



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

(21) BR 102014012267-2 A2

(22) Data do Depósito: 21/05/2014

(43) Data da Publicação: 02/01/2018



\* B R 1 0 2 0 1 4 0 1 2 2 6 7 A

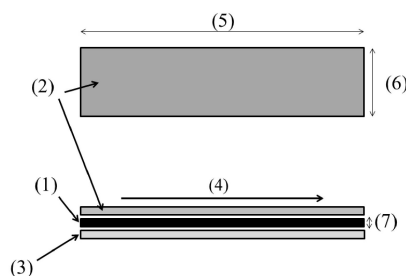
**(54) Título:** SISTEMA E MÉTODO PARA DETECÇÃO DE INGRESSO DE LÍQUIDOS E PERMEAÇÃO DE GASES ENTRE AS CAMADAS DE UMA TUBULAÇÃO OU CABO SUBMARINO FLEXÍVEL MULTICAMADAS, BASEADO EM SENSORES MAGNETOELÁSTICOS

**(51) Int. Cl.:** F17D 5/06; G01N 3/26; G01M 3/28

**(73) Titular(es):** THOMAS GABRIEL ROSAURO CLARKE

**(72) Inventor(es):** THOMAS GABRIEL ROSAURO CLARKE

**(57) Resumo:** Sistema e método para detecção de ingresso de líquidos e permeação de gases entre as camadas de uma tubulação ou cabo submarino flexível, baseado em sensores magnetoelásticos O sistema para detecção de ingresso de líquidos (alagamento) e permeação de gases (como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) por entre as camadas de uma tubulação (riser ou flowline) ou cabo (umbilical) submarino flexível multicamada, objeto da presente invenção, visa alertar os operadores de tais estruturas a respeito da existência de regiões em que estão presentes tais substâncias, que podem corroer e fragilizar o material, e eventualmente levá-lo à falhas. O sistema descrito tem como principais vantagens o fato de os sensores terem geometria em forma de uma fita de pequena espessura, que são ideais para inserção entre camadas da estrutura em questão. Além disto, o sensor opera remotamente, sem necessidade de nenhum tipo de cabo ou fibra para conectá-lo aos dispositivos de excitação e leitura ou aos módulos eletrônicos para operação destes. Os dispositivos de leitura podem operar com afastamento de dezenas de centímetros, inclusive por sobre camadas metálicas ou poli (...)



## **Sistema e método para detecção de ingresso de líquidos e permeação de gases entre as camadas de uma tubulação ou cabo submarino flexível, baseado em sensores magnetoelásticos**

### Campo da invenção

[1] A presente invenção destina-se à inspeção e monitoramento de tubulações ou cabos submarinos flexíveis multicamadas, que podem estar posicionados no leito do oceano ou em posição ascendente. O sistema baseia-se em arranjos de sensores de um material com propriedades magnetoelásticas, que possuem dimensões favoráveis à sua inserção entre as camadas da estrutura. Tais sensores podem detectar a permeação de gases ou de líquidos na sua região de instalação. Setor técnico: Instrumentos de teste para detecção de variações de propriedades físicas através de medições magnéticas de elementos vibratórios, aplicáveis à área de petróleo e gás

### Fundamentos da invenção

[2] Tubos e cabos submarinos flexíveis multicamadas são utilizados em larga escala na indústria petrolífera para transporte de produtos (no caso de tubos) ou de energia elétrica e gases comprimidos (no caso de cabos). Em comum, as duas estruturas possuem condutos internos e uma gama de camadas metálicas, poliméricas, ou de material compósito, que possuem diferentes finalidades, seja garantir a proteção externa, a resistência mecânica da estrutura, evitar a fricção excessiva entre camadas, garantir a estanqueidade interna e externa, etc. Esta invenção se aplica a qualquer estrutura desta espécie: cabos, que são convencionalmente chamados de “umbilicais”, ou tubulações, que são usualmente chamados de “risers”, quando em posição ascendente, ou “flowlines” quando posicionados no leito do oceano.

[3] O modo de falha destas estruturas geralmente se dá pela ruptura progressiva de arames que lhe conferem resistência à tração. Estes, estão presentes na estrutura em números variáveis, que são função do diâmetro da estrutura e dos carregamentos esperados, e que estão usualmente dispostos em forma de helicóide, ao redor do núcleo central longitudinal da estrutura, formando camadas que geralmente estão presentes em números pares. A disposição helicoidal dos arames em cada camada é

feita em direções alternadas, de maneira a garantir um balanceamento dos carregamentos. A falha destes arames, que podem ser metálicos ou de material compósito, geralmente ocorre por mecanismos de fadiga ou corrosão-fadiga nas seguintes condições: a) em regiões onde ocorrem transições bruscas de rigidez, que levam a grandes concentrações de tensões (como no caso dos conectores que acoplam a estrutura a uma unidade marítima flutuante); ou, b) quando água do mar adentra as camadas da estrutura, devido ao rasgamento ou perfuração de camadas poliméricas de vedação interna ou externa, e reage com gases prejudiciais à resistência mecânica de metais, como  $H_2S$  e  $CO_2$ , que permeiam as camadas poliméricas provindos do produto transportado em seu interior. Esta permeação de gases não é necessariamente causada por dano a alguma camada de vedação, e pode ocorrer também naturalmente, através de camadas poliméricas intactas. Apesar de não ser crítica para a resistência mecânica das camadas metálicas da estrutura, a detecção de outros gases, como  $CH_4$ , pode ser desejável, visto que podem indicar uma possível ruptura de uma camada de vedação. A quantificação da presença de gases também é importante, visto que pode diferenciar uma permeação de um vazamento, fornecendo uma indicação da severidade do problema. A presença de líquidos entre as camadas, como água do mar e petróleo, também pode ajudar a estimar o dano à estrutura. A presente invenção busca solucionar o problema da detecção de alagamentos por líquidos e permeação de gases com sensores sem fio, que possibilitam a inspeção e monitoramento de toda a estrutura.

[4] A ruptura de um número excessivo de arames de tração pode levar à perda da tubulação ou cabo, levando a altos riscos de acidentes com impactos ambientais e humanos, além de gerar paradas de produção onerosas. A importância destas estruturas para a exploração de petróleo off-shore é tão grande que muitas empresas começaram recentemente a exigir o uso de algum sistema de monitoramento em todos os risers de suas plataformas e unidades marítimas.

[5] Detalhes sobre estes tipos de estrutura podem ser encontrados nos documentos da American Petroleum Institute, API 17B (para tubulações flexíveis), e API 17E (para cabos submarinos flexíveis).

[6] No que diz respeito a sistemas de monitoramento de estruturas do referido tipo, a invenção registrada em US7,296,480 baseia-se em medidas de deformação com sensores instalados na região próxima ao conector que liga uma tubulação ascendente a uma unidade marítima flutuante, visando identificar movimentações torcionais excessivas, resultantes de rupturas de arames de tração; a correlação destas medidas com indicações provindas de sensores de pressão, distintos dos sensores de deformação, e instalados no próprio conector, que buscam detectar o vazamento de gases a partir do interior da tubulação, causados pela ruptura de camadas poliméricas de vedação por arames rompidos, consistiria um sistema de monitoramento e detecção de eventos de ruptura. No entanto, esta é uma solução aplicável somente à região próxima ao conector. Além disto visa detectar efeitos secundários ao rompimento de arames de tração, que podem não ocorrer imediatamente, ou por completo (a torção pode não ocorrer por efeitos de fricção e aderência entre as camadas).

[7] A presente invenção, relatada neste documento, por outro lado, busca detectar eventos que levam à fragilização da estrutura, como o ingresso de água do mar e outros produtos entre as camadas da estrutura (incluindo gases e líquidos), que, quando combinados, criam uma região de alto potencial de acidentes. Desta maneira, um alerta a respeito das regiões críticas é emitido antecipadamente, dando maior tempo para o planejamento de ações corretivas. Além disto, é uma solução aplicável à toda a estrutura, e não apenas à região próxima ao conector.

[8] Já o sistema proposto em US7,268,541, baseia-se em medidas magnéticas do material dos próprios arames de tração da estrutura, para inferir o nível das tensões aplicadas a estes. Em caso de ruptura de arames, há uma redistribuição de tensões na estrutura, que é mapeada por um conjunto de sensores, de instalação permanente, que é acoplado à superfície externa da tubulação. Seu acoplamento deve ser acima da zona de variação de maré, preferencialmente na região próxima ao conector. No entanto, sabe-se que tecnologias baseadas em medições magnéticas do material do arame vêm uma implementação prática complexa. Isto se deve principalmente ao fato de que o material dos arames de tração possui níveis e distribuições de tensões residuais (tensões internas) muito altas e variáveis ao longo do material, devido às suas propriedades mecânicas e aos seus processos de fabricação. Anular o efeito

destas tensões residuais e isolar o efeito das tensões aplicadas nos arames torna-se muito difícil, levando a uma relação sinal-ruído muito baixa, o que dificulta a identificação de eventos. Além disto, o sistema é de operação e manutenção dispendiosas, é de difícil instalação devido ao seu peso e tamanho, e é limitado ao monitoramento da região próxima ao conector.

[9] A presente invenção, relatada neste documento, por outro lado, busca utilizar sensores de um material de fácil magnetização, inseridos propositalmente na estrutura para viabilizar o seu monitoramento. Ao contrário do material dos arames de tração, este material, denominado *magnetoelástico*, devido às suas propriedades, responde de forma conhecida e controlada a estímulos magnéticos, sendo altamente sensível a variações físicas em seu entorno e em si próprio, com alta relação sinal-ruído e alta sensibilidade. Esta alta sensibilidade reduz as exigências sobre a eletrônica de operação, levando à necessidade de equipamentos de menor complexidade, e tamanho aceitável, tornando-se este um sistema mais simples e com menor demanda por manutenção. Além disto, como mencionado, a configuração sugerida permite que o sistema seja aplicável a toda a extensão da estrutura, e não apenas à região acessível da estrutura, próxima do conector e plataforma. A respeito de similaridades entre os efeitos explorados no documento US7,268,541 e os efeitos explorados no presente documento, é importante notar que estes são completamente distintos, apesar de ambos pertecerem à gigantesca área do eletromagnetismo.

[10] A invenção registrada em PI0801011-0 A2, baseia-se no uso de sensores do tipo redes de Bragg em fibras ópticas para medidas de deformação em arames de tração, com o objetivo de detectar rupturas pela redistribuição de tensões na estrutura. Estes são sensores pontuais, que fazem uma medida extremamente localizada, e que devem ser, portanto, acoplados individualmente sobre cada arame da estrutura, internamente ao conector entre a tubulação e a plataforma, a partir da exposição destes arames que é obrigatória durante a montagem do conector. No entanto: a eletrônica para leitura de um número tão grande de sensores é complexa e cara; a instalação de um número tão grande de sensores é manual, e extremamente trabalhosa; e a conexão dos sensores à eletrônica depende de cabeamentos, que são consituídos de fibras delicadas, que devem ser estendidas de dentro do conector para

fora, e então à eletrônica. Além disto, este sistema reivindica apenas a capacidade de detecção de deformações longitudinais da estrutura; como mencionado anteriormente, as deformações consequentes a um evento de ruptura podem não ocorrer de forma imediata, ou não ocorrer por completo, e a distribuição de tensões resultantes é, na maioria das vezes, imprevisível, levando a situações onde uma medida muito direcional pode não ser suficiente para confirmar uma ruptura.

[11] A presente invenção, relatada neste documento, por outro lado, pode operar com um baixo número de sensores, por estes serem sensores de área ao invés de sensores pontuais. O menor número de sensores torna sua instalação mais fácil. O fato dos sensores magnetoelásticos poderem ser instalados durante a fabricação da estrutura, em intervalos longitudinais pré-determinados, torna sua instalação totalmente automatizada. Como mencionado, a eletrônica de excitação é simples e barata. Além disto, uma importante característica dos sensores magnetoelásticos, a ser detalhada nas seções seguintes, é que estes são interrogados a partir de dispositivos remotos, que podem estar afastados dos sensores em algumas dezenas de centímetros, inclusive por sobre camadas poliméricas e metálicas, sem a necessidade de cabeamento entre os sensores e a eletrônica.

[12] A presente invenção baseia-se, portanto, no bem conhecido fenômeno da magnetoelasticidade. Este fenômeno faz parte dos fundamentos do eletromagnetismo, e assim como outros fenômenos de igual importância (a piezoelectricidade, por exemplo), sua aplicação dá lugar a uma variedade de sensores.

[13] Um exemplo é sua aplicação para medição de pressão ambiental, como registrado no documento US6,393,921, cujo funcionamento baseia-se na medida da deflexão de uma membrana sob variações de pressão, por um elemento magnetoelástico acoplado a esta. No entanto, a introdução deste sensor entre as camadas da estrutura considerada no presente documento não seria viável, por suas dimensões e por conta do contato entre as camadas, que impediria o funcionamento do dispositivo. A medição de pressão entre camadas da estrutura considerada aqui não é necessariamente crítica, e não é um dos objetivos do sistema a ser descrito no presente documento. O documento US6,393,921, citado acima, não revela nem sugere uma possível aplicação deste sensor para detecção seletiva de gases e líquidos

comuns à indústria do petróleo entre as camadas de tubulações e cabos submarinos flexíveis multicamadas.

[14] A invenção objeto do documento US2002/0153882 utiliza elementos magnetoelásticos para medidas de temperatura, tensão, e produtos corrosivos (como ácidos ou bases fortes). No entanto, novamente, o documento não revela nem sugere a aplicação destes sensores para detecção seletiva de permeação de gases e líquidos não reativos (como petróleo e água do mar) dentre as camadas da estrutura que é objeto do presente documento.

[15] O efeito magnetoelástico também foi explorado para detecção de agentes biológicos patogênicos (US2014120524) e agente bioquímicos (US2013318048), com o uso de camadas de detecção formadas por fármacos, que se ligam aos agentes biológicos seletivamente. No entanto, os sensores tem pouca relação com os descritos no presente documento, visto que são para aplicação específica em laboratórios, e os documentos mencionados não revelam nem sugerem como possíveis aplicações a detecção de gases e líquidos específicos, de importância para a indústria petrolífera, nas condições consideradas no presente documento.

[16] Dispositivos simples para medida de viscosidade de óleos em automóveis (US2011166802), e para medida de uma variedade de grandezas mecânicas, baseiam-se nos mesmos princípios eletromagnéticos fundamentais, que são amplamente conhecidos e descritos em diversos livros [1, 2]. No entanto, os documentos referidos não revelam nem sugerem nenhum tipo de possibilidade de uso dos sistemas registrados para detecção de presença de gases e líquidos selecionados, permeados entre as camadas de uma estrutura do tipo tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas.

[17] A patente US6171694 descreve um sistema de segurança de uso em larga escala que baseia-se no mesmo princípio que será exposto neste documento, o que é considerada uma evidência do baixo custo do sensor proposto. Este sistema baseia-se em um dispositivo formado por uma fita magnetoelástica e um ímã permanente, que possuem frequência de ressonância em 58 kHz. Quando um item contendo o dispositivo passa por sensores de excitação, operando exatamente a 58 kHz, que normalmente estão posicionados nas saídas da loja, este gera uma alta resposta por

ressonância, e ativa um alarme. Quando o produto tiver sido apresentado no caixa, e o cliente tiver pago pelo produto, o imã permanente é desmagnetizado, retirando a capacidade do dispositivo de entrar em ressonância. O documento US6171694 não revela nem sugere a possibilidade de aplicação de tais dispositivos para detecção de gases e líquidos. No entanto, o fato deste sistema ser utilizado em escala industrial, com consumo em massa, revela o baixo custo deste tipo de material magnetoelástico.

### Sumário da invenção

[18] O sistema para detecção de ingresso de líquidos (alagamento) e permeação de gases (como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) por entre as camadas de uma tubulação (riser ou flowline) ou cabo (umbilical) submarino flexível multicamada, objeto da presente invenção, visa alertar os operadores de tais estruturas a respeito da existência de regiões em que estão presentes tais substâncias, que podem corroer e fragilizar o material, e eventualmente levá-lo à falhas. O sistema compreende:

- a) um arranjo de sensores magnetoelásticos inserido entre, ou por sobre, as camadas da estrutura, e,
- b) dispositivos remotos de excitação e leitura da resposta dos sensores, com configuração na forma de sondas envoltórias ou superficiais, e,
- c) módulos eletrônicos para operação dos dispositivos de excitação e leitura da resposta dos sensores, capazes de gerar e amplificar sinais de excitação, e garantir a pré-amplificação, condicionamento, e registro dos dados de resposta.

[19] O sistema descrito tem como principais vantagens o fato de ter geometria em forma de uma fita de pequena espessura, que é ideal para inserção entre camadas da estrutura em questão, sem grandes impactos no seu processo fabril ou em sua operação. Além disto, o sensor opera remotamente, sem necessidade de nenhum tipo de cabo ou fibra para conectá-lo aos dispositivos de excitação e leitura ou aos módulos eletrônicos para operação destes. Os dispositivos de leitura podem operar com afastamento de dezenas de centímetros, inclusive por sobre camadas metálicas ou poliméricas, como é a estrutura em questão, possibilitando a leitura de sensores embebidos na estrutura. Os sensores, os dispositivos de excitação e leitura, e os módulos eletrônicos de operação, são baratos, robustos, e simples, tornando esta uma solução competitiva para a inspeção e monitoramento destas estruturas.



### Breve descrição dos desenhos

[20] As características dos sistemas propostos de inspeção e monitoramento da integridade estrutural de tubulações e cabos submarinos flexíveis multicamadas são mais facilmente descritos e detalhados com o auxílio dos desenhos em anexo, apresentados a mero título de exemplo, que fazem parte do presente documento.

[21] A Figura 1 mostra a configuração de um sensor magnetoelástico com imã permanente posicionado junto à tira de material magnetoelástico. A figura mostra também uma camada de detecção, que é aplicada à superfície do elemento magnetoelástico, ou formada nesta superfície por um processo de modificação superficial do material, que possui microestrutura e compostos que reagem ou mudam de propriedades quando em contato com gases ou líquidos, de forma seletiva ou indiscriminada.

[22] A Figura 2 mostra a configuração da invenção, onde arranjos de sensores magnetoelásticos, na forma de tiras retangulares de tamanhos iguais ou dissimilares, são inseridos no interior da estrutura, entre suas camadas, ao redor de sua circunferência. Dispositivos de excitação e leitura externos, envoltórios à estrutura, ou superficiais, são utilizados para interrogar os sensores e registrar sua resposta em frequência.

[23] A Figura 3 mostra a estrutura típica de uma tubulação submarina flexível multicamadas e do conector que acopla a estrutura a uma unidade marítima flutuante, e algumas possibilidades de posicionamento dos sensores (sem limitar o posicionamento destas a estas possibilidades).

[24] A Figura 4 ilustra a possibilidade de se posicionar tais arranjos de sensores periodicamente na direção longitudinal da estrutura. Cada sensor dos arranjos é responsável por fazer uma medida local de uma grandeza específica, sendo o foco desta invenção a detecção de presença de líquidos e/ou gases específicos. Alguns conjuntos de sensores do arranjo podem ser dedicados a prover uma numeração, ou indicação da posição longitudinal do arranjo em questão na estrutura, de maneira a facilitar a navegação de um sistema automático de leitura dos sensores.

[25] A Figura 5 mostra um desenho esquemático que resume três configurações possíveis para o sistema, que inclui combinações de três dispositivos de excitação e

leitura (um de geração de um campo magnético DC, um de geração de um campo magnético AC, e um de leitura). Esta figura mostra também a eletrônica de excitação e leitura de resposta dos sensores, e de posterior condicionamento, registro, e processamento dos dados.

#### Descrição detalhada da invenção

[26] Tubulações ou cabos submarinos flexíveis multicamadas estão sujeitos à deterioração e falha por mecanismos de fadiga e corrosão-fadiga. O modo de falha principal é a ruptura de arames das armaduras de tração da estrutura. Nestes casos, uma ruptura de um arame de tração pode levar ao rasgamento de camadas poliméricas, que garantem a estanqueidade da estrutura a gases ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) e produto interno líquido (misturas de petróleo, água do mar). Danos à capa externa devido à fricção, rasgamento, ou impacto, podem levar ao alagamento da estrutura, ou seja, o ingresso de água do mar, que, em contato com as camadas metálicas, e na presença de alguns destes gases, pode levar à falha prematura por mecanismos de corrosão-fadiga.

[27] O sistema proposto na presente invenção baseia-se em sensores magnetoelásticos, que são efetivamente sensores ressonantes, que mudam sua operação frente a alterações na massa, rigidez, atenuação, deformação, geometria, e condições de contorno, e que possibilitam detectar, dentre outras coisas, a presença de líquidos e gases. Além disto, os sensores utilizados no sistema proposto não necessitam de cabeamento, e podem ser operados à distância, remotamente, por dispositivos de excitação e leitura posicionados a dezenas de centímetros dos sensores. A operação dos sensores é garantida mesmo havendo camadas de material polimérico ou metálico entre os dispositivos de excitação e leitura e os sensores. O material usado para confecção dos sensores é extremamente barato, sendo utilizado em escala industrial em etiquetas anti-furto. A confecção dos dispositivos de excitação e leitura é simples e robusta, e a eletrônica de excitação é barata e simples, sendo constituída de, no máximo, três canais, que possibilitam a leitura de diversos sensores simultaneamente.

[28] Os sensores magnetoelásticos são tipicamente de uma liga metálica com alta magnetoelasticidade e alto acoplamento magnetoelástico (como exemplo, cita-se a liga comercial Metglas, utilizada em dispositivos anti-furto), o que significa que a liga responde mecanicamente, com alterações geométricas, a campos magnéticos impostos. Quando a frequência do campo magnético aplicado é igual à uma das frequências naturais do sensor, este entra em ressonância. Alterações de massa, rigidez, atenuação, condições de acoplamento, deformação, e dimensões do sensor, ou de seu entorno, causam uma modificação nas características de ressonância deste, permitindo uma correlação entre causa e efeito, e também a sua quantificação. Desta maneira, se o sensor estiver inserido dentre as camadas da estrutura, e esta sofrer ingresso de líquidos ou gases, tais meios poderiam ser detectados ao reagirem com, ou provocarem mudanças nas propriedades de, camadas de detecção presentes na superfície do elemento magnetoelástico. Tais reações ou mudanças nas propriedades destas camadas levam a alterações na massa, rigidez, e atenuação do sensor, o que causa um deslocamento na frequência de ressonância.

[29] Os sensores megnetoelásticos são geralmente utilizados na forma de fitas ou tiras retangulares de baixa espessura, onde as ressonâncias longitudinais ocorrem em frequências mais baixas e tem maior intensidade, e onde suas frequências de ressonância são dadas pela seguinte equação [3]:

$$f_n = \frac{n}{2C} \sqrt{\frac{E}{\rho_s(1 - \nu^2)}}, \quad n = 1,2,3, \dots \quad (1)$$

onde  $C$  é o comprimento da tira, que deve ser pelo menos 5 vezes maior que sua largura,  $n$  é o índice da frequência natural, e onde  $\rho_s$  é a densidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, e  $E$  é o módulo de elasticidade do material do sensor. A equação mostra que uma mudança na rigidez (módulo de elasticidade) ou densidade do sensor provoca uma alteração na frequência de ressonância. Se o sensor magnetoelástico possuir uma camada superficial, formando um sistema, a rigidez e a densidade globais do sistema serão uma combinação das propriedades de cada elemento. Se a rigidez ou a densidade da camada mudar, isto implicará em uma mudança da propriedade global, que pode ser medida.

[30] A Equação 1 também mostra que se forem considerados sensores com diferentes comprimentos  $C$ , estes terão frequências de ressonância diferentes. Portanto, ao se formar arranjos de sensores com diferentes comprimentos, pode-se fazer uma medida simultânea de vários sensores, e identificar a região onde ocorreu um evento, ao se avaliar qual frequência de ressonância sofreu alteração. A Equação 1 mostra também que se houver alteração em  $C$ , devido a uma deformação da fita, por exemplo, isto implicará em uma mudança em suas frequências de ressonância.

[31] A alteração da massa do sensor pode ser correlacionada com a variação na frequência de ressonância através da seguinte equação [4]:

$$\Delta f = -f_0 \frac{\Delta m}{2m_0} \quad (2)$$

onde  $\Delta f$  é a variação na frequência de ressonância,  $\Delta m$  é a variação na massa do sensor,  $f_0$  é a frequência de ressonância inicial, e  $m_0$  é a massa inicial do sensor.

[32] Alterações na viscosidade ou densidade do meio em que o sensor está presente causam um efeito de atenuação, que também leva a uma variação na frequência de ressonância e em suas características [4]:

$$\Delta f = \frac{\sqrt{\pi f_0}}{2\pi \rho_s d} \sqrt{\eta \rho_l} \quad (3)$$

onde  $\eta$  é a viscosidade do meio,  $\rho_l$  é a densidade do meio, e  $d$  é a espessura da fita magnetoelástica.

[33] As Equações 1-3 mostram que alterações de rigidez, massa, ou densidade e viscosidade do meio em que o sensor está inserido, levam a alterações quantificáveis nas suas características de ressonância. Portanto se houver uma mudança na rigidez ou massa do sistema formado pela fita magnetoelástica e pela camada de detecção (que foi aplicada à superfície da fita, ou gerada por modificação física ou química da superfície da fita), ou mesmo se houver contato simples do sensor com meio líquido viscoso (petróleo) ou não viscoso (água do mar), o sensor irá acusar uma mudança. O sensor pode ser usado não apenas para gerar alarmes, mas também para quantificar os eventos.

[34] Para correta operação, o sensor magnetoelástico deve ser excitado conjuntamente por um campo magnético DC, que orienta os domínios magnéticos do

material na direção desejada, causando uma expansão do material nesta direção, e um campo magnético AC, que promove uma expansão e contração do material em relação às dimensões iniciais conferidas pelo campo DC, que se alternam na mesma frequência que o campo AC.

[35] A Figura 1 mostra uma possível configuração para o sensor. A fita magnetoelástica (1), de dimensões comprimento ( $C$ ) (5) x largura ( $l$ ) (6) x espessura ( $d$ ) (7), é colocada diretamente em contato com um ímã permanente (3), que é responsável por aplicar o campo magnético constante (DC) (4) no sentido de  $C$  (5), não sendo relevante para o funcionamento do sistema a sua direção. Dimensões típicas das fitas são alguns milímetros em  $l$  (6), algumas dezenas de milímetros em  $C$  (5), e valores abaixo de um milímetro em  $d$  (7). Em trabalhos executados pelo inventor foi usada uma fita com dimensões  $C$  (5) x  $l$  (6) x  $d$  (7) de 30 mm x 6 mm x 0.6 mm, que possui sua primeira frequência de ressonância em 72 kHz. No mesmo trabalho foi utilizado um campo DC (4) de aproximadamente 5 Oe aplicado à fita magnetoelástica, o que lhe confere a maior amplitude de resposta mecânica possível quando um campo magnético AC é aplicado sobreposto a este. Sobre a superfície da fita magnetoelástica deve ser aplicada, ou produzida por modificação física ou química da superfície da fita, uma camada de detecção (2) que tem como finalidade reagir ou alterar suas propriedades quando em contato com gases ou líquidos, de forma seletiva ou indiscriminada. Exemplos de camadas utilizadas pelo inventor são óxidos depositados por vaporização, para detecção de líquidos, e compostos orgânicos, depositados manualmente na superfície previamente oxidada do material magnetoelástico (uma modificação físico-química da própria superfície deste material), para reação com gases. A área de avaliação de compostos deste tipo está em constante progresso em trabalhos realizados pelo inventor, e existem inúmeros outros compostos de possível aplicação como camada de detecção (2). Como demonstrado na Equação 3, no caso de necessidade de detecção apenas de líquidos viscosos ou não-viscosos, esta camada (2) pode ser eliminada, visto que a própria fita magnetoelástica irá mudar de comportamento por conta da mudança de viscosidade ou densidade do meio em que está embebida. Uma variação nesta configuração é a remoção do ímã permanente (3)

da região da tira magnetoelástica, e a geração de um campo magnético DC (4) a partir de um dispositivo apropriado posicionado no exterior da estrutura.

[36] A Figura 2 mostra o conceito de excitação dos sensores e leitura de sua resposta. Três configurações são possíveis, que serão são descritas individualmente, juntamente com a eletrônica necessária para sua operação, na Figura 5. Um dispositivo de excitação (7) é utilizado para aplicação de um campo magnético alternado (AC) nos sensores magnetoelásticos (10), que podem estar presentes de forma individual ou na forma de arranjos no interior da estrutura (11). O dispositivo (7) deve ser utilizado em todas as opções de configuração do sistema. O campo magnético AC gerado por (7), deve ser no mesmo sentido do campo magnético DC (4). O dispositivo (7) deve gerar sinais de entrada (27) que possibilitem uma análise de uma banda de frequências que compreenda todas as frequências de ressonância dos sensores (10), sendo algumas possibilidades: um pulso, uma varredura de senóides em frequências incrementais, ou uma varredura do tipo chirp (ou varredura de frequências similar). A figura mostra ainda um dispositivo de excitação externo à estrutura (8), que, conforme mencionado, pode substituir o uso de um ímã permanente (3) acoplado ao elemento magnetoelástico (1), cuja função é aplicar um campo DC (4) no sentido do comprimento  $C$  (5) dos sensores magnetoelásticos (10) que estão presentes de forma individual ou em forma de arranjo no interior da estrutura (11). O dispositivo de excitação de campo magnético DC (8) é constituído por uma ou mais sondas envoltórias ou, alternativamente, superficiais. Em algumas configurações é utilizado ainda um dispositivo específico para leitura da resposta dos sensores à excitação (9), que tem como finalidade ler um sinal de saída (28) no tempo, ou diretamente no domínio das frequências, caso seja utilizado um analisador de impedâncias ou de frequências. Caso a leitura seja no domínio do tempo, um simples processamento através de análises de Fourier pode gerar a resposta em frequência dos sensores. O dispositivo de leitura (9) é constituído por uma ou mais sondas envoltórias ou, alternativamente, superficiais.

[37] A Figura 3 mostra a estrutura típica de uma tubulação submarina flexível multicamadas (10), com destaque para as armaduras de tração da estrutura (12) e para a capa polimérica externa (13). A Figura mostra algumas configurações possíveis para a inserção de sensores magnetoelásticos (10) entre as camadas da estrutura. Os

sensores magnetoelásticos devem ser inseridos em número suficiente para garantir todas as medidas de interesse, e podem ter finalidades distintas (como por exemplo, detecção e medida da presença de diferentes gases e líquidos de interesse, ou numeração e localização do arranjo de sensores na estrutura), ou podem mesmo ser inseridos em redundância. Para identificar qual dos sensores sofreu alteração, e desta maneira identificar qual gás ou líquido está presente, e quantificá-lo, cada sensor deve ter dimensões diferentes (15), o que, de acordo com a Equação 1, irá lhe conferir uma frequência de ressonância particular e específica. Ao se detectar alterações a uma ou mais das frequências de ressonância, identifica-se qual sensor sofreu alteração. Os sensores devem ser distribuídos em orientações previamente selecionadas (16,17) com o objetivo de maximizar sua resposta a alguma grandeza a ser medida, e entre camadas selecionadas da estrutura (11), que lhe confirmam melhor acesso à região onde a análise é necessária. As dimensões dos sensores (10) possibilitam a sua inserção em todas as interfaces entre camadas da estrutura (11), inclusive por sobre a capa externa (13), independente de seu tipo ou material de constituição. Os sensores podem ser instalados também dentro do conector (23) que liga a estrutura a uma unidade marítima flutuante, durante a montagem do mesmo, ou em acessórios similares que permitam acesso direto a camada internas da estrutura (11).

[38] A Figura 4 mostra a possibilidade de se instalar arranjos de sensores magnetoelásticos (10) em espaçamentos regulares e periódicos na direção longitudinal da estrutura (11), onde o espaçamento entre os arranjos de sensores (18) deve ser selecionado em função da criticidade da detecção de gases e líquidos para sua operação. Uma configuração possível é o uso de um conjunto de dispositivos de excitação e leitura (19), operando em uma das configurações a serem detalhadas na descrição da Figura 5, que deve ser varrido no sentido longitudinal (19) a partir do exterior da estrutura (11), por sobre a sua capa externa (13), de maneira a obter dados a respeito da permeação de gases ou líquidos em toda a sua extensão da estrutura. Para realizar tal varredura deve-se utilizar um veículo de operação remota (ROV), ou veículo de operação autônoma (AOV), ou um equipamento automatizado que se acople à estrutura e a percorra com o uso de um mecanismo de propulsão adequado. Uma configuração alternativa, não demonstrada na figura, seria a de se acoplar, de forma

permanente ou removível, um conjunto de dispositivos de excitação e leitura estático, no lado externo da estrutura (11), por sobre a região de inserção dos arranjos de sensores (10). Esta solução é interessante principalmente para a extensão da estrutura entre o conector (23), que faz a ligação entre a estrutura e uma unidade marítima flutuante, e a zona de variação de maré (entrada da estrutura na água do mar).

[39] A Figura 5 mostra uma possibilidade de configuração para os dispositivos de excitação e leitura. Neste caso são utilizados todos os três dispositivos descritos para a Figura 2 (7, 8, 9). Um gerador de sinais arbitrários (20), que é capaz de gerar qualquer sinal ou sequência de sinais de interesse, é acoplado a um amplificador de potência (21) e então ao dispositivo de geração de campos magnéticos AC (7). Nesta configuração, considera-se que não há ímã permanente (3) acoplado junto à tira magnetoelástica (1), e portanto faz-se necessário o uso de um dispositivo de geração de campo magnético DC (8), que é conectado a uma fonte de corrente DC (22). Completando o conjunto de dispositivos de excitação e leitura, nesta configuração, utiliza-se um dispositivo de leitura independente (9), conectado a um condicionador de sinal (23), que extrai o parâmetro elétrico de interesse e, se necessário, aplica filtros de frequência. O sinal condicionado é então pré-amplificado (24) e transmitido (25) a uma unidade de registro e processamento de sinais (26). A transmissão de dados (25) deve ser selecionada em função da aplicação: no caso de leitura por ROV, AOV, ou sistema automatizado, uma eletrônica específica de transmissão de dados (26) torna-se menos relevante, visto que o mais prático é o armazenamento no próprio veículo de inspeção. Já na configuração onde os dispositivos de excitação e leitura estão posicionados de maneira permanente ou removível sobre a capa externa (13), na região de inserção dos arranjos de sensores (10), especialmente se posicionados na região entre o conector (23) e a zona de variação de maré, uma eletrônica de transmissão (25) sem fio, ou simplesmente por cabo, é mais indicada.

[40] Uma configuração alternativa, onde o dispositivo de excitação de um campo magnético DC (8) é eliminado, e utiliza-se um ímã permanente (3) acoplado junto à fita magnetoelástica (1) para impor tal campo magnético (4). Alternativamente ao uso do ímã permanente (3), o próprio dispositivo de geração de um campo magnético AC (7) pode gerar um campo magnético constituído de uma combinação (sobreposição) de



um campo DC com um AC. Com isto elimina-se a necessidade de qualquer dispositivo de geração de campos magnéticos DC (8), inclusive o imã permanente (3). O restante da operação é similar à primeira configuração descrita. Um gerador de sinais arbitrários (20), que é capaz de gerar qualquer sinal ou sequência de sinais de interesse, é acoplado a um amplificador de potência (21) e então ao dispositivo de geração de campos magnéticos AC (7). Completando o conjunto de dispositivos de excitação e leitura, nesta configuração, utiliza-se um dispositivo de leitura independente (9), conectado a um condicionador de sinal (23), que extrai o parâmetro elétrico de interesse e, se necessário, aplica filtros de frequência. O sinal condicionado é então pré-amplificado (24) e transmitido (25) a uma unidade de registro e processamento de sinais (26). A transmissão de dados (25), também nesta configuração, deve ser selecionada em função da aplicação.

[41] Uma terceira configuração para o sistema, onde apenas um dispositivo de excitação e leitura é utilizado, sendo que este dispositivo exerce ambas as funções. Neste caso, um imã permanente (3) deve ser acoplado junto à fita magnetoelástica (1) para imposição de um campo magnético DC (4), mas como na configuração anterior, alternativamente ao uso do imã permanente (3), é possível utilizar o próprio dispositivo de geração de um campo magnético AC (7) para gerar um campo magnético constituído de uma combinação (sobreposição) de um campo DC com um AC. Um gerador de sinais arbitrários (20), que é capaz de gerar qualquer sinal ou sequência de sinais de interesse, é acoplado a um amplificador de potência (21) e então ao dispositivo de geração de campos magnéticos AC (7). O próprio dispositivo de excitação (7) possibilita a leitura da resposta do arranjo de sensores (10), através da análise de variações em suas propriedades eletromagnéticas. Para coleta do sinal de leitura, o dispositivo (7) é conectado a um condicionador de sinal (23), que extrai o parâmetro elétrico de interesse e, se necessário, aplica filtros de frequência. O sinal condicionado é então pré-amplificado (24) e transmitido (25) a uma unidade de registro e processamento de sinais (26). A transmissão de dados (25), também nesta configuração, deve ser selecionada em função da aplicação.

[42] No caso de utilização de veículos de inspeção para viabilizar a varredura da estrutura, as informações coletadas pelo sistema podem ser armazenadas localmente,

para posterior avaliação por um operador, ou enviadas por sistema de transmissão a uma central localizada na própria unidade marítima flutuante ou em terra. No caso da utilização de dispositivos de excitação e leitura instalados de forma permanente ou removível sobre a capa externa da estrutura, na região de inserção dos sensores, as informações podem ser transmitidas diretamente a uma central em qualquer das duas localizações.

[43] As descrições que foram feitas até aqui do sistema de detecção de alagamento e permeação de gases em tubulações ou cabos submarinos flexíveis multicamadas, objeto da presente invenção, deve ser considerado apenas como possíveis concretizações, e quaisquer características particulares introduzidas nele devem ser entendidas apenas como algo que foi escrito para facilitar a sua compreensão. Desta forma, não podem de forma alguma ser consideradas como limitantes da invenção, a qual está limitada apenas pelo escopo das reivindicações que seguem.

#### Referências

- 1) Bozorth, R., Ferromagnetism, IEEE Magnetics Society, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- 2) Cullity, B.D., Introduction to Magnetic Materials, IEEE Press, John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- 3) Grimes, C.A., Roy, S.C., Rani, S., Cai, Q., Theory, Instrumentation and applications of magnetoelastic resonance sensors: a review, Sensors (Basel), 11, 2809-2844, 2011.
- 4) Grimes, C.A., Mungle, C.S., Zeng, K., Jain, M.K., Dreschel, W.R., Paulose, M., Ong, K.G., Wireless magnetoelastic resonance sensors: a critical review, Sensors (Basel), 2, 294-313, 2002.

## Reinvidicações

1. Sistema para detecção de ingresso de líquidos e permeação de gases entre as camadas de uma tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas, **caracterizado por** arranjos de sensores magnetoelásticos inseridos no interior da estrutura, cuja resposta em frequência é alterada frente a modificações nas características físicas e mecânicas do próprio sensor e de seu entorno, sistema este que compreende:
  - a) sensores com operação baseada no efeito magnetoelástico, acoplados às camadas internas ou externas da estrutura, na região a ser monitorada ou inspecionada
  - b) dispositivos de excitação e leitura dos sensores, operando com afastamento em relação aos sensores, sem necessidade de cabeamento, mesmo que existam camadas poliméricas, metálicas, cerâmicas, ou de material compósito, entre os dispositivos e os sensores
  - c) módulos eletrônicos para a operação dos dispositivos de excitação e leitura, e o registro, armazenamento, processamento, visualização, e interpretação dos dados coletados, visando caracterizar os sensores magnetoelásticos quanto à sua resposta em frequência
  - d) meio para transmitir os dados entre os módulos eletrônicos e os dispositivos de excitação e leitura
2. Sensores para detecção dos eventos descritos, e acoplados às regiões descritas, na reinvidicação 1, **caracterizados por** combinações dos seguintes constituintes:
  - a) um elemento de material magnetoelástico
  - b) uma camada de detecção acoplada à superfície do material magnetoelástico, que sofre alteração de suas propriedades quando em contato com gases e líquidos
  - c) um ímã permanente que impõe um campo magnético constante no elemento magnetoelástico

3. Sensores de acordo com a reivindicação 2, **caracterizados por** camadas de detecção obtidas com os seguintes métodos:
  - a) produzidas a partir de uma modificação física ou química da própria superfície do material magnetoelástico
  - b) depositadas na superfície do material magnetoelástico
4. Sistema de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** permitir também a quantificação da presença de líquidos e gases entre as camadas da referida estrutura através de variações na resposta em frequência de sensores magnetoelásticos
5. Sistema de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** sensores distribuídos nas seguintes configurações:
  - a) na forma de arranjos de sensores distribuídos circunferencialmente entre as camadas da referida estrutura, sendo que um arranjo pode ser constituído de apenas um sensor
  - b) na forma de arranjos de sensores distribuídos em espaçamentos longitudinais, ao longo da extensão da estrutura, sendo que um arranjo pode ser constituído de apenas um sensor
6. Sistema de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** utilizar arranjos constituídos de sensores com as seguintes formas de operação:
  - a) sensores que possuem uma mesma função, mas resposta em frequência distinta e característica, permitindo, desta maneira, a identificação de sensores individuais, e viabilizando uma medida localizada das condições da estrutura
  - b) sensores que possuem uma mesma função, e a mesma resposta em frequência, viabilizando uma medida global das condições da estrutura ou a obtenção de redundância de medidas
  - c) sensores que possuam funções individuais específicas, como a medida seletiva de grandezas mecânicas e físicas e a detecção seletiva de gases e líquidos, e que possam ser identificados e selecionados por suas diferentes respostas em frequência
  - d) sensores dedicados ao fornecimento de informações a respeito de sua posição na extensão longitudinal de uma tubulação ou

cabo submarino flexível multicamadas, facilitando desta maneira a navegação de veículos automatizados

7. Sistema de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** sensores magnetoelásticos acoplados nas seguintes configurações:
  - a) sobre a capa externa de uma tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas
  - b) sobre as camadas internas de uma tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas, a partir do acesso a estas camadas conferido por acessórios do tipo conectores, terminações, e dispositivos do tipo “olho mágico”
  - c) entre as camadas internas de uma tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas, durante a sua fabricação
8. Dispositivos mencionados na reivindicação 1, que permitam a excitação e leitura dos sensores, **caracterizados por** um dos seguintes modos de operação:
  - a) configuração na forma de conjuntos de sondas externas à estrutura, acoplados por sobre a capa externa da estrutura, na região de inserção do arranjo de sensores, sem movimentação destes conjuntos
  - b) configuração na forma de conjuntos de sondas externas à estrutura, deslocados por sobre a capa externa da estrutura por um veículo automatizado de inspeção
9. Dispositivos conforme a reivindicação 15, **caracterizados por** a excitação dos sensores, e a leitura dos dados de resposta destes, se darem em uma das seguintes configurações:
  - a) um único conjunto de sondas excita os sensores com um campo magnético AC, e a leitura da resposta dos sensores é feita apenas através da análise de variações nos parâmetros eletromagnéticos deste conjunto de sondas, e onde o campo magnético DC é aplicado ao elemento magnetoelástico por um ímã permanente posicionado junto a este
  - b) um conjunto de sondas excita os sensores com um campo magnético AC, e um segundo conjunto de sondas se dedica à leitura da resposta dos sensores, o campo magnético DC sendo,

- novamente nesta configuração, aplicado ao elemento magnetoelástico por um ímã permanente posicionado junto a este
- c) um conjunto de sondas excita os sensores com um campo magnético AC, um segundo conjunto de sondas é dedicado à leitura da resposta dos sensores, e um terceiro conjunto de sondas é responsável pela aplicação de um campo magnético DC nos sensores, dispensando, desta maneira, o uso de um ímã permanente posicionado junto ao elemento magnetoelástico
  - d) um único conjunto de sondas excita os sensores com um campo magnético AC sobreposto a um campo magnético DC, aplicado pelo mesmo conjunto de sondas, e a leitura da resposta dos sensores é feita apenas através da análise de variações nos parâmetros eletromagnéticos deste conjunto de sondas, dispensando, desta maneira, o uso de um ímã permanente posicionado junto ao elemento magnetoelástico

10. Módulos eletrônicos que cumprem as funções descritas na reivindicação

1, **caracterizados por** uma das seguintes configurações:

- a) situados inteiramente junto aos dispositivos de excitação e leitura
- b) módulos para armazenamento, processamento, visualização, e interpretação dos dados situados em local remoto, conectados por um sistema de transmissão de dados, a módulos de operação e registro dos dados, situados próximos aos dispositivos de excitação e leitura

11. Método para inspeção e monitoramento de uma tubulação ou cabo submarino multicamadas flexível, que utiliza o sistema da reivindicação

1, **caracterizado por**:

- a) aplicação de um campo magnético DC nos sensores magnetoelásticos
- b) aplicação de um campo magnético AC nos sensores, de frequência variável, por conjuntos de dispositivos dedicados externos à estrutura
- c) registro da resposta dos sensores aos campos magnéticos aplicados, e seu processamento, visando a detecção da frequência de ressonância dos sensores

- d) análise de variações na posição e banda de frequências de ressonância dos sensores, de modo a determinar alterações no comportamento de ressonância destes, que indiquem a ocorrência de fenômenos, como a presença de gases ou líquidos permeados entre as camadas de uma tubulação ou cabo submarino flexível multicamadas
- e) transmissão das informações geradas pelo sistema a uma unidade central de monitoramento, situada na própria unidade marítima flutuante ou em terra

**Figuras**

Figura 1

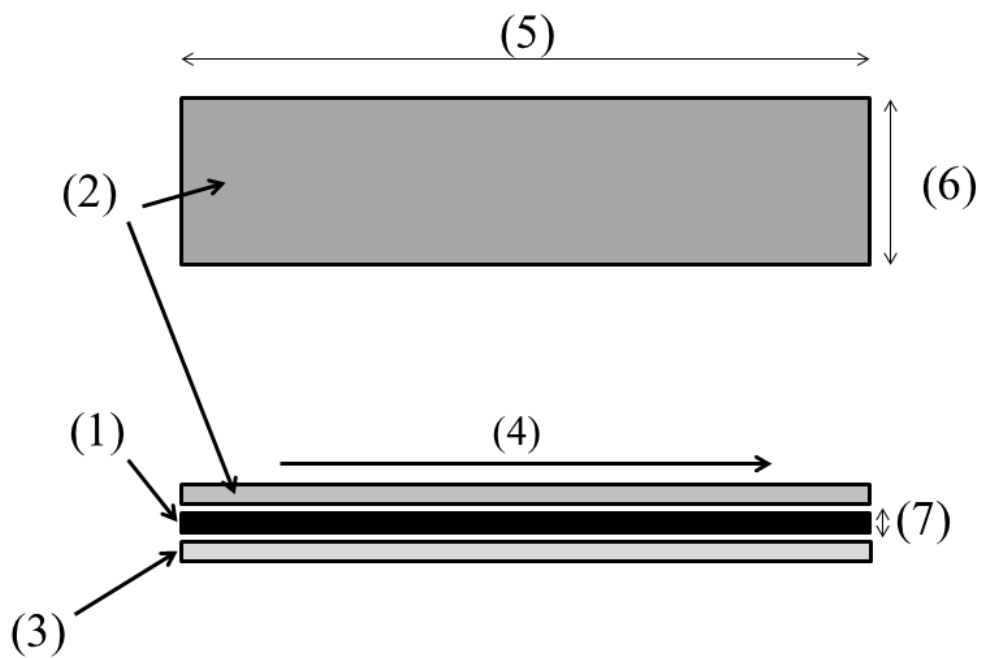




Figura 2

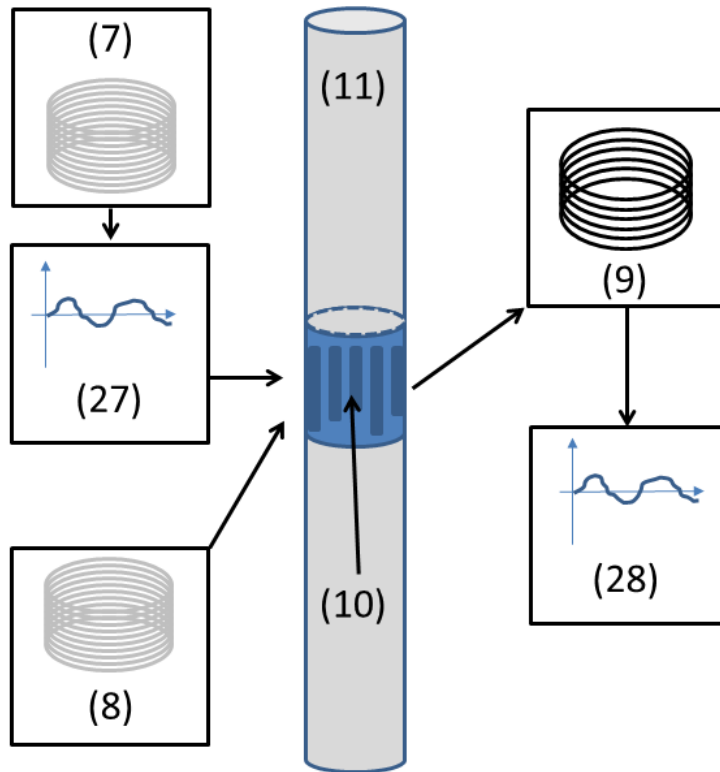


Figura 3

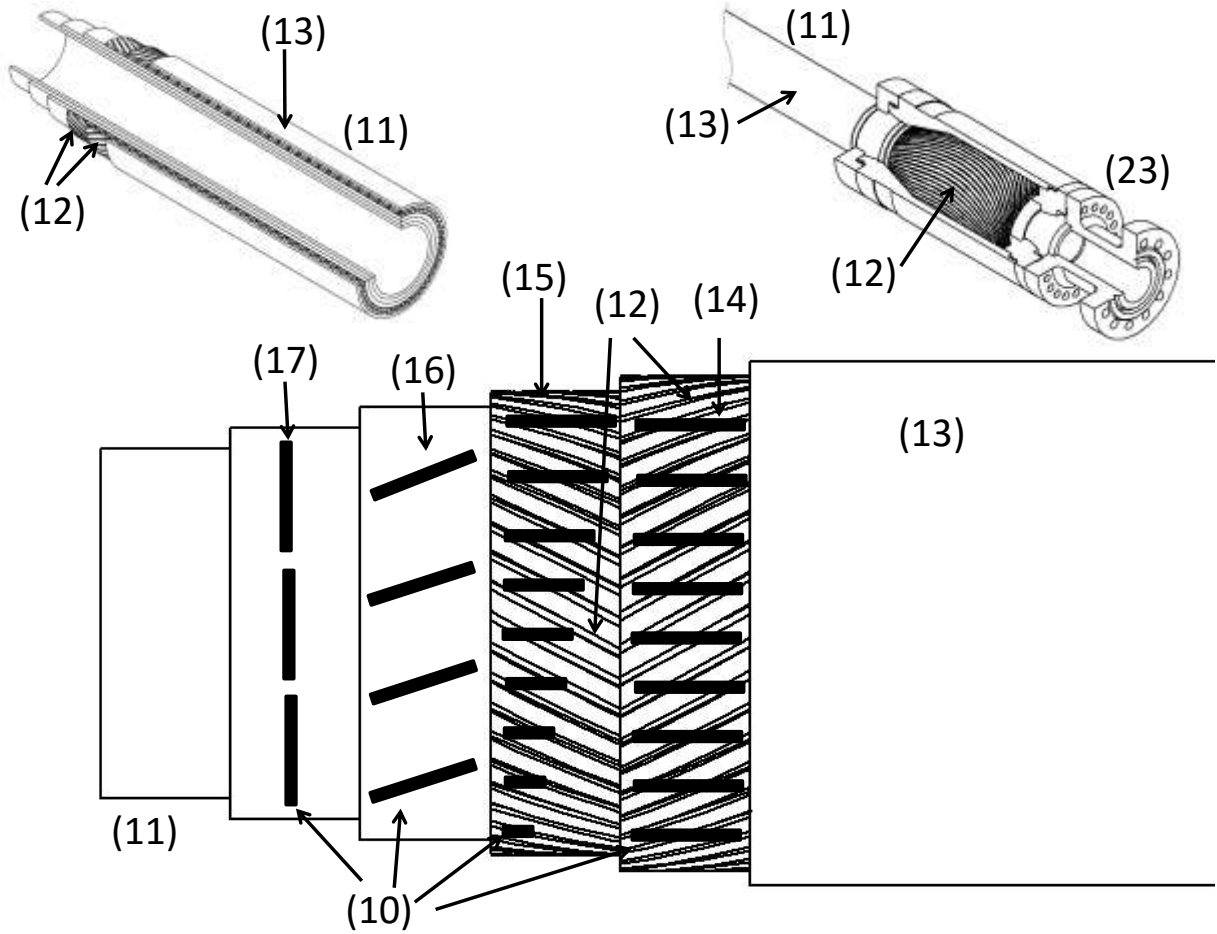


Figura 4

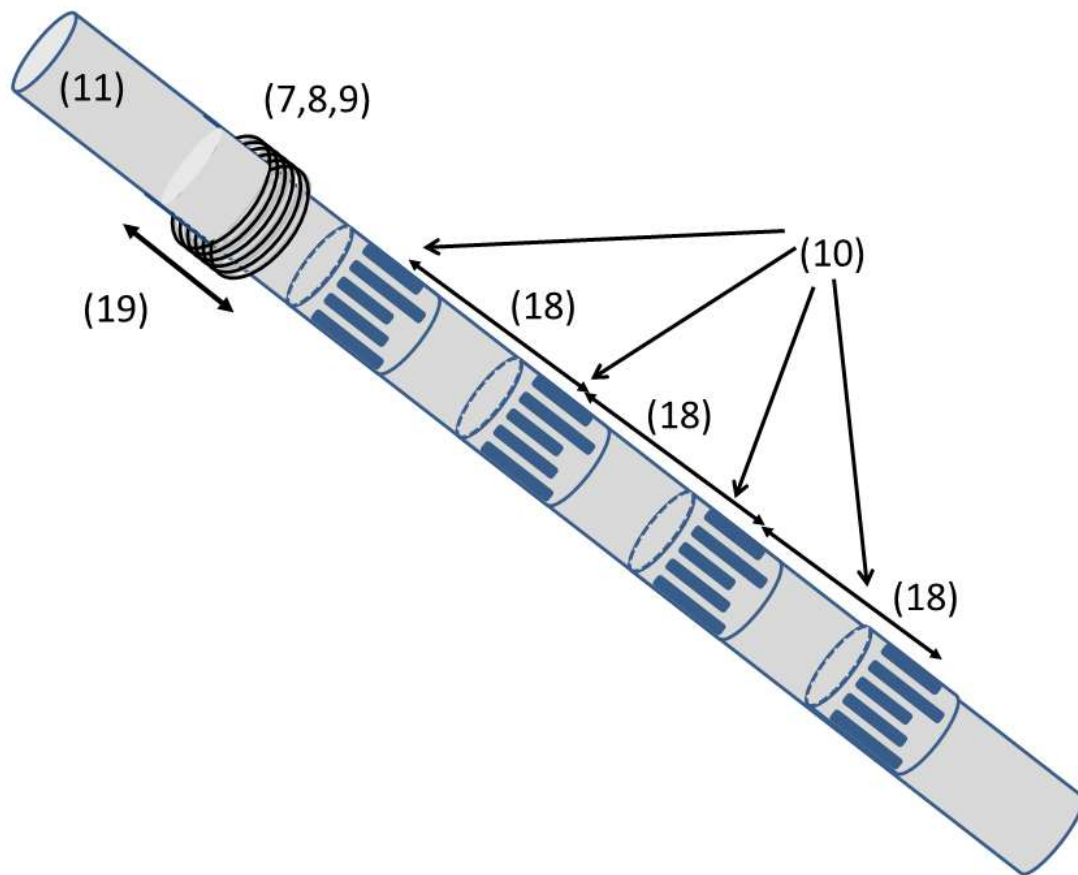
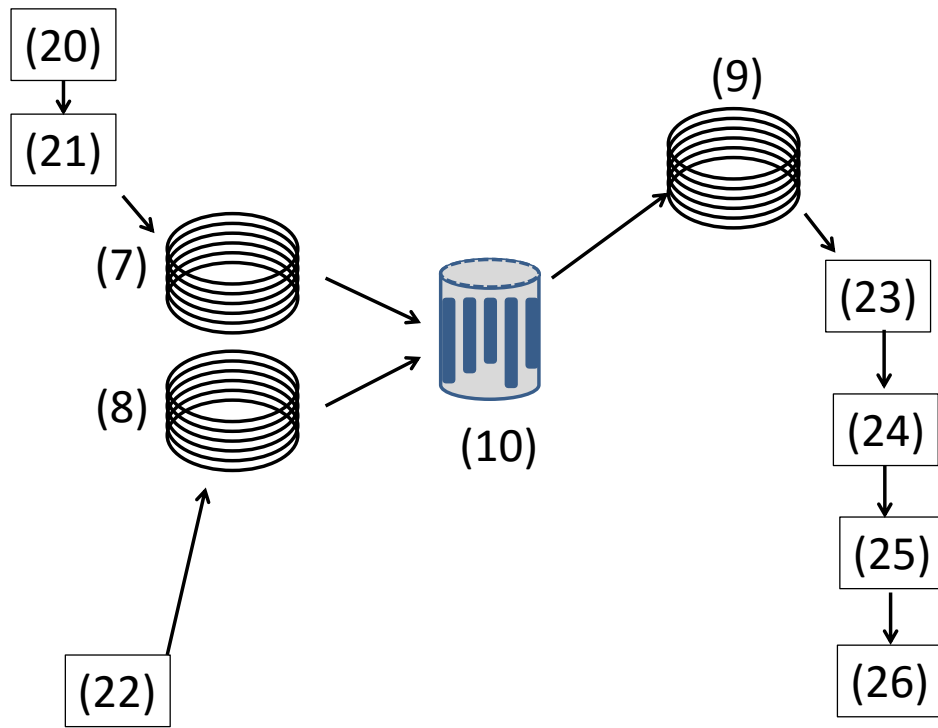


Figura 5



## **Sistema e método para detecção de ingresso de líquidos e permeação de gases entre as camadas de uma tubulação ou cabo submarino flexível, baseado em sensores magnetoelásticos**

### Resumo da invenção

O sistema para detecção de ingresso de líquidos (alagamento) e permeação de gases (como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) por entre as camadas de uma tubulação (riser ou flowline) ou cabo (umbilical) submarino flexível multicamada, objeto da presente invenção, visa alertar os operadores de tais estruturas a respeito da existência de regiões em que estão presentes tais substâncias, que podem corroer e fragilizar o material, e eventualmente levá-lo à falhas. O sistema descrito tem como principais vantagens o fato de os sensores terem geometria em forma de uma fita de pequena espessura, que são ideais para inserção entre camadas da estrutura em questão. Além disto, o sensor opera remotamente, sem necessidade de nenhum tipo de cabo ou fibra para conectá-lo aos dispositivos de excitação e leitura ou aos módulos eletrônicos para operação destes. Os dispositivos de leitura podem operar com afastamento de dezenas de centímetros, inclusive por sobre camadas metálicas ou poliméricas, como é a estrutura em questão, possibilitando a leitura de sensores embebidos na estrutura. Os sensores, os dispositivos de excitação e leitura, e os módulos eletrônicos de operação, são baratos, robustos, e simples, tornando esta uma solução competitiva para a inspeção e monitoramento destas estruturas. Setor técnico: Instrumentos de teste para detecção de variações de propriedades físicas através de medições magnéticas de elementos vibratórios, aplicáveis à área de petróleo e gás