

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE FRAÇÃO DE ÁGUA PARA ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA E ÓLEO) UTILIZANDO TÉCNICAS DE MICRO-ONDAS EM CAVIDADE RESSONANTE

AUTORES:

Eduardo Scussiato, Alan D. Pontizelli, Marcelo Fuck, Daniel J. Pagano

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE FRAÇÃO DE ÁGUA PARA ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA E ÓLEO) UTILIZANDO TÉCNICAS DE MICRO-ONDAS EM CAVIDADE RESSONANTE

Abstract

The main aim of this study is to demonstrate the ability to determine the water cut content in a water and oil mixture flow with use of microwave technology for this measurement. The sensor described in this work use the different relative permittivity values of water and oil to determine the fraction of each one. The monitoring is performed with non-intrusive antenna, in a cylindrical electromagnetic cavity resonator. This is advantageous, as it will prevent the sensor being damaged by the flow through the pipeline and allow cleaning of pipeline. Also this equipment is smaller than bulky test separator and has a faster and on-line measurement.

Introdução

Os fluidos extraídos dos poços de produção de petróleo são, em geral, uma composição de óleo, gás, água salgada e sedimentos, onde água e óleo formam uma emulsão. Para a indústria do petróleo é de vital interesse conhecer a quantidade de água existente nestas emulsões para poder controlar e melhorar os processos em todas as fases da produção do petróleo. A proporção com que se misturam os diferentes componentes destes fluidos varia dependendo desde as características da formação do reservatório até do ciclo de vida do poço. Poços novos apresentam em geral baixo conteúdo de água (tipicamente 10% ou menos), entretanto com o passar do tempo começa a aumentar, podendo chegar a níveis elevados (acima de 75% do volume do fluido) perto do fechamento do poço no fim do seu ciclo de vida. Em uma mistura bifásica de água e óleo, baixos conteúdos de água produzem misturas denominadas de *óleo contínuo*. Fluidos com conteúdo de água variando entre 25% a 75% do volume podem ser classificados tanto de *óleo contínuo* como de *água contínua* dependendo das condições do fluido. Acima de 75% o fluido é classificado como de *água contínua*.

A medição do conteúdo de água é utilizada para determinar a taxa de produção dos poços, na transferência de custódia e no controle da qualidade do óleo. Também é muito importante conhecer a quantidade de água que cada poço produz para o gerenciamento e planejamento da produção dos reservatórios. Poços que produzem fluidos com alto conteúdo de água podem ser fechados para otimizar os recursos de forma a maximizar a produção total do reservatório.

O desenvolvimento de um medidor de fração de água é motivado por ser um equipamento pequeno se comparado aos volumosos separadores de teste de poços. O uso de medidores multifásicos oferece vantagens como menor peso e volume ocupado nas plataformas e maior rapidez de instalação. Além disso, permite a medição sem a separação das fases e em tempo real durante transitórios com maior qualidade das realizadas com separadores de testes que realizam medições por amostragem e demandam um longo tempo para estabilização. Um sensor multifásico é capaz de determinar a fração individual de cada fase em função do volume presente na seção transversal no interior do sensor [3].

Podemos classificar os medidores de fração de água em três categorias: (i) medição de baixo conteúdo de água em *óleo contínuo*, tipicamente entre 0 e 10% de conteúdo de água; (ii) medição de fração de água entre 0 e 100%; (iii) medição do conteúdo de óleo em *água contínua* (ppm de óleo contido na água produzida para devolução ao meio ambiente).

A medição do conteúdo de água pode ser realizada utilizando vários métodos de medição: (i) variação da impedância ou capacitância [3]; (ii) atenuação radioativa (raios X, gamma e etc) [3]; (iii) interação com micro-ondas [5]; (iv) atenuação de sinais de ultra-som [2]; (v) ressonância magnética nuclear[3].

Cada método ou técnica tem suas vantagens e desvantagens. O que justifica a utilização da interação das micro-ondas, é o fato de ser uma técnica onde as ondas eletromagnéticas penetram todo o fluido amostrado, formando assim uma medição significava de toda a mistura, o que não ocorre com técnicas de medição ópticas. Atenuação radioativa é um método muito empregado na detecção de gases, porém sua utilização pode contaminar radiotivamente a amostra além de apresentar riscos ao ser humano, ao contrario das micro-ondas. O uso de técnicas elétricas como capacitância, indutância e micro-ondas apresentam vantagens de não serem intrusivas ao fluxo, o uso da variação de capacitância é empregado em fluxo de óleo contínuo, indutância para água contínua e micro-ondas para ambos.

Muitos dos novos problemas de medições com aplicação em automação de processos industriais têm sido solucionados com o uso de vários tipos de sensores de ondas eletromagnéticas, principalmente com frequências na faixa de micro-ondas. Sensores baseados em micro-ondas são usados amplamente para realizarem medições de movimento, determinação de formas ou comprimentos, porém há um ampla aplicações em medições de propriedades de materiais, geralmente relacionados à presença de água. Sensores por ondas eletromagnéticas são baseados na interação das ondas com o meio de propagação. Esta interação pode ser por reflexão, refração, espelhamento, emissão, absorção, mudança de fase ou de velocidade. Podem-se classificar os sensores por ondas eletromagnéticas dependendo de como as ondas interagem com o meio, sendo os mais utilizados: ressonadores, sensores de transmissão, radares ou reflexão e sensores tomógrafos. O estudo de técnicas eletromagnéticas vem sendo realizados a muito tempo, no entanto sua aplicação tornou-se atrativa em sensores com o avanço da micro e nano eletrônica que possibilitou a construção de ressonadores pequenos e precisos com custo reduzido.

Medidor de fração de água por micro-ondas em cavidade ressonante

O medidor bifásico proposto é baseado em tecnologia de micro-ondas e no princípio físico de ressonância em uma cavidade eletromagnética e é utilizado para monitoramento da fração volumétrica de água em fluxo bifásico em dutos.

Uma cavidade ressonante pode ser descrita como uma estrutura metálica retangular ou cilíndrica totalmente fechada, contendo em seu interior material dielétrico. Permitindo dessa forma armazenar energia eletromagnética em seu interior. Um guia de onda oco com extremidades fechadas é um exemplo de cavidade ressonante [4,5].

No interior da cavidade os campos elétrico e magnético estão em quadratura, ou seja, quando um campo é máximo o outro é nulo. Portanto a energia muda de totalmente elétrica para puramente magnética duas vezes por ciclo. Quando a energia é puramente elétrica, o campo magnético bem como as correntes nas paredes da cavidade são nulas. Posteriormente a energia passa a ser puramente magnética com campo elétrico nulo.

Em uma cavidade ressonante há uma frequência de corte, onde abaixo dessa frequência a energia não se propaga, no entanto para frequências superiores a de corte, existe infinitos modos de propagação, sendo cada modo correspondente a uma frequência de ressonância determinado pela equação (1) para cavidades cilíndricas [1,5]. A ressonância na cavidade eletromagnética ocorre quando o campo elétrico e magnético forma um padrão de onda.

$$Fr_{nlp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \left[\left(\frac{X_{nl}}{\pi r} \right)^2 + \left(\frac{p}{d} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

onde:

r = raio da cavidade ressonante

d = comprimento cavidade ressonante

X_{nl} = Raiz de Bessel, tanto para modo TE como TM

p = número de metades de variação do campo elétrico ao longo do comprimento

μ = permeabilidade do meio

ϵ = permissividade do meio,

sendo, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ e $\mu = \mu_0 \mu_r$, onde ϵ_r , μ_r , ϵ_0 e μ_0 são respectivamente, permissividade e permeabilidade relativa, permissividade e permeabilidade do vácuo, com valores constantes: $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ e $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-8} NA^{-2}$.

Para que uma cavidade eletromagnética armazene energia é necessário que exista uma excitação, que é realizada por acoplamento. Esse acoplamento pode ser com ponta de prova, anel de corrente ou através de uma abertura. A posição e o modo do acoplamento dependem das configurações dos campos elétrico e magnético na cavidade.

Teoricamente uma cavidade apresenta infinitas frequências ressonantes, porém na prática apenas uma ou algumas são de interesse, por isso a escolha das dimensões da cavidade, posição e forma do acoplamento dependem do modo de propagação desejado. Os modos de propagação podem ser Transversal Elétrico (TE) ou Transversal Magnético (TM). Os três modos fundamentais para cavidades cilíndricas são: TM_{010} , TE_{111} e TE_{011} [7].

Uma excitação do tipo ponta de prova (figura 1.a) deve ser posicionada de modo paralelo ao campo elétrico e onde este seja máximo. No entanto os anéis de correntes (figura 1.b) devem se acoplados na posição onde o campo magnético é máximo e de modo perpendicular ao campo[5].

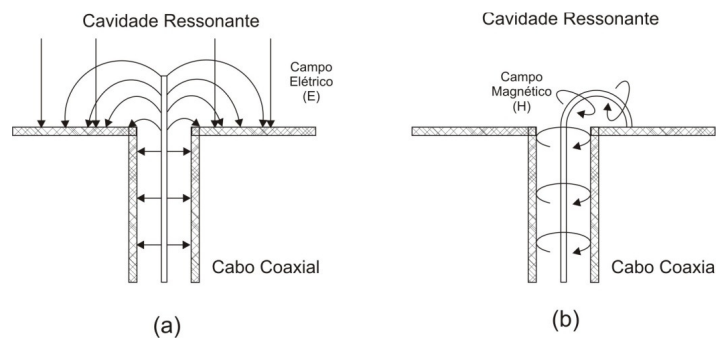


Figura 1 - Acoplamento de Excitação das antenas.

Resultados e Discussão

O sensor apresentado neste trabalho utiliza uma cavidade ressoante cilíndrica, com acoplamento de excitação do tipo ponta de prova. Há duas antenas, uma para transmissão (Tx) e outra para recepção (Rx) do sinal. O projeto do sensor deve ser realizado partindo do princípio que as antenas não devem interferir no fluxo, bem como não podem ser danificadas pelo movimento dos fluídos ou por limpeza do duto. Para isso, as antenas estão separadas do fluxo, sendo fixadas em um cilindro de maior diâmetro que o duto contendo o fluxo com a mistura. De forma que um cilindro está inserido dentro do outro.

A construção do cilindro externo deve ser necessariamente metálica para formar uma cavidade ressonante eletromagnética e confinar a energia em seu interior, por outro lado o duto contendo a mistura bifásica de óleo e água deve ser de material dielétrico de modo a permitir a penetração das ondas eletromagnéticas no material sobre amostragem. Os aspectos construtivos do sensor são mostrados na figura 2.

O sensor é projetado para ser implementado em um ambiente de produção real, por isso há algumas restrições quanto às dimensões. O duto deve ser de 3" para permitir taxas de fluxos correspondente com a demanda industrial. Outra restrição é o fato que quando maior o raio de uma cavidade eletromagnética, menor é sua frequência de corte. Esse é um fator de grande relevância ao projeto. Portanto a cavidade deve apresentar um diâmetro mínimo de 3" mais o espaço necessário para a introdução das antenas de forma não intrusiva no duto. Seguindo esses aspectos as dimensões da cavidade projetada são: raio = 6.35cm (Diâmetro=5") e comprimento=15 cm.

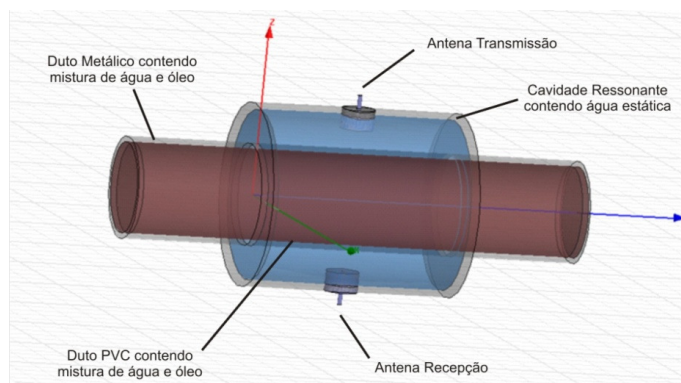


Figura 2 - Aspectos Construtivos do sensor.

O monitoramento das fases é realizado pela interação das ondas com o meio de propagação dentro da cavidade. Essa interação deve-se ao fato que o comportamento da propagação das ondas em uma cavidade eletromagnética depende do meio. Em especial das propriedades elétricas e magnéticas, tais como permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade (σ).

O princípio deste sensor é o fato de que a água apresenta uma permissividade relativa de $\epsilon_{rW} = 81$ e o óleo $\epsilon_{rO} = 2,1$. A permissividade no interior do duto assume valores esperados entre $2,1 \leq \epsilon_r \leq 81$, considerando uma variação de mistura totalmente com óleo a completamente com água. Portanto, uma pequena mudança na fração de água apresenta grande variação na frequência de ressonância, que é máxima com a presença de óleo e a mínima para água para um mesmo modo de propagação. No entanto a permeabilidade relativa é $\mu_r = 1$ e constante tanto para água quanto óleo.

Entre o cilindro externo e o duto interno por onde flui o material, há um vão que pode ser preenchido com ar, água ou qualquer material dielétrico. Quanto menor a permissividade desse material maior será a variação da frequência de ressonância para mudança da fração de água dentro do duto interno. Ao preencher o espaçamento entre os dois cilindros com ar tem-se uma maior variação de frequência do que com água, pois a permissividade do ar $\epsilon_{rA} = 1$. Por outro lado ocorre uma grande variação nas amplitudes do sinal recebido, sendo um fator complicante na detecção do pico de ressonância. O que não ocorre quando é utilizado água para completar a cavidade. A utilização de água reduz a faixa da variação da frequência de ressonância para mudanças de fração de água, ver tabela 1. Essa redução é significativa, mas não a ponto de inviabilizar a realização do sensor. O fato de utilizar água na parte externa mantém o sinal recebido com uma atenuação mais constante e proporciona uma maior resistência mecânica ao duto para suportar valores reais de pressão.

Tabela 1 – Primeira ressonância para ar e água na parte externa, simulado.

Externo	Interno	Frequência [MHz]	Variação Frequência
Água	Óleo	439,0	132,0
	Água	307,0	
Ar	Óleo	1.329,0	976,5
	Água	352,5	

A permissividade da cavidade externa é independente da do fluido dentro do duto, bem como a permissividade da mistura no interior do duto é independente da externa. Porém a parcela estática da água externa afeta a permissividade do sensor como um todo. Além disso o volume das paredes do duto é significativo no interior do sensor. O duto por si só apresenta uma permissividade relativa de 2,1 se considerando sua construção de teflon. Portanto quando o fluxo for puramente água, tem-se um valor de permeabilidade relativa máximo, porém menor que 81, por causa do duto de teflon. Por outro lado quando se tem óleo contínuo, a parcela estática da água proporcionará um valor de permissividade do sensor maior que 2,1.

Os valores correspondentes de permissividade podem ser calculados pela fórmula de Bruggeman (2), para uma mistura bifásica de água e óleo homogênea. Sabe-se que na prática o fluxo não é homogêneo, contudo faz-se aqui uma aproximação para conduzir o estudo teórico e as simulações [5,6]. Através da fórmula (2) calcula-se uma aproximação de valores teóricos para diferentes porcentagens de água em uma mistura água e óleo, apresentados na tabela 2. A terceira coluna corresponde à frequência de ressonância para o modo TE₁₁₁.

$$\frac{\varepsilon_o - \varepsilon_{mix}}{\varepsilon_o - \varepsilon_w} \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{mix}} \right)^{1/3} = 1 - \varphi_o = \varphi_w, \quad (2)$$

onde, ε_o , ε_w , ε_{mix} são permissividade relativa de óleo, água e mistura, respectivamente, φ_o é o volume relativo de óleo e φ_w de água.

Tabela 2 – Aproximação de Bruggeman (2) e respectivas frequências de ressonância (1).

Água [%]	E _r Mistura	Freq. Res. [MHz]	Água [%]	E _r Mistura	Freq. Res. [MHz]
0	31,46	304,47	60	51,89	237,07
10	34,60	290,30	70	55,63	228,95
20	37,86	277,54	80	59,47	221,44
30	41,22	265,99	90	63,40	214,48
40	44,68	255,49	100	67,41	207,99
50	48,23	245,89			

O uso do modo TE₁₁₁ foi escolhido por ser o que apresenta menor frequência de ressonância dentre os modos fundamentais. A tabela 3 apresenta as frequências de ressonâncias com o sensor preenchido com água para os principais modos de propagação.

Tabela 3 - Frequências de ressonância.

Modo	TE ₁₁₁	TM ₀₁₀	TE ₀₁₁
Frequência [MHz]	189,7	200,8	338,9

Para realizar as simulações foi utilizado um software de simulação HFSS de estruturas em frequências eletromagnéticas elevadas, com soluções por elementos finitos, desenvolvido pela Ansoft. Este simulador resolve as complexas equações de Maxwell, matriz de parâmetros S e também gera a distribuição dos campos elétrico e magnético em 3D [9]. As simulações foram realizadas com o projeto do sensor considerando a parte estática de água na parte externa e uma variação da fração de água no interior do duto, através de valores calculados com a equação (2), tais valores são expressos na tabela 4.

Tabela 4 - Valores de Permissividade Relativa para diferentes frações de água no duto.

Água [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E _r Mix	2,10	5,27	9,94	15,84	22,78	30,63	39,30	48,72	58,84	69,61	81,00

Os resultados de simulação são apresentados na figura 3, é possível ver claramente o deslocamento da frequência de ressonância para variações da fração de água, as curvas apresentadas correspondem ao primeiro pico de ressonância para uma mistura estática de água e óleo dentro do duto. O resultado é expresso pela atenuação do sinal de 1 watt transmitido de Tx para Rx.

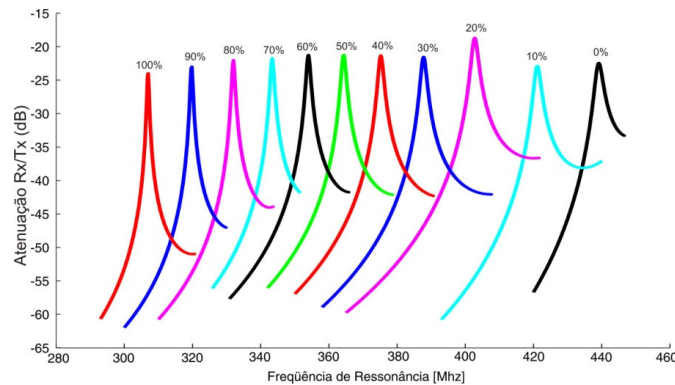


Figura 3 - Primeiro Ressonância para Variações de água em duto fechado

Para desenvolver um sensor baseado em cavidades ressonantes, que possa monitorar o fluxo em um duto de produção, é necessário abrir as extremidades de tal forma que a mistura de água e óleo possa fluir através do sensor. O fato de abrir as extremidades da cavidade foi simulado no software HFSS e apresentado na figura 4 para varias frações de água, bem como comparado com uma cavidade ideal fechada e ilustrado figura 5.

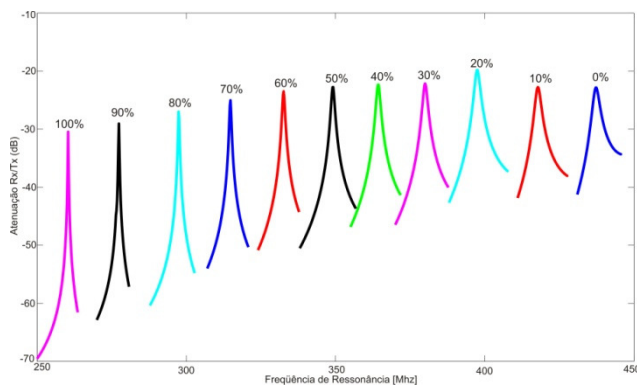


Figura 4 - Ressonância com extremidades do duto abertas

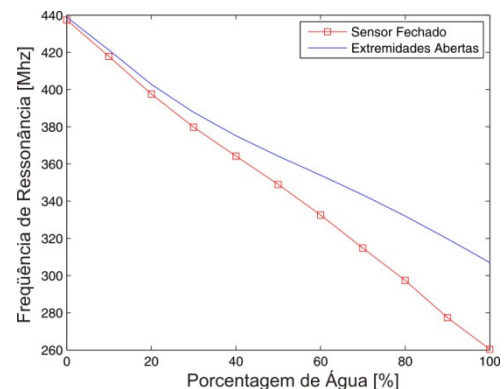


Figura 5 - Comparação entre sensor fechado e aberto

O modo de ressonância TE_{111} que está sendo utilizado apresenta uma dependência em relação ao comprimento do sensor, o que fica claro ao analisar a figura 5, onde o simples fato de abrir as extremidades provocou alterações nos valores de ressonância. Entretanto esta diferença é facilmente eliminada realizando uma calibração no sensor. Por outro lado esse efeito pode ser previsto na equação (1) que apresenta um termo dependendo de p e d . Sendo assim possível eliminar a dependência do sensor em função de seu comprimento ao escolher algum modo de propagação com $p=0$, como por exemplo, o modo TM_{010} . Para esse modo é possível prever que com as extremidades abertas apenas afetem o fator de qualidade será afetado (Q), [8].

Conclusões

A utilização de técnicas de micro-ondas em cavidades eletromagnéticas mostrou-se muito interessante para desenvolvimento de sensores de medição de frações de água em misturas multifásicas. Para validação dos resultados desse trabalho, está sendo construído um protótipo experimental em escala de laboratório.

Além dos desafios construtivos, surgiram outros que estão sendo abordados e serão expressos em trabalhos futuros, como por exemplo, as incertezas causadas por variações de temperatura e utilização de água com concentração de sal, que agrega condutividade a mistura.

Finalmente o desenvolvimento de um sistema de medição multifásica de baixo custo, permitirá maior participação da indústria nacional na área de instrumentação para o setor de petróleo e gás natural. Plataformas off-shore se beneficiam da redução do espaço físico proporcionado por este tipo de medidor. Sua utilização também é comum na recuperação de poços, por permitir um monitoramento constante das frações de água em poços que utilizam injeção de água ou de gás na extração do óleo. Além disso, é possível ainda promover a automação e controle desses poços com medições contínuas do escoamento em tempo real, disponíveis para processamento digital.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e B combustíveis (ANP) pelo apoio fornecido na forma do Programa de Recursos Humanos PRH-34-ANP/MCT.

Referências Bibliográficas

- [1] AL-HAJERI, S.; Wylie, R. S.; STUART, R. A.; AL-SHAMMA'A, A. I. *An electromagnetic cavity sensor for multiphase measurement in the oil and gas industry*. Journal of Physics: Conference Series 76, 2007.
- [2] CARLSON, Johan. *Ultrasonic characterization of materials and multiphase flows*. Phd thesis. Lulea University of Technology, 2002.
- [3] KEY, Martyn John. *Gas microstructure x-ray detectors and tomographic multiphase flow measurement*. PhD thesis. University of Surrey, 1999.
- [4] NYFORS, Ebbe G. *Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow*. PhD thesis. Helsinki University of Technology, 2000.
- [5] NYFORS, Ebbe G. VAINIKAINEN, Pertti. *Industrial Microwave Sensors*. Book. Artech House inc – 1989.
- [6] OYSTEIN, L. B.; NYFORS, E. *Application of microwave spectroscopy for the detection of water fraction and water salinity in water/oil/gas pipe flow*. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002.
- [7] Wylie, R. S.; SHAW A.; AL-SHAMMA'A, A. I. *Real-Time measurements of oil, gas and water contents using an EM wave sensor for oil-marine-environment industrie*. 36th European Microwave Conference, 2006.
- [8] Wylie, R. S.; SHAW A.; AL-SHAMMA'A, A. I. *RF sensor for multiphase flow measurement through na oil pipeline*. Institute of Physics Publishing - Measurement Science and Technology, 2006.
- [9] www.ansoft.com/products/hf/hfss/