmente, é selada hermeticamente.

[081] Em operação, a caixa repetidora 50 é mantida presa entre um pino de junta de ferramenta e a parede posterior de uma caixa de junta de ferramenta. Mecanicamente, a caixa repetidora transmite uma carga de compressão entre pino e caixa e provê um encosto (stop) bem definido para a conexão rotativa, daí impedindo aplicação de sobretorque durante montagem e/ou sob tensão torsional.

[082] No armazenamento, deve se tomar cuidado com as caixas repetidoras 50 localizadas nas caixas de junta de ferramenta abertas 31 não sejam realocadas. Tal ação de autotravamento pode ser feita por meio de vários detalhes

estruturais bem conhecidos. O ajuste do diâmetro interno da caixa de junta de ferramenta 31 com o diâmetro externo da caixa repetidora 50 ligeiramente cônica provê um autotravamento por forças friccionais existentes entre as superfícies. Alternativamente, anéis de retenção podem ser usados para engatar ranhuras localizadas na caixa e repetidor. Preferivelmente, a ação de rotação de pino durante desmontagem, força o mecanismo de retenção engatar (travar) a caixa repetidora no lugar. O sentido rotacional oposto ocorre na montagem, em qual caso nenhuma retenção se faz necessária, pelo fato de o pino fixa a caixa repetidora. A remoção manual da caixa repetidora compreende girar a caixa repetidora na direção da montagem, daí soltando o mecanismo de travamento, e, simultaneamente, erguendo a caixa repetidora da caixa de junta de ferramenta. Uma nova caixa repetidora é instalada, engatando o mecanismo de travamento, fazendo girar a caixa repetidora na direção da desmontagem.

[083] A tarefa logística de distribuir caixas repetidoras ao longo do sistema é simplificada, monitorando a intensidade do sinal recebido no terminal na superfície. Quando a estação na superfície vê o sinal que chega a partir do repetidor (ou repetidores) mais próximo(s) se aproximar ou cair abaixo de um certo limite, o sistema emite um pedido por uma junta de tubo ou suporte de tubo contendo um repetidor ativo. Assim, cadeias de telemetria altamente heterogêneas consistindo de caixas repetidoras ativas e passivas podem ser formadas, sem o conhecimento específico do fator de atenuação em cada elemento de tubo de furação.

[084] As dimensões mecânicas da caixa repetidora 50 e quantidade de furos na parte posterior são escolhidas

de acordo com as dimensões de conexões comerciais de duplo rebordo. Ademais, o pino de um componente de duplo rebordo se ajusta à caixa de junta de tubo 31. A conexão chega a sua máxima resistência mecânica, se uma caixa repetidora ativa ou passiva 50 estiver presa entre o pino padrão e a parede posterior de caixa. Similarmente, uma junta de tubo de pino 33, de acordo com a presente invenção, se ajusta à caixa de um componente de furo de poço de duplo-rebordo.

[085] Qualquer caixa repetidora 50 pode ser usada como plataforma para sensoreamento local e coleta de dados. A figura 15 mostra um diagrama de circuito de repetidor exemplar para um repetidor ativo de sensor habilitado. Para efeito de clareza, apenas um repetidor, dentre tipicamente dois repetidores de caixa repetidora, está desenhado na figura 15. O circuito sensor 200, que inclui sensor 202, o sistema elétrico de condicionamento 204, conversores analógico-digital 206, MPU 208, e circuitagem de comutação de energia 210, ficam na cavidade 52. O sensor e seu sistema elétrico são energizados por uma bateria de célula primária 140. A MPU do repetidor 110 se comunica com o MPU sensor 208 por uma linha de comunicação serial, para direcionar MPU sensor 208 a ligar o sensor, tomar leituras de sensor, e processar e comunicar os dados de sensor comunicados.

[086] Um exemplo de dado a ser coletado em uma coluna de furação é aceleração local. A aceleração em tempo real, dados de vibração, e choques, amostrados em intervalos regulares ao longo da coluna, mostram o comportamento dinâmico da coluna em condição real. Os dados são usados para ajustar a rotação e velocidade de furação e/ou peso na pastilha entre outros parâmetros ajustáveis. Sensores de aceleração baseados em

MEMS adequados para sensor 202 são disponíveis a partir da Analog Devices. Por exemplo, o chip ADX 326 é alojado em um pacote de 4 por 4 mm, que se ajusta à MPU da Microship Technoloy Inc, em uma única cavidade 52.

[087] Dados de sensor são coletados ao longo da coluna de furação interrogando os repetidores 100 com respeito aos dados. Os repetidores 100 respondem, por sua vez, interrogando seus sistemas de sensor acoplados com respeito aos dados, e enviando com os dados arranjados em pacote. Alternativamente, repetidores podem interrogar automaticamente seus sistemas sensores acoplados e/ou inserir dados de sensor nos pacotes de dados. Este último método é útil para detectar uma condição na qual os dados de sensor excedem um certo limite pré-definido, tal como o nível máximo de vibração.

[088] A figura 16 mostra um diagrama de blocos para um circuito repetidor com múltiplas fontes de energia. Operar uma cadeia de repetidores em uma taxa de dados média-baixa reduz dramaticamente o ciclo de trabalho para cada repetidor ativo e, por conseguinte, baixa o consumo de energia médio do repetidor ativo para valores bem abaixo de 1 mW. Na faixa de microwatt, é possível coletar energia da energia vibracional a partir da coluna de furação. Como mostrado na figura 16, uma cavidade 51 aloja uma bobina de solenóide 250, que consiste de até diversos milhares de espiras de fios magnéticos. Um magneto permanente 252, frouxamente suspenso na bobina 250, se move em relação à bobina, quando a coluna de furação vibra na direção longitudinal. Como o magneto 252 é um dipolo lateral, tais movimentos induzem uma voltagem na bobina 250, que é capturada por um circuito de

condicionamento de energia 254 e repetidor 100. Uma bateria suplementar 140 supre energia aos circuitos, quando a energia vibracional não está disponível, tal como, quando a junta de tubo de furação está elevada. Dispositivos adequados para circuito de condicionamento de energia 254 são disponíveis da Advanced Linear Devices Inc, Sunnyvale, CA 94089.

[089] A figura 17 mostra o diagrama de blocos para um circuito repetidor usando baterias recarregáveis. Os acopladores EMR são lineares com respeito a amplitude e energia, i.e. são capazes de transmitir energia elétrica em adição aos sinais de dados. Sempre que uma energia de alta-frequência nas bandas HF, VHF, UHF, em particular na frequência EMR, e além de cerca de 0 dBm (1 mW) é aplicada a uma ou ambas antenas 71, o retificador de alta velocidade 262 e capacitor 263 converte a energia de alta-frequência para uma voltagem adequada, para entrada para o circuito de condicionamento de energia 254. O retificador 262 é preferivelmente um diodo Schottky, com um tempo de recuperação reverso de cerca de 1 ns ou menos, tal como o retificador SD 101 provido pela Vishay Intertechnology Inc, Malven, PA 19355. O circuito de condicionamento de energia 254 estabiliza a voltagem de entrada e recarrega a bateria 260. A bateria recarregável 250, por sua vez, supre o circuito de condicionamento de energia 254 e repetidor 100. As baterias de íon-Lítio recarregáveis adequadas para operações de furo de poço são providas pela Saft 93172 Bagnolet, France. A energia de alta-frequência aplicada simultaneamente dispara a condução no par de diodos Schottky 264. Com o par de diodos 264 conduzindo, um circuito tanque ressonante 266 é formado, sintonizado com a frequência EMR. O

circuito tanque ressonante apresenta uma impedância de série alta, e isola a interface de antena 130 do surto procedente da energia HF/ VHF/ UHF.

[090] Estações recarregáveis adequadas podem ser integradas a unidades móveis no sub de comunicação de superfície 519, (ver abaixo), e/ou em uma caixa de carregar montada sobre um suporte (monkey) que guarda suportes de tubo vertical na plataforma. Em todos casos, a caixa de carregar contém um gerador de alta-frequência supre cerca de 1 W per suporte de tubo. Um distribuidor (manifolde) de cabo conecta a caixa de carregar a adaptadores, cada uma delas contendo um acoplador EMR do tipo pino. Cada adaptador no distribuidor de cabo interfaceia a caixa superior de um suporte de tubo. Preferivelmente, cada adaptador é ligado à junta de tubo com um único fixador, em vez de uma conexão rotativa. A energia de alta-frequência desce o suporte para uma ou mais caixas repetidoras suprimindo energia de alta-frequência para recarregar baterias. A energia total HF/VHF/UHF aplicada ao carregador da placa de conexão (monkey plate) pode ser da ordem de diversos 100 W.

[091] A estação de recarregar também pode ser integrada ao sub de comunicação de superfície 510. A estação de recarregar recarrega os repetidores ativos localizados no topo da coluna de furação, assim o tempo disponível para recarga depende do progresso da furação. Uma vez cada aplicação de energia HF/VHF/UHF cega os repetidores, o transmissor HF/VHF/UHF é ligado apenas de modo intermitente. Cada surto de energia de cerca de 10 ms é sincronizado ao pacote de mensagem corrente de modo que os surtos caiam em espaços não usados na sequência de tempo.

[092] Preferivelmente, o retificador 202 e o capacitor 263 fazem parte de cada circuito repetidor ativo independente da recarregabilidade da fonte de energia (ou fontes). A voltagem instantânea gerada no capacitor 263 é usada para "acordar" MPU 110 do modo dormente, para economizar energia, no qual Fonte-Clock 112 e circuito "Front-End" RF 120 estão desligados. O consumo corrente no modo dormente pode ser mantido em poucos microampéres (ou abaixo disto), i.e. o circuito pode ser energizado no modo de espera por períodos muito longos a partir de uma única bateria 140. O sinal mais forte de alta-frequência gerado pela estação de recarregar, integrada ao sub de comunicação de superfície 510, não requer amplificação, e a seletividade das frequências providas pelos blocos de hardware relativamente "famintos" de energia 112 e 120, mas, ao invés, pode ser usado para gerar um sinal de acordar para MPU 110. Assim, a MPU 110 é notificada que seu repetidor chegou ou está prestes a fazer parte da coluna de furação de comunicação habilitada, e começa a executar os algoritmos de repetidor, através dos quais Fonte-Clock 112 e "Front-End" RF 120 são ligados e desligados.

[093] Obviamente, podem ser combinados diferentes métodos para coletar energia para aproveitar a vantagem do fato de a energia HF/ VHF/ UHF ser mais prontamente disponível no topo da coluna e a energia vibratória a partir da pastilha mais prontamente disponível na base da coluna. Ademais, os métodos para colher energia podem ser combinados com diversas combinações de células primárias e e/ou secundárias. Neste primeiro caso, a energia colhida é usada para estender a vida das células primárias e, no segundo caso, a vida será limitada apenas ao número máximo de ciclos de carga/recarga

das células secundárias.

[094] A figura 18 mostra, em alguns detalhes, como todos sistemas de transmissão de dados são montados a partir de componentes individuais de sistema. Em particular, um exemplo de sistema motriz de mesa usando Kelly 17 é diagramado. Os componentes, mostrados em vista explodida passante, da esquerda para a direita, de cima para baixo, compreendem: sub de comunicação 510, Kelly 17, válvula inferior de Kelly 117 (mostrado como exemplo de como as válvulas são instrumentadas) e sub economizador (sub saver) de Kelly 119.

[095] O sub de comunicação 510 converte os sinais no sistema de transmissão de dados em sinais compatíveis através de um equipamento de superfície existente. Como o sub de comunicação 510 faz parte da coluna de furação rotativa, o sub de comunicação 510 é preferivelmente energizado por bateria e troca sinais com o equipamento de superfície 500 via link de rádio. Por considerações de segurança da plataforma, no entanto, pode ser requerida a comunicação por cabo, onde, uma porção interna do sub de comunicação 510 gira com a coluna de furação e a porção externa é fixa à plataforma, permitindo que um cabo corra entre a porção externa e o equipamento de plataforma. A natureza de acoplamento de ressonância entre acopladores EMR 61, 62, 63, 64 permite um espaço de diversos milímetros e, no caso de transmissão de sinal, diversos centímetros, entre acopladores EMR próximos pode ser introduzido, um aspecto que simplifica grandemente a construção de um mecanismo de acoplamento de sinal e/ou energia entre partes rotativas e não-rotativas de uma coluna de furação e/ou equipamento de plataforma, pelo

fato de os espaços entre acopladores permitirem uma rotação quase sem fricção entre acopladores que não contatam. A necessidade de tais acopladores ocorre, por exemplo, no ponto de uma articulação superior, onde a coluna de furação rotativa encontra um gancho não-rotativo do equipamento de extração, ou no sub de comunicação 510.

[096] A figura 22 mostra a seção transversal conceitual do elemento de acoplamento de rotação que gira livremente. Dois componentes ou elementos de coluna de furação 910 e 920, i.e. um conjunto de articulação, pulsador de lama, sirene de lama, motor de lama, ferramenta esterçável rotativa (RTS), ou pastilha, podem girar livremente entre si, em torno de um eixo comum 930. Uma folga 940 de cerca de 1 mm é deliberadamente formada entre os elementos 910 e 920 para permitir uma rotação quase sem fricção. Tipicamente, faz-se necessário passar sinais elétricos e energia sem o uso de escovas entre os elementos 910 e 920, em razão de a pastilha rotativa conter sensores remotos energizados, que transmite as leituras de sensor para o BHA. Os acopladores EMR 61 e 62 são montados em elementos 910, 920, respectivamente, e conectados via linhas de transmissão 40, a outros circuitos nos componentes da coluna de furação. Estes circuitos podem gerar e processar sinais de alta-frequência, que são adequados para passar energia e dados entre os elementos 910 e 920 por meio de acoplador EMR através da folga de fluido 940. A folga 940 pode conter fluidos de furação, ou outros fluidos, tais como ar ou óleo, sendo que estes últimos fluidos são contidos dentro dos componentes da coluna de furação. O elemento 920 pode ser um eixo rotativo com múltiplos acopladores EMR 62, de modo que sinais e/ou energia

passem ou sejam captados por múltiplos acopladores EMR não-rotativos 61. Sinais e/ou energia são conduzidos ao longo do eixo - i.e. através das linhas de transmissão rotativas 40. Neste arranjo, os acopladores 61 e 62 preferivelmente são concêntricos, i.e. têm diâmetros diferentes. Diferenças nos comprimentos da antena são compensadas ajustando os valores dos capacitores em cada antena, para criar antenas de mesmo comprimento no sistema.

[097] Acima do sub de comunicação 510 pode haver outra válvula ou dispositivo giratório. O sub de comunicação 510 interfaceia o resto do sistema de transmissão via um conjunto de acopladores EMR de pino 62. O Kelly 17 é instrumentado com os mesmos componentes de sistema de transmissão como junta de tubo, especificamente caixa repetidora 50, acoplador EMR de caixa 61, linhas de transmissão 40, e acoplador EMR de pino 62. Abaixo do Kelly 17 é mostrada uma válvula de Kelly 117 opcional 117, que é usada para reter a coluna de nível de lama dentro do Kelly 17 durante montagem ou desmontagem da conexão rotativa abaixo. O alojamento de válvula contém caixas repetidoras 50 acoplador EMR de caixa 61 e acoplador EMR de pino 62. As linhas de transmissão 40 seguem da caixa para a parte de fora do corpo de válvula e voltam para o corpo de válvula abaixo da válvula para conectar o acoplador EMR de pino 62. O sub economizador Kelly 119 é barato, se trata de uma peça pequena usada como item de desgaste para operações frequentes de montagem/ desmontagem. O sub economizador Kelly 119 contém outro conjunto de caixa repetidora 40, acopladores EMR tipo caixa 61, e acopladores EMR tipo pino - o último sendo conectado por linhas curtas de transmissão 40.

[098] Como diagramado na coluna central da figura 18, podem ser encontradas duas juntas de tubo 30, que são instrumentadas para prover transmissão de dados, e junta de tubo curta 39, instrumentada para transmissão de dados e sensoriamento remoto. Para este propósito, a junta de tubo 39 contém uma janela de sensor 331.

[099] Como mostrado na coluna direita da figura 18, um sub de crossover (crossover) 540 converte as diferentes formas de roscas usadas entre juntas de tubo 30 e anéis de furação 13, respectivamente. O sub de crossover 540 e anéis de furação 13 são equipados para transmitir dados de maneira similar às juntas de tubo 30. O sub de interface de furo de poço 560 se trata de uma peça de instrumentação alojada em um anel de furação 13 incluindo o acoplador EMR 61, que converte os sinais e protocolos usados pelo sistema de transmissão de dados de/ para sinais e protocolos usados no barramento de instrumentação BHA 570. A implementação deste barramento é específica de serviço, mas, tipicamente, é uma variante de MIL-STD-1553. Portanto, os componentes eletrônicos de interface são parcialmente genéricos e parcialmente específicos para equipamento de furo de poço 580 provido pela companhia de furação direcional MWD/LWD.

[100] A figura 19 é um diagrama de blocos de circuito esquemático do sub de comunicação de superfície 510. O circuito emprega o mesmo circuito de núcleo base 760 como repetidores, incluindo MPU 110, ressonador 112, Front-End RF 120, interface de antena 130, e capacitores T/M 78 e 79. Este circuito de núcleo é conectado ao acoplador EMR 62, que aloja as antenas 71. Uma fonte HF/VHF/ UHF 280, ligada/desligada via MPU 110, provê

energia de alta-frequência às caixas repetidoras 50 através de fontes de energia recarregáveis. A fonte 280 é ligada durante interrupção de transmissão entre pacotes de mensagem. O sub de comunicação 510 é adicionalmente aumentado por funções adicionais de processamento e comunicação no bloco de comunicação 750, incluindo interface serial 751 para comunicação com MPU 110, bloco de pacotização de mensagem e formação de fila de mensagem 752, bloco de codificação/decodificação de mensagem 753, bloco de controle de início e controle de sessão 754, assim como, um rádio de duas vias 755, bloco de desformação de fila de mensagem e despacotamento de mensagem 756, bloco de supervisão de rede 757, e bloco de funções de recuperação de rede 758, que juntos permitem comunicação com o mundo exterior. Estas funções adicionais lidam com protocolos de extremidade de alto nível, de extremidade a extremidade, incluindo funções de supervisão de rede e conectividade com o mundo exterior, tal como rede de dados de plataforma através de links sem fio (como mostrado) ou conexões cabeadas. As tarefas em rede (networking) realizadas no bloco de comunicação 750 incluem, por exemplo, o manuseio de dados de usuário, que chegam em mensagens de extensão variável, e sua divisão em pacotes de dados de extensão fixa (752); a codificação/decodificação de pacotes de mensagem 753 (que será discutido mais adiante); supervisão de sessões de comunicação mais uma variedade de supervisão geral e funções de manutenção de rede. Neste contexto, o termo "Sessão de Comunicação" se refere às atividades entre os instantes em que uma trajetória de comunicação contínua entre sub de furo de poço e o sub de superfície foi estabelecida e o instante em que a trajetória

foi interrompida, por exemplo, quando da adição de um tubo ou remoção de uma junta de tubo da coluna. Uma das tarefas do sub de comunicação 510 é prontamente prover a recuperação de uma condição interrompida e rapidamente restabelecer a comunicação, assim que o link físico se restabelecer. O link de comunicação com o restante do equipamento de superfície 500 pode ser implementado como link de rádio sem-fio ou link cabeado.

[101] A figura 20 é um diagrama de blocos de circuito esquemático para os componentes eletrônicos situados em um sub de interface - furo de poço/ BHA 560. Um circuito de núcleo 760, similar ao circuito repetidor, é empregado para operar com funções RF e comunicação de nível baixo, aumentado pelo sistema elétrico adicional 770, responsável por comunicações de alto nível, de extremidade a extremidade, funções de supervisão de rede, e comunicação com barramento de instrumentação BHA. O circuito de núcleo 760 é conectado ao acoplador EMR 61. O sistema elétrico de comunicação de furo de poço 770 é similar ao circuito 750, a menos de o rádio de duas vias 755 ser substituído pela interface 78 com o barramento BHA 570 (barramento exemplar MIL-STD-1553), específico para cada fornecedor LWD/MWD.

[102] Os pacotes de mensagem podem consistir de 2.000 bits organizados em 250 bites. Cada pacote pode ser organizado assim: preâmbulo, cabeçalho de mensagem, matéria útil, soma de verificação de redundância cíclica (CRC). O preâmbulo consiste de bits de sincronização e arbitração; o cabeçalho da mensagem contém informações, tais como: ID do pacote, extensão do pacote, e tempo de vida TTL (de Time-to-Live) do pacote; a matéria útil consiste de dados de usuário.

Dos 2000 bits, cerca de 10% são alocados para controle (overhead), ou seja, todos os bits que forem bits úteis. Um adicional de 5% do tempo de transmissão é perdido com respeito a atrasos de chaveamento e sincronização. Os dados de usuário são enviados a uma taxa de 56 kb/s.

[103] PROJETO DE ACOPLADOR EMR E FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

[104] A construção de acopladores EMR foi descrita acima em detalhes. A seleção da frequência de ressonância de operação e antena ótima compreende diversos fatores. Os acopladores EMR se baseiam no princípio de ressonadores fracamente acoplados, onde o termo "Fracamente Acoplado" se refere a um fator de acoplamento fora de ressonância k de cerca de 0,1. Sem ressonância, apenas uma pequena quantidade de energia é acoplada via um link fraco. Com ressonância, no entanto, antenas próximas interagem fortemente, desde que seus fatores individuais sejam suficientemente altos. Como diversos fatores Q limitam o fator Q desejável e alcançável, é inevitável uma certa perda em cada "Salto" (Hop) entre acopladores EMR. Mas, estas perdas podem ser minimizadas com uma frequência de operação ótima.

[105] No limite relevante de $k \ll 1$ e $Q \gg 1$, a perda *per* par de acopladores EMR pode ser aproximada como segue:

[106] Perda "Salto" = $-20 \log_{10}(1 + Z_0/(\omega_0 k L Q))$ [dB]

[107] onde Z_0 é a impedância característica de linhas de transmissão (tipicamente 50 ohms), ω_0 a frequência de ressonância e operação em rad/s, k o fator de acoplamento, L a indutividade da antena, e Q o fator Q da antena. O fator de acoplamento k incorpora a geometria básica da cavidade formada por dois acopladores EMR próximos. Em valores K baixos, a frequência de ressonância ω_0 de um par de

acopladores é aproximadamente igual à frequência de ressonância de um único acoplador. O fator Q é a razão da impedância da antena $\omega_0 L$ em relação à resistência ôhmica da antena R_{ant} nas frequências e temperaturas visadas, a R_{ant} é dominada pelos efeitos "pele" (skin) e vale cerca de 0,5 a 1 ohm. A impedância de antena é cerca de 50 ohms, assim fatores Q de cerca de 50 a 100 são alcançáveis.

[108] Em adição às perdas ôhmicas de antena, efeitos de atenuação surgem a partir de uma camada fina do fluido de furação, que pode estar presa entre as superfícies dos acopladores EMR acoplados. No pior caso, a condutividade dos fluidos é 100 S/m. Na faixa visada, a condutividade requer uma profundidade de pele elétrica de cerca de 4 mm. Como as conexões de duplo-rebordo supostamente acoplam rebordos secundários, a possível folga de fluido, já de projeto, é muito estreita. Assumindo que a folga com fluido seja cerca de 0,010" (0,25 mm), se introduz um fator de atenuação de cerca de -0,5 dB per folga.

[109] O fator de atenuação de perda de salto precisa ser compensado em relação às perdas de cabo coaxial. As perdas de cabo podem ser descritas como segue:

$$\text{Perda per Salto} = -20 \log_{10}(e) R_{cabo} \text{ [dB]}$$

onde a constante de Euler Z_0 é a impedância característica de cabo (tipicamente 50 ohms); e R_{cabo} a resistência ôhmica de uma seção de 10 metros de cabo coaxial na frequência e temperatura de operação.

[110] A atenuação total de sinal em uma junta de tubo, em decibéis, é dada pela soma de fator de perda per salto (acoplamento direto pino-caixa) ou dois fatores de perda per salto (acoplamento via repetidores passivos) e contribuição

de perda de cabo. Como pode ser visto, as perdas per salto diminuem com o aumento da frequência de ressonância ω_0 e a perdas de cabo aumentam lentamente com a frequência devida ao efeito de pele. A análise da atenuação total em função de frequência mostra o domínio de perdas per salto abaixo de cerca de 100 MHz, uma porção razoavelmente plana do espectro na frequência superior VHF, onde as perdas per salto e perdas de cabo aproximadamente se compensam, e aumentando perdas em frequências mais altas devido a perdas de cabo e elevadas perdas de fluido. A faixa ótima de frequência de operação nestas condições corresponde a aproximadamente ao espectro de frequência VHF, que se estende na faixa entre 30 MHz e 300 MHz. Em particular, descobriu-se que a porção superior da banda VHF, que começa em 100 MHz, é muito adequada.

[111] Se os cabos coaxiais forem substituídos por cabos enterrados, como as linhas de transmissão 40, uma perda maior de atenuação será atribuível às linhas de transmissão que aos acopladores EMR. Devido à dependência de frequência oposta de perdas de salto e perdas no fio, o sistema de transmissão de cabo enterrado pode ser otimizado, operando em uma faixa alta de frequência HF de 10 MHz a 30 MHz ou operando em uma faixa baixa de frequência VHF de 30 MHz a 100 MHz.

PROJETO DE ALGORITMO

[112] Na descrição anterior, deve ficar claro que a topologia da rede formada por repetidores ativo e passivo é complexa e semi-determinística. No entanto, é altamente vantajoso ocultar esta complexidade dos próprios repetidores, e definir o comportamento de um único repetidor ativo em termos de um algoritmo simples, que não demande potência computacional e recursos de memória na MPU 11. A

complexidade e robustez da rede surgem da conectividade entre muitos de tais repetidores e de sua conectividade multitorcida, quase-randômica.

Algoritmo de Repetidor Básico (BRA)

[113] Faz seguidamente:

1- escaneia a entrada RF com respeito a pacotes de mensagem;

2- se encontrar um pacote de mensagem:

verifica se a mensagem CRC corresponde ao CRC computado;

se os CRCs corresponderem, avança, e descarta pacote e reinicie o escaneamento;

verifica a última lista de pacote com respeito ao ID de pacote, se encontrar, descarta o pacote e reinicia o escaneamento;

verifica o ID do pacote com respeito à idade, se for muito antigo, descarta o pacote e reinicia o escaneamento;

3- realiza arbitração de prioridade de par;

se a arbitração for perdida para o par, descarta o pacote e reinicie o escaneamento;

se for diferente, avança;

4- transmite o pacote;

5- atualiza a lista dos pacotes que passaram;

6- atualiza o valor da prioridade de arbitração do par.

[114] Repete seguidamente.

[115] O algoritmo de repetidor básico não demanda grande capacidade de computação de um repetidor ativo. Basicamente, o repetidor deve ser capaz de: (a) detectar e receber um pacote de mensagem; (b) ler algumas informações básicas, a partir do cabeçalho da mensagem; (c) computar a soma de verificação de redundância cíclica (CRC) nos pacotes em tempo

real; (d) guardar o pacote de mensagem simples; e (e) transmitir o pacote de mensagem. Desde que haja uma trajetória de comunicação contínua entre as extremidades de terminal da rede, i.e. entre o sub de comunicação e sub de furo de poço/ BHA, os pacotes de mensagem são enviados em ambas direções via rede, desde que cada repetidor ativo siga BRA.

[116] A porção de computação mais intensiva do BRA se refere à computação dos CRCs nos pacotes recebidos e transmitidos. Este cálculo pode ser feito em tempo real para não reter o processo de transmissão de mensagem. A MPU 110 usa um dispositivo PIC24F16KA102, contendo um gerador interno CRC. Durante a recepção, o BRA supre o fluxo de dados que chega ao gerador CRC e apenas sendo necessário comparar os bytes CRC do cabeçalho da mensagem à saída do gerador CRC. Na transmissão, um novo CRC precisa ser computado, uma vez que o repetidor, tipicamente, modifica o cabeçalho da mensagem. Enquanto o conteúdo do pacote é suprido ao Front-End RF, o fluxo de dados que passam também é suprido ao gerador CRC, e os bytes CRC resultantes são anexados ao fluxo de dados que sai, daí, aliviando o software de uma calculação mais pesada em tempo real, e permitindo o processamento e retransmissão de pacotes de mensagem de volta em tempo real.

[117] Uma porção do BRA arbitra e coordena o compartilhamento de tempo (time-sharing) entre os repetidores 100 contidos no mesmo alojamento de repetidor 50. Sem tal arbitração, seria possível que os repetidores simultaneamente transmitissem e interferissem com a transmissão entre si. A arbitração é feita programando cada repetidor com um valor de arbitração único e randômico durante sua fabricação. No

início da transmissão, o repetidor transmite o valor de arbitração corrente em um modo de chaveamento liga/ desliga OOK (de On-Off Keying), enquanto simultaneamente ouve sua entrada. Na primeira ocorrência de um bit transmitido como "transmissor desligado" e recebido como "RF ligado", o repetidor cessa a transmissão. Assim, apenas um repetidor pode "ganhar" uma ranhura (slot) de transmissão específica, quando repetidores de valores de prioridade/ arbitração baixa recua durante o intervalo de arbitração. Depois da completação da transmissão, um repetidor reduz sua prioridade de transmissão, enquanto os repetidores (derrotados) aumentam as respectivas prioridades. Assim ao longo do tempo, os repetidores tomam ciclos de enviar pacotes produzindo um nivelamento de carga em suas respectivas baterias. A porção OOK da transmissão não afeta o resto da transmissão, que pode ser feita em Chaveamento de Amplitude ASK (Amplitude Shift Keying) ou Chaveamento de Frequência FSK (Frequency Shift Keying).

[118] O BRA é ineficiente com respeito ao consumo de energia, porque requer que o repetidor permaneça no modo de recepção energizado na maior parte do tempo. O algoritmo de repetidor modificado (MRA) emula o BRA, contudo, sem esgotar a bateria.

Algoritmo de Repetidor Modificado (MRA):

[119] Faz seguidamente,

- 1- Modo de Espera (Stand By Mode): "dorme" 9 segundos e amostra RF por 1 segundo;
- 2- se nenhum RF for detectado, avança para o Modo de Escaneamento, ou, ao invés, reinicia o Modo de Espera;
- 3- Modo de Escaneamento: executa o loop Faça/ Repita BRA

por 2 segundos;

- 4- se nenhum RF for detectado, volta para o Modo de Espera;
- 5- se um padrão de transmissão repetitivo for identificado, avança, ou segue para o Modo de Escaneamento;
- 6- executa o loop Faça/ Repita BRA per padrão de transmissão aprendido;
- 7- se o padrão de pacote recebido não corresponder ao padrão aprendido, segue para o Modo de Escaneamento.

[120] Repete seguidamente.

[121] O algoritmo repetidor modificado faz uso da vantagem do fato de os subs de comunicação e furo de poço emitirem pacotes de mensagem em modo determinístico, em intervalos constantes em um prazo curto. Em particular, os terminais de rede, i.e. os subs de comunicação e furo de poço são requeridos a aderir a repetições de UM segundo. Observando o padrão de pacote, cada repetidor aprende qual janela de tempo é requerida para receber, transmitir, e gastar o saldo de tempo no modo de dormir, com nenhum gasto de energia. A qualquer tempo, o terminal de transmissão precisa modificar a geração de dados, o terminal de transmissão temporariamente segura e guarda pacotes de mensagem. Esta não-correspondência entre o tráfego esperado e o tráfego efetivo, prepara o repetidor para reentrar no modo de escaneamento para aprender um novo padrão. Como o modo de Escaneamento demanda uma grande quantidade de energia, os terminais de rede sempre armazenam diversos pacotes para estabelecer uma taxa média de dados, e o padrão de repetição pode se manter constante em um período de tempo prolongado.

[122] BRA e MRA são cegos na direção efetiva de informação na medida que BRA e MRA repetem quaisquer dados de

entrada. Trata-se de uma característica da telemetria de furo de poço a existência de um fluxo de dados contínuo dos sensores de furo de poço para a superfície, enquanto, apenas em caráter esporádico, as informações de controle precisam ser baixadas para controlar os parâmetros de furação. É vantajoso usar este sistema de telemetria em modo meio-duplex, onde, na maior parte do tempo, a capacidade total da largura de banda é dada para o upload de dados de sensor. O terminal de telemetria no poço interrompe o fluxo de dados periodicamente, i.e. uma vez *per* minuto, portanto, descarregando todos os dados da rede em cerca de 3 segundos, e fazendo todos repetidores passarem para o modo de escaneamento. Os repetidores então são escorvados para aceitar dados de download até preencher toda a largura de banda de telemetria. O modo de download é terminado por outra sequência pára/ excita/ escaneia, (stop/ flush/ scan), agora iniciada a partir da superfície.

[123] A operação de excitação (flushing) periódica de rede também é prevista para deixar a rede se recuperar de uma repentina falha de hardware ou desligamento de software. A perda repentina de um repetidor, em geral, provoca a interrupção no padrão de temporização de pacote de mensagem, resultando na perda de pacotes na falha. Depois da excitação, todos repetidores escaneiam a janela de temporização de repetição de 1 segundo com respeito a pacotes de mensagem, que faz todos repetidores em contato com o repetidor defeituoso se fixarem nos padrão de tempo e sinais que emanam dos repetidores mais distantes. A reconfiguração da rede é automática, e a perda parcial potencial da comunicação é limitada a 1 minuto ou menos.

[124] A perda de transiente de um ou mais pacotes de dados faz as funções supervisoras de rede, contidas em cada terminal de rede, investigar a possibilidade de uma falha parcial de hardware, que precisa ser identificada, diagnosticada, e informada. Embora a prioridade seja restaurar o fluxo de dados no próximo nível de prioridade, os terminais de rede enviam pedidos de diagnóstico, aos quais os repetidores ativos respondem com respostas de status individuais. Se uma falha de hardware não-transiente ocorrer, os repetidores mais próximos à falha informarão um nível de intensidade de sinal recebido (RSSI) mais baixo que antes da falha. A queda pode ser pequena, dependendo da distância entre os repetidores ativos, local da falha, e condição de o sistema elétrico EMR restaurar o sinal no intervalo interveniente. No entanto, com base no acompanhamento periódico de todos valores RSSI no sistema, um processo que acomoda as mudanças graduais associadas à temperatura e outros efeitos deformantes, uma mudança de etapa não-contínua no RSSI, possivelmente acompanhada pela perda de um ou mais pacotes de mensagem, indica uma falha oculta no sistema. Com base nos valores ID dos repetidores com RSSIs diminuídos, o supervisor de rede, tipicamente, estreita as localizações de falha a uma-duas juntas de tubo. O equipamento de superfície memoriza os IDs, e como os repetidores identificados são vizinhos aos subs de comunicação de superfície durante a próxima operação de retirada do furo (POOH de Pull-Out Hole), sinaliza ao operador para separar estes suportes de tubo, até serem reparados.

[125] A detecção de repetidores defeituosos ou exauridos simplesmente envolve a enumeração de todos IDs de todos

repetidores no sistema. O pedido de diagnóstico atua como rolagem e determina os IDs de todos repetidores capazes de comunicação. Uma simples comparação com resultado da rolagem com a lista de repetidores conhecidos produz IDs, número, e localização dos repetidores desabilitados durante POOH.

[126] Outra característica do MRA é um gasto de uma quantidade muito baixa de energia dos repetidores não constituintes da rede ativa. Isto acontece quando juntas individuais ou segmentos de tubo parcialmente montados são armazenados para uso futuro. A ausência da fonte de dados BRA e MRA faz os repetidores cessarem a transmissão RF e entrarem no modo de espera. No modo de espera, um repetidor deixa o estado de dormência, de baixo consumo de energia, a cada 10 segundos para ativar o Front-End RF por 1 ms a cada 10 ms, para um período de tempo total de 1 s. Assim, um repetidor detecta a presença de um transmissor que gasta apenas 1% da energia requerida no modo de escaneamento total. Uma vez detectada a presença do transmissor, que, por sua vez, requer que a rede esteja conectada a pelo menos um terminal ativo emitindo dados, o modo de escaneamento determina o padrão requerido para o repetidor. A corrente média no modo de espera é 1% de 12 mA. Uma única célula de Lítio AAA pode suprir continuamente um repetidor no modo de espera por cerca de 170 dias. Durante a montagem do tubo, repetidores ativos saem do modo de espera e se ligam à rede ativa com atraso médio de cerca de 5 segundos.

[127] Uma modificação adicional no BRA ajusta a quantidade de redundância inerente ao sistema. O BRA, como mostrado, permite que um repetidor envie qualquer pacote

apenas uma vez, para evitar a proliferação de pacotes seguindo diferentes trajetórias na rede. Analisando o padrão de tráfego recebido e, em particular, o número de pacotes baixados, um ou ambos terminais de rede podem instruir a cadeia de repetidores a implementar uma redundância adicional, para superar um ambiente particularmente eletricamente ruidoso. Esta mudança é implementada por marcadores (flags) nos cabeçalhos das mensagens, que indicam a cada repetidor o número alvo de cópias idênticas de pacotes de mensagem no sistema. Estes terminais geram o número apropriado de pacotes de mensagem, i.e. geram cópias adicionais de mensagem, se o número de cópias for determinado muito baixo e baixam as cópias de mensagem, se o número for muito alto. Simplesmente seguindo o BRA, que determina o descarte de pacotes de mensagem não-reparáveis, qualquer repetidor pode recuperar a mensagem original, simplesmente aguardando a chegada de uma cópia idêntica. Se o número alvo de cópias de mensagem não for atendido, o repetidor avança para gerar duplicatas adicionais de pacote. Como estas duplicatas podem ser enviadas apenas durante os tempos livres, a quantidade de redundância de pacote impacta a geração alcançável de dados.

[128] Mesmo se o número alvo de pacote de mensagem for UM, i.e. não há duplicatas explícitas, duplicatas de mensagem são quase sempre disponíveis a partir de repetidores próximos e distantes. Portanto, é desejável que os repetidores fixem um padrão de transmissão distante-vizinho recebidos em níveis de potência baixa. Se estes sinais de nível baixo não forem confiáveis, evidenciado pela não-correspondência de CRC, o repetidor pode voltar para duplicatas de pacotes emitidos a

partir de vizinhos mais próximos.

[129] BRA e MRA, como descrito acima, assumem a presença de protocolos de alto nível, que implementam redundância suficiente de mensagem para recuperar dados na presença de ruído elétrico provenientes de alguns pacotes de mensagem baixados, devido a não-correspondência de CRC. Uma extensão útil do BRA é a implementação de correção de erro de encaminhamento FEC (de Forward Error Correction). Usando FEC, os pacotes de mensagem com extensão de N bits não são mais enviados em código direto, mas codificados com k bits adicionais, de modo que a informação correta possa ser recuperada com alta probabilidade, a partir de um trem de bits distorcido de $N + k$ bits - o chamado "código Raptor", como descrito em "Raptor Codes" de Shokrollahi, A, IEEE *Trans Information Theory*, vol 52, N° 6, de Junho 2006, pps 2551 a 2567, que se mostrou particularmente útil para a presente invenção. Os k bits adicionais podem ser computados em uma pequena MPU durante a transmissão de um pacote de mensagem, e a recuperação de dados a partir de mensagens corrompidas pode ser feita em tempo quase-real.

[130] Trata-se de uma característica dos códigos "Raptor", e sua família de códigos, o não conhecimento do código *a priori*. É vantajoso que o fluxo de dados seja analisado pelo sub de comunicação e sub de interface por um dado período de tempo, que, então, determinem um código adequado. Esta tabela de código é distribuído como mensagem "pura", i.e. sem ser codificada periodicamente para todos os repetidores, para subsequente uso nas etapas de codificação/decodificação.

[131] Na versão FEC do MRA, a MPU não necessariamente

descarta um pacote de mensagem que não passe no teste CRC. Ao invés, a MPU aguarda a chegada de outra cópia do mesmo pacote de mensagem, e se a cópia não for enviada ou for recebida igualmente defeituosa, a MRU avança e repara o pacote de mensagem corrompida disponível. O reparo é feito como operação de fundo, por conseguinte, sem interferir com o padrão de temporização de mensagem instruído e seguido pela MRA. O reparo compreende as etapas de decodificar a matéria útil (pay load), com base na tabela vigente de código, e a etapa de determinar se o texto original foi recuperado com sucesso (ou não), e pela recodificação da mensagem.

[132] Se a operação de reparo recuperar com sucesso os dados originais, a MPU reinsere o pacote reparado no fluxo de mensagem. A operação de reinserção consiste em atuar sobre um bit de alerta no cabeçalho da mensagem de um pacote regular repetido, e receber o pacote reparado depois do pacote regular. O bit de alerta faz os repetidores seguintes e todos os repetidores subsequentes a temporariamente desligarem MRA e BRA, assim pegando o pacote defeituoso. Obviamente, o envio da correção de erro permite que os pacotes de mensagem cheguem em qualquer ordem, o que requer um contador de sequência no cabeçalho da mensagem, para permitir que estação receptora monte o fluxo de dados, decodificando, reordenando, e mesclando os pacotes à medida que chegam.

[133] Deve ser entendido, por aqueles habilitados na técnica, que a presente invenção não se limita às particulares configurações descritas, outrossim, pretende cobrir modificações dentro do espírito e escopo da invenção, como definido pelas reivindicações anexas. Pretende-se, ademais, que todos tais aspectos da mesma sejam cobertos em

sua total abrangência pelas reivindicações anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de transmissão de sinal ou energia em furos de poço, para prover comunicação ou energia ao longo de uma coluna de componentes de furo de poço interconectados, caracterizado pelo fato de compreender:

- uma pluralidade de componentes de furo de poço, pelo menos um dos citados componentes de furo de poço compreendendo:

- uma primeira extremidade contendo um acoplador eletromagnético de pino (62), a citada primeira extremidade interconectando mecanicamente uma extremidade de um primeiro componente de furo de poço adjacente contendo um acoplador eletromagnético de caixa (61) e a citada primeira extremidade sendo eletromagneticamente acoplada a citada extremidade do citado primeiro componente de furo de poço adjacente através do citado acoplador eletromagnético de pino (62); e

- uma segunda extremidade contendo um acoplador eletromagnético de caixa (61), a citada segunda extremidade interconectando mecanicamente uma extremidade de um segundo componente de furo de poço adjacente contendo um acoplador eletromagnético de pino (62) e a citada segunda extremidade sendo eletromagneticamente acoplada a citada extremidade do citado segundo componente de furo de poço adjacente através do citado acoplador eletromagnético de caixa (61);

sendo os citados acopladores eletromagnéticos (61, 62) construídos a partir de materiais não-magnéticos e sendo que sinais e/ou energia são trocados entre os citados componentes de furo de poço pelo acoplamento ressonante eletromagnético do dito acoplamento ressonante eletromagnético ocorrendo em uma frequência dentro de bandas VHF ou UHF entre 30 MHz e 3

GHZ.

2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de adicionalmente compreender pelo menos um repetidor de sinal (50), eletricamente acoplado ao acoplador eletromagnético de caixa (61) na citada segunda extremidade do citado componente de furo de poço, e eletromagneticamente acoplado à citada extremidade do citado segundo componente de furo de poço adjacente, sendo que o citado repetidor de sinal (50) é sintonizado aos citados sinais de alta-frequência.

3. Sistema, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de a segunda extremidade do citado componente de furo de poço alojar o citado repetidor de sinal (50).

4. Sistema, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de os citados componentes de furo de poço interconectados terem conexões rotativas e pelo menos algumas das citadas conexões rotativas serem adaptadas para aceitar pelo menos um repetidor de sinal (50).

5. Sistema, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de as citadas conexões rotativas serem do tipo aba dupla.

6. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de os citados sinais de alta-frequência incluir informações moduladas.

7. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de o citado acoplador eletromagnético de pino (62) e o citado acoplador eletromagnético de caixa (61), cada um deles compreender pelo menos uma antena substancialmente circular (71) colocada em uma ranhura (70) que é preenchida com material dielétrico não magnético (170).

8. Sistema, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado

pelo fato de pelo menos um dos citados repetidores de sinal (50) compreender um circuito sensor (200) incluindo um sensor (202), um sistema elétrico de condicionamento (204), um conversor analógico/digital (206), um processador (208), e um sistema elétrico de comutação de energia (210), sendo que o citado circuito sensor (200) é direcionado pelo citado pelo menos um dos citados repetidores de sinal (50) para tomar leituras de sensor e para comunicar dados do sensor.

9. Sistema, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de pelo menos um dos citados repetidores de sinal (50) compreender uma bobina de solenoide (250) de fio magnético, um magneto permanente (252) que é frouxamente suspenso na bobina de solenoide (250), de modo que possa se mover em relação à bobina de solenoide (250), à medida que a coluna de furação vibra na direção longitudinal, e daí induzindo uma voltagem na bobina de solenoide (250), um circuito de condicionamento de energia (254), que captura a voltagem induzida, e um capacitor de armazenamento (256), que armazena a energia induzida capturada.

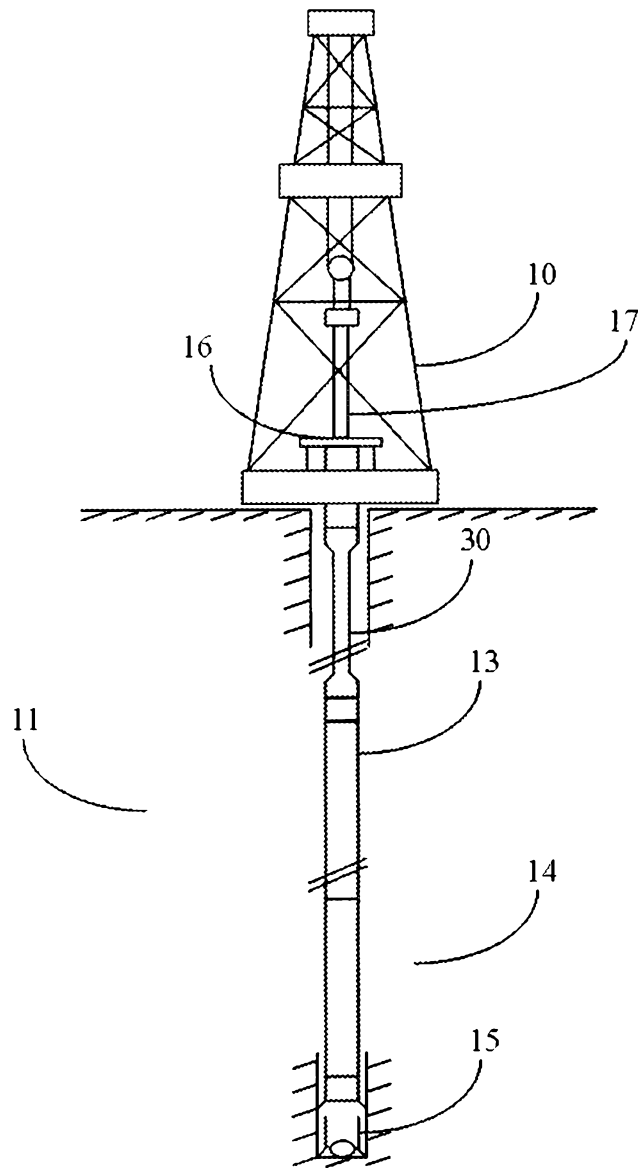


FIG.1
TÉCNICA ANTERIOR

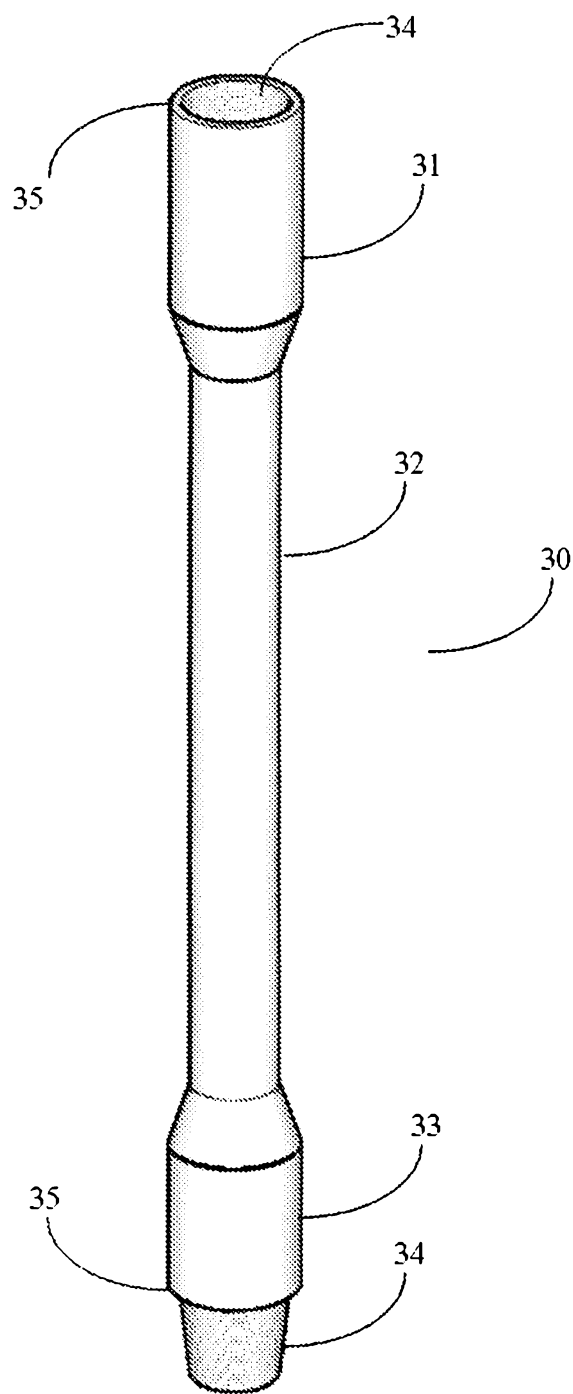


FIG.2
TÉCNICA ANTERIOR

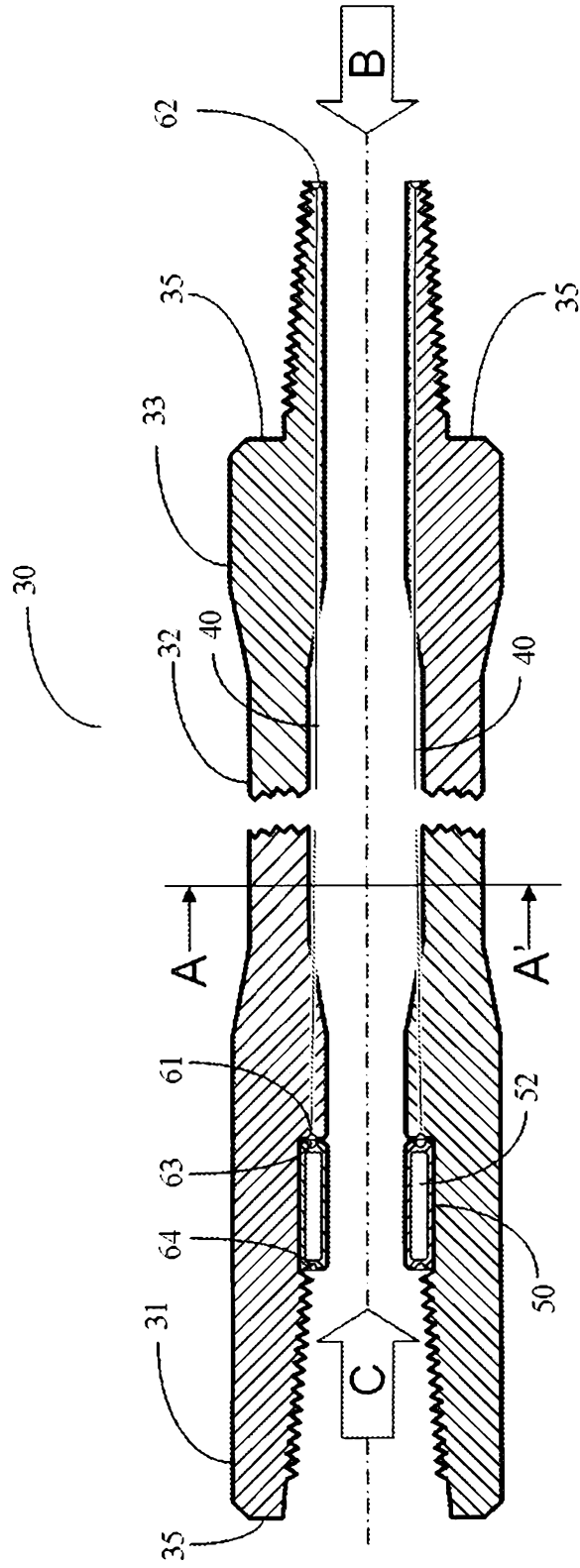


FIG.3

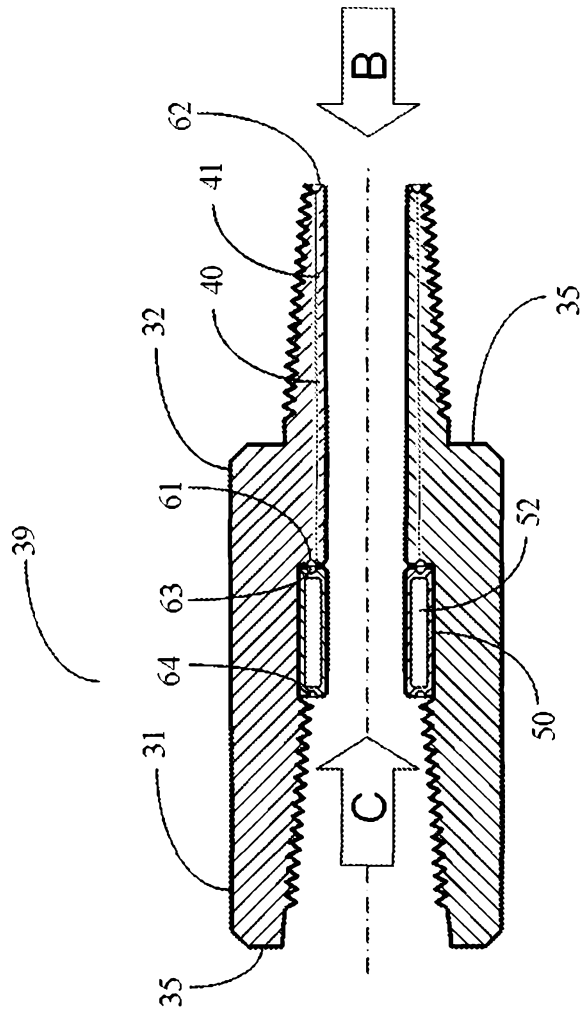
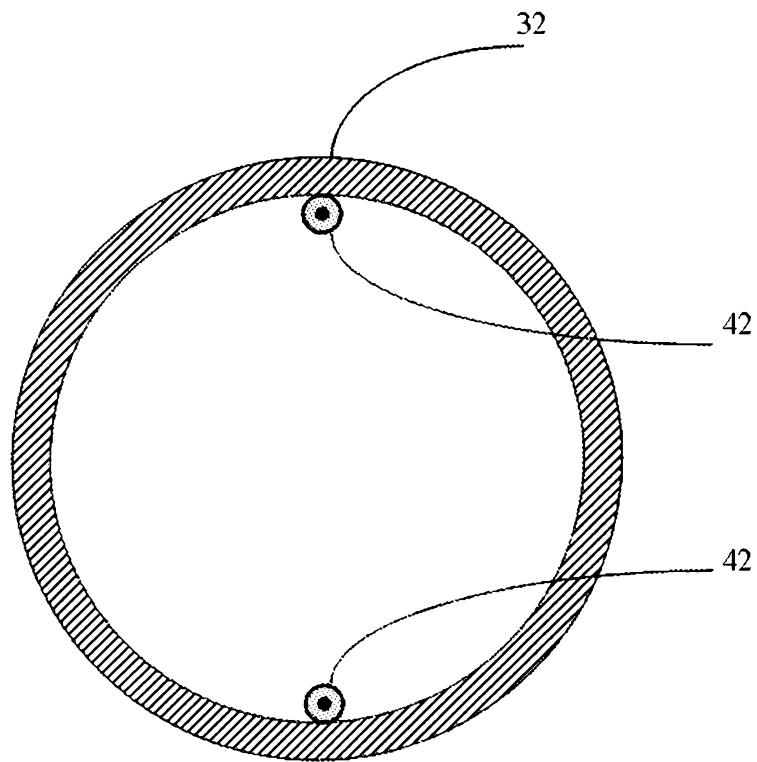


FIG.4

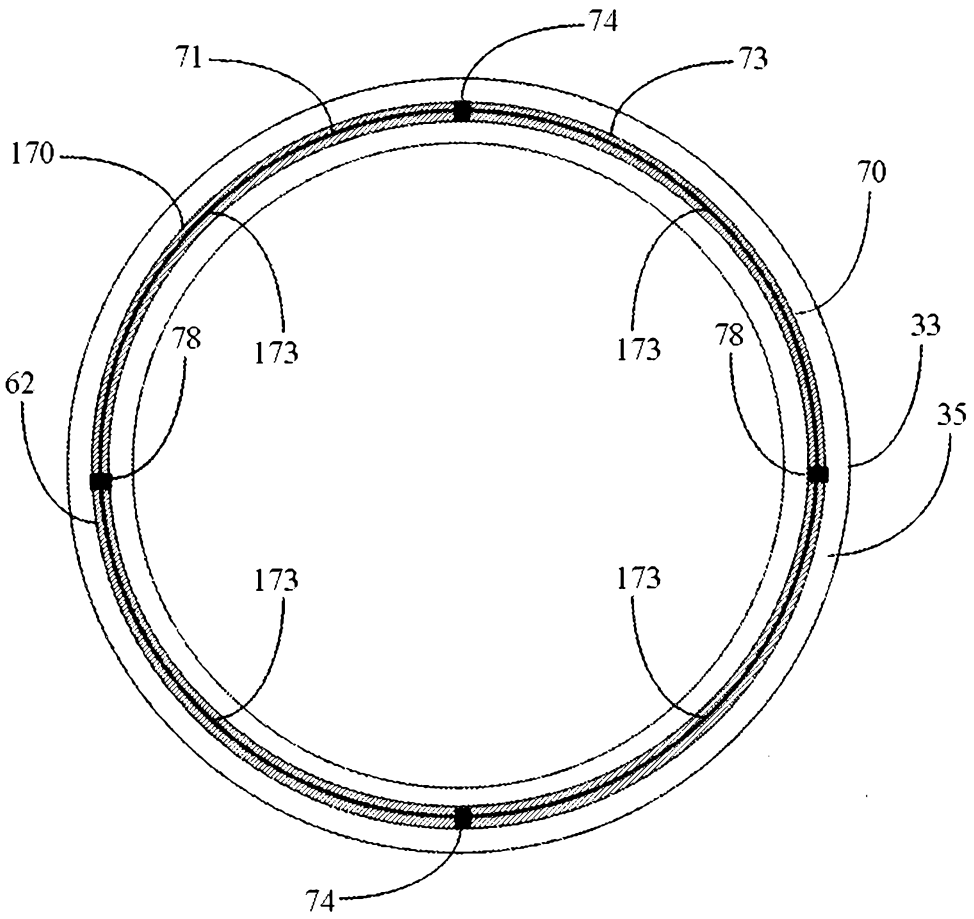
5/22



A-A'

FIG.5

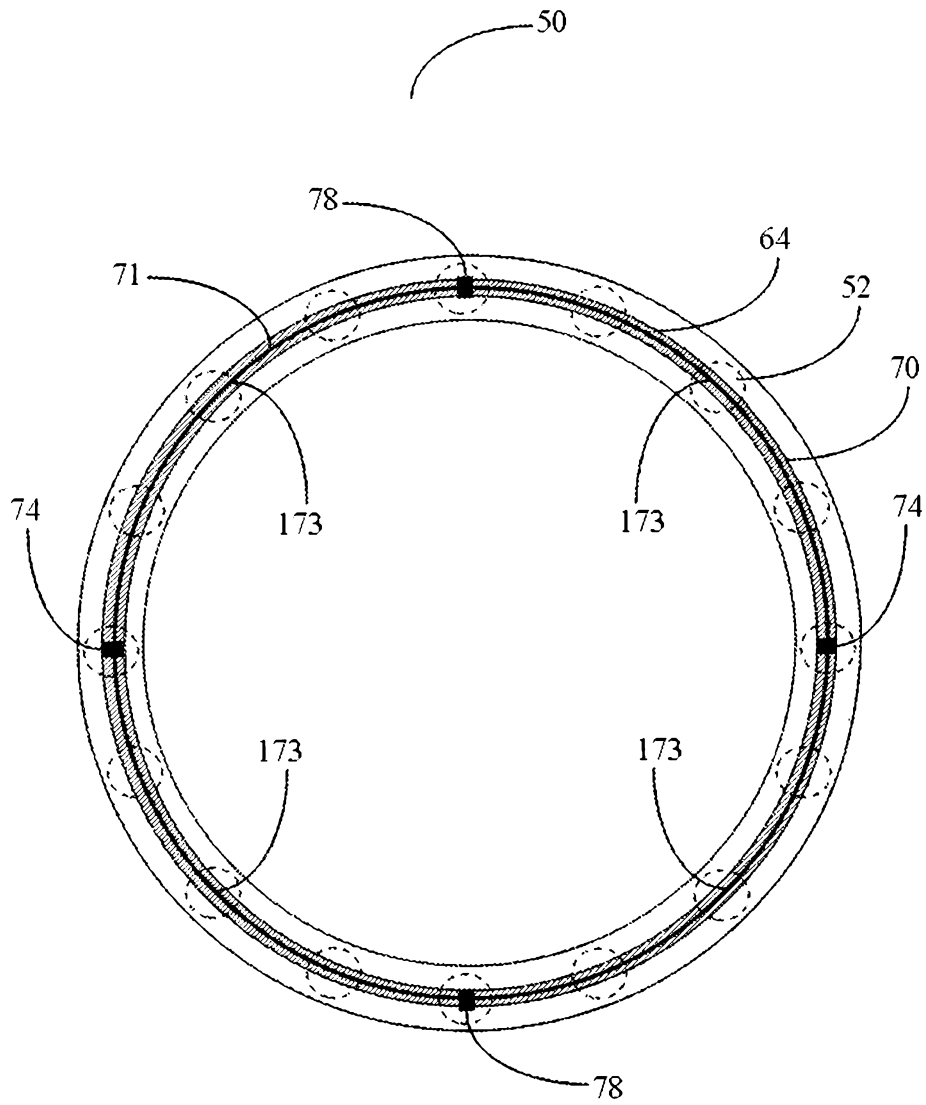
6/22



B

FIG.6

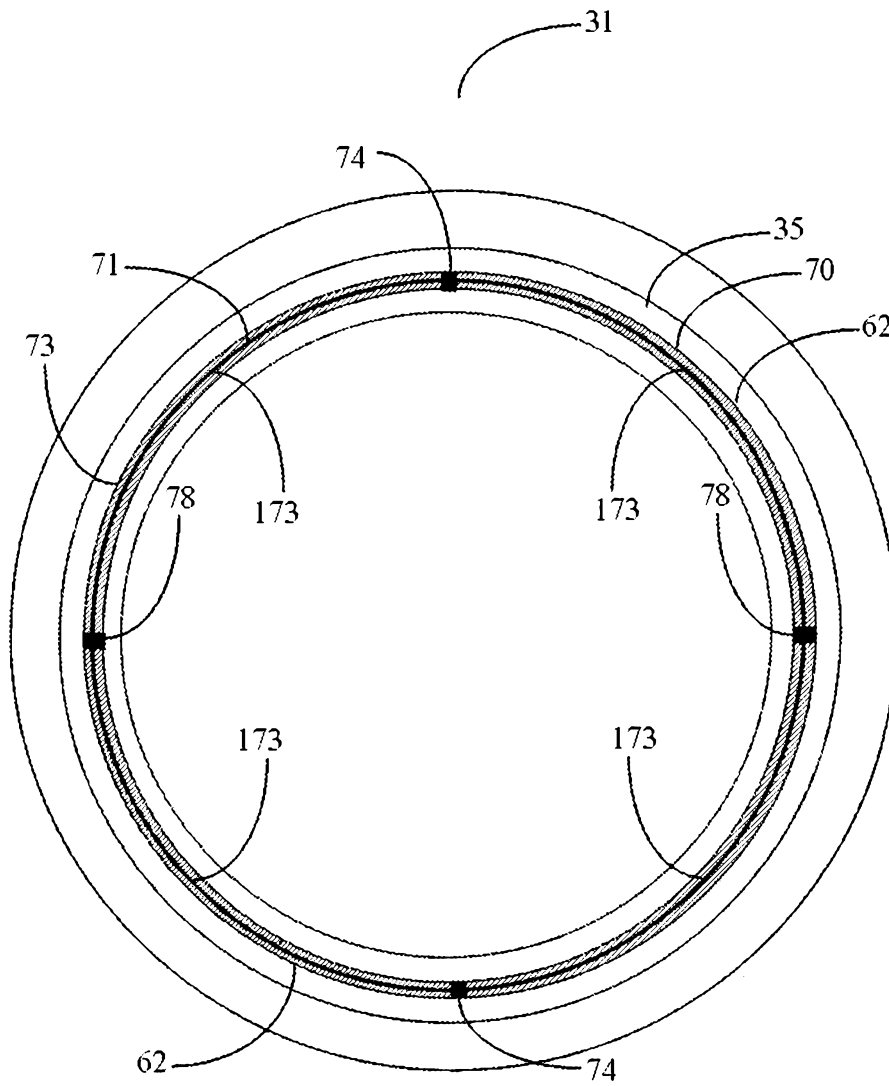
7/22



C

FIG.7

8/22



C

FIG.8

9/22

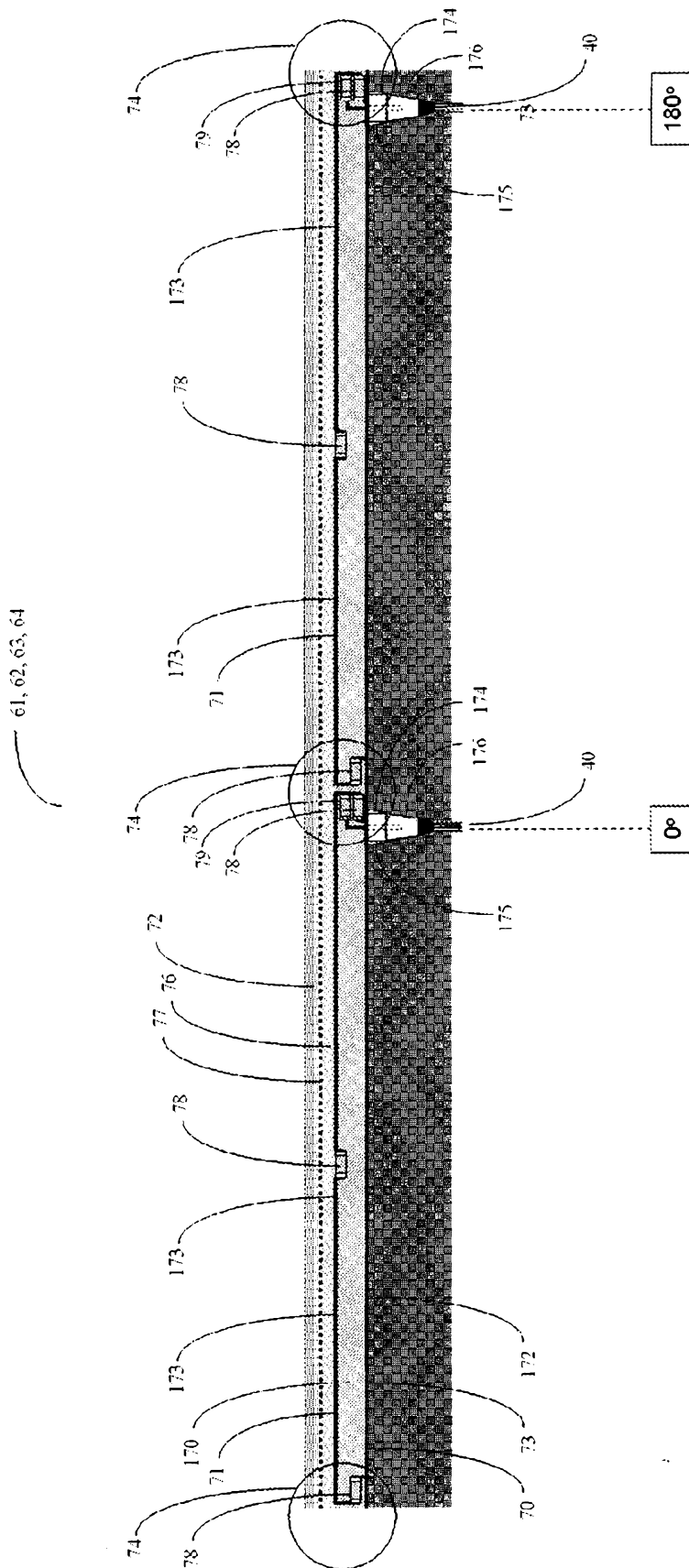


FIG.9

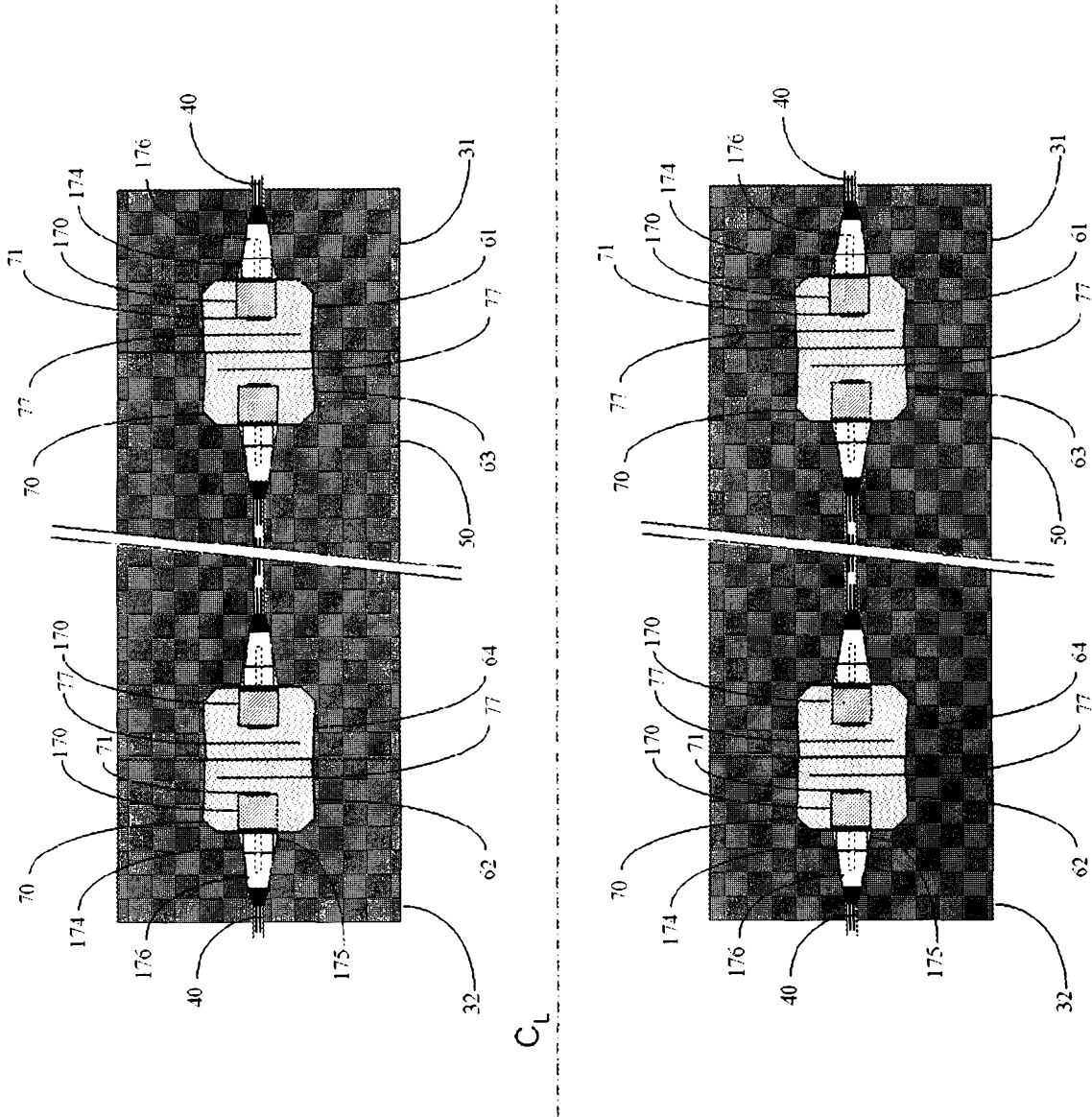


FIG.10

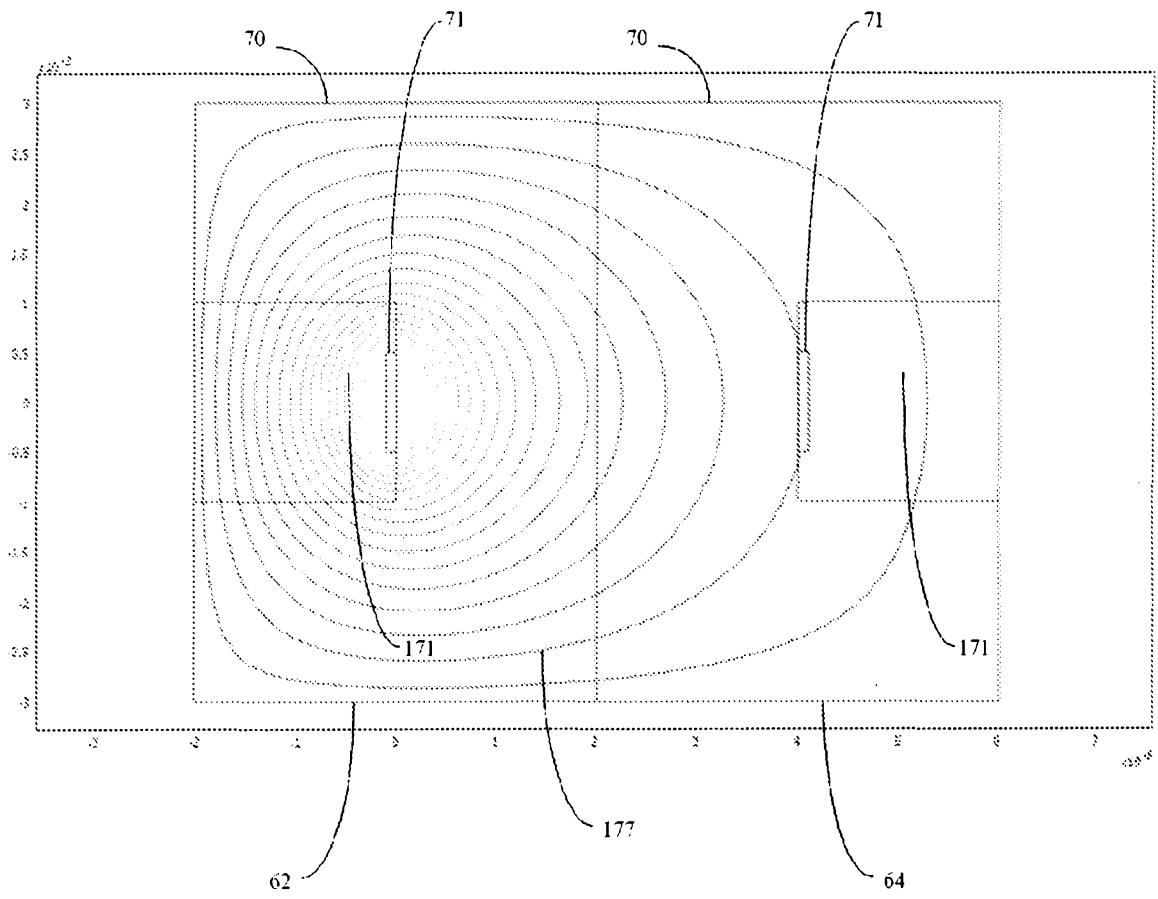


FIG.11

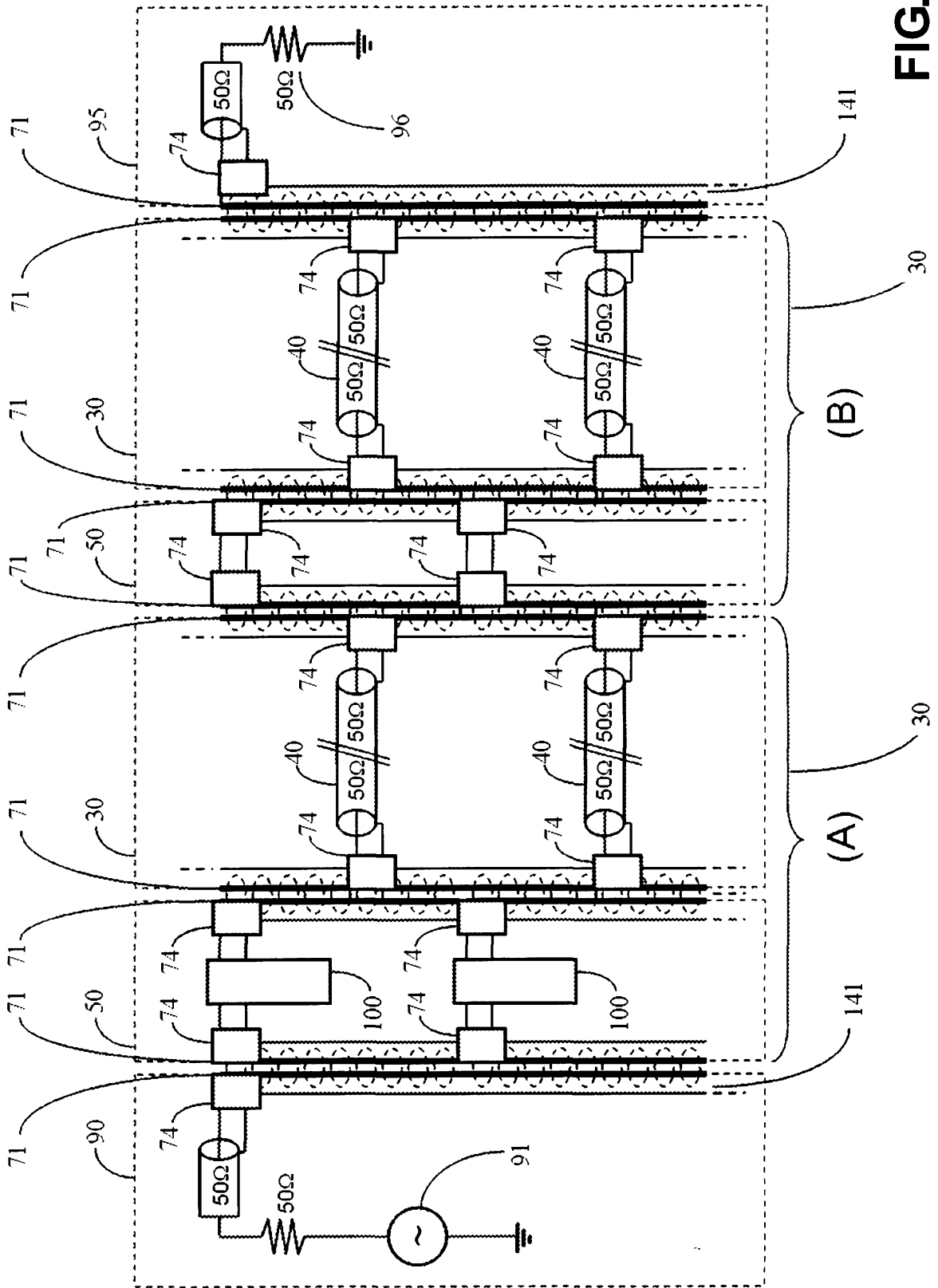


FIG.12

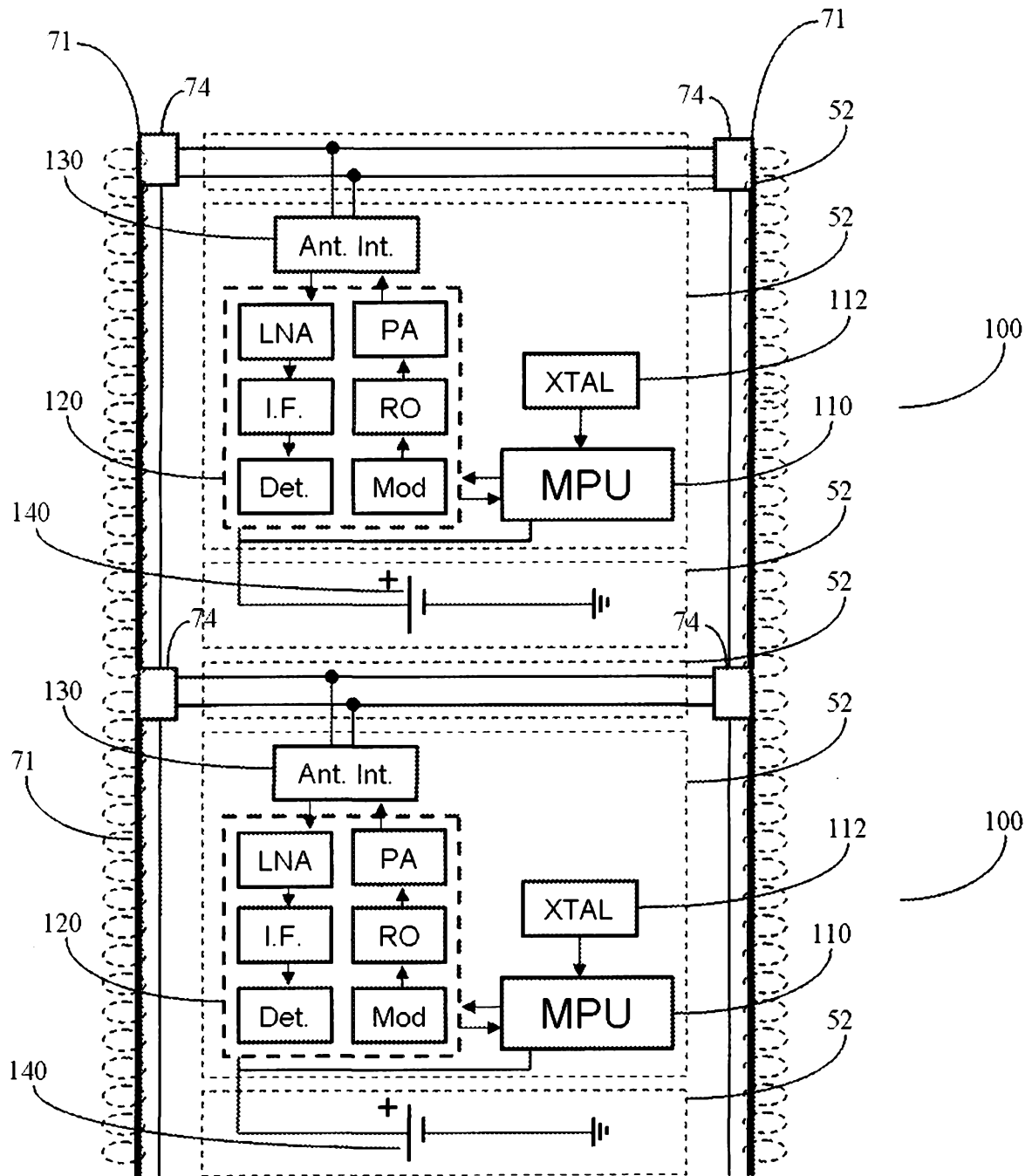


FIG.13

14/22

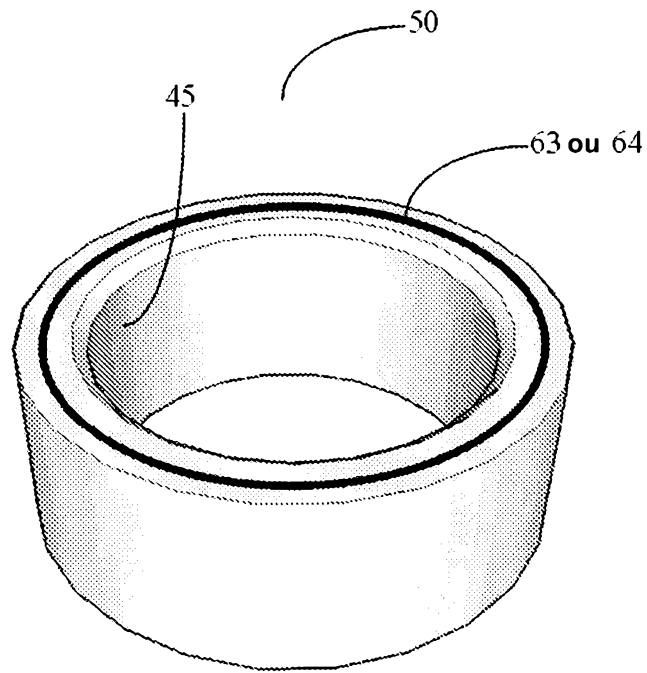


FIG.14

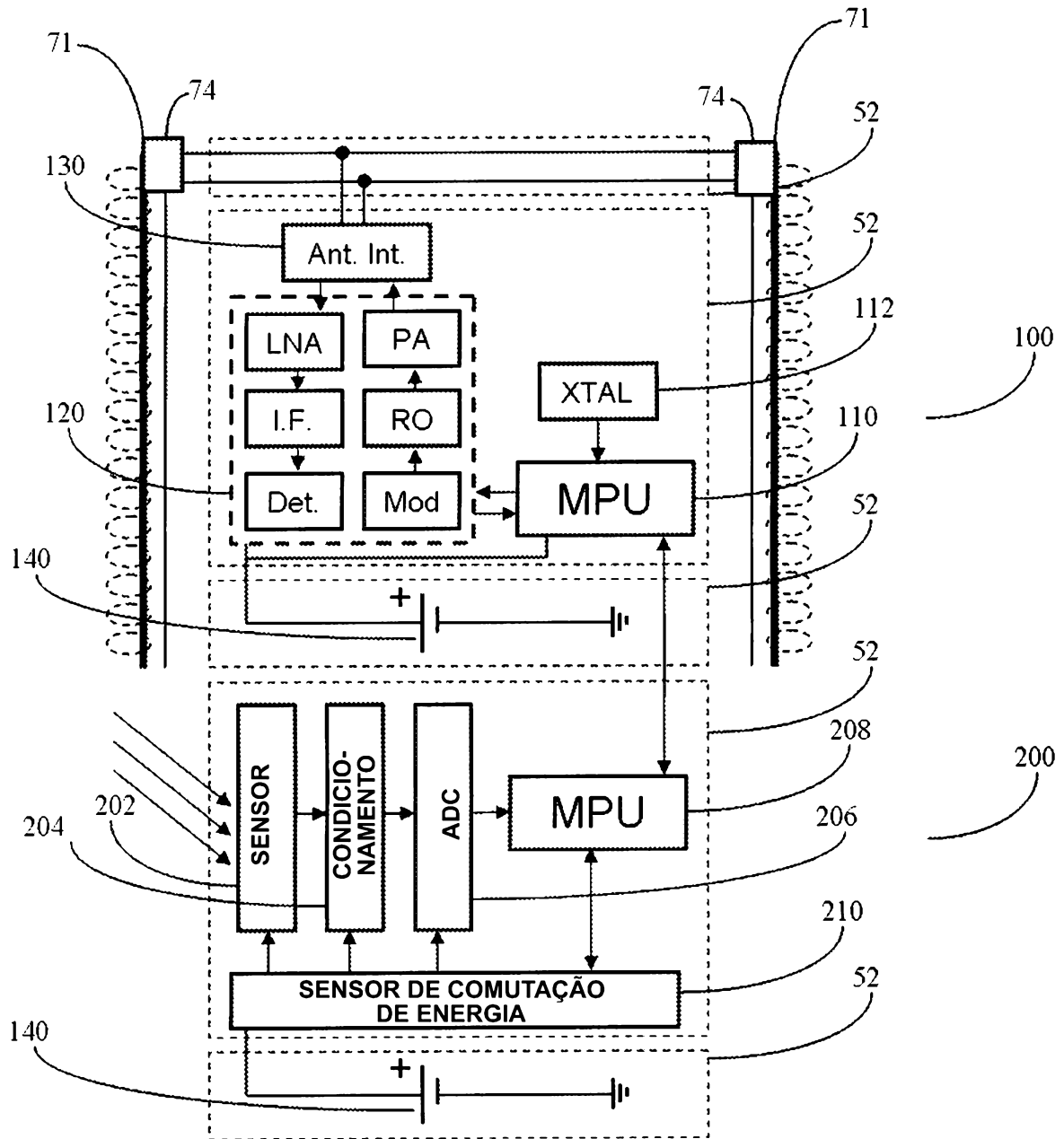


FIG.15

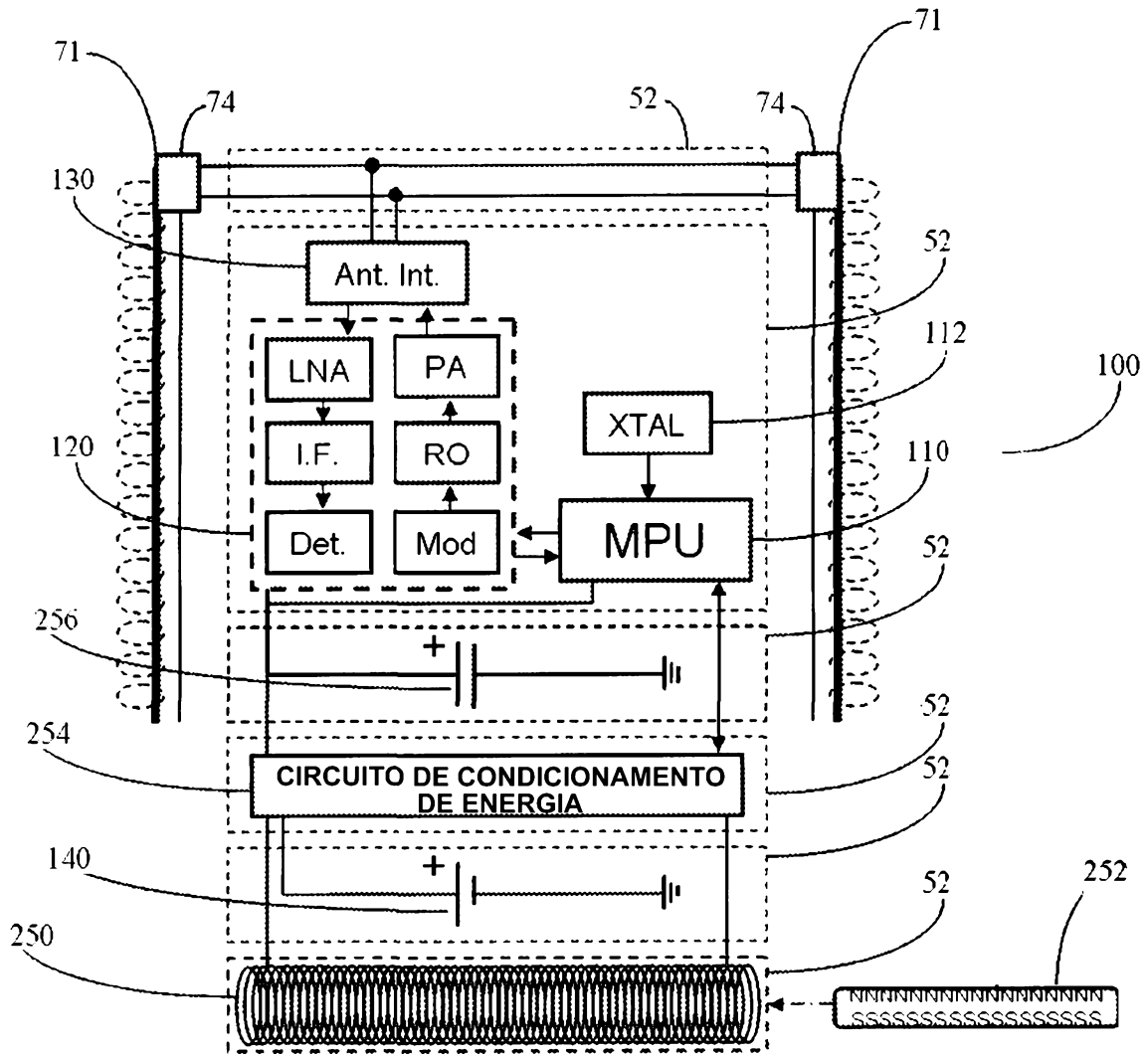


FIG.16

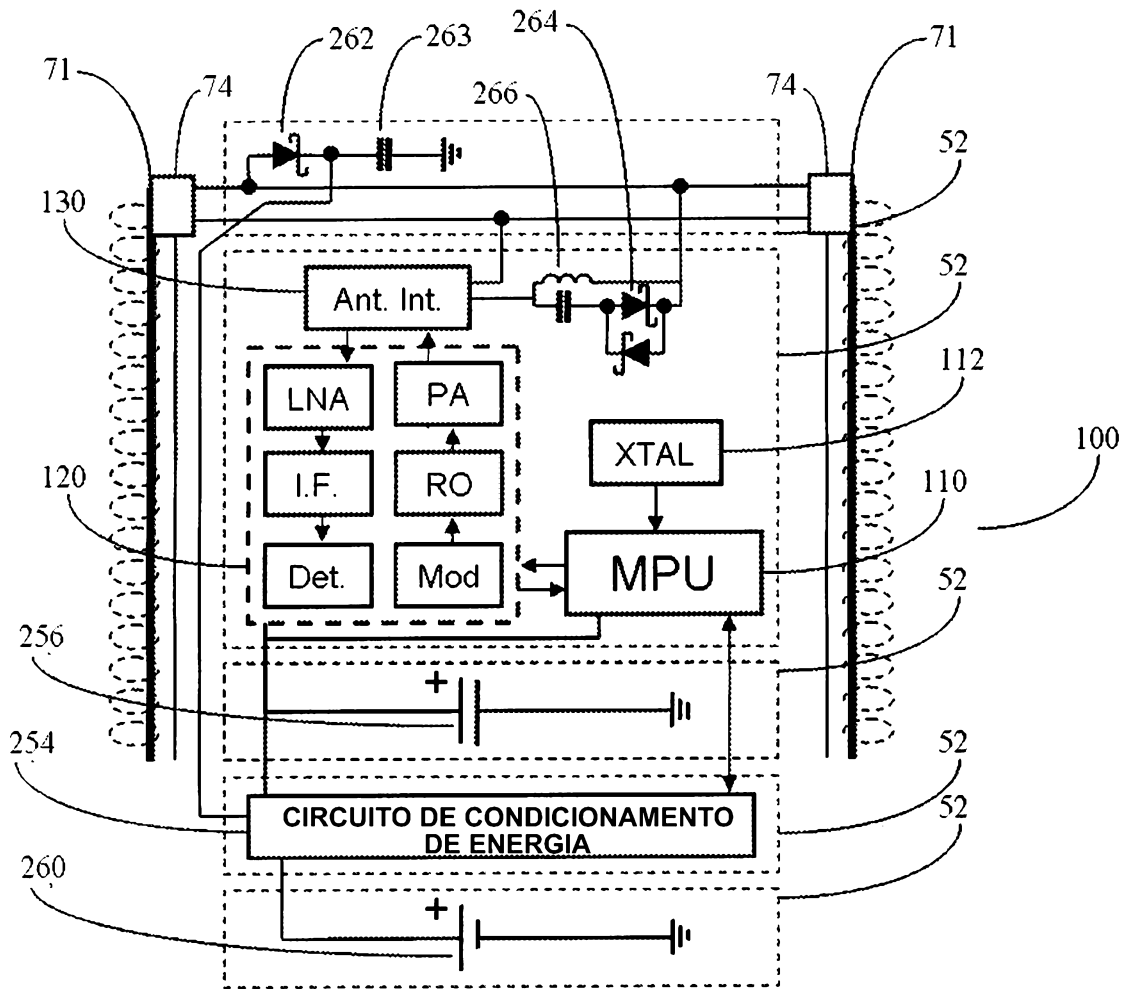


FIG.17

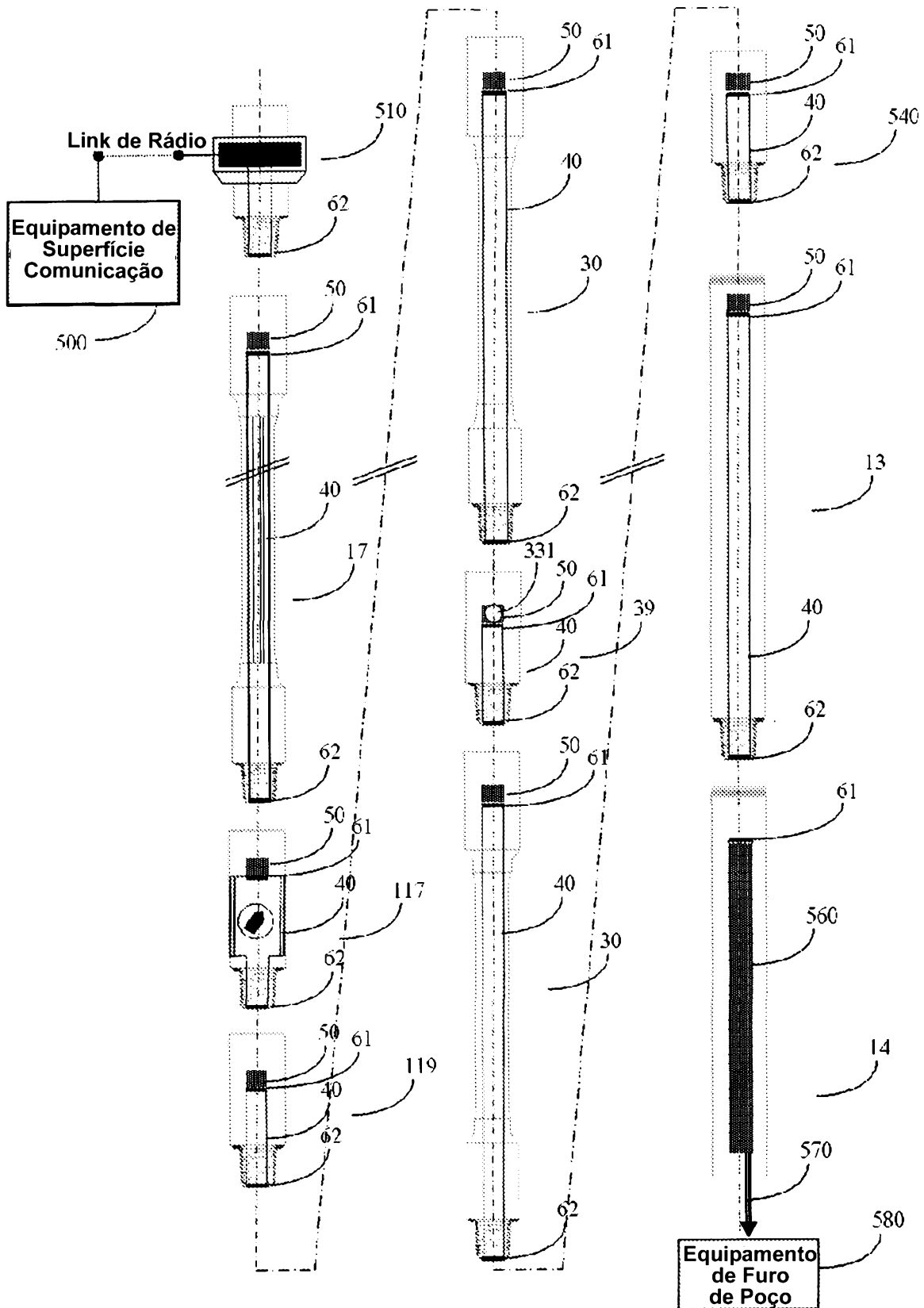


FIG.18

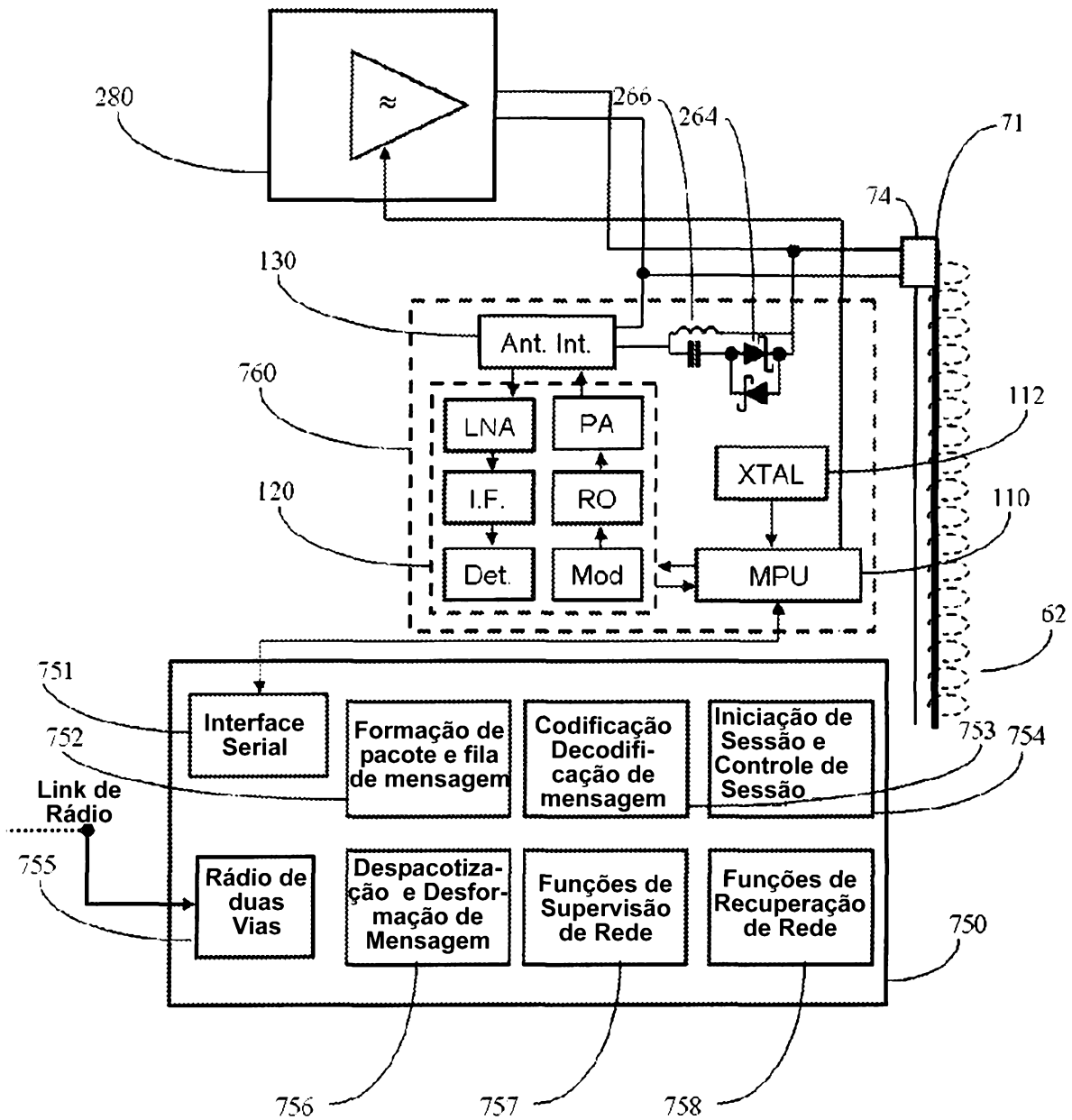


FIG.19

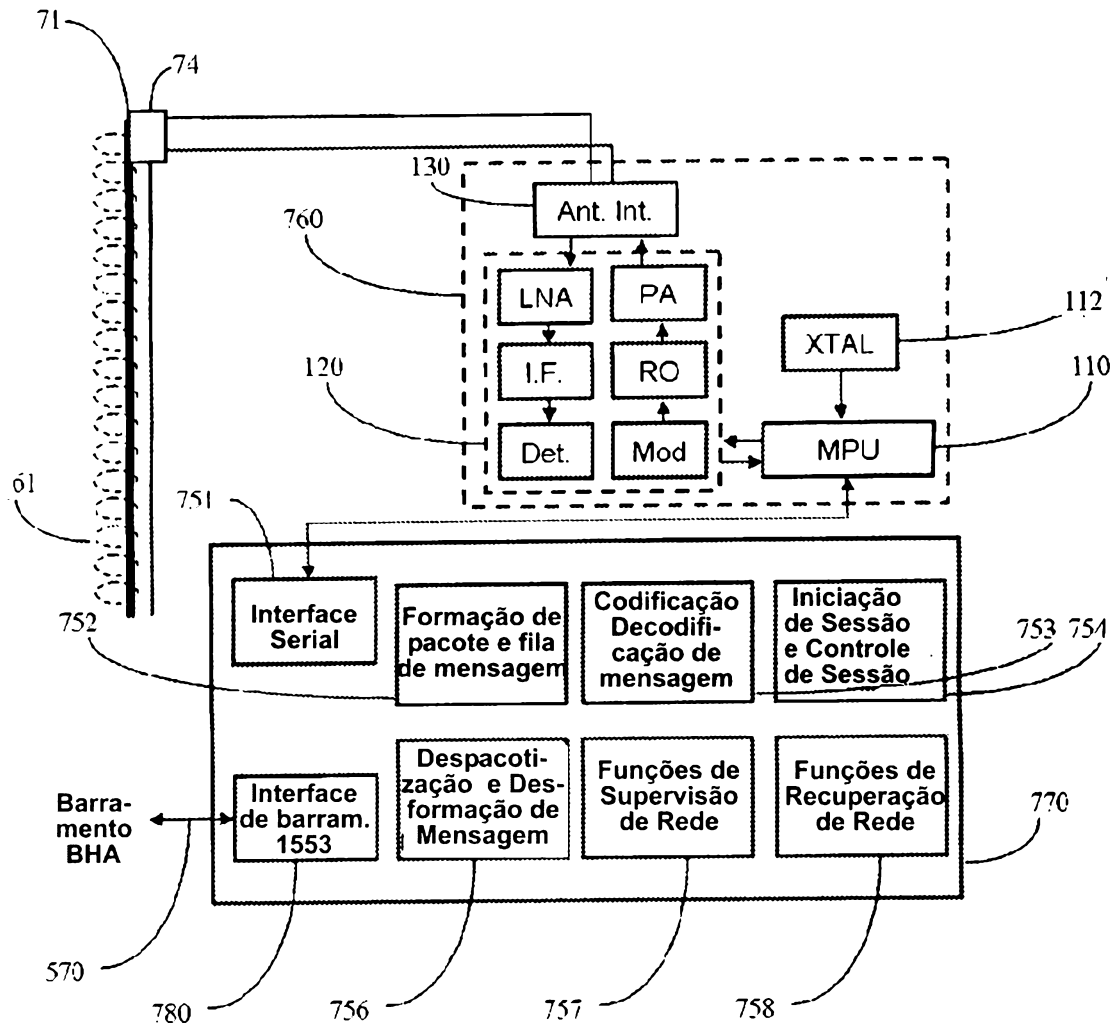


FIG.20

21/22

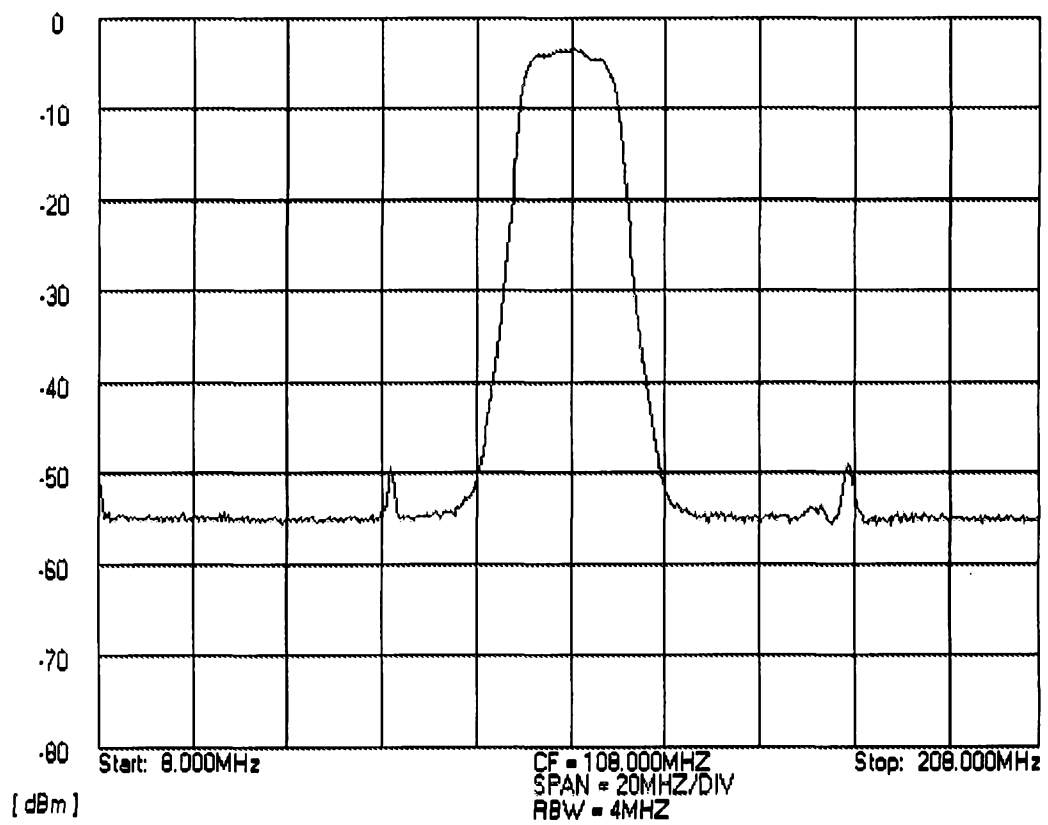


FIG.21

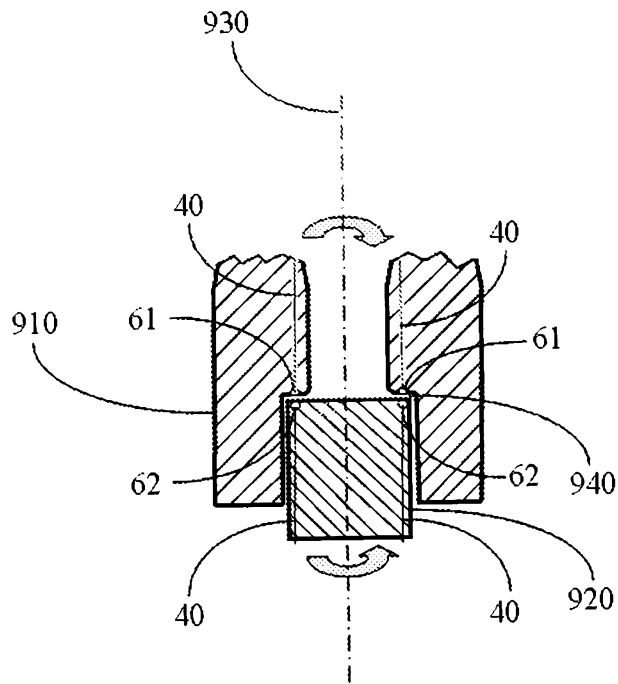


FIG.22