



# COMUNICAÇÃO DE DADOS DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DE PAREDES METÁLICAS DE DUTOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO RADIOFREQUÊNCIA

MAURO EDUARDO BENEDET, CLAUDIO R. SCHMITZ, GABRIEL M. PROBST,  
MARCO A.M. CAVACO

Laboratório de Metrologia e Automatização  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Caixa Postal 5053, CEP 88040-970, Florianópolis, Brasil

(Recibido 5 de septiembre de 2016, para publicación 30 de noviembre de 2016)

**Resumo** – O conhecimento das reais condições de operação de dutos destinados ao transporte de óleo e gás é de fundamental importância econômica e social. O vazamento desses produtos acarreta, além dos prejuízos financeiros associados ao reparo do duto e ao desperdício de produtos, graves consequências para o local atingido. O monitoramento de deformações sofridas pelos dutos é um dos métodos mais utilizados na prevenção dessas falhas. Além disso, o monitoramento da sua inclinação também pode indicar que o duto sofreu, ou está sofrendo, esforços mecânicos que podem prejudicar sua integridade. Por esse motivo, é de interesse das empresas responsáveis a medição dessas grandezas, tanto pelo lado interno quanto pelo lado externo dos dutos. Grande parte dos dutos utilizados para transporte está enterrada ou submersa, o que dificulta o acesso contínuo a diversos pontos do seu lado externo, considerados críticos do ponto de vista da sua integridade. No entanto, existem equipamentos, conhecidos como PIGs (do inglês, *Pipeline Inspection Gauges*), capazes de percorrer o lado interno, realizando limpeza, separação de produtos ou medições. Nesse contexto, iniciou-se um projeto de pesquisa para avaliar diferentes formas de comunicação sem fio através de paredes metálicas, entre transdutores instalados do lado de fora do duto e os PIGs. O projeto envolveu o estudo de comunicação através de paredes metálicas com tecnologias de radiofrequência e ultrassom. Nesse artigo, é apresentado o estudo de viabilidade de utilização de radiofrequência, mostrando suas vantagens e limitações, bem como as principais conclusões a respeito da utilização dessa tecnologia em um caso prático. Os resultados obtidos com esse trabalho servem não apenas para aplicação em dutos de óleo e gás, mas também para outras aplicações onde exista a necessidade de comunicação através de paredes metálicas.

**Palavras-chave** – Comunicação através de paredes metálicas, radiofrequência, condutividade elétrica, permeabilidade magnética, elementos finitos.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiofrequência é o meio de comunicação mais utilizado em sistemas de transferência de dados sem fio. No entanto, essa tecnologia encontra algumas dificuldades na presença de barreiras metálicas entre emissor e receptor. A barreira metálica funciona como uma blindagem às ondas eletromagnéticas, prejudicando ou até mesmo inviabilizando a comunicação por radiofrequência. Essa blindagem é decorrente do “efeito pelicular” que, por sua vez, é dependente das características do metal e da frequência da onda eletromagnética ( $\omega = 2\pi f$ ). As características do metal que influenciam no efeito pelicular são a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ), conforme indicado pela equação (1), onde o  $\delta$  dá-se o nome de profundidade pelicular. Quanto menor é a profundidade pelicular, maior é a blindagem eletromagnética do material.

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

A comunicação através de paredes metálicas é especialmente interessante na indústria de petróleo e gás, onde existe a necessidade de transferência de dados entre sensores instalados no lado externo de dutos e

dispositivos que percorrem o interior desses dutos (PIGs instrumentados). Os dutos de transporte de interesse para este trabalho são aqueles constituídos de aço regulamentado pela norma API 5L.

Neste artigo, primeiramente, são descritos métodos para a medição da permeabilidade magnética e condutividade elétrica do aço. Tais parâmetros foram quantificados para uma amostra de aço proveniente de um tubo utilizado na indústria petrolífera, sendo essenciais para posterior discussão da capacidade de blindagem eletromagnética exercida por materiais dessa natureza nas comunicações por radiofrequência.

Posteriormente, uma discussão sobre campo próximo e campo distante é realizada e, finalmente, uma análise do problema de comunicação por radiofrequência através de paredes metálicas é realizada utilizando ferramentas de simulação por elementos finitos.

## 2. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é uma característica do material que indica a facilidade com a qual ele é capaz de conduzir uma corrente elétrica. Conforme indicado pela equação (2), o inverso da condutividade elétrica é chamado de resistividade elétrica ( $\rho$ ) que, por sua vez, é uma grandeza relacionada ao impedimento sofrido pelos portadores de carga no deslocamento através do material.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Diversos são os métodos descritos na literatura que podem ser utilizados para a determinação da resistividade elétrica e, portanto, da condutividade elétrica. O método da sonda de quatro pontas, também conhecido como método de quatro terminais, é o mais utilizado para a determinação da resistividade elétrica de condutores metálicos e semicondutores [1]. A utilização de quatro pontas tem o objetivo de reduzir os efeitos das resistências parasitas presentes no método de duas pontas.

Para a medição da condutividade elétrica da amostra de aço retirada do tubo em análise, foi preparada uma bancada, conforme ilustra a Fig. 1. Utilizou-se uma fonte de alimentação Minipa MPC 303DI ligada às pontas externas da sonda. Para monitorar a tensão nas pontas internas da sonda, foi utilizado um multímetro HP-34401A de 6½ dígitos. O espaçamento ( $s$ ) entre as pontas da sonda utilizada é de, aproximadamente, 1,27 mm.

A amostra de aço utilizada para o cálculo da condutividade foi confeccionada de forma retangular segundo as dimensões indicadas na tabela 1, que também apresenta as dimensões de uma amostra de alumínio utilizada para verificação do sistema de medição. As medidas apresentadas são referentes à média de dez medições para cada variável, com erros sistemáticos devidamente corrigidos.



Fig. 1. (a) Bancada para cálculo da condutividade elétrica através do método de quatro pontas e (b) detalhe da sonda de quatro pontas.

Tabela 1. Dimensões das amostras destinadas à medição de condutividade.

Sigla	Descrição	Aço	Alumínio
$l$	comprimento	15,49 mm	35,17 mm
$w$	largura	10,12 mm	27,12 mm
$t$	espessura	1,4354 mm	0,4966 mm

Tabela 2. Fatores de correção para o cálculo da condutividade elétrica.

Fator de Correção	Aço	Alumínio
$F_3$	4,085	4,462
$F_4$	0,885	1,000

Tabela 3. Resultados da medição de condutividade do aço API-5L analisado.

Corrente (A)	0,5	1,0	2,0	3,0
Tensão ( $\mu\text{V}$ )	25,38	48,42	90,50	136,26
Condutividade (MS/m)	3,872	3,940	4,258	4,242

Tabela 4. Resultados da medição de condutividade do alumínio.

Corrente (A)	0,5	1,0	2,0	3,0
Tensão ( $\mu\text{V}$ )	6,78	13,72	24,44	35,14
Condutividade (MS/m)	33,278	32,890	36,927	38,525

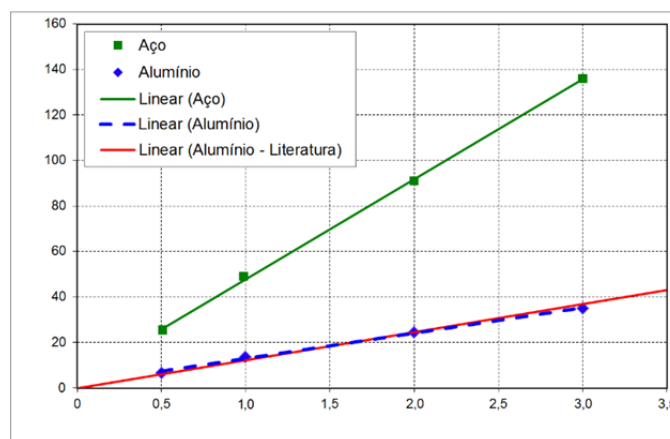


Fig. 2. Valores de tensão elétrica medidos nas amostras de aço e alumínio e comparação com os valores esperados para o alumínio segundo o valor teórico de condutividade elétrica.

Para a realização do cálculo da condutividade elétrica das amostras de aço e de alumínio, foram calculados seus respectivos fatores de correção,  $F_3$  e  $F_4$ , provenientes do método de quatro pontas. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.

Deve-se ressaltar que os valores apresentados na tabela 2 são válidos apenas para as condições específicas do experimento e dimensões das amostras.

Quatro intensidades de corrente elétrica foram aplicadas à amostra de aço. Para cada intensidade, foram realizadas cinco medições de tensão, sendo que a média obtida é apresentada na tabela 3, juntamente com o respectivo resultado para a condutividade elétrica.

O mesmo procedimento foi realizado com a amostra de alumínio, sendo os resultados obtidos apresentados na tabela 4.

As médias dos valores de tensão medidos para cada corrente aplicada, utilizando-se as amostras de aço e alumínio, são também apresentadas na Fig. 2.

A amostra de alumínio foi utilizada para verificação do método, sendo que a condutividade elétrica encontrada na literatura para esse material é de aproximadamente  $36,36 \times 10^6$  S/m [4], representada pela linha em vermelho da Fig. 2. Pelo método proposto, chegou-se ao valor de  $35,41 \times 10^6$  S/m para a amostra de alumínio, o que representa um desvio de 2,6%.

Com base nos resultados obtidos e avaliação de incertezas, pode-se assumir a condutividade elétrica do aço API-5L analisado como sendo de  $(4,08 \pm 0,20) \times 10^6$  S/m.

As principais fontes de incerteza associadas ao procedimento realizado estão relacionadas a incertezas na medição das dimensões das amostras e dos valores de corrente e tensão, definição dos fatores de correção, posicionamento das pontas da sonda na amostra, corrosão da superfície da amostra, temperatura ambiente e, no caso da amostra de alumínio, pureza da amostra.

### 3. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A resposta da matéria à presença de um campo magnético externo está diretamente relacionada às propriedades magnéticas de cada material. Assim, define-se a permeabilidade magnética como a capacidade do material permitir a existência de fluxo magnético em seu interior quando submetido a um campo magnético. Em outras palavras, quanto maior a permeabilidade magnética de um material, mais facilmente ele será magnetizado e, conseqüentemente, mais facilmente novas linhas de campo o atravessarão.

Pode-se representar a permeabilidade magnética de um material de forma adimensional dividindo-a pela permeabilidade magnética do vácuo,  $\mu_0$ . A esse novo valor, dá-se o nome de permeabilidade relativa.

Em materiais ferromagnéticos, as permeabilidades relativas são bem maiores do que a unidade, podendo chegar a 100.000 [2]. Nesses materiais, mesmo na ausência de campo magnético externo, fortes interações entre os momentos magnéticos atômicos produzem alinhamentos em determinadas regiões, chamadas de domínios magnéticos. No interior de cada domínio, a maioria dos momentos magnéticos são paralelos entre si, existindo assim uma direção preferencial [2].

Quando o material encontra-se desmagnetizado, as direções de magnetização dos domínios são orientadas ao acaso. Porém, na presença de um campo magnético, os domínios tendem a se alinhar ao campo aplicado. À medida que se aumenta o campo magnético aplicado, a magnetização do material também aumenta, até o ponto que, idealmente, todos os domínios magnéticos estão alinhados ao campo externo. A partir desse ponto, um aumento do campo aplicado não resulta em aumento de magnetização. Essa condição é chamada de “magnetização de saturação” ou “indução máxima”.

A partir dessa condição, a redução do campo aplicado a zero não retorna à condição inicial, ou seja, mesmo com a retirada do campo externo, uma magnetização remanescente é observada no material. A essa magnetização, dá-se o nome de “retentividade” ou “remanência”.

Para retirar a magnetização do material, é necessária a aplicação de um campo magnético em sentido oposto. O campo magnético oposto necessário para essa desmagnetização chama-se “coercividade” ou “campo coercivo”.

O aumento do campo magnético no sentido oposto torna a magnetizar o material, agora na direção oposta, até a sua saturação e assim por diante, completando o ciclo de histerese magnética, conforme ilustrado na Fig. 3.

As curvas de magnetização e histerese são comumente utilizadas para a caracterização magnética dos materiais. Observando a curva de histerese, por exemplo, pode-se dizer que um bom ímã permanente

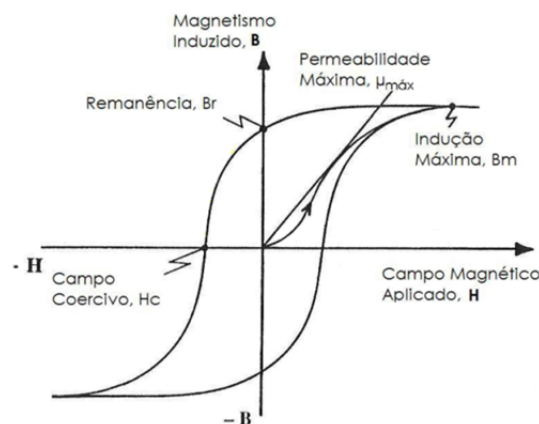


Fig. 3. Curvas de magnetização e histerese de material ferromagnético.

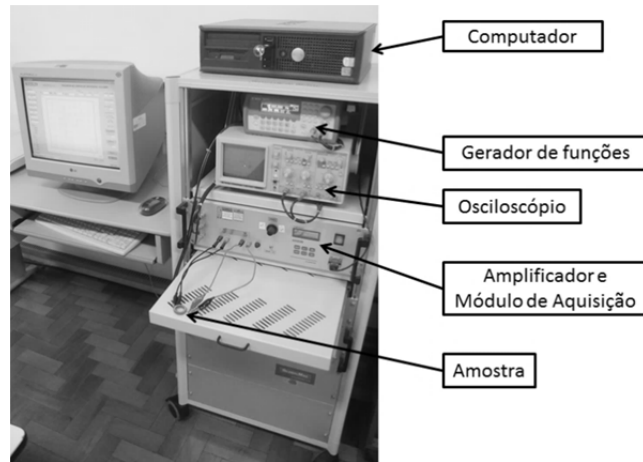


Fig. 4. Histeresígrafo TCH5000.

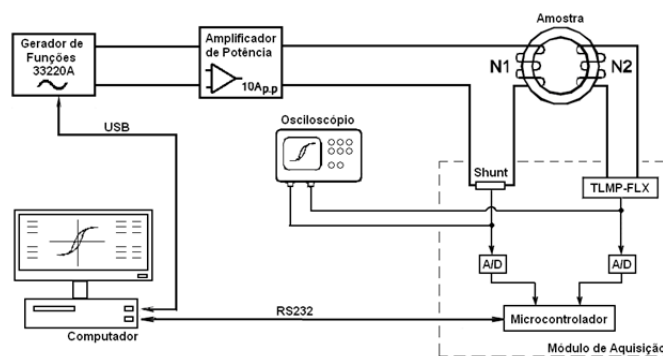


Fig. 5. Diagrama de blocos do histeresígrafo.

deve possuir elevada remanência e elevado campo coercivo, enquanto que para o material empregado no núcleo de um transformador, esses valores devem ser os menores possíveis. Já através da curva de magnetização, é possível extrair a permeabilidade magnética máxima do material, que corresponde à inclinação da reta que passa pela origem e tangencia o “joelho” da curva.

### 3.1. Preparação do experimento

Para obtenção da curva de magnetização e histerese do material de interesse, foi utilizado um histeresígrafo TCH5000-GlobalMag [3], apresentado na Fig. 4.

Para utilização do histeresígrafo, é necessária uma amostra do tipo anel de Rowland. O núcleo da amostra foi confeccionado a partir do material do tubo API 5L, seguindo a norma ASTM A773 [4], formando um anel com diâmetro interno de 21,5 mm, diâmetro externo de 26,8 mm e altura de 6,4 mm.

Foram bobinados no anel de forma sobreposta, os enrolamentos primário e secundário, utilizando-se fio de cobre esmaltado 27 AWG (0,39 mm de diâmetro), sendo empregado como primário o enrolamento interno, com 204 espiras, e como secundário o enrolamento externo, com 223 espiras. O isolamento foi reforçado com a aplicação de papel celofane entre o enrolamento interno e a amostra e entre os dois enrolamentos.

A Fig. 5 apresenta um diagrama de blocos onde são indicados os principais componentes do histeresígrafo, na configuração utilizada para a realização do experimento.

Um gerador de funções, Agilent 33220A, fornece um sinal senoidal de referência para um amplificador de potência com saída máxima de 10 A pico a pico. A saída do amplificador é conectada ao enrolamento primário da amostra.

Um resistor shunt de  $0,1 \Omega$  em série com o enrolamento primário é utilizado para fornecimento de uma tensão proporcional à corrente elétrica que circula por esse enrolamento. Ao enrolamento secundário é conectado um integrador modelo TLMP FLX, responsável pelo fornecimento de um sinal de tensão proporcional ao fluxo magnético.

Os sinais de tensão do resistor shunt e do integrador foram monitorados através de um osciloscópio Minipa MO-1225. Utilizando-se o modo “X-Y” do osciloscópio, foi possível visualizar a forma da curva de histerese magnética do material.

Conversores analógico-digitais e um microcontrolador, inseridos no módulo de aquisição de dados, são utilizados para tratamento dos dados provenientes do resistor shunt e do integrador. Através de uma interface RS-232, os dados são enviados a um computador onde serão utilizados para o cálculo do campo magnetizante ( $H$ ), e da indução magnética ( $B$ ), permitindo traçar as curvas de magnetização e histerese.

### 3.2. Cálculo do campo magnetizante

A corrente elétrica fornecida pelo amplificador de potência circula pelo enrolamento primário do anel de Rowland gerando o campo magnetizante. A intensidade desse campo é variada modificando-se a amplitude da corrente elétrica através do gerador de funções controlado pelo computador através de uma interface USB.

Para circuitos magnéticos fechados e enrolamentos uniformemente distribuídos, o valor do campo magnetizante pode ser estimado pela equação (3)

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (3)$$

onde:

$H$  : campo magnetizante [A/m];

$N_1$  : número de espiras do enrolamento primário;

$I$  : corrente elétrica no enrolamento primário [A];

$L$  : comprimento do circuito magnético [m].

A medição da corrente elétrica ( $I$ ) é realizada através do resistor shunt e o comprimento do circuito magnético corresponde ao perímetro mediano do anel de Rowland. Assim, a equação (3) pode ser reescrita como na equação (4).

$$H = \frac{2 N_1 I}{\pi(d_1 + d_2)} \quad (4)$$

onde  $d_1$  e  $d_2$  referem-se, respectivamente, ao diâmetro interno e externo do anel de Rowland.

### 3.3. Cálculo da Indução Magnética ( $B$ )

A circulação de uma corrente elétrica senoidal no enrolamento primário induz uma tensão no enrolamento secundário proporcional à variação do fluxo magnético no tempo ( $d\phi/dt$ ). O circuito integrador (TLMP-FLX), ligado ao enrolamento secundário, fornece uma tensão elétrica proporcional ao fluxo magnético que flui pelo núcleo do anel de Rowland.

O cálculo da indução magnética pode ser realizado a partir da tensão de saída do integrador, conforme a equação (5)

$$B = \frac{V_{int} RC}{N_2 A} \quad (5)$$

onde:

$B$  : indução magnética [T];

$V_{int}$  : tensão de saída do integrador [V];

$RC$  : constante de tempo do circuito integrador [s];

$N_2$  : número de espiras do enrolamento secundário;

$A$  : área da seção transversal da amostra [m<sup>2</sup>].

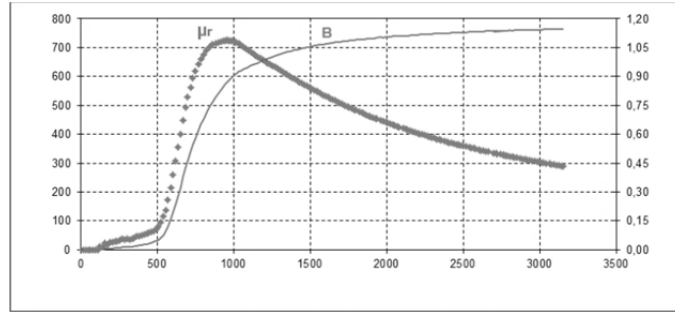


Fig. 6. Curva de permeabilidade magnética relativa e magnetização.

### 3.4. Cálculo da permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética do material pode ser expressa pela relação entre a indução magnética e o campo magnetizante, conforme indica a equação (6).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6)$$

Portanto, a permeabilidade magnética relativa pode ser escrita na forma da equação (7).

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (7)$$

Assim, a equação completa utilizada para o cálculo da permeabilidade magnética relativa da amostra pode ser expressa pela equação (8)

$$\mu_r = \frac{V_{int} RC \pi (d_1 + d_2)}{2 \mu_0 N_1 I N_2 h e} \quad (8)$$

onde  $h$  e  $e$  referem-se, respectivamente, à altura e à espessura do anel de Rowland.

Na Fig. 6, pode-se observar os valores assumidos pela permeabilidade magnética relativa em função do campo magnetizante, assim como os valores da indução magnética, que correspondem à curva de magnetização.

Para a amostra confeccionada a partir do material do tubo de aço API 5L, o resultado observado da permeabilidade magnética relativa máxima foi de 725. Em termos absolutos, conclui-se que a permeabilidade magnética da amostra de aço API-5L analisada equivale a  $(9,12 \pm 0,46) \times 10^{-4}$  H/m.

## 4. EFEITO PELICULAR NO AÇO API 5L ANALISADO

Com os valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética calculados, pode-se avaliar o efeito pelicular nas paredes metálicas do tubo analisado.

Através das Equações 1, 9 e 10, é possível calcular a intensidade de campo eletromagnético que atravessa um material em função da sua espessura e da frequência da onda

$$E_x = E_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (9)$$

$$H_x = H_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (10)$$

onde  $E_x$  e  $H_x$  são as intensidades dos campos elétrico e magnético, respectivamente, em uma profundidade  $t$  dentro do material condutor.

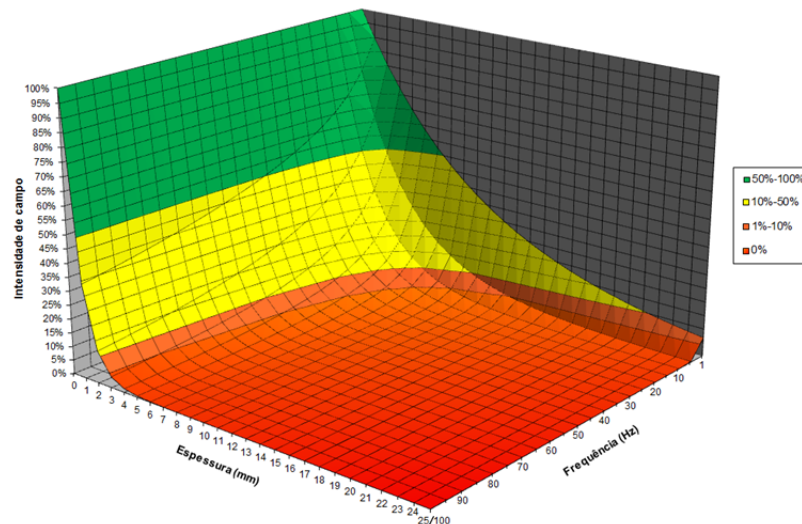


Fig. 7. Intensidade de campo que atravessa o aço em função da espessura e frequência.

A Fig. 7 apresenta o percentual da intensidade de um campo que consegue atravessar as paredes de um duto confeccionado com o aço analisado, em função da espessura (em milímetros) e da frequência da onda (em hertz).

Analisando a Fig. 7, pode-se perceber que para frequências acima de 100 Hz a intensidade do sinal que consegue atravessar uma superfície de aço com mais de 5 mm de espessura é praticamente nula.

À medida que se diminui a frequência da onda eletromagnética ou a espessura da parede metálica, um valor maior de intensidade do campo eletromagnético é observado no lado da parede oposto à aplicação do campo.

Para as frequências mais elevadas, utilizadas em sistemas convencionais de comunicação por radiofrequência, pode-se dizer que uma superfície fechada confeccionada com o aço analisado exerce uma excelente blindagem eletromagnética, tornando a comunicação impraticável.

Os resultados aqui apresentados mostram a influência do efeito pelicular na atenuação de uma onda eletromagnética que se propaga através de uma superfície constituída pelo aço analisado. A grande maioria dos sistemas de comunicação por radiofrequência é projetada para operar no campo distante, onde existe a propagação da onda. No entanto, deve-se ressaltar que a utilização de sistemas de baixa frequência faz com que o campo próximo se estenda por grandes distâncias, e este não pode ser desconsiderado.

## 5. CAMPO PRÓXIMO E CAMPO DISTANTE

Os termos “campo próximo” e “campo distante” são utilizados para descrever as diferentes características de um campo eletromagnético em função da distância em relação a sua fonte. A mudança de comportamento do campo eletromagnético não acontece bruscamente, sendo os limites dessas regiões geralmente estabelecidos em função do comprimento de onda emitido pela fonte. A Fig. 8 apresenta os diferentes campos e os seus respectivos limites, convencionalmente estabelecidos para o caso de uma antena.

Resolvendo as equações de Maxwell para campos elétricos e magnéticos provenientes de uma fonte oscilante pontual, conclui-se que para uma distância ( $r$ ) maior do que dois comprimentos de onda ( $2\lambda$ ), o campo tem um decaimento de amplitude proporcional a  $1/r$ . Assim, a energia total por unidade de área é proporcional a  $1/r^2$ . Como a área de uma esfera concêntrica ao ponto de emissão é proporcional a  $r^2$ , a energia total que atravessa a esfera é constante ao longo de  $r$ , ou seja, a onda se propaga. A essa região, dá-se o nome de campo distante. Nessa região, o campo elétrico ( $E$ ) e o campo magnético ( $H$ ) são iguais em módulo para qualquer ponto no espaço.

No campo próximo ( $r < \lambda$ ), as relações entre o campo elétrico e o campo magnético tornam-se bastante complexas. Além disso, enquanto no campo distante as ondas eletromagnéticas são geralmente caracte-



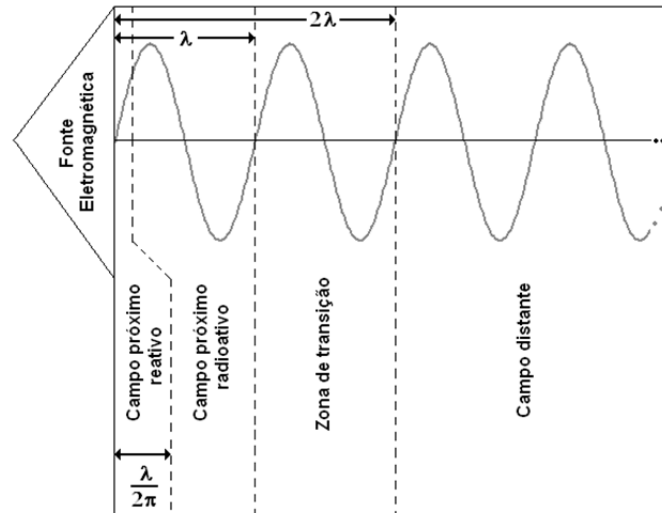


Fig. 8. Campo próximo e campo distante.

rizadas por um tipo de polarização (horizontal, vertical, circular ou elíptica), no campo próximo todos os tipos de polarização podem estar presentes [5].

Enquanto que no campo distante a amplitude de sinal tem um decaimento proporcional a  $1/r$ , no campo próximo outros termos da solução das equações de Maxwell tornam-se significativos. O primeiro termo que rege influência sobre a intensidade do campo é proporcional a  $1/r^2$  e é comumente denominado como “termo de indução”. Para distâncias ainda menores ( $r \ll \lambda$ ), o “termo de campo eletrostático”, proporcional a  $1/r^3$ , também se torna significativo [6][7].

Esses termos, ocasionados pelos efeitos indutivos e capacitivos provenientes de correntes e cargas elétricas na antena, decaem muito mais rapidamente com a distância do que os efeitos de radiação observados no campo distante, mas que também estão presentes no campo próximo.

O campo próximo ainda pode ser dividido em campo próximo reativo e campo próximo radioativo. O campo próximo reativo é comumente determinado como sendo a região entre a fonte e a distância de  $\lambda/2\pi$ . O campo próximo radioativo é delimitado pelo espaço compreendido entre as distâncias radiais de  $\lambda/2\pi$  e  $\lambda$ , em relação à fonte.

No campo próximo reativo, a absorção de energia eletromagnética por um segundo dispositivo afeta diretamente o transmissor que alimenta a antena. Esse segundo dispositivo diminui a impedância “vista” pelo transmissor, aumentando a corrente na fonte. Em outras palavras, o posicionamento de um receptor dentro do campo próximo altera a demanda de energia fornecida pelo transmissor. Tal fenômeno não ocorre no campo distante, onde a impedância do receptor não interfere no dispositivo de transmissão.

No campo próximo radioativo, as componentes reativas não exercem grande influência, mas as relações entre os campos  $E$  e  $H$  ainda são complexas. Nesse campo, objetos metálicos podem agir como antenas, recebendo e “re-radiando” parte da energia, formando uma nova superfície de radiação. Essa nova superfície possui seu próprio campo próximo e campo distante [5].

A zona de transição ( $\lambda < r < 2\lambda$ ) é a região compreendida entre o campo próximo e campo distante. Nessa região são observadas características dos dois campos, sendo que já é possível obter uma boa aproximação da relação entre  $E$  e  $H$ .

Em geral, o propósito das antenas é a comunicação sem fio através de longas distâncias, valendo-se das características intrínsecas ao campo distante. No entanto, a utilização de baixas frequências em dispositivos de transmissão próximos ao receptor (um localizado no interior de um tubo metálico e outro próximo à superfície externa, por exemplo) exige uma análise que considere o campo próximo. A análise do efeito pelicular realizada no item 4 considera que a fonte emissora está distante em relação ao tubo e a onda eletromagnética está em regime de propagação (campo distante). Nesse sentido, uma segunda análise pode ser realizada considerando o campo próximo, através do método de elementos finitos.

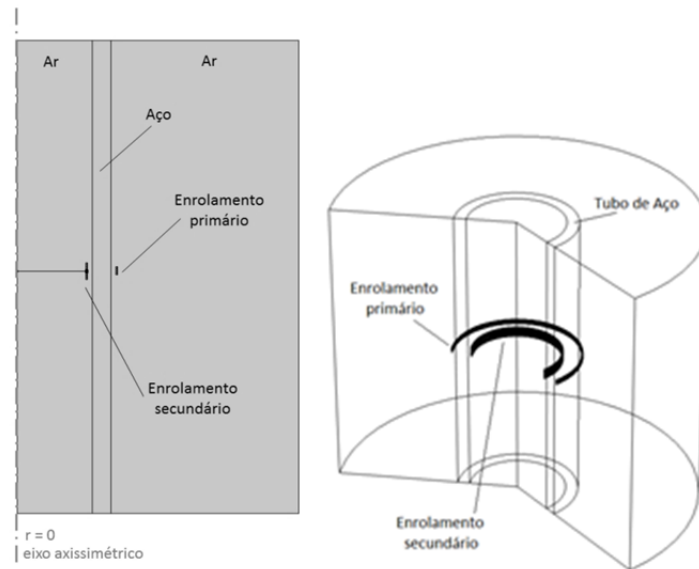


Fig. 9. Geometria do problema – vista 2D com simetria axial e vista 3D equivalente.

## 6. ANÁLISE POR MEF E PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO

Devido à complexidade de resolução das equações para o campo próximo de uma onda eletromagnética incidindo em uma superfície metálica, torna-se mais conveniente a análise do problema utilizando um método computacional.

Sabe-se que quanto maior a frequência, maior é a atenuação do fluxo magnético através de um obstáculo metálico, o que reduz a tensão induzida em uma bobina posicionada no lado oposto. Por outro lado, frequências mais baixas implicam baixa amplitude de tensão induzida em uma bobina receptora.

Portanto, em uma disposição onde existe uma barreira metálica entre bobinas primária e secundária, existe um ponto ótimo de frequência para indução de tensão no enrolamento secundário. Esse ponto ótimo varia para cada configuração do sistema. Para um dado material metálico, a frequência ótima de operação é influenciada principalmente pelo formato, espessura e características de condutividade elétrica e permeabilidade magnética do metal, além da proximidade das bobinas em relação à parede metálica.

O modelo computacional utilizado para determinação da frequência ótima de operação baseia-se no método dos elementos finitos (MEF). O problema analisado refere-se a uma bobina enrolada externamente a um tubo metálico servindo como um enrolamento primário para indução de uma tensão elétrica em outra bobina (enrolamento secundário) posicionada no interior do tubo. O modelamento do problema e a análise pelo método de elementos finitos foram realizados utilizando-se o software COMSOL Multiphysics®.

A Fig. 9 apresenta a geometria do problema de forma genérica (variou-se a espessura da parede do tubo). O problema foi modelado utilizando geometria 2D com simetria axial, que fornece uma análise confiável do problema 3D, reduzindo drasticamente o tempo de processamento e os requisitos do sistema computacional.

Os parâmetros do metal foram definidos conforme os valores calculados nos itens 2 e 3. As análises foram realizadas variando-se a espessura da parede do tubo, sendo utilizados os valores de (5, 10, 15, 20, 25 e 30) mm. Para todas as espessuras analisadas, as bobinas foram mantidas a uma distância de 5 mm em relação à parede do tubo. O diâmetro interno do tubo foi definido em 160 mm.

Para todas as espessuras e frequências analisadas, considerou-se uma corrente com amplitude de 10 A circulando pelo enrolamento primário.

No problema proposto, onde os condutores são ideais e o secundário comporta-se como um circuito aberto, tanto a intensidade de corrente no primário quanto o número de voltas nos enrolamentos variam a intensidade de tensão induzida no secundário, mas não variam a frequência ótima de indução.

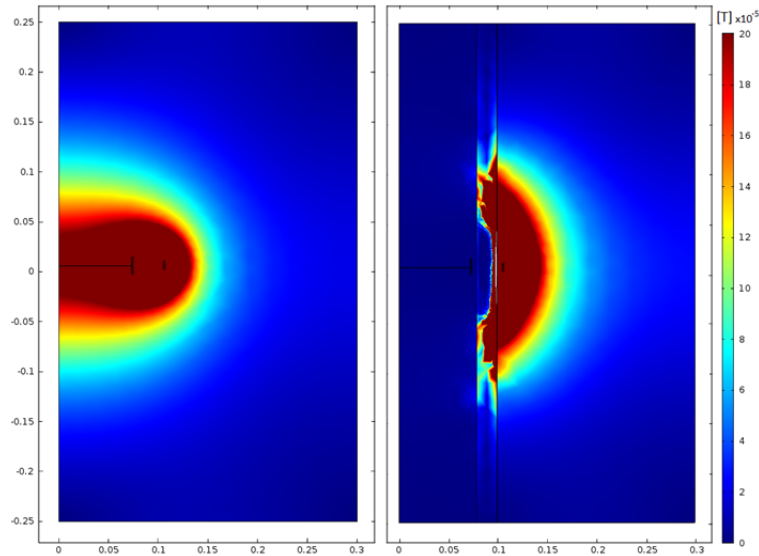


Fig. 10. Campos magnéticos gerados a 1500 Hz, sem obstáculo (esquerda) e com parede de aço de 20 mm de espessura (direita).

As ferramentas do software COMSOL Multiphysics® foram utilizadas de forma a calcular os campos elétrico e magnético no sistema. Como exemplo, a Fig. 10 apresenta os campos magnéticos calculados pelo MEF para uma frequência de 1500 Hz, para o caso em que não existe o obstáculo metálico entre os enrolamentos e para o caso onde existe uma parede com espessura de parede de 20 mm de um tubo de aço separando os dois enrolamentos. Através das imagens, é possível perceber o efeito de blindagem exercido pela parede metálica.

A faixa de frequência analisada, para cada espessura, foi de 25 Hz a 10 kHz, com incrementos de 25 Hz. Para cada combinação de frequência e espessura foi gerado um mapa de campo como os apresentados na Fig. 10, totalizando 2400 mapas de campo magnético. Da mesma forma, foram gerados 2400 mapas de análise do campo elétrico.

Para o cálculo da tensão induzida ( $\varepsilon$ ) no enrolamento secundário, basta realizar a integral de linha do campo elétrico ao longo da bobina (equação (11), onde  $N$  é o número de espiras).

$$\varepsilon = N \oint \vec{E} d\vec{l} \quad (11)$$

Alternativamente, pode-se calcular a tensão induzida no enrolamento secundário através do campo magnético incidente sobre a área transversal da bobina secundária, de acordo com a equação (12), obtendo-se os mesmos resultados da equação (11).

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA \quad (12)$$

Os resultados obtidos pelo método proposto estão sintetizados na Fig. 11, que apresenta a resposta em frequência de indução de tensão para cada espessura analisada e os valores máximos de indução de tensão em função da espessura da parede metálica.

Os resultados obtidos mostram que a intensidade de tensão induzida diminui à medida que a espessura da parede aumenta, aproximando-se de uma exponencial. Para as espessuras analisadas, o ponto ótimo de indução de tensão em uma bobina ideal encontrou-se entre 900 Hz e 3200 Hz.

## 7. CONCLUSÕES

Os estudos apresentados mostram que é possível a utilização de radiofrequência para transmissão de dados através de superfícies metálicas. No entanto, a necessidade de utilização de baixas frequências limi-

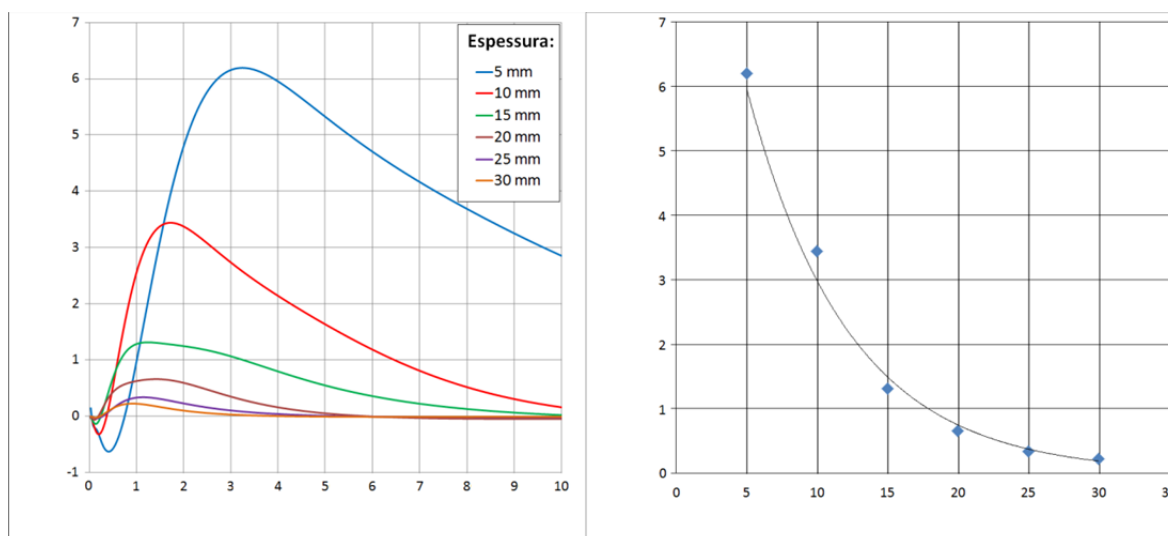


Fig. 11. Resposta em frequência de indução de tensão para cada espessura de parede metálica (a) e valores máximos de indução de tensão obtidos para cada espessura (b).

ta a taxa de transferência de dados. Uma onda eletromagnética carregando uma informação modulada em uma frequência de 3 kHz, por exemplo, utilizando três ciclos por símbolo e modulação binária, atingiria uma taxa de transferência de dados de 1 kb/s (desconsiderando a necessidade de utilização de alguns bits como preâmbulo da mensagem e verificação de erros).

A norma IEEE 1902.1 propõe a utilização de baixa frequência (131 kHz) para transferência de dados em ambientes onde protocolos comuns de RF encontrariam problemas com a proximidade de materiais metálicos. No entanto, a norma não trata de problemas de enclausuramento de um dos lados da comunicação através de metal com alta permeabilidade magnética.

Por fim, conclui-se que a utilização de RF pode ser indicada para pequenas transferências de dados, cuja quantificação depende do tempo disponível para transmissão e da frequência utilizada na portadora. Um exemplo de aplicação que exige pequena transferência de dados e que a RF pode ser utilizada é a detecção de passagem do PIG por um determinado ponto de um duto.

Uma alternativa promissora para a comunicação através de obstáculos metálicos é a utilização de ultrassom. Experimentos realizados em laboratório já comprovaram a sua viabilidade, atingindo-se taxas de transferência muito superiores às obtidas com a radiofrequência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES, pelo financiamento através de bolsa de doutorado, mestrado e taxa de bancada, e ao Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina pela infraestrutura disponibilizada.

## REFERÊNCIAS

- [1] Giroto, E.M., Santos, I.A., “Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente”, *Química Nova*, **25**(4), 639-647, São Paulo, jul. 2002.
- [2] Young, H.D., Freedman, R.A., *Física III – Eletromagnetismo*, 12ª Edição, São Paulo (2009)
- [3] GLOBALMAG TRANSDUTORES MAGNÉTICOS. Manual de Operação – Traçador de curvas de histerese magnética versão TCH5000. São Paulo: GLOBALMAG (2006)

- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A773/A773M – 01 – Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresisgraphs. 2009.
- [5] OSHA. Electromagnetic Radiation: Field Memo. 1990. Disponível em: <[http://www.osha.gov/SLTC/radiofrequency\\_radiation/electromagnetic\\_fieldmemo/electromagnetic.html](http://www.osha.gov/SLTC/radiofrequency_radiation/electromagnetic_fieldmemo/electromagnetic.html)>. Acesso em: 30 jul. 2012.
- [6] Johansson, J., Lundgren, U., EMC of Telecommunication Lines. 1997. 219 f. Master Thesis in Industrial Electronics – Telia Research AB, Sweden (1997)
- [7] Capps, C., Near Field or far Field?. 2001. Disponível em: <<http://www.edn.com/design/communications-networking/4340588/Near-field-or-far-field->>> Acesso em: 30 jul. 2012.

## COMMUNICATION OF MEASUREMENT DATA THROUGH METALLIC PIPELINE WALLS USING RADIO FREQUENCY

**Abstract** – The knowledge of real operation conditions of pipelines for transporting oil and gas is of fundamental economic and social importance. The leakage of these products, in addition to the financial losses associated with pipe repair and product waste, represents serious consequences for the affected area. The monitoring of pipelines strains is one of the most used methods for preventing these faults. Moreover, the monitoring of its tilting can also indicate that the pipeline has suffered, or is suffering, mechanical stresses that can damage its integrity. For this reason, it is of great interest the measurement of these quantities, inside and outside the duct. A large part of the pipeline used for transportation is buried or submerged. This fact complicates the continuous access of several points on the outside of the pipe, considered critical in terms of its integrity. However, there are devices, known as PIGs, (Pipeline Inspection Gauges) able to scroll through the inside of the pipes, performing cleaning, product separation or measurements. Nesse contexto, iniciou-se um projeto de pesquisa para avaliar diferentes formas de comunicação sem fio através de paredes metálicas, entre transdutores instalados do lado de fora do duto e os PIGs. O projeto envolveu o estudo de comunicação através de paredes metálicas com tecnologias de radiofrequência e ultrassom. Nesse artigo, é apresentado o estudo de viabilidade de utilização de radiofrequência, mostrando suas vantagens e limitações, bem como as principais conclusões a respeito da utilização dessa tecnologia em um caso prático. Os resultados obtidos com esse trabalho servem não apenas para aplicação em dutos de óleo e gás, mas também para outras aplicações onde exista a necessidade de comunicação através de paredes metálicas.

**Keywords** – Communication through metallic walls, Radio frequency, Electric conductivity, Magnetic permeability, Finite elements.