



COPPE/UFRJ

SISTEMA INTELIGENTE DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE SEM FIO
BASEADO EM MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA

Jose Luiz Arias Vidal

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro

Abril de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SISTEMA INTELIGENTE DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE SEM FIO BASEADO
EM MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA

Jose Luiz Arias Vidal

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D. Sc.

Prof. Marcelo Luiz Rodrigues de Campos, Ph.D.

Prof. Paulo Couto, Dr.Eng.

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2010

Vidal, Jose Luiz Arias

Sistema Inteligente de Comunicação e Controle sem Fio Baseado em Materiais com Memória de Forma/Jose Luiz Arias Vidal, - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,2010.

XX, 112 p. 29,7 cm .

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Tese doutorado- UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica,2010.

Referências Bibliográficas: p. 105-112.

1. Modelo de Monitoração e Controle sem Fio em e de Poços de Petróleo.
2. Sistemas sem Fio em Meios Multifásicos.
3. Válvula para Controle de Poço de Petróleo usando SMA.
4. Modelo de Geração e Conversão de Energia.

I. Antoun Netto Theodoro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica, III Título.

Dedico esta Tese aos meus pais: Emílio
Jose Perdiz Vidal (in memoriam) e
Maria Arias Vidal, a minha esposa:
Rosana Pardine de Aragão Vidal, pelo
amor e incentivo sempre presentes.

Agradecimentos

- Primeiramente agradeço a Deus por me dar forças e me iluminar durante toda minha trajetória para escrever e pesquisar esta tese. Nos momentos mais difíceis de minha existência, Ele trouxe paz e alegria ao meu coração.
- Agradeço aos meus pais: Emílio Jose Perdiz Vidal (in memoriam) e Maria Arias Vidal pela educação recebida, pelo constante amor que me deram, pela alegria usufruída em minha vida, por todo apoio e base fornecidos, por me incentivarem a cursar o Doutorado e por sempre priorizarem o estudo científico.
- Agradeço à minha esposa Rosana Pardine de Aragão Vidal por me incentivar a começar, desenvolver e concluir este trabalho. Pelo apoio dado em todos os aspectos para a concretização deste trabalho. Pela paciência em me entender nos momentos de estresse e cansaço. Por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida me apoiando e opinando em qualquer situação.
- Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro, a COPPE, ao Centro de Tecnologia, ao Departamento de Engenharia Oceânica, ao Laboratório de Tecnologia Submarina e à PETROBRAS/CENPES por contribuírem para a ampliação de meus conhecimentos acadêmicos e profissionais.
- Agradeço ao mestre, em especial ao orientador Theodoro Antoun Netto pelas dúvidas respondidas, correções, explicações, aulas, paciência, disponibilidade e todo auxílio na realização desta tese.
- Agradeço aos doutores: Theodoro Antoun Netto, Paulo Couto, Marcelo Luiz Rodrigues de Campos, Ilson Paranhos Pasqualino, e Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco por participarem da banca examinadora.

Resumo de Tese apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

SISTEMA INTELIGENTE DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE SEM FIO BASEADO
EM MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA

Jose Luiz Arias Vidal

Abril/2010

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Oceânica.

Este trabalho desenvolve um novo conceito e modelo teórico de comunicação e controle totalmente sem fio, por meio de ondas eletromagnéticas que se propagam pelas estruturas de um poço de petróleo até o dispositivo de controle. Um novo conceito é desenvolvido para o sistema de atuação que viabiliza a atuação sem fio com boa eficiência com o uso de atuadores com materiais de memória de forma (SMA). Adicionalmente propõe-se um novo modelo para a geração e armazenamento de energia elétrica obtida pela conversão de energias disponíveis provenientes da passagem do fluxo de fluidos no interior das colunas de produção de petróleo. Os resultados obtidos a partir dos modelos experimentais observados corroboram os resultados previstos analiticamente.

Abstract of the Thesis presented to COPPE/UFRJ in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SHAPE MEMORY MATERIALS-BASED SMART WIRELESS COMMUNICATION
AND CONTROL SYSTEM

Jose Luiz Arias Vidal

April/2010

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Ocean Engineering.

This work presents a new concept and model of a true wireless communication and control system, using electromagnetic waves propagated by the structures of an oil well to a control device. A new concept is developed for the system performance that enables wireless operation with fairly good efficiency by using shape memory materials (SMA)-based actuators. Additionally a new model is proposed for the generation and storage of electrical energy produced by the conversion of the energy available from the passage of fluid flow inside the column of oil production. The experimental results of the models corroborate the analytical predictions.

ÍNDICE ANALÍTICO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.2	MOTIVAÇÃO	1
1.3	TECNOLOGIAS SEM FIO EM POÇOS DE PETRÓLEO	2
2	SISTEMAS SEM FIO EM MEIOS MULTIFÁSICOS.	6
2.1	MODELO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM MEIOS MULTIFÁSICOS.	8
2.2	MODELO DE COMUNICAÇÃO ELETROMAGNÉTICA VLF (MODELO 1)	10
2.2.1	Propagação da Onda Eletromagnética em uma Coluna de Produção	22
2.2.2	Modelo Teórico de Comunicação Eletromagnética VLF	23
2.3	MODELO DE COMUNICAÇÃO POR INJEÇÃO DE CORRENTE (MODELO 2)	38
2.4	MODELO DE COMUNICAÇÃO POR INDUÇÃO MAGNÉTICA (MODELO 3)	43
2.4.1	Modelo Teórico de Comunicação por Indução Magnética	45
3	MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA.	59
3.1	EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA (SME)	61
3.2	EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA REVERSÍVEL (TWSME)	62
3.3	ATUADORES COM MATERIAIS DE MEMÓRIA DE FORMA	63
3.3.1	Atuadores com Materiais de Memória de Forma SMA	64
3.3.2	Atuadores com Memória de Forma FSMA.	69
4	ESTUDO DE CASO DE APLICAÇÃO	72
4.1	VÁLVULA PARA CONTROLE DE POÇO SEM FIO	72
4.1.1	Testes com o Dispositivo de Atuação do Tipo Carretel.	79
4.1.2	Válvula para Controle de Poço Tipo Rotativa	87
4.2	SISTEMAS DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	91
4.2.1	Modelo de Geração de Energia.	91

4.3	MODELO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.	94
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
5.1	CONCLUSÕES	99
5.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	101
5.3	TRABALHOS FUTUROS.	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a: Arquitetura de monitoração sem fio offshore	4
Figura 1b: Arquitetura de controle sem fio onshore	5
Figura 2. Sistema de comunicação sem fio	11
Figura 3: Atenuação na água x frequência	13
Figura 4: Perda de refração na interface ar-água em função da frequência	15
Figura 5: Comprimento de onda x frequência	16
Figura 6: Transmissão do ar para água fresca	18
Figura 7: Transmissão da água fresca para o ar	18
Figura 8: Transmissão na água fresca com transmissor e receptor submersos	19
Figura 9: Transmissão em largas distâncias acima da superfície de um receptor submerso	20
Figura 10: Comunicação entre duas estações submersas	21
Figura 11: Configuração geométrica do modelo teórico de comunicação (Modelo 1)	24
Figura 12: Configuração geométrica de um dipolo elétrico vertical em um meio homogêneo.	25
Figura 13: Discretização da coluna de produção em “n” elementos	30
Figura 14: Campo elementar E_{Vs}^{ra} no ponto M(D) provocado por uma densidade de corrente I_{ρ}^{im} situada na profundidade D_T .	31
Figura 15: Impedância de superfície x frequência.	34
Figura 16: Distribuição da corrente ao longo da coluna na frequência de 2Hz	35
Figura 17: Distribuição de corrente ao longo de uma coluna com raio $r_e = 10cm$.	36
Figura 18: Distribuição de corrente ao longo de um tubo oco	37
Figura 19: Distribuição de corrente ao longo de um tubo imerso no mar	38
Figura 20: Modelo de linha de transmissão considerando a aplicação de corrente nas extremidades dos dutos (sobre os “packers”)	39
Figura 21: Modelo de linha de transmissão considerando a aplicação de corrente a 25% do comprimento total entre as extremidades dos dutos	40

Figura 22: Corte um poço de produção utilizando a tecnologia de transmissão por ondas eletromagnéticas através do uso de bobinas.	44
Figura 23, Escolha da licença de trabalho.	46
Figura 24 Simulação em elementos finitos de transmissão eletromagnética de um modelo de poço	47
Figura 25: Desenho da bobina utilizada no modelo.	47
Figura 26: Densidade de fluxo magnético na região próxima à bobina para diferentes frequências: (a) 1hz, (b) 10hz, (c) 30hz e (d) 50hz	50
Figura 27: Densidade de correntes parasitas na região próxima à bobina para diferentes frequências: (a) 1hz, (b) 10hz, (c) 30hz e (d) 50hz.	51
Figura 28: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para diferentes frequências (corrente 1A)	52
Figura 29: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 1HZ (corrente 1A)	53
Figura 30: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 10HZ (corrente 1A)	54
Figura 31: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 1Hz e 10HZ (corrente 10A)	57
Figura 32: Curva fase-temperatura	60
Figura 33: Representação esquemática de um atuador com memória de forma	65
Figura 34: Desenho esquemático do dispositivo de atuação tipo carretel	74
Figura 35: Desenho esquemático das partes do dispositivo de atuação tipo carretel	75
Figura 36 Desenho esquemático do funcionamento do dispositivo tipo carretel	76
Figura 37: Ativação devido à transformação de fase durante o resfriamento	77
Figura 38: Ativação devido à transformação de fase inversa durante o aquecimento	78
Figura 39, Transformação de fase e ativação durante o resfriamento sob tensão	78
Figura 40, Transformação de fase e ativação durante o aquecimento sob tensão	79
Figura 41: Foto do experimento realizado com o dispositivo de atuação tipo carretel	81
Figura 42: Deslocamento angular e temperatura do interior do dispositivo ao longo de 14 ciclos.	82

Figura 43: Variação da temperatura em cada ciclo no interior do dispositivo	83
Figura 44: Variação da rotação em cada ciclo do interior do dispositivo	83
Figura 45: Desenho esquemático da simulação feita em elementos finitos	85
Figura 46: Resultados da simulação da deformação para várias forças de resistência	86
Figura 47: Resultados da simulação da força de atuação para várias forças de resistência	86
Figura 48: Desenho da válvula tipo carretel	90
Figura 49: Transdutor piezelétrico da Steiner & Martins	92
Figura 50: Desenho esquemático do módulo de geração de energia	93
Figura 51: Circuito de armazenamento de energia	97
Figura 52: Simulação da operação do circuito de armazenamento durante 1 dia	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Simulações para a aplicação de corrente nas extremidades dos dutos (sobre os “packers”).	41
Tabela 2: Simulações para a aplicação de corrente a 25% do comprimento total entre as extremidades dos dutos	42
Tabela 3: Propriedades Elétricas e Magnéticas de cada Material	44
Tabela 4: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para diferentes frequências	53
Tabela 5: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à transmissora (1 “ packer ” a cada 10m)	55
Tabela 6: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à bobina transmissora (1 “ packer ” a cada 50m)	55
Tabela 7: Voltagem induzida na bobina receptora em função das diferentes propriedades elétricas do óleo e da formação relação à bobina transmissora	56
Tabela 8: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à transmissora (1 “ packer ” a cada 50m)	57
Tabela 9a. Comparação entre os Materiais Inteligentes	70
Tabela 9b. Comparação entre o SMA e FSMA	71
Tabela 10: Propriedades Mecânicas da Liga NiTi “ <i>AlloyBB</i> ” a 40°C	85
Tabela 11: Parâmetros para o dispositivo tipo carretel	87
Tabela 12: Características do atuador tipo carretel	89
Tabela 13: Número de módulos de geração necessários	94
Tabela 14- Número de módulos de armazenamento necessários	96
Tabela 15: Características do dispositivo tipo carretel	98
Tabela 16: Consumo da válvula rotacional	98

ÍNDICE DE NOMECLATURA

A_t	Área Transversal
A	Área da Seção Transversal do Tubo na Profundidade D_T . m[ft]
A	Área
A/m	Ampère por Metro
A_f	Finalização da Transformação Austenítica
Al	Alumínio
A_p	Parâmetro Ajustável do Modelo Polinomial
As	Arsênio
A_s	Inicialização da Transformação Austenítica
B	Campo Magnético Efetivo
B_{1p}	Parâmetro Ajustável do Modelo Polinomial
B_{1t}	Parâmetro Ajustável do Modelo Trigonométrico
B_{2p}	Parâmetro Ajustável do Modelo Polinomial
B_{2t}	Parâmetro Ajustável do Modelo Trigonométrico
Bi	Bismuto
C	Constante
Co	Cobalto
C_p	Parâmetro Ajustável do Modelo Polinomial
Cr	Cromo
Cgs	Centímetro-Grama-Segundo
C_t	Parâmetro Ajustável do Modelo Trigonométrico
Cu	Cobre
D	Profundidade do Ponto de Recepção M, m[ft]
D_T	Profundidade do Dipolo de Transmissão, m[ft]
Dy	Disprósio
Eu	Európio
E	Campo Elétrico, V/m

E_{mag}	Energia Magneto motriz
e_x	Eixo x
e_y	Eixo y
f^{ξ}	Função da Variante Martensítica
f_n	Função Básica.
f_T	Frequência de Transmissão, Hz.
F_{MSMA}	Força do Material com Memória de Forma Magnética
F_{mat}	Força do Material
F_{mec}	Força Mecânica
F	Força
Fe	Ferro
F_{tw}	Força de União (<i>Twinning Force</i>)
FSMA	Liga Com Memória de Forma Ferromagnética
F_v	Fração Volumétrica da Variante Martensítica
G	Energia Livre de Gibbs
G_0	Energia Livre de Gibbs inicial
Ga	Gálio
Gd	Gadolínio
$G(r)$	Função de Green
$H_0^{(1)}$	Ordem Zero-Terceiro Tipo da Função de Bessel
H_1^1	Primeira Ordem - Terceiro Tipo da Função de Bessel
$H^{s(1,2)}$	Campo Magnético Correspondente ao Princípio do Processo de Reorientação na Ida
$H^{s(2,1)}$	Campo Magnético Correspondente ao Princípio do Processo de Reorientação na Volta
$H^{f(1,2)}$	Campo Magnético Correspondente ao Término do Processo de Reorientação na Ida

$H^{f(2,1)}$	Campo Magnético Correspondente ao Término do Processo de Reorientação na Volta
H	Henry
H	Intensidade de Campo Magnético
H_{fa}	Campo Magnético Correspondente ao Término do Processo de Reorientação na Ida
H_{fr}	Campo Magnético correspondente ao Término do Processo de Reorientação na Volta
H_{sa}	Campo Magnético Correspondente ao Princípio do Processo de Reorientação na Ida
H_{sr}	Campo Magnético Correspondente ao Princípio do Processo de Reorientação na Volta
I	Quatro Regiões das Combinações das Variantes Martensíticas e Domínios Magnéticos
I	Corrente Elétrica- A
I_{ρ}	Densidade de Corrente A/m^2
J	Joule
j	Número Imaginário $\sqrt{-1}$
J_0	Ordem Zero do Primeiro Tipo da Função de Bessel.
J_1	Primeira Ordem do Primeiro Tipo da Função de Bessel
K	Kelvin
L	Comprimento da Coluna de Produção M[Ft]
M	Indução Magnética, A/m.
M	Magnetização
M^{sat}	Magnetização de Saturação
Mn	Manganês
Mpa	Mega Pascal
M_s	Magnetização de Saturação
MSM	Memória de Forma Magnética
$MSMA$	Liga com Memória de Forma Magnética
$MSME$	Efeito de Memória de Forma Magnética

Mt	Fase Martensítica
Mtf	Finalização da Transformação Martensítica
Mts	Inicialização da Transformação Martensítica
N	Newton
<i>N</i>	Número de Espiras
\vec{N}	Vetor Normal
Ni	Níquel
Nol	Naval Ordnance Laboratory
O	Oxigênio
Oe	Oersted
P	Densidade de Massa
Pd	Paládio
Pt	Platina
\vec{P}	Vetor Peso
P_{cons}	Potência Consumida
P_{forn}	Potência Fornecida
Q_{ρ}	Densidade de Carga, C/m ³
R	Resistência
<i>r</i>	Distância Entre o Ponto de Observação Q, e um Elemento Fonte Volumétrica da Coluna, m[ft]
r_e	Raio Externo Do Tubo, m[ft]
r_H	Distância Horizontal Entre o Ponto de Observação Q e o Eixo D, m[ft]
r_i	Raio Interno do Tubo, m[ft]
r_{Mi}	Distância Entre o Ponto de Observação M na Superfície do Tubo e a Imagem da Fonte, m[ft]
r_{Ms}	Distância Entre o Ponto de Observação M na Superfície do Tubo e a Fonte, m[ft]
r_{Qi}	Distância Entre o Ponto de Observação Q e a Imagem da Fonte, m[ft]
r_{Qs}	Distância Entre o Ponto de Observação Q e a Fonte, m[ft]
r_V	Distância Vertical entre a Fonte de Voltagem e um Ponto de Observação no Tubo m[ft]

S	Entropia Específica
Sb	Antimônio
SMA	Liga com Memória de Forma
SME	Efeito de Memória de Forma
T	Temperatura
t	Tempo, Segundos.
Ti	Titânio
U	Integral de Sommerfield
v	Volume, m^3 [ft]
\bar{v}	Número de Onda, m^{-1} ft ⁻¹
V	Voltagem, V
W	Watts
W_n	Função de Ponderação
X_m	Suscetibilidade Magnética
Y	Ítrio
Y^α	Quantidade Escalar Relacionada à Dissipação do Movimento de Rotação
Y^ξ	Quantidade Escalar Relacionada à Dissipação do Movimento do Limite Duplo
$Y^{\xi,p}$	Força Orientadora do Modelo Polinomial
$Y^{\xi,c}$	Força Orientadora do Modelo Trigonométrico
Z	Deformação Máxima do Modelo Experimental de Tickle (2000)
Zn	Zinco
Z_i	Impedância Interna de um Tubo Sólido, Ω/m
Z_{ih}	Impedância Interna de um Tubo Oco, ΩM
γ	Constante de Propagação, m^{-1} ft ⁻¹
δ	Profundidade de Penetração, m[ft]
ϵ	Constante Dielétrica, F/m
λ	Comprimento de Onda, m[ft]
μ	Permeabilidade Magnética, H/m
σ	Condutividade, S/m ou \mathcal{U}/m
ϵ_r	Deformação Residual

π^{ξ}	Força da Fração Volumétrica da Variante Martensítica
π^{α}	Força da Fração Volumétrica do Domínio Magnético
π^r	Força de Deformação por Reorientação
π^{θ_i}	Força de Rotação dos Momentos Magnéticos
$\pi^{\xi(1,2)}$	Força Termodinâmica da Fração Volumétrica Martensítica de Ida
$\pi^{\xi(2,1)}$	Força Termodinâmica da Fração Volumétrica Martensítica de Volta
ϕ^{ξ}	Função de Reorientação
ϕ^{α}	Função do Movimento da Parede do Domínio Magnético
Ξ	Fração Volumétrica
Σ	Tensão de Cauchy = Tensão
μ_0	Permissividade Magnética no Vácuo
Δl	Quantidade Escalar que a Barra MSMA Deslocou
Δx	Quantidade Escalar que a Massa Deslocou
σ^b	Tensão de Bloqueio
σ^{sv}	Tensão Inicial
ΔS	Tensor de Área
ε^r	Tensor de Deformação por Reorientação
ε^{-tr}	Tensor de Deformação por Transformação
ε^{te}	Tensor de Deformação Termo-Elastico
2-D	Bidimensional

Índices Superiores

mn	Índices de Matriz.
s	Superfície do Tubo
t	Total
v	Componente Vertical
0	Ar
1	Terra

2 Metal

Índices Inferiores

im Sinal Aplicado

ra Sinal Irradiado

→ Vetor.

Capítulo 1

1 Introdução

Recentes descobertas de novos campos de petróleo em águas ultra-profundas, que por sua vez necessitam cada vez mais de poços de grandes extensões, com exemplo do campo de “TUPI”, criaram novas necessidades tecnológicas no mercado de óleo e gás nacional e internacional para viabilizar a exploração e produção de novos campos de petróleo. Estas novas necessidades tecnológicas na área de poços, chamadas de poços inteligentes ou campos inteligentes exigem, por sua vez, o desenvolvimento de novos sistemas de monitoração e controle capaz de suportar as novas condições, tais como alta temperatura, alta pressão, e vibração (poços “*HTHP*” – *high temperature and high pressure*). Esta nova categoria de poços requer cada vez mais poços instrumentados com sistemas de controle e monitoração sem fio robustos (sensores e válvulas de controle no interior dos poços) capazes de atender aos requisitos técnicos e operacionais de automação exigidos em um campo petrolífero.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é a pesquisa e o estudo de novas tecnologias que viabilizem um novo conceito de monitoração e controle de poço sem umbilical. O modelo de sistema estudado e proposto é um sistema “*true wireless*” (totalmente sem fio) capaz de coletar os dados de fundo de poço e transmití-los para a superfície, e ao receber um comando da superfície atuar as válvulas de complementação inteligente no fundo do poço, mantendo de forma autônoma o “setpoint” (nível ou pressão pré-estabelecido dentro da margem admitida). As figuras 1a e 1b são exemplos de sistemas sem fio em poços de petróleo. O trabalho proposto é inédito e totalmente inovador em nível mundial, e representa uma quebra de paradigma na indústria de óleo e gás.

1.2 Motivação

A tecnologia hoje disponível de complementação inteligente e elevação artificial (tecnologia convencional elétrica e hidráulica) com uso de umbilicais para poços ultra-

profundos tem aspectos críticos (operações “*workover*”), e em alguns casos sua aplicação se torna inviável. Buscando atender às novas demandas se faz necessário o desenvolvimento de novas alternativas tecnológicas que viabilizem a construção de sistemas sem fio autônomos e integrados ao novo conceito de campos inteligentes. A alternativa mais indicada é o desenvolvimento de um sistema de completação inteligente e elevação artificial sem fio completamente autônomo, capaz de controlar e monitorar o reservatório sem a necessidade de cabos elétricos e umbilicais. O outro ponto importante que motiva este estudo é o domínio de novas tecnologias na área de engenharia de materiais (materiais inteligentes), sistemas sem fio e sistemas de geração e conversão de energia, que podem ser aplicadas em vários outros segmentos da indústria do petróleo.:

1.3 Tecnologias Sem Fio em Poços de Petróleo

Acredita-se que, se aplicadas, as tecnologias abordadas e estudadas neste trabalho poderão viabilizar a exploração e produção em poços altamente produtores, reduzindo drasticamente os custos de produção e intervenção nos poços. Os pontos importantes do sistema proposto neste estudo são: sistema de transmissão e recepção capaz de se propagar no interior do poço independente da sua geometria, com protocolo otimizado para um melhor aproveitamento da autonomia e ciclo de carga das baterias, projeto de válvulas com acionamento remoto eficiente, ou seja, com baixo consumo de energia, e sistemas de conversão, geração e acúmulo de energia elétrica, a fim de fornecer energia para a comunicação (telemetria) e atuação das válvulas. Desta forma, o presente estudo é focado em três tecnologias principais:

- **Comunicação e Controle sem Fio em Meios Multifásicos:** estudo e desenvolvimento de um modelo de comunicação sem fio capaz de realizar a comunicação entre o dispositivo de superfície e o dispositivo no fundo do poço de forma bidirecional e operar em um ambiente (canal) com geometrias complexas de forma estável com baixo consumo de energia e de modo confiável.

- **Materiais de Memória de Forma:** estudo e desenvolvimento de uma nova tecnologia para atuação no interior do poço de petróleo capaz de operar sem a necessidade de cabos elétricos ou linhas hidráulicas e que opere com baixo consumo de energia, alta confiabilidade e robustez.
- **Geração e Armazenamento de Energia:** estudo e desenvolvimento de um novo modelo e conceito de geração e armazenamento de energia elétrica no interior do poço de petróleo necessário para a atuação e comunicação com o sistema de superfície, por meio da conversão, transformação e armazenamento da energia disponível no interior do poço.

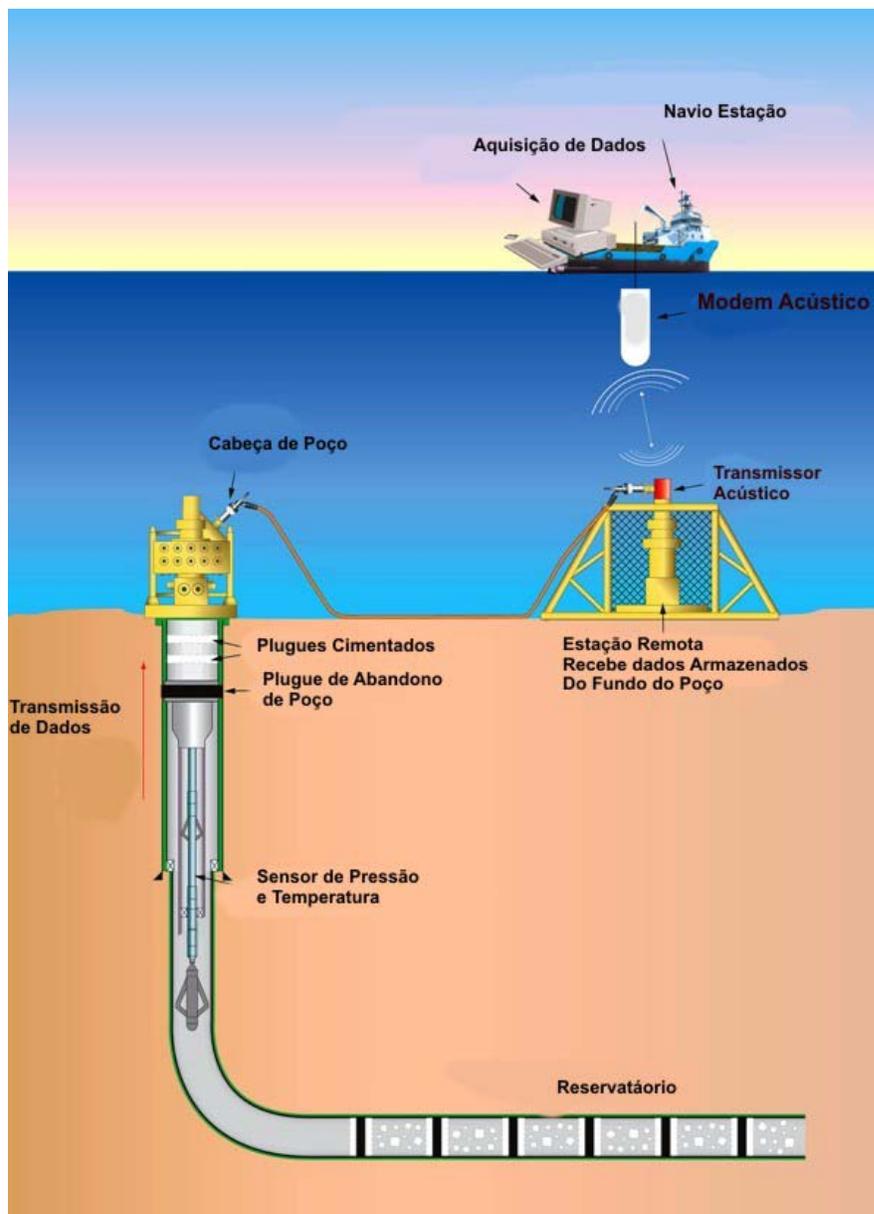


Figura 3a: Arquitetura de monitoração sem fio offshore.

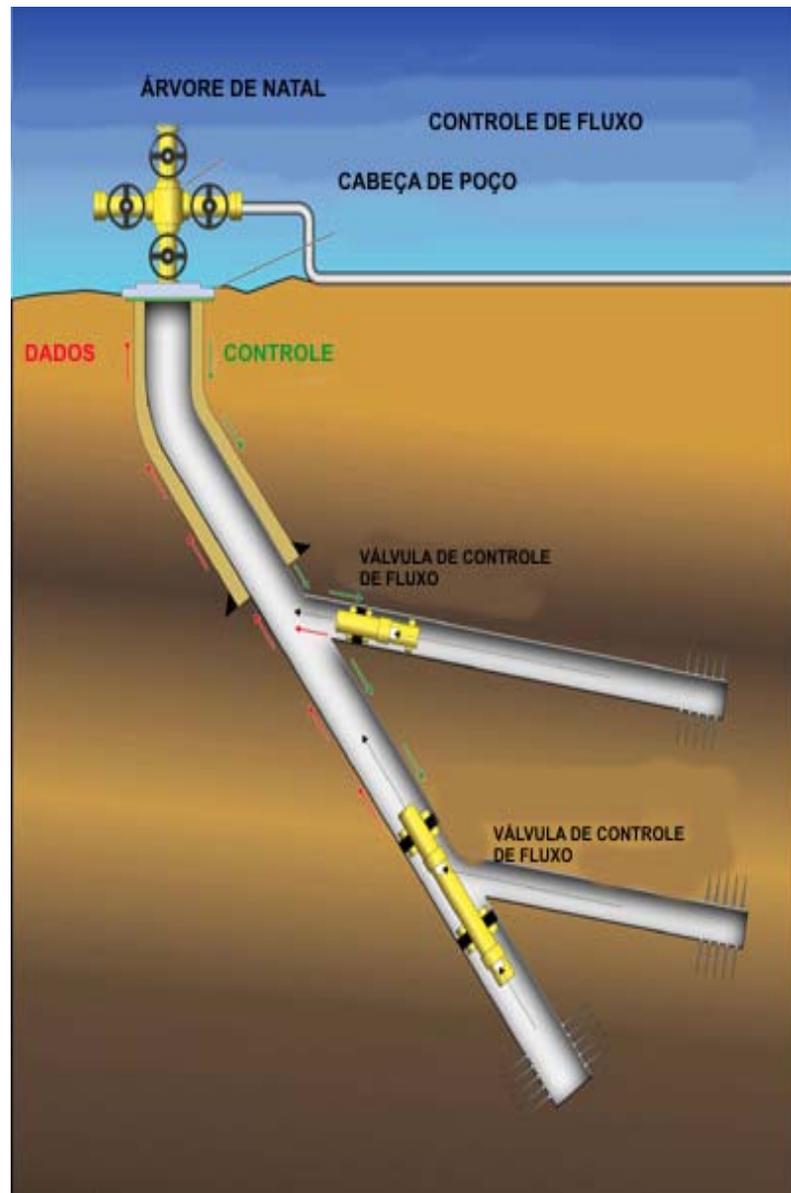


Figura 1b: Arquitetura de controle sem fio onshore.

Capítulo 2

2 Sistemas Sem Fio em Meios Multifásicos.

Os benefícios da comunicação sem fio (Figura 2) no interior de um poço de petróleo são altos. O interesse neste tipo de comunicação não se deve apenas à necessidade da investigação da conectividade entre os reservatórios, mas também à de desenvolver sistemas permanentes de monitoração dos poços capazes de acompanhar variáveis como pressão, vazão e temperatura. Adicionalmente à monitoração existe igualmente o interesse em controlar válvulas no interior dos poços. A tecnologia que agrega monitoração e controle em poços de petróleo é conhecida como “Completação Inteligente ou Poços Inteligentes”. Grandes esforços e recursos foram investidos durante anos para desenvolver uma tecnologia robusta capaz de atender aos requisitos técnicos de um ambiente de poço de petróleo.

Até a presente data foram estudados e desenvolvidos vários sistemas de telemetria sem fio, sempre baseados em uma das cinco metodologias abaixo:

- **Ondas de pressão:** método acústico que consiste na utilização de modem acústico. A transmissão é feita por meio de um sistema piezelétrico que transmite dados de maneira remota através da coluna de fluidos no interior de uma coluna de produção. Como exemplo, podemos citar a comunicação por pulsos de lama.
- **Ondas acústicas que se propagam nas paredes do tubo:** método que consiste na propagação de uma onda acústica em uma coluna de produção, gerada por meio de um dispositivo mecânico (modem) acoplado na parede da coluna que codifica as comunicações em pulsos acústicos.
- **Ondas eletromagnéticas (EM) que se propagam pela formação:** método que consiste na comunicação entre o dispositivo de superfície e o dispositivo no fundo do poço por meio da propagação de ondas eletromagnéticas de alta potência que são

irradiadas desde a formação, penetrando no revestimento de produção até alcançar o dispositivo na coluna de produção. A transmissão entre o dispositivo na coluna de produção e o sistema de superfície é transmitida e amplificada por módulos de retransmissão intermediários instalados na coluna de produção, que geralmente utilizam antenas que auxiliam a recepção.

- **Ondas eletromagnéticas (EM) que se propagam pela coluna de produção e o revestimento:** método que consiste na comunicação entre os dispositivos (superfície e fundo de poço) por meio da propagação de ondas eletromagnéticas de baixa potência em um dipolo formado entre a coluna de produção ou revestimento e um eletrodo referencial instalado na superfície.
- **Sistema de loop de corrente coaxial:** método onde a coluna de produção e o revestimento estão isolados eletricamente um do outro de forma que a coluna e o revestimento se comportam como um cabo de transmissão coaxial, onde o positivo é o elemento coluna de produção, e o negativo é o elemento revestimento (referencial terra).

Todos os cinco métodos apresentam restrições e limitações, de forma que, dependendo do tipo de aplicação (tipo de poço), um determinado método apresentará vantagens ou desvantagens sobre o outro. A transmissão por ondas de pressão, por ser um método acústico, necessita que toda a coluna seja preenchida por fluido monofásico sem a presença de ar. A transmissão do modem acústico possui baixa taxa de transmissão. Este método é limitado para uso em MWD (“*Measurement While Drilling*” – ferramenta de perfuração que usa comunicação por meio de pulsos de lama) na perfuração. Ondas Acústicas são afetadas pelo ruído produzido pelos equipamentos de produção instalados na superfície, e sofrem grandes atenuações ao longo das seções cimentadas da completação e nas conexões entre as seções. A Transmissão Eletromagnética via formação é altamente afetada por regiões de baixa condutividade, que atenuam a propagação da onda eletromagnética. A transmissão eletromagnética via coluna de produção também é afetada

por regiões de baixa condutividade, porém com menos intensidade. Por último tem-se a Transmissão via Loop de Corrente Coaxial, que requer de forma considerável a instalação de componentes que limitam a flexibilidade na hora da escolha do tipo de fluido que pode ser usado na região anular, pois esse deve possuir uma alta resistividade. Essa tecnologia é geralmente aplicada em poços de produção de gás (fluido de alta resistividade) ou poços injetores de água fresca.

2.1 Modelo de Comunicação sem Fio em Meios Multifásicos.

Numerosos estudos dirigidos para a indústria de óleo e gás foram efetuados, sempre no sentido de buscar uma alternativa sem cabo (ferramentas e sensores) para a comunicação com o fundo do poço de forma a obter os dados dos reservatórios em tempo real.

Entretanto, devido a certas barreiras tecnológicas do passado, tais como: dificuldades no uso do canal de comunicação (meio de propagação das ondas eletromagnéticas), que é drasticamente afetado pela geometria do poço (dimensões, metalurgia, e capacidade dielétrica do fluido), a energia necessária para que o dispositivo se comunique com a superfície, e custos altos gerados por aspectos operacionais (complexidade dos equipamentos), somente foram implantados sistemas sem fio de monitoração em poços piloto baseados em duas vertentes tecnológicas: telemetria de transmissão e recepção eletromagnética em baixas frequências VLF, e telemetria de transmissão em altas frequências HF. A partir de estudos recentes das tecnologias disponíveis, testes de laboratório, testes em escala real, análise de aspectos técnicos, análise de aspectos operacionais e análise de aspectos econômicos para aplicação em campos e poços de petróleo, foram selecionados três modelos para investigação e desenvolvimento:

- **Modelo 1:** Telemetria baseada em transmissão e recepção em frequências muito baixas VLF (*very low frequency*) que se propagam pela estrutura metálica do poço (coluna/revestimento).

- **Modelo 2:** Telemetria baseada em linha de transmissão via loop de corrente coaxial com uso de médias/baixas frequências que se propagam pela coluna de produção, ou seja, o poço tem o comportamento de um cabo coaxial, a coluna se comporta como condutor central, o revestimento como condutor de malha e o fluido como dielétrico.
- **Modelo 3:** Telemetria baseada em transmissão via indução eletromagnética. As transmissões e recepções do sinal são emitidas e recebidas por meio de bobinas localizadas ao longo da coluna de produção do poço.

- **O Modelo 1 apresenta as seguintes características:**

Por ser um sistema de transmissão em VLF, a propagação não é afetada pela geometria de poço, e sim pelas condições da formação (aterramento). Este modelo necessita de alta energia para a propagação do sinal de comunicação, o que pode ser crítico em poços de grande extensão. O sinal pode ser facilmente transmitido a todos os segmentos dos poços (poços multilaterais). Possui baixas taxas de transmissão, já que as taxas de transmissão estão associadas às frequências de transmissão (frequências baixas limitam as taxas de transmissão). Não há a necessidade de isolar a coluna do revestimento, a conexão entre a coluna e o revestimento no suspensor da coluna e a cabeça do poço ou árvore de natal.

- **O Modelo 2 apresenta as seguintes características:**

Por ser um sistema de transmissão por injeção de corrente (loop de corrente) em médias/baixas frequências, a propagação é afetada pela geometria de poço, e não pelas condições da formação (aterramento). Este modelo não necessita de fontes de energia no interior do poço para a propagação do sinal de comunicação, o que pode ser crítico em poços de grande extensão. O sinal não pode ser facilmente transmitido a todos os segmentos dos poços (poços multilaterais). Possui altas taxas de transmissão. Há a

necessidade de isolar a coluna do revestimento, a conexão entre a coluna e o revestimento no suspensor da coluna e a cabeça de poço ou árvore de natal.

- **O Modelo 3 apresenta as seguintes características:**

Este modelo é composto por um grupo de bobinas instaladas no interior do poço com a finalidade de transmitir o sinal de comunicação de baixa/alta frequência via indução magnética, ou seja, o sinal é transmitido por meio de pulsos eletromagnéticos que são codificados via protocolo (FSK ou PSK) em trechos curtos na coluna de produção. Este modelo tem potencial utilização em regiões de transição na coluna, em partes móveis, onde não é possível a propagação da comunicação entre o dispositivo de monitoração e a atuação.

O modelo 1 é o que reúne as condições mais favoráveis para uma instalação, pelo fato de que a geometria de poços é complexa e as características dielétricas do fluido nem sempre são conhecidas e regulares. A outra característica importante é o fato de que isolar a coluna do revestimento requer equipamentos especiais não disponíveis no mercado. O presente estudo se concentrará na análise e adaptação dos três modelos.

2.2 Modelo de Comunicação Eletromagnética VLF (Modelo 1)

A transmissão de dados por ondas VLF, do inglês “*very low frequency*” (frequências muito baixas) através da formação rochosa usando a estrutura do duto como antena apresenta vantagens no alcance da transmissão devido à propagação por um meio condutor (XIA ,M..Y., CHEN Z.Y., et al., 1993) , entretanto, a grande dificuldade do emprego desta tecnologia encontra-se na necessidade de isolar eletricamente o duto em duas partes de forma a constituir um dipolo de dimensões compatíveis com o comprimento de onda que se deseja transmitir (da ordem de quilômetros).

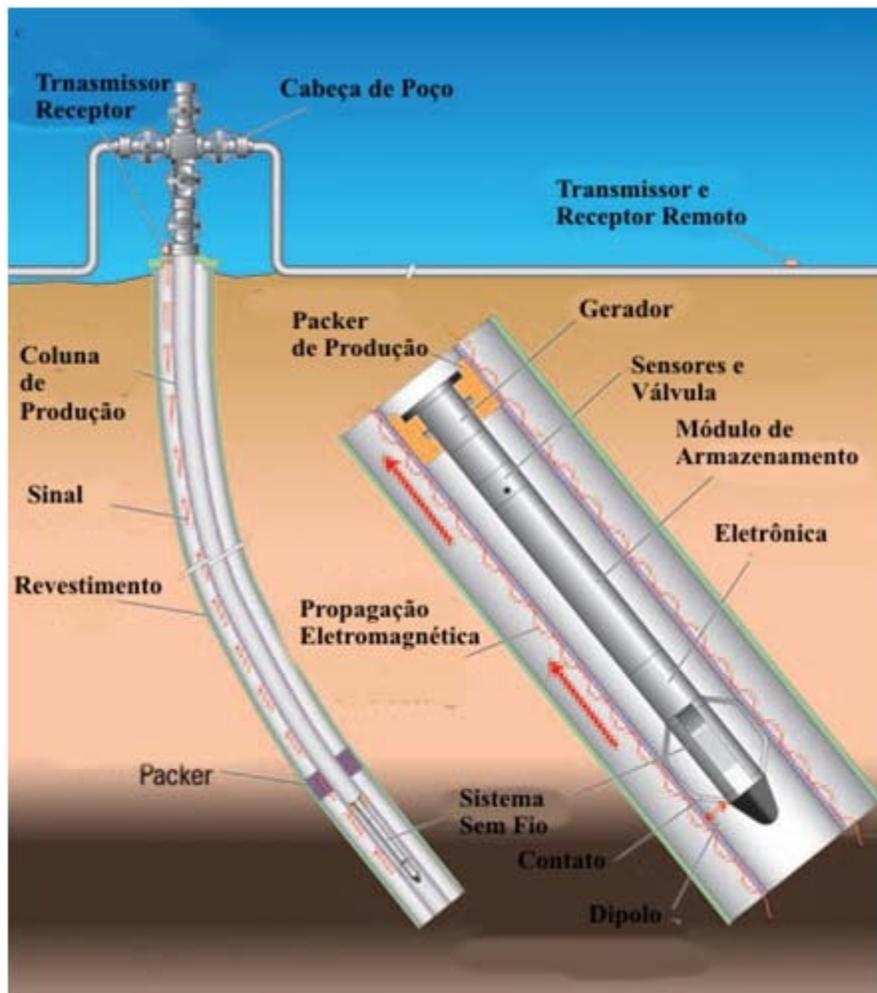


Figura 4. Sistema de comunicação sem fio

- **A Condutividade da Água**

A água pura é um isolante, entretanto quando em seu meio natural, ela contém sais e outros materiais que a tornam parcialmente condutora. Quanto maior a condutividade, maior a atenuação dos sinais de rádio que se propagam neste meio. Nos casos reais, encontram-se poços de petróleo que contêm sais e metais pesados dissolvidos na água, o que aumenta significativamente a sua condutividade.

A condutividade (σ) varia com a salinidade e temperatura. A água presente nos poços geralmente possui alta condutividade pelo fato de conter minerais dissolvidos. A condutividade da água gelada com baixa salinidade ou com minerais dissolvidos varia de 2m Ω /m a 8 m Ω /m (BUTLER, L., 1987), que é a forma típica de um poço de produção. Esta salinidade aumenta conforme o aumento da temperatura dos poços de produção de óleo.

Como referência, assumimos o valor médio de 4 m Ω /m. Isto quer dizer que um metro cúbico de água do mar tem a condutividade de 4 m Ω /m ou a resistência de 0,25 Ω (equivalente).

A água fresca tem baixa condutividade, e somente para fins de análise da água usada neste trabalho, consideramos que o sal dissolvido na água é de aproximadamente 300 mg/litro e a condutividade é de 0,0546. m Ω /m. É claro que as características da água mudam conforme o tempo, ano, período das chuvas, etc. Entretanto estes valores são usados somente como referência. Valores mais precisos somente poderão ser obtidos com medidas de condutividade em amostras da água obtidas no poço.

- **A Atenuação**

A atenuação das ondas eletromagnéticas na água (em qualquer meio condutor) aumenta com o incremento da condutividade e frequência. Esta relação pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\text{Atenuação } (\alpha) = 0,0173\sqrt{(f\sigma)}$$

Onde f é a frequência em Hz, e σ é a condutividade em m Ω /m.

Devido ao fato de que a atenuação da propagação de ondas eletromagnéticas em água salina ou condutiva em qualquer distância é muito alta, torna-se necessário o uso de frequências baixas (10kHz a 200Mz) onde a atenuação é da ordem de 3,5 a 10 dB por

metro. Transmissões em frequências acima de 800 MHz são praticamente impossíveis devido ao fator de atenuação. E como referência, transmissões em frequências acima de 1GHz em poços com profundidades acima de 3000 ft (914m) e diâmetro maior que 4 polegadas são inviáveis. A potência requerida para a transmissão seria altíssima e a antena não seria eficiente em propagar a potência necessária devido às restrições físicas.

A figura 3 mostra a atenuação em função da frequência no mar. A atenuação da água do mar é muito alta. A comunicação para altas profundidades somente será possível com o uso de baixas frequências (10 a 30Khz), onde a atenuação é da ordem de 3,5 a 5 dB por metro.

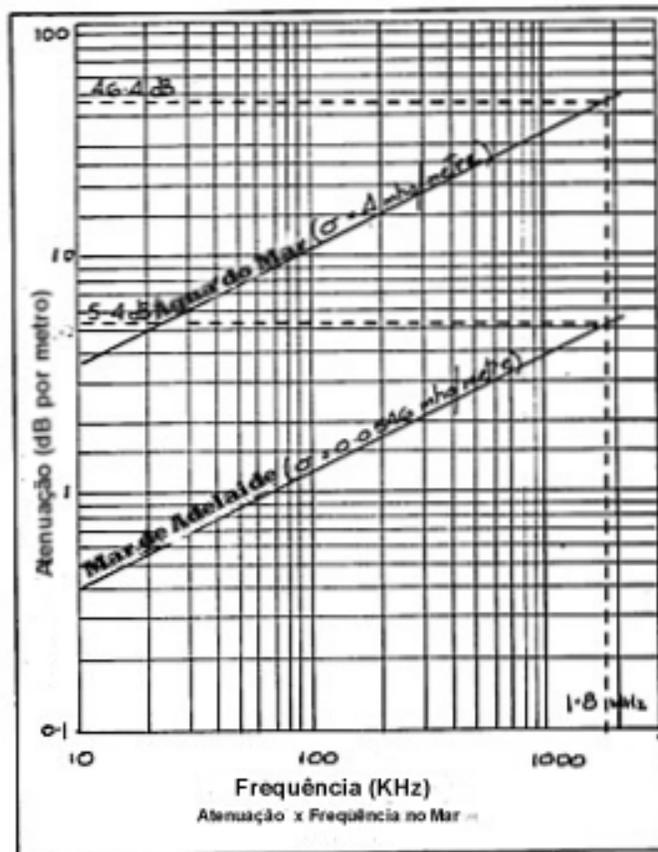


Figura 3: Atenuação na água x frequência (BUTLER, L., 1987).

Em água fresca a propagação das ondas é bem melhor. Em uma análise de amostra de água local, a atenuação em 10kHz é de 0,4dB por metro, crescendo até 5,1dB quando alcança uma frequência de 1,8MHz. Em altas frequências em UHF o uso de antena com sincronização de canais cruzados e compressor de modulação FSK se torna possível. Desta forma é possível obter transmissões de até 5 km em um poço.

- **Refração e Perda de Interface na Superfície**

Quando a onda eletromagnética atravessa uma interface ar –água ou água –ar da superfície de um poço até a ferramenta do fundo do poço, ou da ferramenta do fundo do poço até a superfície do poço, ocorre uma perda por refração devido à mudança do meio em que se propaga a onda eletromagnética. A perda pode ser calculada pela seguinte fórmula (BUTLER, L., 1987):

$$\text{Perda de Refração (dB)} = -20 \log \left\{ (7,4586/10^6) \times \sqrt{(f/\sigma)} \right\}$$

Em água condutiva (salina) a perda é muito alta; para frequências baixas a atenuação está em torno de 60db e para frequências acima de 800mhz (frequências consideradas para “links” rápidos de “wireless”) a atenuação é maior que 130db. Transmissões em frequências altas (links rápidos) de 2.4GHz e 1 Mbps ou mais não são possíveis devido à energia necessária para as transmissões. A perda por reflexão pode ser reduzida substancialmente se o equipamento de superfície for conectado a uma antena abaixo da superfície (interface) em questão.

Em um poço de petróleo não é prático o uso de antena. Entretanto, o uso maximiza a propagação da Transmissão das Ondas Eletromagnética (TEM) com baixas perdas na zona da interface de refração. Em poços com fluidos multifásicos (água e óleo) é possível o uso de antenas e, neste caso, a propagação é afetada pela introdução de múltiplas refrações entre a parte superior e o fundo do poço. Outros aspectos como a descontinuidade nas paredes internas devida às juntas dos tubos ocasionam interferências na propagação.

As discussões sobre a escolha do uso de altas frequências x baixas frequências para transmissão são grandes. Entretanto, a relação entre atenuação x distância, atenuação entre a água x ar nas interfaces e a refração devido à mudança de meio ar - água não pode ser alterada.

A figura 4 representa a perda de refração em função da frequência para a água do mar. A perda de refração é reduzida com o aumento na frequência e, no caso de água fresca, a perda de refração cai para 27dB em 1,8 MHz.

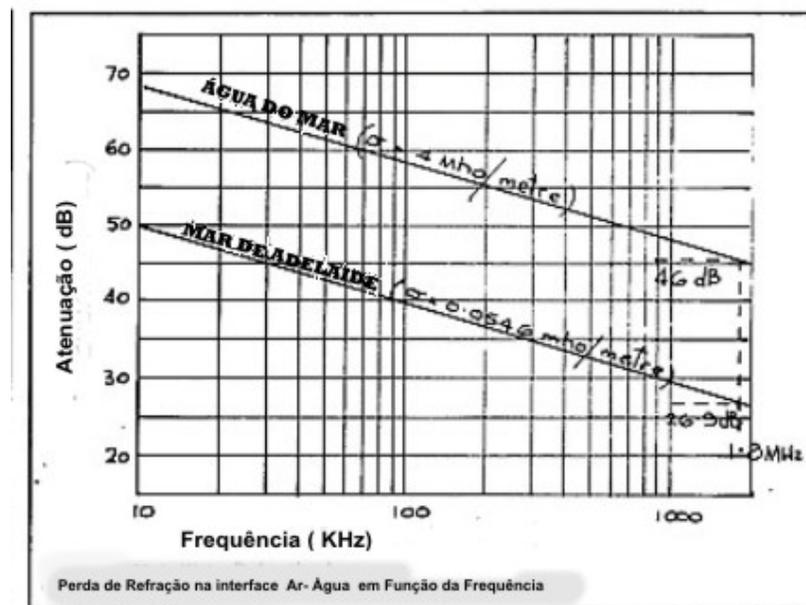


Figura 4: Perda de refração na interface ar-água em função da frequência (BUTLER, L., 1987).

- **Comprimento de Onda na Água**

O comprimento de onda de uma TEM (transmissão de onda eletromagnética) na água é mais uma fração do comprimento da onda TEM se propagando no ar, e é calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{Comprimento de Onda } (\lambda) \text{ em metros} = 1000 \sqrt{\frac{10}{(f\sigma)}}$$

A figura 5 mostra a relação entre o comprimento de onda versus a frequência. Na água do mar, o comprimento de onda em 10kHz é de somente 15,8 metros comparados a 30 km no espaço. Na água salgada a redução do comprimento de onda é dramático. Em 1,8MHz o comprimento de onda é de 10,1 metros comparados com 167 metros no espaço. Esta redução no comprimento de onda afeta consideravelmente a engenharia da antena, de forma que um dipolo imerso na água em 1,8MHz alcança somente uns poucos metros de distância.

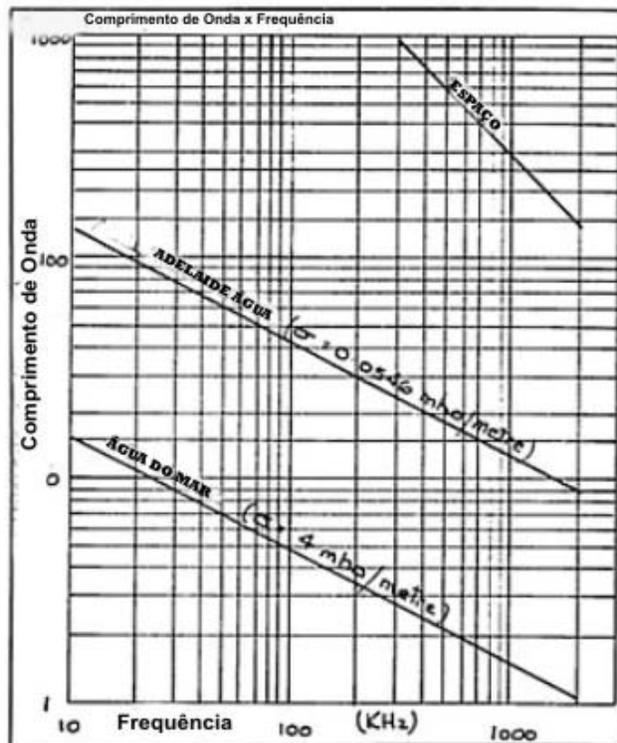


Figura 5: Comprimento de onda x frequência (BUTLER, L., 1987).

As transmissões em baixa frequência são ideais para comunicação em meios com a presença de água. Com base em algumas definições abaixo serão estudados alguns modelos de comunicação:

- 1) Potência irradiada de 0 dBW (referenciada para um watt produzido por um dipolo de meia onda).
- 2) Largura de banda do receptor igual a 3KHz.
- 3) Mínimo nível de recepção de 10dB acima do ruído térmico (KTB) será de 153dBW (para largura de banda 3KHz).
- 4) Ruído atmosférico em 1,8MHz igual a 35dB acima do KTB. Exemplo: 128dBW para 3KHz de largura de banda.
- 5) Atenuação em água fresca igual a 5,4 dB/metro em 1,8MHz.
- 6) Perda de Refração igual a 27 dB.

A figura 6 mostra o receptor submerso e o transmissor acima da superfície. O sinal está sujeito a uma perda de refração de 27 dB na interface ar/água. Ruídos atmosféricos também atenuam na transmissão. O nível mínimo de recepção é função da sensibilidade do sistema de recepção (não afetado pelo ruído atmosférico). A distância máxima para transmissão no meio água no caso da figura 6 é da ordem de 23 metros.

Na figura 7 a transmissão é na direção reversa de forma que o transmissor fica submerso e o receptor fica acima da superfície. Neste caso o nível mínimo de recepção é determinado pelo ruído atmosférico (bem acima da sensibilidade do sistema de recepção). Devido a estes fatores, a distância máxima no meio água é reduzida para 18,7 metros.

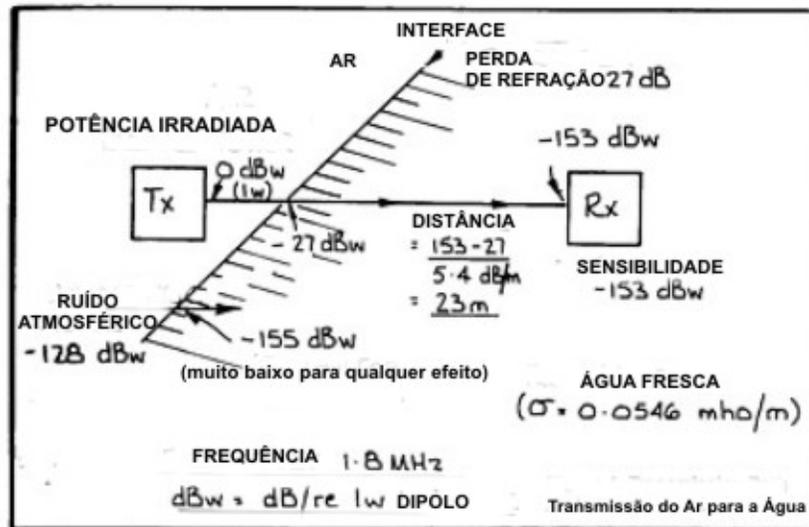


Figura 6: Transmissão do ar para água fresca (BUTLER, L., 1987).

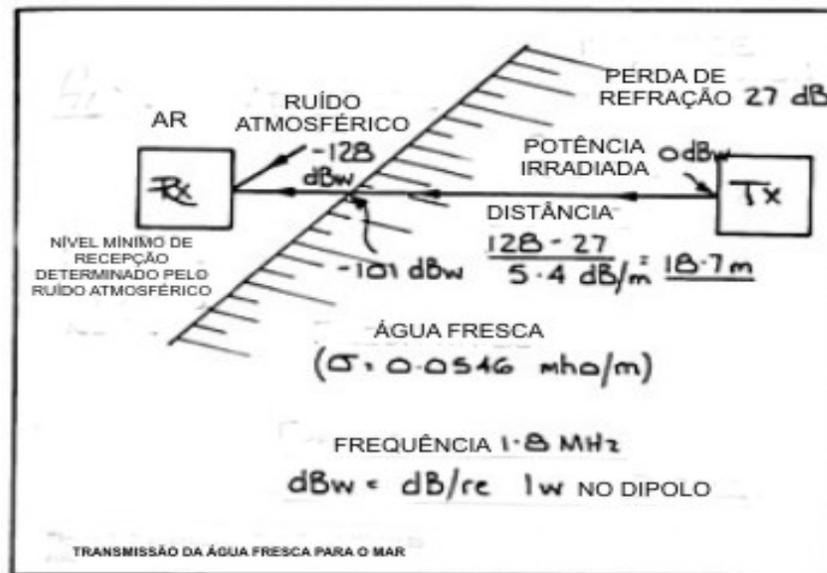


Figura 7: Transmissão da água fresca para o ar (BUTLER, L. 1987).

Na figura 8 ambos transmissor e receptor estão submersos, eliminando as perdas na interface ar - água de 27db. Desta forma a distância máxima para transmissão na água é em torno de 28 metros.

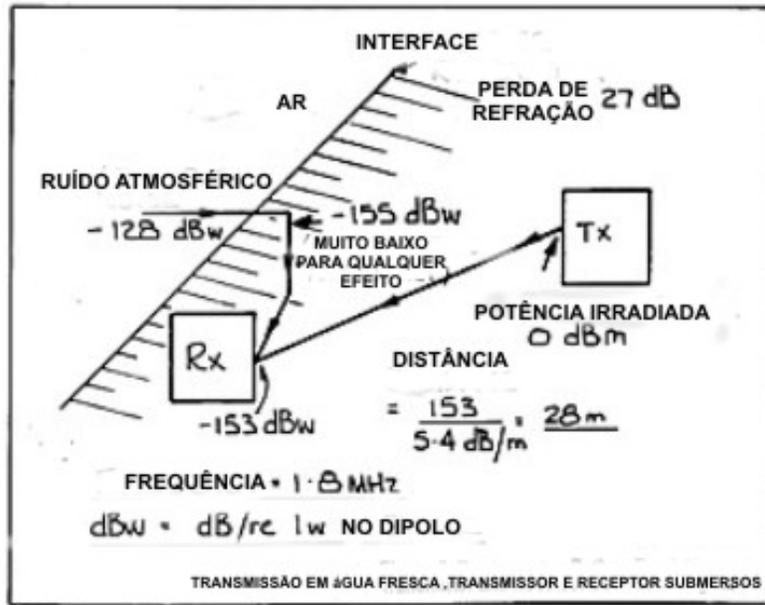


Figura 8: Transmissão na água fresca com transmissor e receptor submersos (BUTLER, L., 1987)).

Analisando a transmissão de forma espacial, em torno de um comprimento de onda a partir da antena de transmissão em direção direta, conclui-se que o espaço varia de forma inversa com a distância. Isto quer dizer que o sinal é atenuado de 6dB cada vez que a distância é dobrada e a atenuação desde um ponto que está a um comprimento de onda da antena até a distância “d” é igual a $20 \log(d/\lambda)$.

A figura 9 mostra um transmissor com uma potência de referência de 0 dBw para um comprimento de onda e um ponto situado a 1000 metros (seis comprimentos de onda) da superfície da água. O nível de potência na interface ar-água é de 15,6 dBw e a transmissão para profundidades de 20 metros se mantém viável.

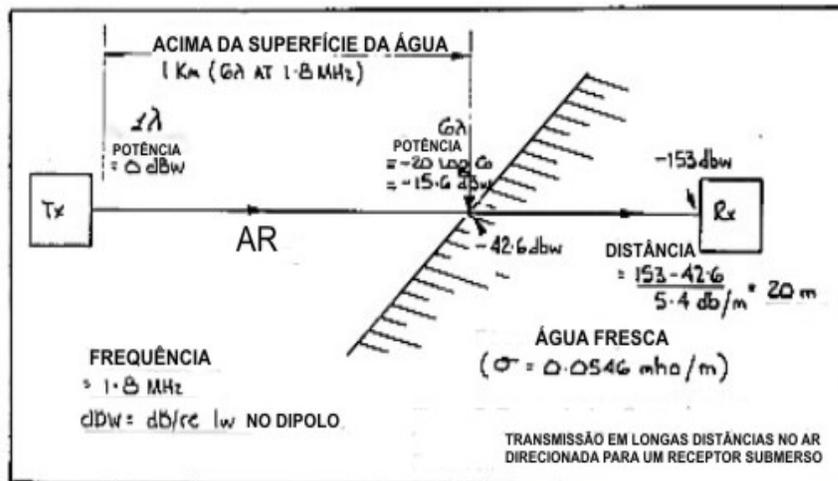


Figura 9: Transmissão em largas distâncias acima da superfície de um receptor submerso (BUTLER, L., 1987)).

Na figura 10 ambos transmissor e receptor estão abaixo da água em uma distância de 1000m. A comunicação direta no meio água é impossível, entretanto uma coluna de produção é um material melhor condutor que a superfície da água, particularmente se for água fresca. Desta forma podemos alcançar maiores distâncias em 1,8MHz.

O sinal pode se propagar desde o transmissor, passando pela água até o ar e penetrar na água até chegar ao receptor. O sinal sofrerá duas vezes perdas na interface (54db), entretanto a atenuação nesta distância (1000m) será limitada pela propagação do sinal no ar. Desta forma a outra técnica na qual duas estações submersas podem se comunicar em longas distâncias será limitada essencialmente pela profundidade das estações na água.

Este modelo de configuração é similar a um modelo real (coluna de produção) em que a propagação do sinal entre a parte superior do poço (cabeça de produção) e a ferramenta, ambos submersos na água, passa por duas vezes pelo ar.

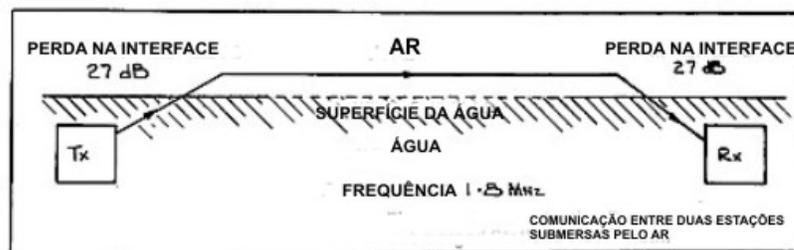


Figura 10: Comunicação entre duas estações submersas (BUTLER, L., 1987).

Neste caso a distância máxima para a comunicação submersa é de 18 a 30 metros. A distância pode ser aumentada pelo espaço entre a coluna e o revestimento (espaço anular) via compressão de fase de baixa frequência, aumento da potência de transmissão e pela redução da frequência. O aumento da potência irradiada para dar 20 dB de ganho extra numa distância de 3,7m aumenta a distância em mais 150m.

- **A Água do Mar**

A atenuação da propagação de ondas de rádio no mar é tão alta que as comunicações abaixo da superfície são praticamente impossíveis a não ser que se usem baixas frequências de 10 a 30kHz (VLF). A perda por refração da água para o ar é da ordem de 60 a 70 dB. Antenas de grandes dimensões são necessárias (em 30kHz o comprimento de onda é 10 km). Altas potências de transmissão são necessárias para compensar as altas perdas das antenas. Os picos dos ruídos atmosféricos, cerca de 160db acima do ruído térmico (KTB) em 10kHz, dificultam a detecção do sinal de recepção.

- **Os Outros Meios Condutores**

A condutividade na crosta da terra em alguns casos está na faixa de 10^{-4} mS/m a 1 mS/m, e em rochas de baixa condutividade chegam a valores inferiores a 10^{-5} mS/m.

Desta forma fica claro que o sucesso da transmissão depende muito do tipo da formação geológica das camadas de subsuperfície.

2.2.1 Propagação da Onda Eletromagnética em uma Coluna de Produção

A transmissão de sinais de um dispositivo no fundo do poço de petróleo até a superfície sempre foi considerado um desafio tecnológico devido às condições de contorno existentes em um poço, tais como: condutividade do fluido, baixo isolamento da coluna de produção, disponibilidade de potência elétrica, características elétricas da formação, etc. Desta forma, buscando uma alternativa à tecnologia de comunicação acústica por pulso de lama, que possibilita somente taxas de transmissão muito baixas (acima de 10kHz a propagação eletromagnética é 100 vezes mais rápida que a acústica), utiliza-se a transmissão por meio de propagação de ondas eletromagnéticas. Neste contexto, dois modelos de sistemas podem ser concebidos: um usando a terra como meio de transmissão, e outro usando a coluna de produção como uma longa guia de transmissão, ou seja, o sinal que é guiado através da coluna de produção é recebido no nível do terra entre duas conexões de terra, ou entre duas conexões terra e coluna de produção. A análise e construção do modelo investigado terão como base a transmissão entre o dipolo coluna de produção e terra, já que o modelo de transmissão usando a terra como meio de transmissão é muito dependente das características elétricas da formação para a viabilidade da comunicação.

As aproximações teóricas são efetuadas com base na teoria de linhas de transmissão, e os tubos são considerados condutores perfeitos. É importante notar que, se uma onda eletromagnética se propaga ao longo de uma coluna que se supõe infinitamente longa e se constitui em condutor perfeito, a propagação se torna constante e uniforme para a terra .

É sabido que a amplitude do campo ou a distribuição da corrente decreta de forma exponencial em um tubo de produção com o aumento da distância vertical r_v desde a fonte segundo a equação (1):

$$\exp(-r_v/\delta_1) \quad (1)$$

onde δ_1 é a taxa de penetração na terra expressa pela equação (2):

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{\lambda f_T \mu_1 \sigma_1}} \quad (2)$$

onde μ_1 , e σ_1 são respectivamente a permeabilidade magnética e a condutividade da terra e f_T é a frequência de transmissão.

Já que a comunicação deve ser estabelecida em poços com grandes profundidades, na equação (2) os sinais deverão ser transmitidos em baixas frequências. Nesta relação matemática a resistência dos tubos é negligenciada, ou seja somente o decremento da frequência reduz a atenuação da corrente. A conclusão não é necessariamente válida já que a resistência dos tubos não é levada em conta.

Os coeficientes de atenuação se tornam constantes abaixo de uma determinada frequência. A partir desta frequência a redução não aumenta o alcance da transmissão em longas distâncias, mas sim reduz a taxa de transmissão.

2.2.2 Modelo Teórico de Comunicação Eletromagnética VLF

O modelo idealizado consiste em uma série de tubos de produção de 10m de comprimento conectados em série e imersos em um meio condutor, no interior de um revestimento metálico. Dois métodos podem ser considerados para a transmissão e recepção dos sinais entre a seção que está no fundo do poço e a cabeça do poço que se encontra na superfície: 1) excitar o tubo através de um acoplamento magnético (bobina ou antena), e 2) o uso de um transmissor inserido entre a coluna de produção e o revestimento no fundo do poço, eletricamente isolado das seções superiores, atuando como um eletrodo no fundo do poço conforme a configuração da figura 11.

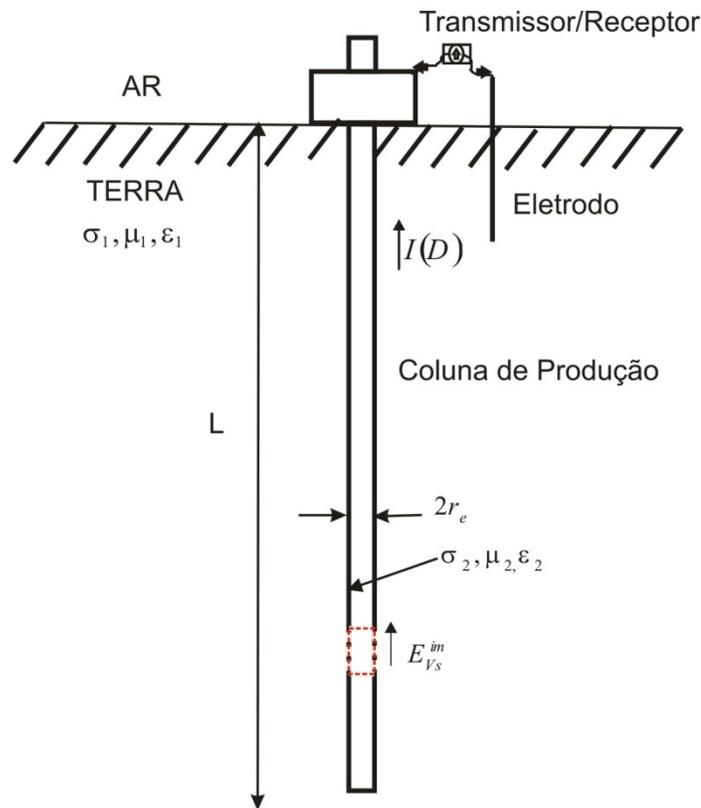


Figura 11: Configuração geométrica do modelo teórico de comunicação (Modelo 1).

O tubo tem raio r_e , condutividade σ_2 , permeabilidade μ_2 e comprimento total L . E_{VS}^m é o campo aplicado entre duas seções da coluna de produção. A característica homogênea da terra é representada por sua condutividade σ_1 e permeabilidade μ_1 . A influência da região de isolamento entre a parte superior da coluna e a parte inferior, ambas compostas de tubos de seção fabricados com aço, serão descritas abaixo. A voltagem entre a parte superior da coluna de produção e a outra conexão aterrada é medida a partir do nível referencial do terra. Desta forma é importante conhecer a distribuição das correntes ao longo da coluna de forma a determinar a capacidade de transmissão por este meio.

- **Distribuição da Corrente ao longo da Coluna de Produção**

O primeiro passo na formulação é determinar o campo E_{ra}^{\rightarrow} irradiado pelo tubo quando a densidade de corrente $I_{\rho}^{\vec{m}}$ flui ao longo do seu volume. Para uma variação harmônica no tempo, é assumida uma dependência no tempo segundo a fórmula: $exp(+2\pi j f_T t)$, onde j é um número imaginário, f_T é a frequência de transmissão e t é o tempo. As “Equações de Maxwell” em qualquer ponto na terra são:

$$\nabla \times E_1^{\rightarrow} + j2\pi f_T \mu_1 M_1^{\rightarrow} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \epsilon_1 E_1^{\rightarrow} = Q_{\rho} \quad (4)$$

e

$$\nabla \times M_1^{\rightarrow} = I_{\rho t}^{\rightarrow} + j2\pi f_T \epsilon_1 E_1^{\rightarrow} \quad (5)$$

A equação (3) é aplicada para os parâmetros da terra. As equações de continuidade relativas ao total da densidade de corrente $I_{\rho t}^{\rightarrow}$ para a densidade de carga Q_{ρ} são dadas por:

$$\nabla I_{\rho t}^{\rightarrow} + j2\pi f_T Q_{\rho} = 0 \quad (6)$$

onde $I_{\rho t}^{\rightarrow}$ é o somatório da densidade de corrente induzida I_p^{\rightarrow} mais a densidade de corrente aplicada $I_{\rho}^{\vec{m}}$ em um meio isotrópico.

$$I_p^{\rightarrow} = \epsilon_1 E_1^{\rightarrow} \quad (7)$$

Então combinando as equações (4), (6) e (7) temos:

$$\nabla E_1^{\rightarrow} = - \frac{\nabla I_{\rho}^{\vec{m}}}{\sigma_1 + j2\pi f_T \epsilon_1} \quad (8)$$

Correlacionando as equações (3) e (5) temos:

$$\nabla \times \nabla \times E_1^{\rightarrow} + \gamma_1^2 E_1^{\rightarrow} + j2\pi f_T \mu_1 I_{\rho}^{\vec{im}} = 0 \quad (9)$$

$$\gamma_1^2 = j2\pi f_T \mu_1 (\sigma_1 + j2\pi f_T \epsilon_1) \quad (10)$$

Expandindo o primeiro termo da esquerda em : $\nabla \nabla E_1^{\rightarrow} - \nabla^2 E_1^{\rightarrow}$ e usando (8) tem-se a equação (11) dos campos de onda na terra:

$$\nabla^2 E_1^{\rightarrow} - \gamma_1^2 E_1^{\rightarrow} = \frac{-1}{\sigma_1 + j2\pi f_T \epsilon_1} (\nabla \nabla - \gamma_1^2) I_{\rho}^{\vec{im}} \quad (11)$$

No ar o mesmo tipo de equação é obtida e pode ser deduzida da equação (11), substituindo o índice 1 por zero. Como não há fonte neste meio, $I_{\rho}^{\vec{im}} = 0$. Concluímos que:

$$\nabla^2 E_0^{\rightarrow} - \gamma_0^2 E_0^{\rightarrow} = 0 \quad (12)$$

e

$$\gamma_0^2 = -4\pi^2 f_T^2 \epsilon_0 \mu_0 \quad (13)$$

A solução da equação (11) pode ser um produto da convolução entre a densidade de corrente $I_{\rho}^{\vec{im}}$ e a função de Green $G(r)$ associada à densidade de corrente da radiação $I_{\rho}^{\vec{im}}$ no meio espacial.

$$E_1^{\rightarrow} = \frac{1}{4\pi(\sigma_1 + j2\pi f_T \epsilon_1)} (\nabla \nabla - \gamma_1^2) \iiint_V I_{\rho}^{\vec{im}} G(r) dv \quad (14)$$

onde r é a distância entre o ponto de observação M e cada elemento de densidade de corrente $I_{\rho}^{\vec{im}}$. A equação (14) é conhecida como a “Equação de Pockington”. O volume v é limitado pelo volume da coluna de produção. Uma vez fora desta região não existem correntes aplicadas.

Uma pequena simplificação pode ser introduzida devido à geometria da coluna de produção. A coluna de produção está em um meio homogêneo médio em um plano ao longo da coluna. Isto nos leva a assumir que o vetor \vec{I}_ρ^{im} tem somente um componente ao longo do eixo vertical do tubo. Neste caso a função de Green $G(r)$ corresponde à irradiação dos dipolos verticais no meio espacial. A formulação deste problema e a sua solução analítica podem ser descritas como:

$$G(r) = \frac{e^{-\gamma_1 r_{Qs}}}{r_{Qs}} - \frac{e^{-\gamma_1 r_{Qi}}}{r_{Qi}} + \gamma_0^2 U \quad (15)$$

onde U é uma Integral de Sommerfeld definida por:

$$U = 2 \int_0^\infty \frac{e^{\tilde{\nu}_1(D+D_T)}}{\tilde{\nu}_0 + \tilde{\nu}_1} J_0(\tilde{\nu}_{rH}) \tilde{\nu} d\tilde{\nu} \quad (16)$$

onde $\tilde{\nu}$ é a variável de integração com a dimensão do número de onda e J_0 é a função de ordem zero de Bessel, D, D_T são as profundidades a partir do ponto Q e do dipolo de transmissão respectivamente e r_H é a distância horizontal entre a fonte e o ponto Q . A configuração geométrica do dipolo está representada na figura 12.

$$\tilde{\nu}_0 = \sqrt{(\tilde{\nu}^2 + \gamma_0^2)} \quad (17a)$$

e

$$\tilde{\nu}_1 = \sqrt{(\nu^2 + \gamma_1^2)} \quad (17b)$$

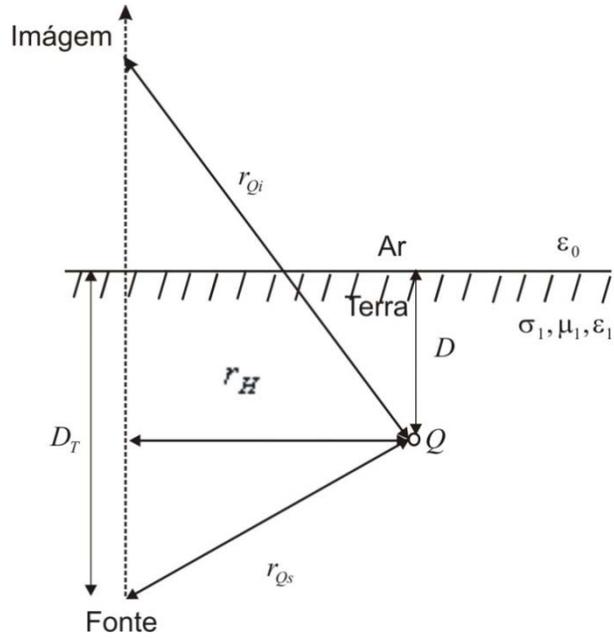


Figura 12: Configuração geométrica de um dipolo elétrico vertical em um meio homogêneo.

onde r_{Qs} , e r_{Qi} são as distâncias entre o ponto Q e a fonte e entre o ponto Q e o ponto de imagem da fonte localizada simetricamente no ar.

$$r_{Qi} = \sqrt{(r_H^2 + (D + D_T)^2)} \quad (18a)$$

$$r_{Qs} = \sqrt{(r_H^2 + (D + D_T)^2)} \quad (18b)$$

Uma aproximação da função de Green pode ser feita já que a frequência de transmissão é muito baixa ($\sigma_1 \gg f_T \epsilon_1$) e a distância horizontal r_H entre o tubo e o ponto de observação Q é muito menor que o comprimento de onda no ar ($r_H \ll \lambda_0$) ou $|\gamma_0 r_H| \ll 1$. Isto nos leva para uma aproximação quase estática que é alcançada fazendo $\gamma_0 = 0$ na função de Green. Neste caso, a função de Green de um dipolo elétrico vertical da equação (15) é simplificada, tomando a seguinte forma:

$$G(r) = \frac{e^{-\gamma_1 r_{Qs}}}{r_{Qs}} - \frac{e^{-\gamma_1 r_{Qi}}}{r_{Qi}} \quad (19)$$

Após várias simplificações o campo elétrico vertical E_V^{ra} , irradiado na terra pela coluna de produção, é obtido pela equação (20).

$$E_V^{ra} = \frac{1}{4\pi\sigma_1} \left(\frac{\partial^2}{\partial D^2} - \gamma_1^2 \right) \iiint_V \left(\frac{e^{-\gamma_1 r_{Qs}}}{r_{Qs}} - \frac{e^{-\gamma_1 r_{Qi}}}{r_{Qi}} \right) dv \quad (20)$$

Considera-se para fins de simplificação do modelo que $I_\rho^{\vec{im}}$ tem somente um componente ao longo do eixo D chamado de I_ρ^{im} . A distribuição da corrente ao longo da coluna pode ser obtida pelas condições de contorno da superfície da coluna. O campo irradiado, E_V^{ra} , deve ser calculado na sua superfície, denominado $E_{V_s}^{ra}$.

A figura 13 ilustra a discretização da coluna usada para o cálculo da integral de volume, que corresponde à soma de todas as contribuições da densidade de corrente. No cálculo de $E_{V_s}^{ra}$ a distância r_{Mi} é dada por:

$$r_{Mi} = \sqrt{(r_H^2 + (D - D_T)^2)} \quad (21)$$

Neste caso r_H deve variar de 0 a $2r_e$.

Para evitar a computação da integral de volume, uma aproximação de um fio fino foi usada. Isto é alcançado quando a variável $r_H = r_e$. Esta aproximação é válida somente se a razão entre o comprimento total da coluna, L , e o seu raio r_e , é maior que 100, o que é verificado nos casos práticos. Devido ao fato que a integral de superfície de I_ρ^{im} é estendida para um plano transversal, a figura 14 é obtida por:

$$\iint_A I_\rho^{im} dA = I(D_T) \quad (22)$$

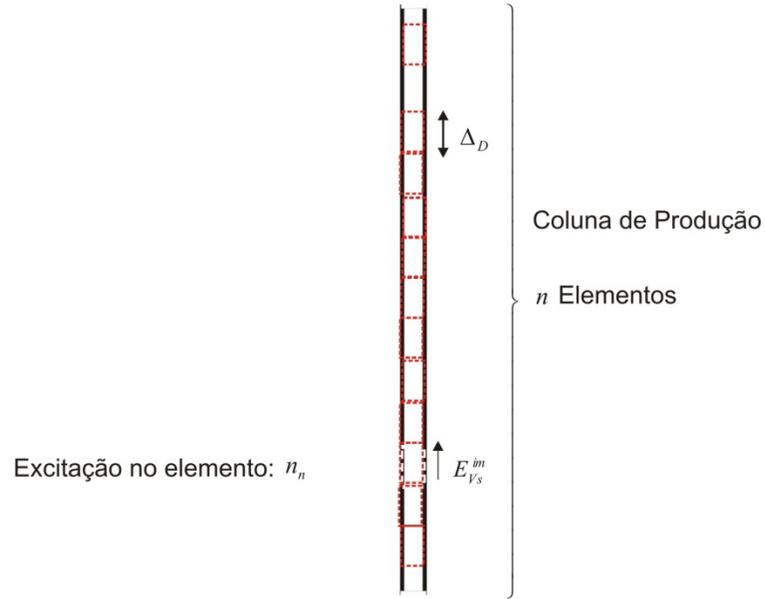


Figura 13: Discretização da coluna de produção em “n” elementos

onde $I(D_T)$ é a corrente que flui em uma abscissa D_T , e desta forma o campo elétrico tangencial em qualquer ponto na superfície da coluna será dado por:

$$E_{Vs}^{ra} = \frac{1}{4\pi\sigma_1} \left(\frac{\partial^2}{\partial D^2} - \gamma_1^2 \right) \int_0^L I(D_T) \left(\frac{e^{-\gamma_1 \overline{r_{Ms}}}}{\overline{r_{Ms}}} - \frac{e^{-\gamma_1 \overline{r_{Mi}}}}{\overline{r_{Mi}}} \right) dD_T \quad (23)$$

$$\overline{r_{Mi}} = \sqrt{((D + D_T)^2 + r_e^2)} \quad (24a)$$

e

$$\overline{r_{Ms}} = \sqrt{((D + D_T)^2 + r_e^2)} \quad (24b)$$

onde $\overline{r_{Mi}}$ é o valor médio de r_{Mi} e $\overline{r_{Ms}}$ é o valor médio de r_{Ms} .

A distribuição de corrente é determinada pela aplicação das condições de contorno na superfície da coluna. Se $E_{V_S}^{im}$ é o campo aplicado ao longo da região de “gap”, obtém-se:

$$E_{V_S}^{ra} + E_{V_S}^{im} = Z_i I(D) \quad (25)$$

Z_i é a série eficaz de impedância interna que caracteriza os efeitos de condutividade finita.

$$Z_i = \frac{j\gamma_2 J_0(j\gamma_2 r_e)}{2\pi r_e \sigma_2 J_1(j\gamma_2 r_e)} \quad (26)$$

onde γ_2 é a constante de propagação no metal, J_0 e J_1 sendo a ordem zero e a primeira ordem da função de Bessel respectivamente.

O conceito de impedância interna pode ser estendido para tubos ocios:

$$Z_{ih} = \frac{-j\gamma_2}{2\pi r_i \sigma_2} \times \frac{H_0^{(1)}(j\gamma_2 r_i) J_1(j\gamma_2 r_e) - H_1^{(1)}(j\gamma_2 r_e) J_0(j\gamma_2 r_i)}{H_1^{(1)}(j\gamma_2 r_e) J_1(j\gamma_2 r_i) - H_1^{(1)}(j\gamma_2 r_i) J_0(j\gamma_2 r_e)} \quad (27)$$

Nesta fórmula, r_e é o raio externo e r_i é o raio interno dos tubos, $H_0^{(1)}$ e $H_1^{(1)}$ sendo a ordem zero e ordem primeira do terceiro tipo da Função de Bessel respectivamente.

A equação (25) que descreve o campo elétrico tangencial irradiado pode ser resolvida pelo método dos momentos, e pode ser expressa na forma geral:.

$$E_{V_S}^{ra} = H[I(D_T)] \quad (28)$$

onde H é o operador íntegro diferencial da equação (23) e $I(D_T)$ é a corrente na profundidade D_T . No método dos momentos, a coluna é dividida em n células elementares de comprimento Δ_V e a corrente é expandida com a função base, $f_n(D_T)$:

$$I(D_T) = \sum_{n=1}^n I_n f_n(D_T) \quad (29)$$

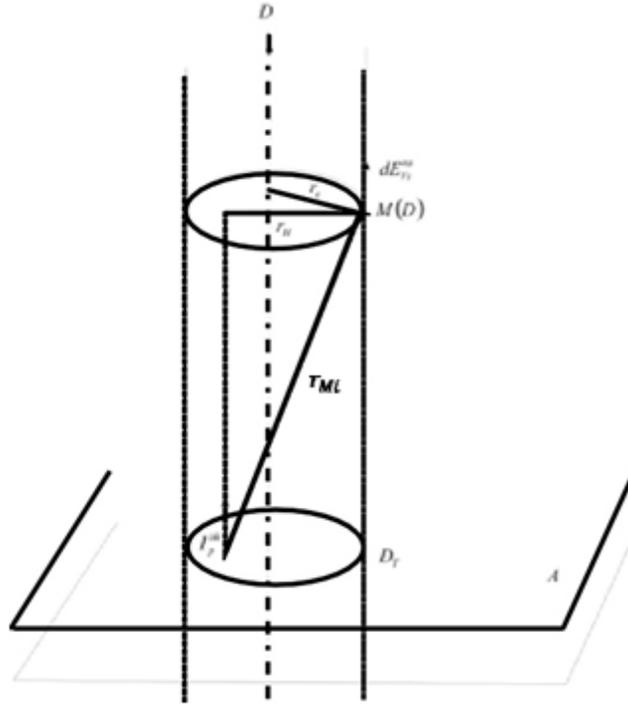


Figura 14: Campo elementar $E_{V_S}^{ra}$ no ponto $M(D)$ provocado por uma densidade de corrente $I_{\rho}^{\overline{m}}$ situada na profundidade D_T .

onde I_n é um coeficiente desconhecido porque H é um operador linear. Combinando as equações (25), (28) e (29) temos:

$$\sum_n I_n H(f_n) + Z_i \sum_n I_n f_n = E_{V_S}^{im} \quad (30)$$

A função peso $W_n(D_T)$ é introduzida, e um produto interno (W_n, f_n) é definido. Usualmente este produto interno é o produto de funções dentro dos seus limites estabelecidos ($0 < D_T < L$).

$$(W_n, f_n) = \int_0^L W_n(D_T) f_n(D_T) dD_T \quad (31)$$

$$\sum_{mn} I_n (W_m, H(f_n)) + Z_i \sum_{mn} I_n (W_n, f_n) = \sum_m (W_m E_{V_S}^{im}) \quad (32)$$

$$\delta_{mn} = (W_m, f_n) \quad (33)$$

$$Z_{mn} = (W_m, H(f_n)) \quad (34)$$

A equação (32) pode ser escrita na forma matricial:

$$\{[Z_{mn}] + [Z_i]\}[I_n] = [V_n^{im}] \quad (35)$$

Onde $[Z_{mn}]$ é a matriz de impedância generalizada e $[Z_i]$ é a matriz diagonal. Todos os termos da diagonal são idênticos porque representam o efeito da condutividade finita da coluna, sendo constantes ao longo da mesma. I_n é o vetor coluna desconhecido, enquanto $[V_n^{im}]$ é a matriz coluna com elementos iguais a zero, exceto nas células correspondentes à voltagem do “gap”. Por definição:

$$V_n^{im} = (W_n, E_{V_s}^{im}) \quad (36)$$

O qual difere de zero na região de excitação. E V_n^{im} representa a voltagem no n ésimo elemento.

- **Experiências Práticas**

A impedância de entrada em uma coluna de produção não isolada, e de comprimento infinito, varia muito com a frequência. Por razões técnicas, a região de “gap” não é localizada no meio, mas no final da coluna. E neste caso o modelo numérico descrito mostra que a impedância de entrada para uma frequência de transmissão abaixo de 100Hz varia muito pouco com a frequência. A impedância de entrada é a resistência de terra do eletrodo de fundo de poço, e é constante em baixas frequências. Por esta mesma razão o tamanho do “gap” não é um parâmetro crítico se for de alguns poucos metros. Com a finalidade de facilitar os cálculos a amplitude de corrente injetada na coluna foi normalizada.

A influência da condutividade e seção transversal da coluna na relação impedância de superfície (distribuição de corrente) versus frequência é vista na figura 15. A curva 1 representa a variação da amplitude do sinal com a frequência em um tubo de aço com raio interno zero (seção sólida) localizado na superfície. A curva 3 representa a variação da amplitude do sinal com a frequência em um tubo de aço com raio interno zero (seção sólida) com baixa permeabilidade relativa, localizado na superfície. A curva 2 representa a variação da amplitude do sinal com a frequência em um tubo oco. Com base no gráfico podemos concluir que a relação entre o comportamento da impedância em relação à frequência muda com o tubo oco, e a condutividade e permeabilidade relativa afetam a impedância.

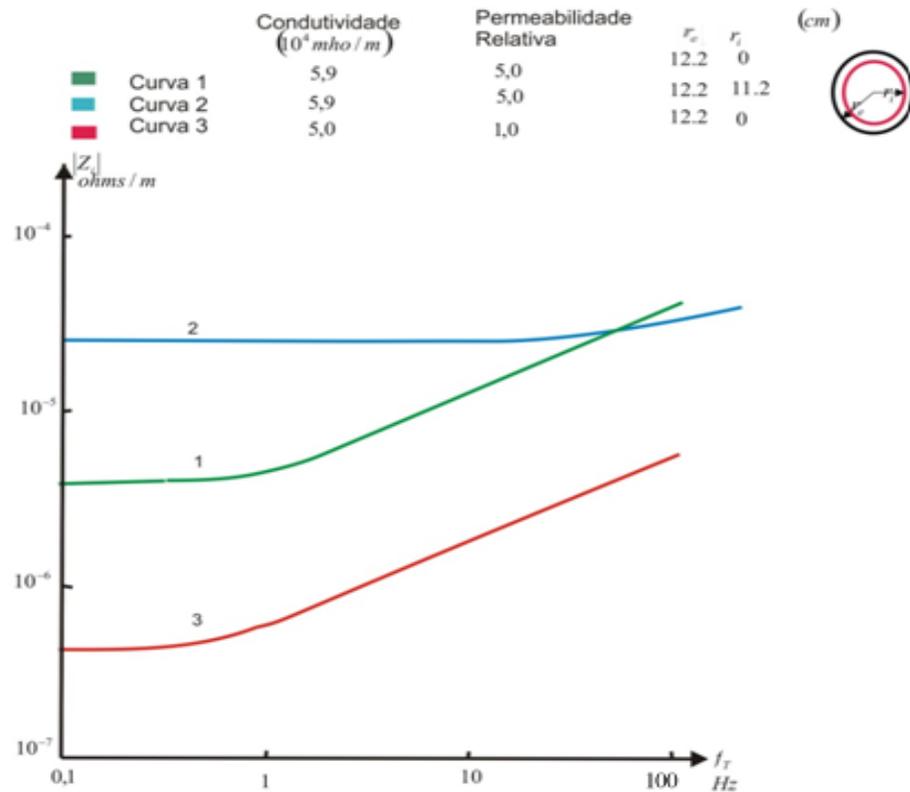


Figura 15: Impedância de superfície x frequência.

A curva da figura 16 representa a distribuição da corrente em três tipos de tubos. A condutividade da terra usada ao longo dos tubos foi de $0,5 \text{ S/m}$, o comprimento total foi de 1560 m , a excitação estava situada a 40m do fundo, e o comprimento da região isolada também foi de 40m . Na frequência de 2Hz a taxa de penetração na terra é de 500m , e concluímos que qualquer que seja a distância vertical r_v entre o “gap” e o ponto de medição, a atenuação é sensível à condutividade e permeabilidade dos tubos.

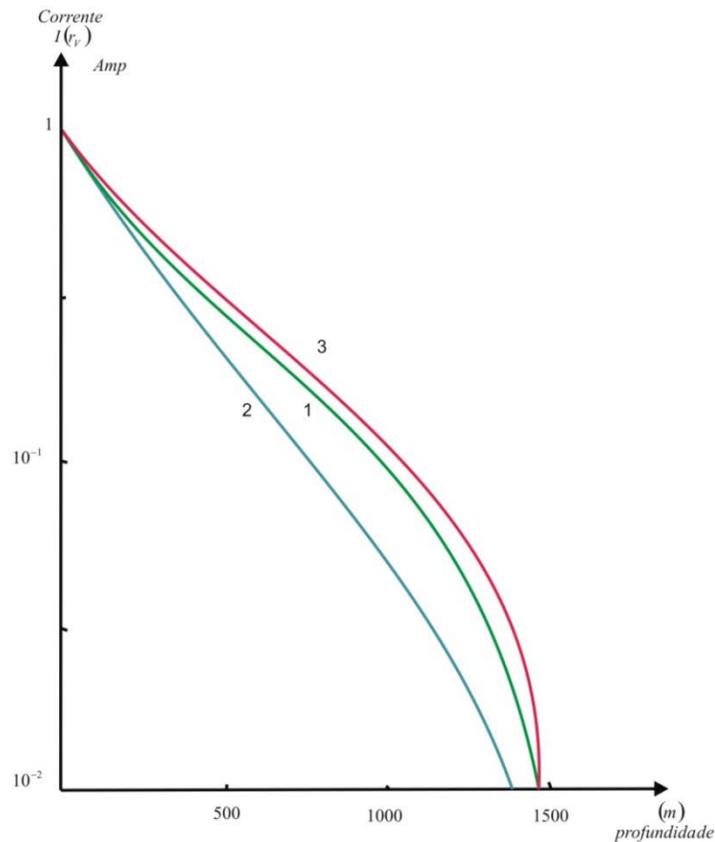


Figura 16: Distribuição da corrente ao longo da coluna na frequência de 2Hz .

As curvas na figura 17 representam a distribuição da corrente na coluna na faixa de frequência de $0,1$ a 10Hz , e nos mostram que a atenuação é praticamente constante independentemente das variações de frequência dentro desta faixa.

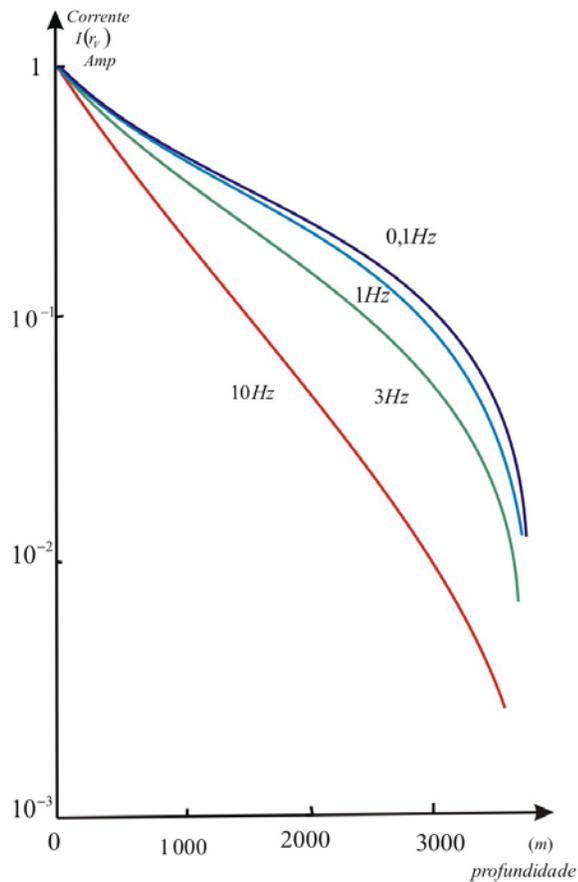


Figura 17: Distribuição de corrente ao longo de uma coluna com raio $r_e = 10\text{cm}$.

Comparando essas curvas com a da figura 18 que corresponde a um tubo oco com 1cm de parede, nota-se que a impedância de superfície é um ponto de grande importância na transmissão de um sinal pela coluna. Abaixo de uns poucos “hertz” a atenuação não muda. Observa-se na figura 18 que neste caso, a frequência ótima que possibilita uma melhor relação frequência/atenuação em profundidade é de 3Hz.

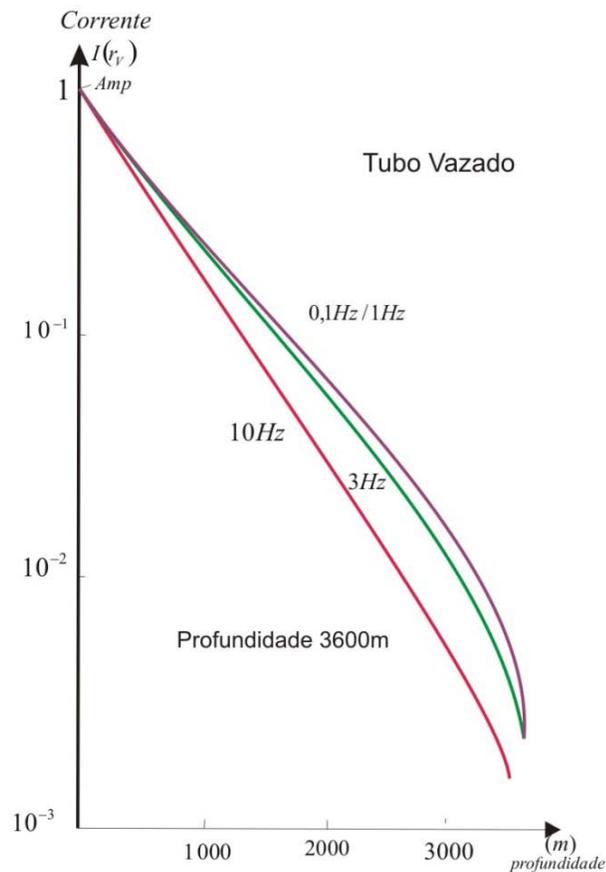


Figura 18: Distribuição de corrente ao longo de um tubo oco. Todos os parâmetros são idênticos aos da figura 17, com exceção do raio interno do tubo que é , $r_i = 9\text{cm}$.

- **Resultados Experimentais**

Diversos experimentos foram conduzidos (XIA , M..Y., CHEN Z.Y., et al., 1993). A fim de verificar o modelo teórico, comparamos as curvas teóricas com dados de um teste experimental similar realizado. O teste experimental foi á realizado com uma sonda de corrente ao longo de um tubo vertical (simulando uma coluna de produção com 40m de comprimento) com um diâmetro externo de 1,27cm e diâmetro interno de 1,05cm, um transmissor na extremidade inferior imerso no mar, e um eletrodo equivalente de 1m de comprimento. A condutividade foi de $4,2 \times 10^6$ S/m em 15 graus. A distribuição teórica

da corrente ao longo do tubo é mostrada na figura 19. As curvas cheias correspondem ao modelo teórico, e os pontos correspondem às medidas experimentais feitas.

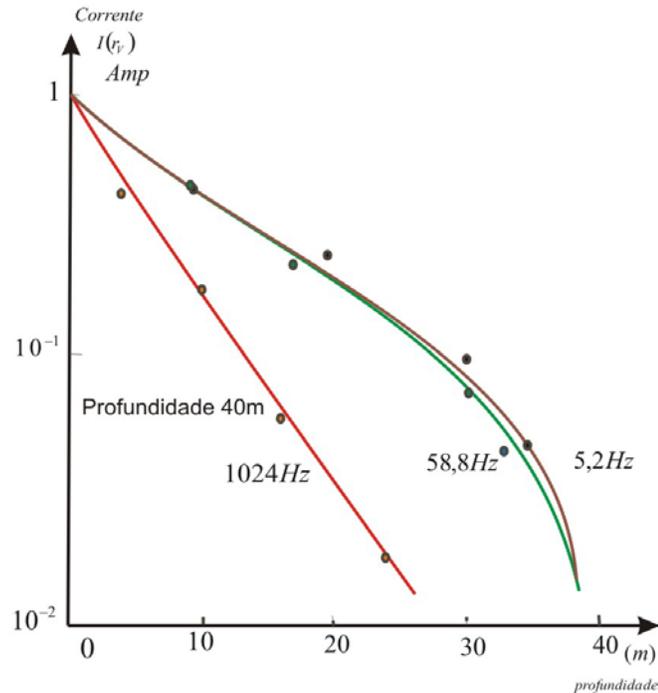


Figura19: Distribuição de corrente ao longo de um tubo imerso no mar. Correlação entre o modelo teórico e os valores experimentais.

2.3 Modelo de Comunicação por Injeção de Corrente (Modelo 2)

Na primeira alternativa, foi modelado um poço como linha de transmissão com características ativas (cargas não reativas). O interesse, neste caso, foi calcular a quantidade de energia por *bit* necessária para a comunicação de dados, visto que energia é o parâmetro mais escasso em uma aplicação como a vislumbrada neste estudo. Não há interesse no momento em se calcular a banda disponível para transmissão, já que se pretende transmitir pouquíssimos dados (sistema totalmente autônomo e distribuído). Desta forma todos os elementos reativos (que por definição não dissipam potência) foram retirados do modelo, tornando-o puramente resistivo.

Na segunda alternativa encontraram-se dados na literatura (KUCHPIL, C., et al. 1994), que indicam ser possível transmitir ondas mecânicas na faixa de ultra-som através de tubulações (usando a parede do tubo como guia, e não o seu interior) com perdas na ordem de 20 a 30 dB/km, o que parece bastante promissor para uma aplicação com baixa taxa de dados como a da aplicação em questão.

Nesta simulação, serão consideradas todas as impedâncias reais (resistências) dos dutos, da formação, do óleo, da lama que preenche o anular e dos “packers”. As componentes reativas são desprezadas, pois por definição as mesmas não dissipam potência. O objetivo desta simplificação é obter uma estimativa da potência necessária para transmitir dados pelos dutos por este método. Os dados correspondem a uma coluna de produção de 2 7/8 polegadas de diâmetro revestida por um duto de 5,5 polegadas. As espessuras estão de acordo com os padrões internacionais (fornecidos pela indústria de petróleo) definidos para tubos de produção. A figura 20 mostra um modelo de linha de transmissão para este caso, considerando a aplicação de corrente nos extremos (exatamente onde estão localizados os “packers”). Já a figura 21 mostra outro modelo, onde a corrente é aplicada a 25% do comprimento total entre as extremidades de cada duto.

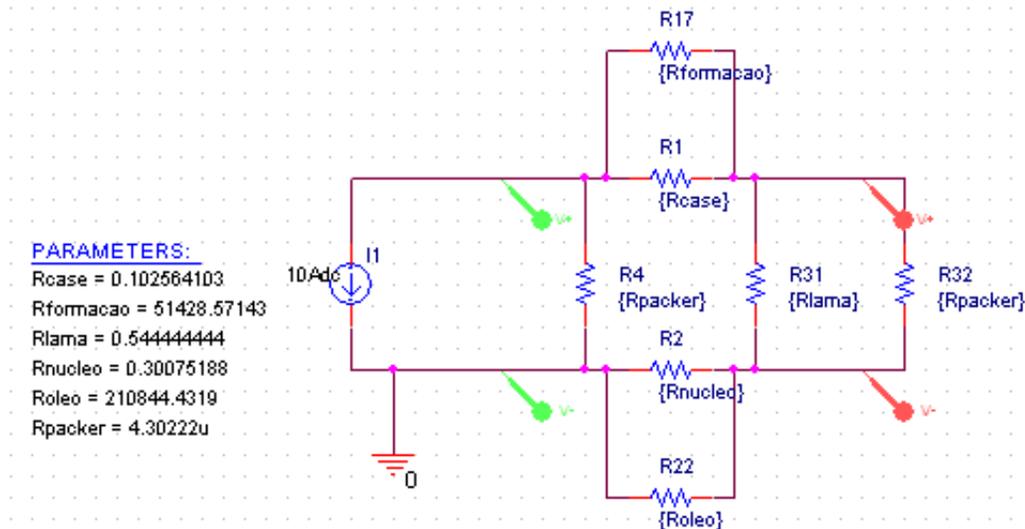


Figura 20: Modelo de linha de transmissão considerando a aplicação de corrente nas extremidades dos dutos (sobre os “packers”)

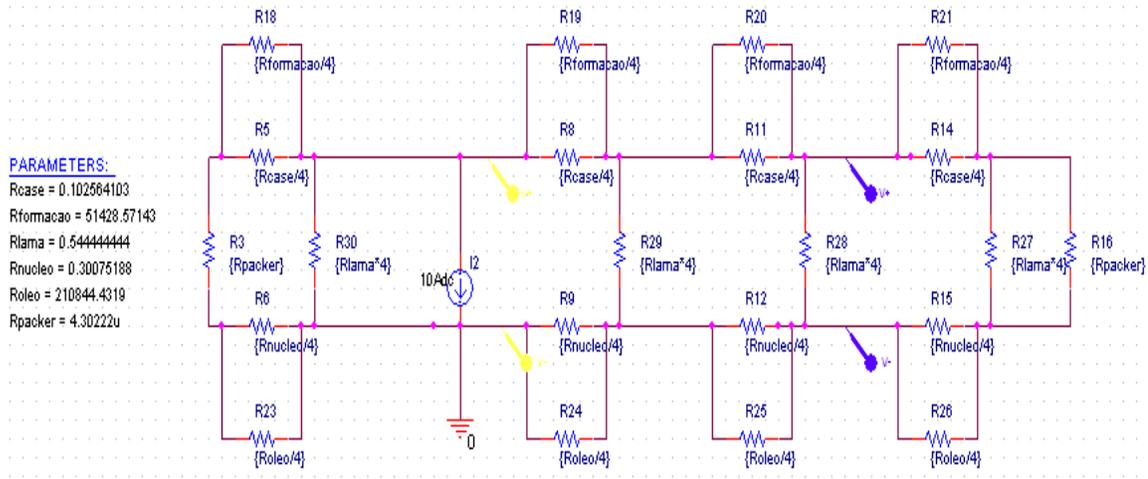


Figura 21: Modelo de linha de transmissão considerando a aplicação de corrente a 25% do comprimento total entre as extremidades dos dutos

A resistência R_{case} modela a resistência do duto exterior. $R_{formação}$ modela a resistência da formação que cerca o duto (considerando apenas um campo próximo). R_{lama} modela a resistência da lama que ocupa o anelar entre os dutos. $R_{núcleo}$ modela a resistência da coluna de produção. Por fim, R_{packer} modela a resistência dos “packers” (de aço) que ficam nas extremidades dos dutos. O valor das resistências foi obtido pela fórmula:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (37)$$

onde R é a resistência (em ohms), ρ é a resistividade elétrica do material em ohms por metro (inverso da condutância), L é o comprimento em metros e A é a área da seção reta (em metros quadrados). Em superfícies com seção reta não constante foi obtido o valor médio por meio de aproximações. Foram realizadas 12 simulações conforme a tabela 1, com cada modelo usando as Leis de Kirchhoff no software Matlab.

onde I é a corrente injetada, σ_A , σ_F , σ_L e σ_0 são respectivamente a condutividade elétrica do aço, formação, lama e óleo. Nas simulações de 1 a 8 considerou-se um duto de

10 metros de comprimento, enquanto nas simulações 9 e 10 considerou-se um duto de 50 metros e nas simulações 11 e 12, um duto de 1800 metros (sempre com apenas dois "packers" nas extremidades).

Tabela 1: Simulações para a aplicação de corrente nas extremidades dos dutos (sobre os "packers").

Simulação	I (A)	σ_A (MS/m)	σ_F (S/m)	σ_L (S/mm)	σ_0 (S/m)	V_E (mV)	P_T (μW)	V_S (nV)
1A	1	4,50	0,035	0,50	2,98	4,29	4,29	8,21
1B	10	4,50	0,035	0,50	2,98	42,90	429,00	82,10
2	1	4,50	0,035	0,50	4,47	4,29	4,29	82,10
3	1	4,50	0,035	0,50	5,96	4,29	4,29	8,20
4	1	4,50	0,035	0,50	29,82	4,29	4,29	8,21
5	1	4,50	0,035	50,00	2,98	4,29	4,29	8,21
6	1	4,50	0,35	0,50	2,98	4,29	4,29	8,21
7	1	4,50	35,00	0,50	2,98	4,29	4,29	8,22
8	1	4,50	350,00	0,50	2,98	4,29	4,29	8,26
9	1	4,50	0,035	0,5	2,98	4,30	4,30	1,65
10	10	4,50	0,035	0,5	2,98	43,00	430,00	15,50
11	1	4,50	0,035	0,5	2,98	4,30	4,30	0,04
12	10	4,50	0,035	0,5	2,98	43,00	430,00	0,45

A tabela 2 mostra os resultados para o caso da injeção de corrente a 25% de distância das extremidades:

Após a análise dos resultados das simulações, observa-se que apesar de uma variação de quatro ordens de grandeza no valor da condutividade da formação, duas ordens de grandeza na condutividade elétrica da lama, e uma ordem de grandeza na condutividade elétrica do óleo, os resultados não foram influenciados. Este resultado comprovado pela simulação já era esperado, pois a condutividade elétrica do aço está mais de seis ordens de grandeza acima de todas as outras, dominando o resultado. Fica claro também que para que esta forma de transmissão de dados possa funcionar, a corrente deve ser aplicada longe dos "packers", pois os mesmos representam um curto-circuito na linha de transmissão, haja vista as tensões extremamente baixas verificadas

quando a aplicação de corrente (e a medida da tensão) é feita sobre os mesmos. Seria necessária uma unidade retransmissora para encaminhar o sinal de um lado do "packer" para o outro em um sistema com "packers" .

Tabela 2: Simulações para a aplicação de corrente a 25% do comprimento total entre as extremidades dos dutos.

Simulação	I (A)	σ_A (MS/m)	σ_F (S/m)	σ_L (S/mm)	σ_0 (S/m)	V_E (mV)	P_T (μW)	V_S (mV)
1A	1	4,50	0,035	0,50	2,98	0,42	0,42	0,14
1B	10	4,50	0,035	0,50	2,98	4,23	42,90	1,42
2	1	4,50	0,035	0,50	4,47	0,42	0,42	0,14
3	1	4,50	0,035	0,50	5,96	0,42	0,42	0,14
4	1	4,50	0,035	0,50	29,82	0,42	0,42	0,14
5	1	4,50	0,035	50,00	2,98	0,42	0,42	0,14
6	1	4,50	0,35	0,50	2,98	0,42	0,42	0,14
7	1	4,50	35,00	0,50	2,98	0,42	0,42	0,14
8	1	4,50	350,00	0,50	2,98	0,42	0,42	0,14
9	1	4,50	0,035	0,5	2,98	2,10	2,10	0,70
10	10	4,50	0,035	0,5	2,98	21,00	210,00	7,01
11	1	4,50	0,035	0,5	2,98	71,80	71,80	22,50
12	10	4,50	0,035	0,5	2,98	71,80	718,00	225,00

Com base nos resultados obtidos concluímos que a aplicação deste método é viável, e tecnicamente promissora desde que a aplicação de corrente esteja a 25% do fim da linha, pois mesmo com 1A de corrente (e uma potência em regime permanente de apenas 72 mW) foi obtida uma tensão de 23 mV após 1800 metros de duto, valor bastante significativo. Se considerarmos uma transmissão por pulsos com 50% dos bits em cada estado (0 ou 1) que durasse 10 segundos (pois provavelmente a taxa de dados utilizada será muito baixa), a energia total necessária seria da ordem de 1,44 J, facilmente obtida por meio de piezelétricos atuando como coletores de energia.

2.4 Modelo de Comunicação por Indução Magnética (Modelo 3)

O modelo consiste no uso de um conjunto de pares de bobinas instaladas ao longo da coluna de produção para a transmissão e recepção de sinais no interior de um poço de petróleo. O acoplamento magnético entre as bobinas se faz por meio do núcleo de aço da coluna de produção.

Para a análise de viabilidade técnica deste modelo em cada tipo de transmissão utilizou-se um estudo de caso real de poço de produção com as seguintes características geométricas:

Parâmetros:

Tubo Externo

- “Diâmetro externo: 5 1/2”
- “Espessura da parede: 3/8”

Tubo Interno

- “Diâmetro externo: 2 7/8”
- “Espessura da parede: 1/4”

“Packer”

- “Diâmetro: 23.8125mm”
- “Tamanho: 1”

Para as simulações, utilizou-se 50 m como o tamanho médio de uma seção. Foram realizadas simulações com as seguintes combinações de “packers”:

- Um “packer” no início e outro no fim da seção de 50 m.
- Um “packer” a cada 10 m, totalizando, portanto 5 “packers” em uma seção de 50 m.

A figura 22 mostra o corte de um poço mostrando o esquema da tecnologia de transmissão por ondas eletromagnéticas através do uso de bobinas.

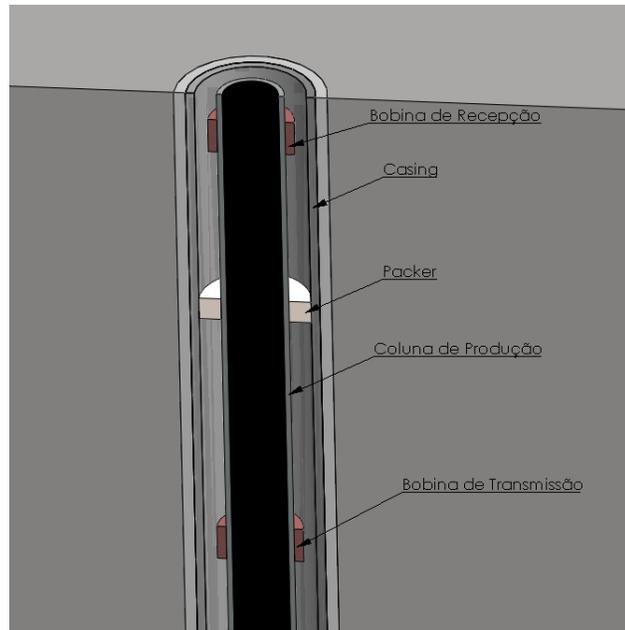


Figura 22: Corte um poço de produção utilizando a tecnologia de transmissão por ondas eletromagnéticas através do uso de bobinas.

A tabela 3 mostra as propriedades elétricas e magnéticas de cada material encontrado em um poço de produção, sendo σ a condutividade elétrica, μ a permeabilidade magnética e ϵ permissividade elétrica. Estes valores foram obtidos na literatura (POH, V. , et al., 2005).

Tabela 3: Propriedades Elétricas e Magnéticas de cada Material

Material	σ (S/m)	μ	ϵ
Óleo	2.985	1	14
Coluna de Produção	4.5e 6	500	1
Lama	5 e -4	1	14
Revestimento	4.5e 6	500	1
Formação	0.035	1	1
“Packer”	4.5e 6	500	1
bobina	5.998e 7	1	1

Sabe-se que existem variações destas propriedades, principalmente relativas ao óleo, lama e à formação. Levando isto em conta, simulou-se também diferentes valores para cada caso no intuito de se observar a influência destas propriedades nos resultados de transmissão.

2.4.1 Modelo Teórico de Comunicação por Indução Magnética

Foram feitas simulações em elementos finitos (FEM) através do software FEMLAB (Comsol Ltd.) com base em um estudo de caso para uma coluna de produção visando obter o valor de voltagem induzida na bobina receptora em função da distância.

Para o problema em questão, utiliza-se o módulo AC/DC, escolhendo trabalhar com correntes induzidas azimutais em duas dimensões com simetria axial, figura 23.

A equação que governa o fenômeno é dada por:

$$(i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma_{v\times}(\nabla \times \mathbf{A}) + (\sigma + i\omega\varepsilon_0)\nabla V = \mathbf{J}^e + i\omega\mathbf{P} \quad (38)$$

Onde ω é a frequência angular, ε_0 a permissividade do vácuo, σ a condutividade elétrica, μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, \mathbf{A} o potencial vetor, \mathbf{M} o vetor magnetização, \mathbf{P} o vetor polarização, ∇V a diferença de potencial e \mathbf{J}^e a densidade de corrente externa. Já a voltagem induzida na bobina receptora é calculada através da equação:

$$V = \frac{2\pi i\omega N}{(i_2 - i_1)(r_2 - r_1)} \int_{i_1}^{i_2} \int_{r_1}^{r_2} r A(r, z) dr dz \quad (39)$$

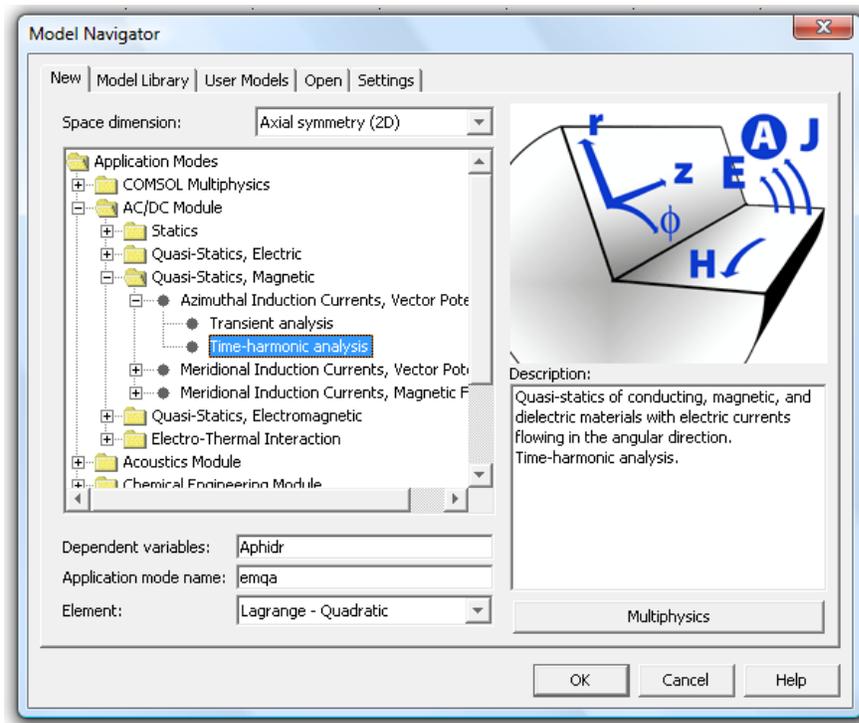


Figura 23, Escolha da licença de trabalho.

Foram utilizadas como condições de contorno no problema: Simetria axial, isolante Magnético ($\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$) e continuidade ($\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{0}$).

A figura 24 mostra o modelo de transmissão eletromagnética em elementos finitos do poço mostrado nas figuras 1a e 1b. Na figura 24 à esquerda vê se o modelo completo, incluindo a formação. Nesta região observam-se grandes dimensões de modo a não produzir nenhum efeito de borda. Na figura 24 à direita observa-se a amplificação de uma pequena região do poço, incluindo as bobinas.

A figura 25 mostra o desenho do modelo de bobina utilizada tanto para transmissão como para recepção. As dimensões escolhidas para a bobina são: $L = 400$ mm, $r_2 - r_1 = 100$ mm e $N = 4000$ espiras. As dimensões podem ser modificadas para se obter melhor eficiência, ou seja, a alteração combinada do número de espiras, altura L , e espessura $r_2 - r_1$ pode otimizar significativamente o acoplamento magnético entre a bobina transmissora e a receptora.

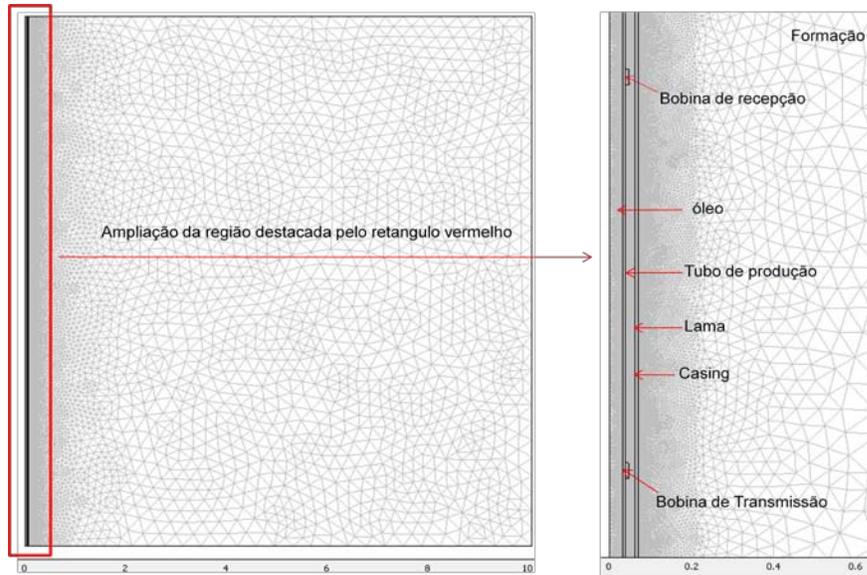


Figura 24 Simulação em elementos finitos de transmissão eletromagnética de um modelo de poço

As correntes de alimentação da bobina transmissora utilizados nos modelos foram de 1A e 10A. As frequências utilizadas foram 1, 10, 30 e 50hz.

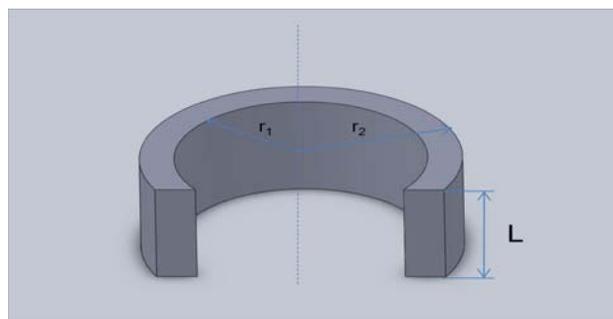


Figura 25: Desenho da bobina utilizada no modelo.

Foram simulados diferentes casos para o estudo de viabilidade da técnica, como mostrado a seguir:

1º Grupo de Simulações:

Corrente de alimentação da bobina transmissora: 1A

Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais: Tabela 3

Número de “packers”: 1 a cada 10 m

Frequências: 1, 10, 30 e 50hz

Distância entre a bobina transmissora e a receptora: 1 até 60m

2º Grupo de Simulações:

Corrente de alimentação da bobina transmissora: 1A

Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais: Tabela 3

Número de “packers”: 1 a cada 50 m

Frequências: 1, 10, 30 e 50hz

Distância entre a bobina transmissora e a receptora: 1 até 60m

3º Grupo de Simulações:

Corrente de alimentação da bobina transmissora: 1A

Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais: modificações nos valores da Tabela 3 de condutividade elétrica do óleo e da formação.

Número de “packers”: 1 a cada 50 m

Frequências: 10Hz

Distância entre a bobina transmissora e a receptora: 1m

4º Grupo de Simulações:

Corrente de alimentação da bobina transmissora: 10A

Propriedades elétricas e magnéticas dos materiais: Tabela 3

Número de “packers”: 1 a cada 50 m

Frequências: 1 e 10hz

Distância entre a bobina transmissora e a receptora: 1 até 90m

- **Resultados do 1º Grupo Simulações**

A figura 26 apresenta a densidade de fluxo magnético na região próxima à bobina para diferentes frequências (1hz, 10hz, 30hz e 50hz). É possível observar que com o aumento da frequência ocorre um aumento da amplitude da densidade do fluxo magnético.

Ainda na figura 26 é possível observar também que a região das paredes do tubo de produção e do revestimento possui alta concentração do campo, embora a penetração diminua com o aumento da frequência. Este efeito é conhecido como “*skin depth*”, ou seja, o campo magnético primário que penetra no material condutor decresce com a profundidade.

Estes resultados ficam mais evidentes na figura 27, que mostra em (a) um corte feito ao longo do eixo z (linha vermelha) e em (b) os resultados da densidade de fluxo magnético ao longo do eixo em z para diferentes frequências 1hz, 10hz, 30hz e 50hz.

Já a figura 28 mostra o efeito da densidade de correntes parasitas no efeito “*skin depth*” ou seja, com o aumento da densidade de correntes parasitas ocorre o decréscimo da profundidade de penetração no material condutor.

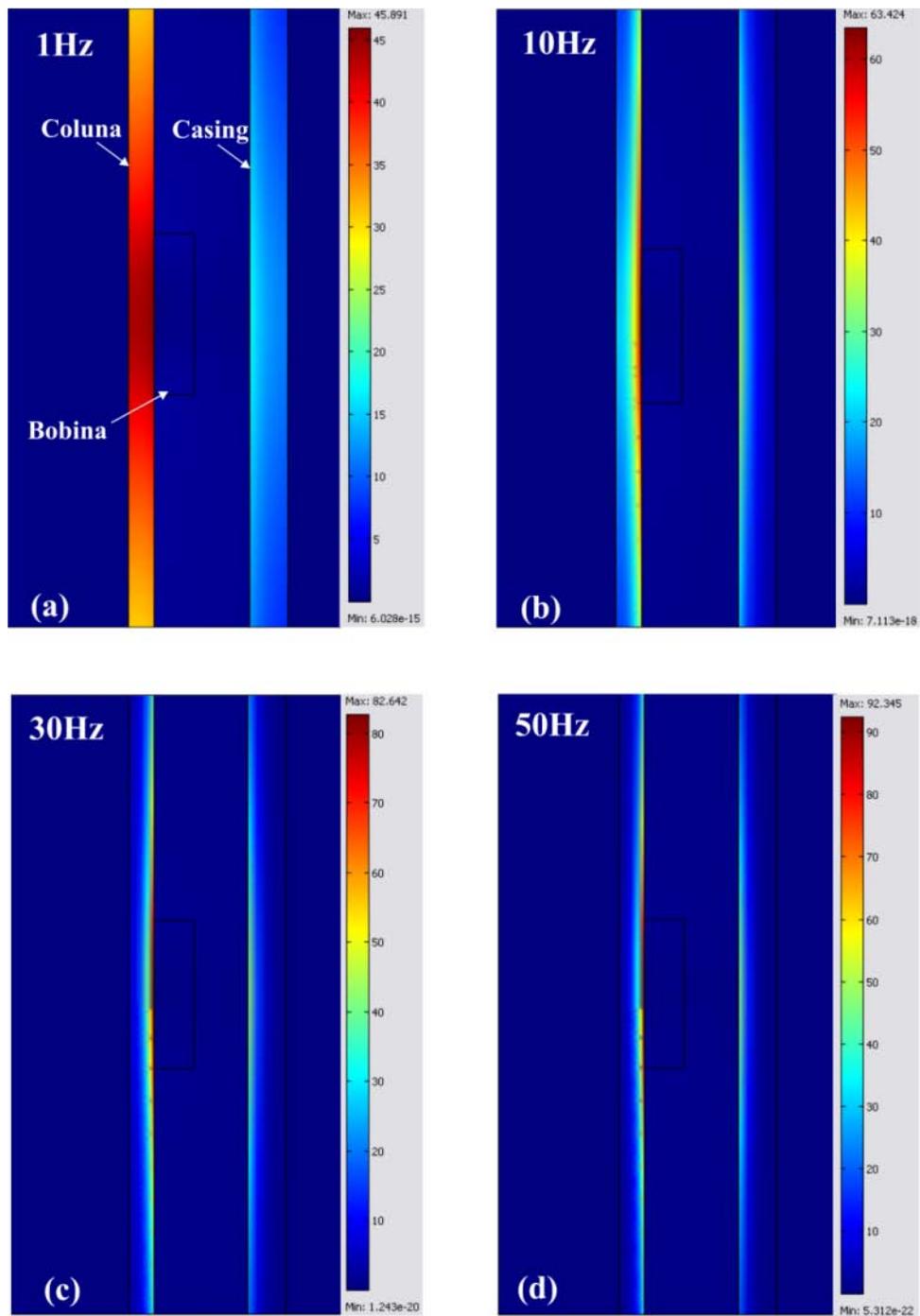


Figura 26: Densidade de fluxo magnético na região próxima à bobina para diferentes frequências: (a) 1hz, (b) 10hz, (c) 30hz e (d) 50hz

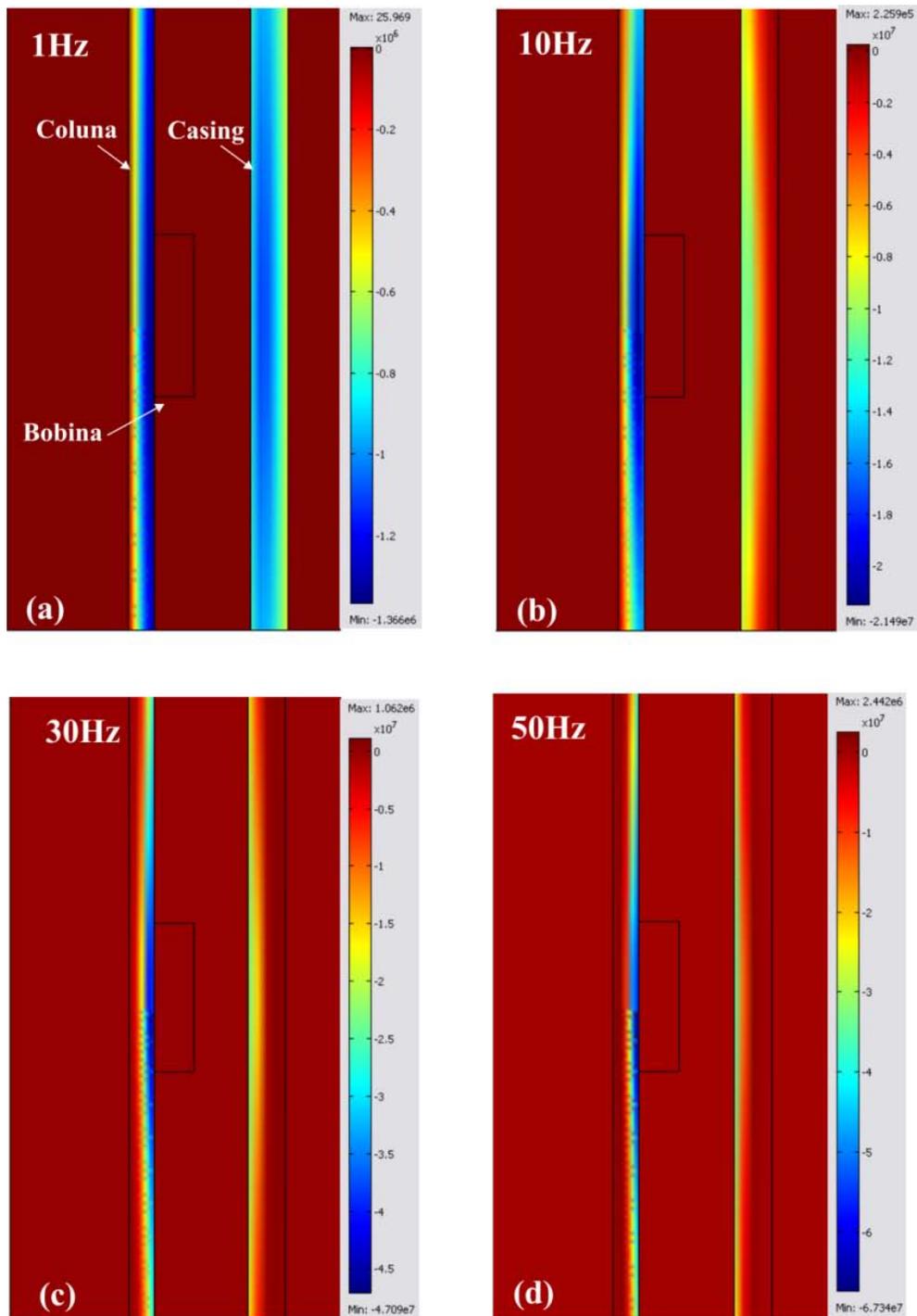


Figura 27: Densidade de correntes parasitas na região próxima à bobina para diferentes frequências: (a) 1hz, (b) 10hz, (c) 30hz e (d) 50hz.

A figura 28 mostra a voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora, esta distância sendo de 1 a 10 m. Estes resultados foram obtidos utilizando 1A de corrente de alimentação da bobina transmissora a diferentes frequências de 1hz, 10hz, 30hz e 50hz.

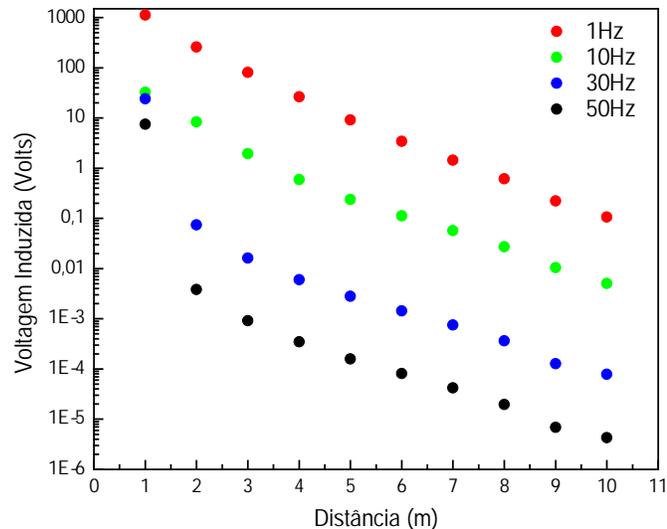


Figura 28: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para diferentes frequências (corrente de alimentação da bobina transmissora 1A).

A tabela 4 mostra os resultados apresentados na figura 28 para a melhor visualização da relação entre a frequência e a voltagem induzida. Pode-se ver que a voltagem induzida diminui consideravelmente com o aumento tanto da frequência como da distância entre as bobinas.

Com base nestes resultados escolheu-se trabalhar somente com as frequências de 1Hz e 10Hz, uma vez que com frequências maiores percebe-se que o sinal já para 10 m está quase no limite dos circuitos capacitados para detecção do sinal (ordem de grandeza

de micro volts). As figuras 29 e 30 enfatizam os resultados para frequências de 1Hz e 10Hz mostrados na figura 28.

Tabela 4: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para diferentes frequências

Distância (m)	Voltagem Induzida na bobina receptora (Volts)			
	1hz	10hz	30hz	50hz
1	1122.	32.571	24.063	7.510
2	258.1	32.5682	0.07422	3.851E-3
3	80.89	1.964	0.01611	9.18E-4
4	26.44	0.60	6.034E-3	3.461E-4
5	9.123	0.241	2.791E-3	1.602E-4
6	3.431	0.111	1.430E-3	8.123E-5
7	1.444	0.063	7.521E-4	4.222E-5
8	0.621	0.032	3.633E-4	1.963E-5
9	0.223	0.013	1.271E-4	6.830E-6
10	0.114	5.03E-3	7.863E-5	4.304E-6

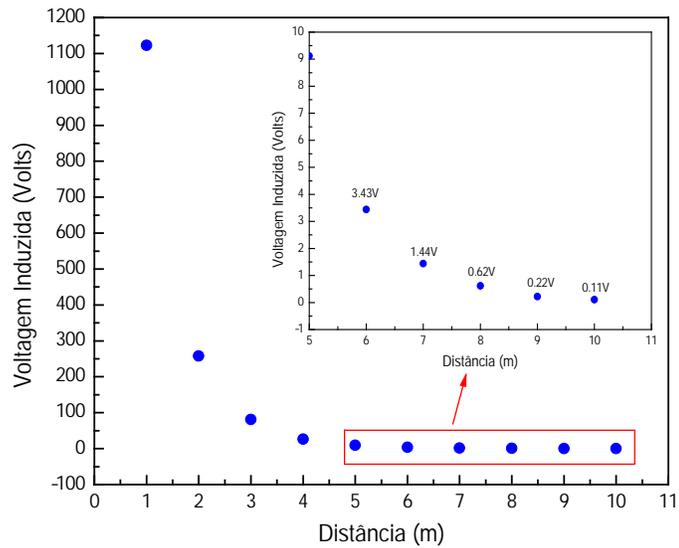


Figura 29: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 1HZ (corrente de alimentação de 1A).

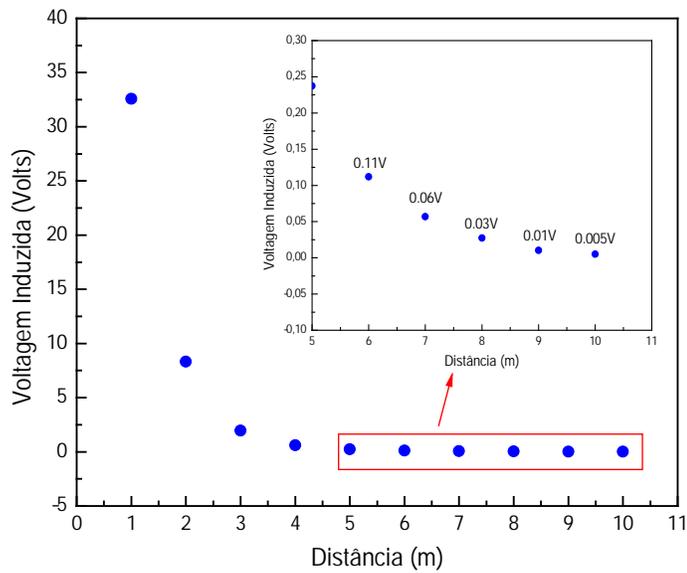


Figura 30: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 10HZ (corrente de alimentação de 1A).

Para verificar qual a distância máxima a que a bobina receptora pode ser posicionada em relação à bobina transmissora, simulou-se até 50m entre as bobinas para obter a máxima distância na qual é possível efetuar a transmissão de dados. É importante salientar que entre a bobina receptora e a transmissora existem 5 “packers” (1 “packer” a cada 10m).

A tabela 5 mostra que com a frequência de 1 Hz é possível atingir a distância máxima de separação de 50 m, entretanto para a frequência de 10Hz não seria possível transmitir o sinal até a superfície. Torna-se necessário o uso de repetidores para transmitir o sinal até a superfície.

Tabela 5: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à transmissora (1 “packer” a cada 10m).

Frequência	Voltagem	Distância (m)
1Hz	2.24 μV	50 m
10Hz	0.098 μV	50m

- **Resultados do 2º Grupo de Simulações**

Este grupo de simulações visa o estudo do efeito dos “packers” na transmissão de dados. Anteriormente, utilizava-se um “packer” a cada 10m, enquanto neste grupo a simulação compreende um “packer” a cada 50m.

Os resultados de voltagem induzida deste modelo até 10m são os mesmos apresentados anteriormente. A Tabela 6 mostra os resultados para 50m entre as bobinas.

Comparando a tabela 5 com a Tabela 6 pode-se ver que a redução de número de “packers” não aumentou consideravelmente a voltagem induzida na bobina receptora,

isto porque na simulação considera-se que a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética dos “packers” são iguais às do tubo de produção.

Tabela 6: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à bobina transmissora (1 “**packer**” a cada 50m).

Frequência	Voltagem	Distância (m)
1Hz	2.75 μV	50 m
10Hz	1.006 μV	50m

- **Resultados do 3º Grupo de Simulações**

Este grupo de simulações visa o estudo do efeito das mudanças de propriedades elétricas do óleo e da formação na transmissão de dados, como pode ser visto na tabela 7.

Tabela 7: Voltagem induzida na bobina receptora em função das diferentes propriedades elétricas do óleo e da formação relação à bobina transmissora.

Material	σ (S/m)	ϵ	V(V) a 10Hz
Óleo	2.985	14	32.571
	2.985	1	32.574
	4.4725	14	32.569
	5.963	14	32.563
	29.85	14	32.552
Formação	0.035	1	32.571
	0.35	1	32.533
	350	1	32.228

Podem-se observar na tabela 7 pequenas mudanças na voltagem induzida com as mudanças de propriedades elétricas dos materiais, embora não sejam muito significativas, uma vez que o campo magnético está altamente concentrado nas paredes da coluna e do revestimento.

- **Resultados do 4º Grupo de Simulações**

Neste grupo de simulações utilizou-se 10A de corrente de alimentação. A figura 31 mostra a voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora (de 1 a 10m) a frequências de 1Hz e 10Hz.

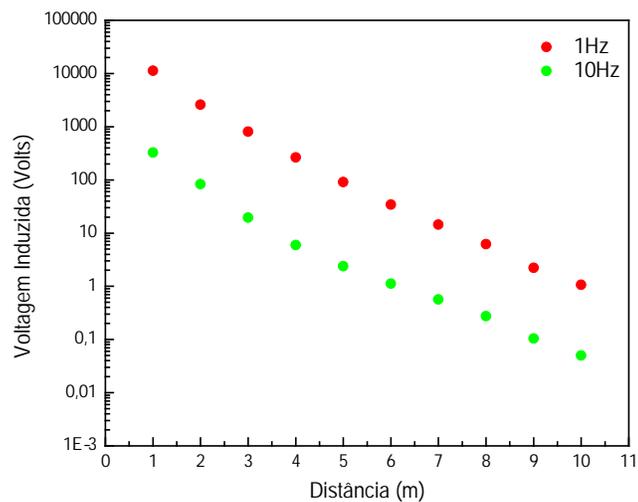


Figura 31: Voltagem induzida na bobina receptora em função da distância em relação à bobina transmissora para a frequência de 1Hz e 10Hz (corrente de alimentação de 10A).

Observa-se na figura 31 que a voltagem induzida na bobina receptora na distância de 10 m para a frequência de 1Hz é de 1,14V e para 10Hz. é de 0,0503V

A tabela 8 mostra os resultados para 50 m entre as bobinas.

Tabela 8: Voltagem induzida na bobina receptora para a distância de 50m em relação à transmissora (1 “**packer**” a cada 50m).

Frequência	Voltagem	Distância (m)
1Hz	36.42 μV	50 m
10Hz	12.10 μV	50 m

A tabela 8 mostra que neste caso (corrente 10A), para a frequência de 10 Hz a distância máxima de separação é de 50 m para que se possa detectar o sinal. Na frequência de 1 Hz é possível chegar até aproximadamente 86m, sendo em ambos os casos necessário o uso de repetidores para transmitir o sinal até a superfície.

Como base nos resultados experimentais podemos concluir que o modelo de transmissão por indução magnética possui limitações físicas para transmissão em grandes distâncias, ou seja, possui baixo alcance. A máxima distância entre as bobinas transmissoras e receptoras obtida no modelo experimental foi de 50 m para uma corrente de 10A na bobina transmissora. A necessidade da aplicação de grandes potências na bobina de transmissão com a finalidade de obter uma indução magnética capaz de transmitir sinais para a bobina de recepção condiciona a sua aplicação somente como conector ou penetrador sem fio em zonas de alta pressão e conexões rotativas.

Capítulo 3

3 Materiais com Memória de Forma.

As ligas de materiais com memória de forma conhecidas como **SMA**s (*Shape Memory Alloys*) são ligas que têm a habilidade de retornarem à sua forma ou tamanho original, ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação mediante um procedimento térmico e/ou de tensão que provoca transformações de fase induzidas nas ligas. As propriedades das ligas **SMA**s está baseada na transformação martensítica termoelástica.

O efeito de recuperação de forma não é exclusivo das ligas metálicas, existindo também em polímeros, cerâmicos e em materiais biológicos, de que é exemplo o cabelo humano.

Em 1962, Bueher e seus colegas de trabalho do *Naval Ordnance Laboratory* (Laboratório Naval de Ordnance nos Estados Unidos) descobriram o efeito memória de forma em uma liga Níquel Titânio (NiTi), que ficou conhecida como Nitinol, uma referência às iniciais do laboratório, NOL (HODGSON, D. E. et al., 1990). Industrialmente o Nitinol foi utilizado pela primeira vez em 1967 na construção de mangas de junção para os aviões F-14. Posteriormente, houve um crescente interesse pelo emprego destes materiais em aplicações que vão desde estrutura adaptativa a implantes utilizados pela medicina.

Particularmente, as ligas de maior importância são NiTi, CuZnAl e CuAlNi. As ligas NiTi são de maior potencial em aplicações comerciais porque combinam boas propriedades mecânicas com os fenômenos de memória de forma e boa resistência à corrosão (HODGSON, D. E. et al., 1990).

As fases mais presentes nas SMA's são a Austenita (A) e a Martensita (M). A Austenita é uma fase de alta temperatura (fase mãe), dura e de estrutura geralmente cúbica. A Martensita é a fase de baixa temperatura flexível e facilmente deformável e apresenta uma estrutura com pouca simetria.

O efeito de memória de forma está fundamentado na transformação de fase devida à variação de temperatura. O arrefecimento de uma liga SMA provoca a mudança de fase de austenita para martensita, e com a aplicação de uma deformação nesta fase a liga assume uma nova forma. O aquecimento da liga faz com que o material recupere a sua forma original, esta recuperação sendo conseqüência da transformação reversível da fase martensita em fase austenita.

As fases presentes nas SMAs são a austenita e a martensita. No processo de transformação quatro temperaturas características são definidas: M_s (Martensite start) e M_f (Martensite finish), respectivamente temperaturas de início e formação da fase martensita. Já A_s (Austenite start) e A_f (Austenite finish) correspondem respectivamente às temperaturas de início e fim de formação da fase austenita.

A transformação apresenta histerese, ou seja, as temperaturas de transformação em aquecimento são diferentes das de resfriamento. A diferença entre as temperaturas de transição quando do aquecimento e do resfriamento é chamada histerese (representada por H no gráfico da figura 32), que nesse caso pode ser definida como a diferença entre as temperaturas nas quais a liga encontra-se como 50% austenita e 50% martensita. Essa histerese de transformação varia de liga para liga. Para as ligas equiatômicas Ni-Ti, essa diferença pode se dar em torno de 20°C a 30°C (HODGSON, D. E. et al., 1990)

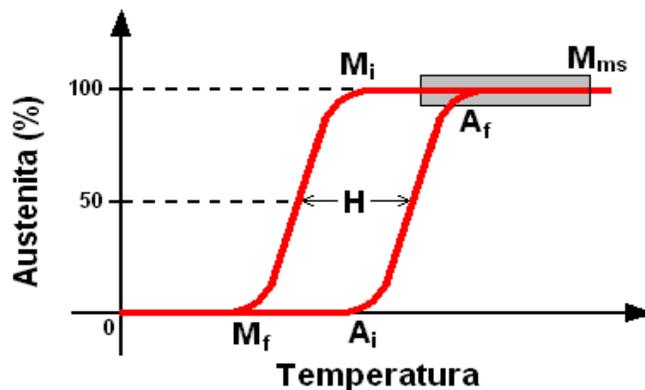


Figura 32: Curva fase-temperatura

As SMAs apresentam uma série de comportamentos termomecânicos particulares. Os principais fenômenos associados a estas ligas são: a pseudo-elasticidade; o efeito de memória de forma (“*shape memory effect*” – **SME**); a transformação de fase devida à variação de temperatura e o efeito de memória de forma reversível (“*two-way shape memory effect*” – **TWSME**).

3.1 Efeito de Memória de Forma (SME)

O efeito de memória de forma **SME** conhecido como efeito de memória simples, consiste no processo em que a liga memoriza apenas a forma da fase mãe austenita. A modificação da forma (processo de partida) se dá com o aquecimento da liga na fase mãe (austenita). As temperaturas de transformação de fase são características de cada liga e variam em função da composição química e de tratamentos termomecânicos (OTSUKA, K. & REN, X., 1999; WU, S.K. & LIN, H.C., 2000). Essa reversão de sentido cria um ciclo de histerese e sua largura varia em função da composição química da liga e de tratamentos térmicos (DELAEY et al., 1974).

A quasiplasticidade é observada em temperaturas abaixo de M_f e a pseudo elasticidade em temperaturas superiores a A_f . Estes são os dois principais fenômenos observados nas SMAs, além do efeito memória de forma, observado com a variação de temperatura.

Nas SMA, quando a martensita se forma somente através da variação da temperatura, é denominada martensita maclada ou martensita “*twined*”. Este tipo de martensita é uma forma cristalina potencial, que se transforma em uma determinada estrutura cristalina que dependerá das tensões impostas na mesma (DELAEY, L; et al., 1974).

Essa estrutura metalúrgica apresenta 24 variantes, isto é 24 subtipos com orientações cristalográficas diferentes (DELAEY, L. et al., 1974). Quando esta estrutura é submetida a uma tensão, estas 24 variantes da martensita “*twined*” (maclada) se reorientam na direção mais favorável ao carregamento aplicado, levando à formação da martensita orientada “*detwined*” (não maclada).

Quando a martensita maclada é submetida a uma determinada tensão ocorre a formação de martensita “*detwined*”, e ela assume uma forma cristalina relacionada ao tipo de tensão a que foi submetida por um processo de reorientação das variantes (DELAEY, L. et al., 1974).

3.2 Efeito de Memória de Forma Reversível (TWSME)

Quando o efeito de memória de forma se manifesta apenas durante o aquecimento, diz-se tratar de memória de forma não reversível SME (“*one way shape memory effect*”). Se este efeito se manifestar também durante o resfriamento, o mesmo passa a chamar-se efeito reversível de memória de forma ou dupla memória de forma TWSME (“*two way shape memory effect*”).

O efeito de memória de forma reversível ou dupla memória de forma é obtido após a liga de SMA ser submetida a um processo de treinamento (ZHANG, J.X. et al, 1997; MILLER, D.A. & LAGOUDAS, D.C., 2000) que permite associar uma forma a cada fase em função da variação de temperatura.

O treinamento das ligas SMA é realizado com ciclos de memória de forma conhecidos como SME (“*shape memory effect cycling*”), ou com ciclos pseudo-elásticos conhecidos como SIMT (“*stress-induced martensite training*”).

Nos ciclos de treinamento SME são aplicados carregamentos até que o limite de escoamento da fase produto (plastificação da martensita) seja superado para a temperatura $T < M_f$.

Nos ciclos de treinamento SIMT são aplicados carregamentos acima do limite de escoamento da fase produto (pseudo-elasticidade) $T > A_f$.

Os limites máximos de deformação e o número de ciclos devem ser observados, já que as deformações plásticas impostas durante o processo de treinamento das ligas são consideráveis. Os resultados experimentais mostram que para treinar uma liga de nitinol a deformação total imposta ao material deve estar entre dez e vinte por cento e o número de ciclos em torno de vinte.

O modelo matemático que melhor representa os fenômenos de memória de forma,

pseudo-elasticidade, descreve os principais comportamentos das SMAs apresentando um menor número de restrições, permite tratar diferentes carregamentos termomecânicos pelo método dos elementos finitos, é o modelo desenvolvido por FREMOND, M. (1987, 1996) e modificado por SAVI, M.A. et al 2002) e (BAETA, A.P. et al 2003).

3.3 Atuadores com Materiais de Memória de Forma

A construção de atuadores para válvulas de fundo de poço é inédita no mundo, e altamente inovadora. A escolha desta tecnologia para substituir os tradicionais tipos de atuadores, tais como o **atuador elétrico**: atuador que requer o uso de motores elétricos de alta rotação e elevado torque, necessitando de tensões altas para a sua alimentação por meio de umbilicais elétricos. A outra opção: o **atuador hidráulico**, que apesar de sua simplicidade e eficiência, necessita de umbilicais hidráulicos e manutenção periódica nas vedações, linhas e fluido hidráulico.

O atuador proposto neste estudo será um atuador do tipo carretel na sua versão SMA (mecânico) com base em um dispositivo mecânico acionado por um conjunto de fios de SMA. O acionamento será por meio da aplicação de uma corrente elétrica de baixa intensidade produzida por um gerador no interior do poço. A corrente elétrica ao aquecer os fios de SMA do atuador vai gerar um diferencial de temperatura, fazendo com que a temperatura do dispositivo chegue à temperatura de transformação, provocando o acionamento do dispositivo. Aspectos importantes como: consumo de energia e repetibilidade serão devidamente estudados.

A outra forma possível de construção de um atuador seria um atuador com dispositivo mecânico de acionamento fabricado com material do tipo FSMA (magnético). Este atuador poderia ser construído com uma mola fabricada com material FSMA que seria acionada por uma bobina “yoke” que produz campo magnético para o acionamento da mola de FSMA deslocando uma mola convencional (tração/compressão) e assim movimentando o atuador. Aspectos tais como temperatura de operação da liga (< 90 graus)

e dificuldade na obtenção da liga, já que se trata de uma liga ainda em fase de desenvolvimento e industrialização, dificultam a sua aplicação em atuadores comerciais.

3.3.1 Atuadores com Materiais de Memória de Forma SMA

Atuadores convencionais tais como motores hidráulicos e pneumáticos promovem grandes perdas de energia e têm um grande volume e pesadas massas para o sistema de atuação. Novas tecnologias e materiais estão atraindo a atenção para que se desenvolvam sistemas mais leves e com grande poder de atuação.

As ligas com memória de forma **SMA** são ligas metálicas especiais que possuem a propriedade de serem tecnicamente ativas, retornando ao seu estado original quando aquecidas. Esta característica é conhecida como “efeito memória”. Aquecendo-se a **SMA** até uma determinada temperatura, ocorre uma mudança de fase na estrutura cristalina do material, ocorrendo assim uma contração. Como na fase fria ocorre um estiramento devido à carga aplicada e à alta plasticidade e no aquecimento ocorre a contração do material, pode-se utilizar esse fenômeno para construir atuadores leves e silenciosos, como verdadeiros músculos metálicos.

O desenvolvimento de atuadores com as **SMAs** apresenta grandes atrativos para diversos campos da engenharia, principalmente na área de robótica, substituindo os atuadores convencionais de grande peso e ruidosos, como motores e válvulas solenóides. Os atuadores baseados em **SMA** possuem a maior relação de carga útil por peso em relação aos atuadores convencionais. Entretanto, o desempenho dinâmico dos atuadores com **SMA** é limitado devido ao elevado tempo de resposta. Para a **SMA** operar rapidamente, deve-se aquecê-la para haver a contração e resfriá-la na recuperação. O aquecimento é um processo simples e rápido, podendo ser feito com a passagem de corrente elétrica pelo fio **SMA**. Entretanto, o resfriamento é lento, o que limita o comportamento dinâmico dos atuadores. Esta limitação pode ser contornada com o uso de pastilhas termoelétricas que auxiliem no resfriamento de forma que a resposta dinâmica (velocidade de atuação) seja compatível com os atuadores convencionais.

A forma mais comum de construção de um atuador de **SMA** está representada na

figura 33 (HODGSON, D.E. & BROWN, J.W., 2000). O atuador consiste no uso de um conjunto composto de uma mola de material SMA em equilíbrio de forças com uma mola convencional. O atuador em condições iniciais permanece em posição de avanço (mola convencional comprimida e mola SMA distendida). Após o aquecimento da mola SMA, a mesma se comprime e a mola convencional se expande, provocando o avanço do eixo do atuador. Durante o processo de resfriamento, a mola SMA expande contraindo a mola convencional, provocando o retorno do eixo.

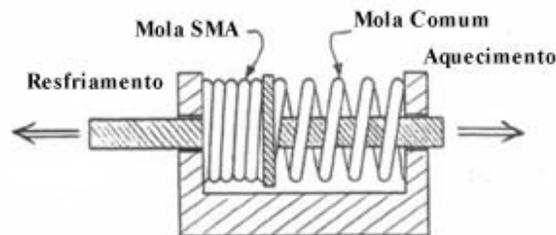


Figura 33: Representação esquemática de um atuador com memória de forma (HODGSON, D.E. & BROWN, J.W., 2000).

- **Modelo Constitutivo SMA.**

O uso de dispositivos com ligas de memória de forma **SMA** em atuadores para válvulas de controle somente torna-se viável com o uso de modelos matemáticos capazes de descrever de forma adequada o comportamento termomecânico, permitindo explorar todo o seu potencial. Vários modelos já foram criados pela comunidade científica utilizando abordagens microscópicas que levam em consideração os aspectos metalúrgicos, e abordagem macroscópica representando os aspectos fenomenológicos.

O modelo escolhido para representar o comportamento termomecânico foi a versão simplificada do modelo proposto por SAVI, M. A. *et al.* (2002), BAETA NEVES, *et al.* (2004), PAIVA, A., (2004), PAIVA, A. & SAVI, M. A., (2004) e PAIVA, A. *et al.* (2005). Este modelo contempla quatro fases macroscópicas representando a austenita, A,

a martensita maclada, M , e duas outras variantes de martensita, M^+ e M^- , que são induzidas respectivamente por cargas mecânicas de tração e compressão.

O modelo apresenta propriedades diferentes para cada uma das fases, o que possibilita uma correta descrição do comportamento termomecânico das SMAs. Além disso, o modelo contempla fenômenos como a plasticidade e a assimetria tração-compressão. A versão simplificada desconsidera alguns destes efeitos.

A formulação considera além da deformação total ε , e da temperatura T , quatro variáveis relacionadas à fração volumétrica de cada fase: β_1 associada à fase M^+ , β_2 associada à fase M^- , β_3 associada à austenita. A fase M é representada por β_4 , que não é uma variável independente uma vez que:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1 \quad (40)$$

Desta forma, o comportamento das SMAs é descrito pelo seguinte conjunto de equações constitutivas (SAVI, M. A. *et al.* (2002), BAETA NEVES, *et al.* (2004), PAIVA, A., (2004), PAIVA, A. & SAVI, M. A., (2004) e PAIVA, A. *et al.* (2005)):

$$\sigma = E[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)] + \alpha(\beta_2 - \beta_1) - \Omega(T - T_0) \quad (41)$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{n} \{ \alpha \varepsilon + \Lambda(T) + (2\alpha \alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) + \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_1} J_\pi \} + \partial_{\beta_1} J_\chi \quad (42)$$

$$\dot{\beta}_2 = \frac{1}{n} \{ -\alpha \varepsilon + \Lambda(T) - (2\alpha \alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_2} J_\pi \} + \partial_{\beta_2} J_\chi \quad (43)$$

$$\dot{\beta}_3 = \frac{1}{n} \left\{ -\frac{1}{2}(E_A - E_M)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)]^2 + \Lambda_3(T) + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)] - \partial_{\beta_3} J_\pi \right\} + \partial_{\beta_3} J_\chi \quad (44)$$

Onde o módulo elástico E é dado por:

$$E = E_M + \beta_3(E_A - E_M) \quad (45)$$

E está relacionado ao coeficiente de expansão térmica Ω é dado por:

$$\Omega = \Omega_M + \beta_3(\Omega_A - \Omega_M) \quad (46)$$

O subscrito A refere-se à fase austenítica enquanto o M à fase martensítica. Os parâmetros α e α_h estão relacionados às dimensões do laço de histerese, enquanto η é um parâmetro de dissipação.

Os termos:

$$\partial_{\beta_n} J_\pi \quad \text{e} \quad \partial_{\beta_n} J_\chi \quad (n = 1, 2, 3)$$

Representam restrições associadas às transformações de fase. Além disso, vale considerar a definição das funções Λ e Λ_3 :

$$\Lambda = -L_0 + \frac{L}{T_M}(T - T_M) \quad (47)$$

$$\Lambda_3 = -L_0^A + \frac{L^A}{T_M}(T - T_M) \quad (48)$$

Onde T_M é a temperatura abaixo da qual a martensita é estável enquanto L_0 , L , L_0^A e L^A são parâmetros relacionados às tensões críticas de transformação. Para maiores detalhes sobre o modelo em questão, ver as referências SAVI, M. A. *et al.* (2002), BAETA NEVES, *et al.* (2004), PAIVA, A., (2004), PAIVA, A. & SAVI, M. A., (2004) e PAIVA, A. *et al.* (2005).

- **Relação Potência-Temperatura**

Um dos aspectos importantes para a construção de um atuador elétrico para válvula de fundo de poço baseado em elementos **SMA** é a potência necessária (consumida) para a atuação. A quantificação da energia necessária é importante principalmente em sistemas de acionamento (sistemas sem fio) onde a energia disponível

(elétrica) é limitada (baterias). Os elementos **SMA** são usualmente aquecidos a partir da passagem de uma corrente elétrica, o que, através do efeito Joule, promove um aumento da temperatura do elemento atuador. Assim sendo, a modelagem deste fenômeno implica na descrição da relação potência-temperatura.

Com este objetivo, define-se um volume de controle (VC) onde se faz um balanço de energia (SAVI, M. A. *et al.* (2002), BAETA NEVES, A.P. *et al.* (2004), PAIVA, A. *et al.* (2005) e PAIVA, A. & SAVI, M. A. (2004)) considerando as seguintes hipóteses: não existe energia fornecida através da superfície do VC e desconsideram-se os mecanismos de troca de calor do sistema com o meio externo (seja por radiação, seja por convecção), ou seja, o atuador é aquecido rapidamente pela passagem de corrente elétrica.

Com isso, o balanço de energia fica reduzido a:

$$\dot{U}_{gerada} = \dot{U}_{armazenada}$$

Onde: \dot{U}_{gerada} está relacionada à resistência elétrica oferecida pelo atuador, enquanto: $\dot{U}_{armazenada}$ deve-se ao aparecimento de energia térmica interna provocada pela mudança de temperatura. A taxa de energia gerada pode ser interpretada como a taxa de transferência de energia elétrica ou, simplesmente, potência elétrica (W), portanto:

$$\dot{U}_{gerada} = dqV = i dt V \quad (49)$$

Sabendo que: L_{MF} é o comprimento do atuador, A_{MF} é a área do atuador e θ é a resistividade elétrica do material, é possível escrever a resistência elétrica R_{el} oferecida pelo atuador como:

$$R_{el} = \theta \frac{L_{MF}}{A_{MF}} \quad (50)$$

A taxa de energia armazenada devida à variação de temperatura é dada por:

$$\dot{U}_{armazenada} = \frac{d}{dt} (\rho V_{MF} c_p T) \quad (51)$$

Onde: ρ é a massa específica e c_p é o calor específico a pressão constante.

Assumindo que essas propriedades não variem com o tempo, tem-se:

$$\dot{U}_{armazenada} = \rho c_p L_{MF} A_{MF} \frac{dT}{dt} \quad (51)$$

Considerando-se um intervalo de variação finito, pode-se aproximar a variação de temperatura no atuador para:

$$W = \rho c_p L_{MF} A_{MF} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (52)$$

Desta forma, é possível estimar a temperatura a partir da potência elétrica o que é útil para avaliar as características de atuação das ligas com memória de forma.

3.3.2 Atuadores com Memória de Forma FSMA.

As Ligas com Memória de Forma Magnética (MSMA) surgiram mais recentemente como uma adição muito interessante a esta classe de materiais inteligentes. Em acréscimo aos esforços originados a partir da temperatura ou comportamento de memória de forma convencional controlado por estresse, grandes esforços podem ser produzidos nestas ligas sob aplicação externa de campos magnéticos moderados. Ou seja, em princípio, sob condições extremas, a transformação de fase da austenita para martensita também pode ser induzida nas MSMA sob a aplicação de campos magnéticos. O esforço macroscópico observável induzido na MSMA é causado pelo rearranjo micro estrutural das variantes martensíticas. Já que as variantes cristalográficas da martensita possuem diferentes preferidas direções de magnetização (eixo preferencial), os campos magnéticos aplicados podem ser utilizados para selecionar determinadas variantes sobre outras, resultando na mudança de forma macroscópica. O processo de reorientação variável fornece uma maneira tecnologicamente mais atrativa de produzir grandes deformações/esforços nestes materiais por meio de campos magnéticos. A resposta constitutiva é histerética e não linear entre o campo magnético gerado e a deformação, que dá ao material característica interessante, em termos de possíveis aplicações.

As ligas FSMA são muito promissoras, mas ainda estão em um estágio anterior às SMAs tradicionais e desta forma as ligas não estão disponíveis para a indústria. Simulações permitem estimar as relações potência-deslocamento. Atualmente no contexto da indústria do petróleo, as ligas FSMA apresentam limitações técnicas para o seu emprego em dispositivos de atuação. Esta limitação se deve principalmente à temperatura de Curie (temperatura de 103°C) da liga que está abaixo da temperatura mínima requerida para equipamentos de poços submarinos, que é de 120°C (padrão “*IWIS-Intelligent Well Interface Standardisation*”). A comparação entre os materiais inteligentes, e a comparação entre SMA e FSMA são descritas nas tabelas 9a e 9b respectivamente.

No estudo de caso o uso da FSMA foi descartado em virtude das limitações descritas anteriormente. O atuador de memória de forma terá como base o uso de dispositivos **SMAs**.

Tabela 9a. Comparação entre os Materiais Inteligentes

	PZE	PZEM	Nitinol SMA	Terfenol-D	NiMnGa MSMA
Mecanismo de Atuação	piezo elétrico	Piezo elétrico Multi camadas	Liga com Memória de Forma	Magneto estríctivo	Liga com Memória de Forma Magnética
Max deformação	0,13%	0,07%	2% a 8%	0,2%	6% a 10%
Temp Curie (°C)	350	350	-	380	103*
Fator acoplamento/ balanço energia (%)	75	70	-	75	75
Campo máx para deformação	2MV/m	2MV/m	-	240kA/m	400kA/m
Histereses	10%	>10%	Alta	2%	Alta
Temp. Operação	100°C	100°C	-	150°C	70°C*

Tabela 9b. Comparação entre o SMA e FSMA

Memória de Forma (SMA)	Memória de Forma Magnética (MSMA)
Atuação por aquecimento e resfriamento	Atuação por campo magnético externo
NiTi, NiTiCu, CuZnAl, CuAlNi	NiMnGa, FePt, FePd, CoNiGa
Há necessidade de condutores elétricos para aquecimento da amostra para atuação como resistência elétrica	Não há necessidade de condutores elétricos para aquecimento da amostra como resistência elétrica, pois é atuado com campo magnético
Atuador que geralmente funciona em tração	Atuador que geralmente funciona em compressão
Faixa típica de operação de tensão de 800 MPa	Faixa típica de operação de tensão de 3 MPa, dependendo do twinning stress (pré-carga)
Frequência máx 5 Hz	Frequência máx 380-500Hz
Biocompatível (stent, aparelho ortodôntico)	Não é biocompatível
Fadiga: 10 milhões de ciclos	Fadiga: 100 milhões de ciclos
Formato comercial: Arames	Formato comercial: Barras

Capítulo 4

4 Estudo de Caso de Aplicação

4.1 Válvula para Controle de Poço Sem Fio

Um dos pontos críticos para o desenvolvimento de um sistema de completação inteligente sem fio é o desenvolvimento de uma válvula de controle de fluxo no interior de um poço de petróleo que possua características especiais tais como baixo consumo de energia e resistência a altas temperaturas (em torno de 120 °C) e altas pressões (10.000 psi) .

Com o objetivo de desenvolver um mecanismo de atuação baseado em dispositivo SMA para a válvula que atenda a todas as características de um poço de petróleo foi realizado um estudo criterioso e chegou-se à conclusão que a melhor opção a princípio seria a construção de uma válvula rotativa cujo elemento de atuação seria composto por um ou vários fios de SMA acoplados a um sistema carretel – mola.

A fim de estudar o comportamento do novo modelo proposto, foi construído um dispositivo de atuação do tipo carretel utilizando o efeito de memória de forma. As figuras 34 e 35 mostram o esquema do dispositivo. O objetivo é atuar fechando ou abrindo uma válvula de controle de fluxo. O mecanismo desenvolvido é inovador, podendo ser aplicado em diferentes concepções.

O dispositivo de atuação apresenta uma forma de ativação, que pode ser realizada em processo contínuo, ou seja, somente através de ciclos de aquecimento/resfriamento que se baseia no efeito de memória de forma com tensão assistida (OTSUKA, K. et al., 1999, WU, S.K. et al., 2000), ou *SATWME* do inglês *Stress Assisted Two Way Memory Effect*. Este, por sua vez, consiste em um efeito de memória de forma reversível, porém sem estar livre de tensão.

O fio é enrolado em um carretel com a finalidade de que o espaço ocupado pelo fio permita a utilização de fios com comprimentos maiores. Como consequência, temos maiores deslocamentos utilizando um espaço consideravelmente menor. A mola de aço fixada no eixo restaura a tensão no fio, sem a qual o efeito *SATWME* não seria possível.

O fio de SMA enrolado no carretel é previamente distendido durante a sua montagem no dispositivo, de forma que o fio inicie na sua variante martensítica $M \rightarrow M^+$. A mola é mantida a força (torção) constante no dispositivo de forma que o fio permaneça distendido. Ao aquecer-se o conjunto até uma temperatura tal que $T > Af$ em torno de 160°C o fio sofre a transformação de fase $M^+ \rightarrow A$, o que provoca a diminuição de seu comprimento e conseqüentemente o movimento do carretel, ocorrendo a atuação desejada. Quando o fio é resfriado, a tensão constante é aplicada ao fio devido à mola interna do dispositivo, que faz com que ele ao invés de retornar à sua fase original M , retorne à variante induzida por tensão M^+ . Como consequência, temos o efeito de memória de forma com tensão assistida *SATWME*, o que permite que apenas a variação de temperatura resulte na atuação do fio, através do aumento e diminuição de seu comprimento. Este efeito é similar ao efeito de memória de forma reversível *TWSME*, do inglês “*Two Way Shape Memory Effect*” diferindo apenas no nível de tensão empregada, pois no *TWSME* a tensão pode ser zero durante todo o efeito.

A força de atuação é modificada pela adição de mais fios. Por outro lado, o deslocamento angular é função do comprimento do fio utilizado.

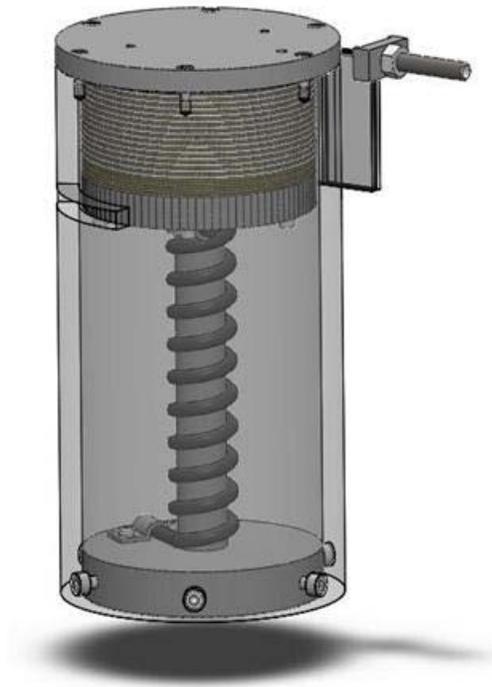


Figura 34: Desenho esquemático do dispositivo de atuação tipo carretel.

A figura 36 apresenta o desenho esquemático que representa o funcionamento do dispositivo de atuação tipo carretel. O dispositivo consiste de um fio de memória de forma interligado a uma mola. A passagem de corrente elétrica pelo fio gera o aquecimento da liga que se contrai gerando o movimento do carretel e a atuação. Esta representação visa reproduzir o efeito de memória de forma com tensão assistida para a válvula do tipo carretel, e seu acionamento se dá somente pelo aquecimento e resfriamento do fio em torno do carretel e abre/fecha da válvula. Inicialmente em 1 o fio está pré-tensionado, apresenta o seu maior comprimento, e a mola está retraída. Ao aquecer o fio este se retrai, a tensão aumenta e a mola começa a se distender em 2, até que atinge sua contração máxima em 3, e é posteriormente resfriado em 4, onde por ação da mola o fio começa a ser tracionado, retraindo a mola em 5 até atingir a condição inicial em 6 (fio com o seu maior comprimento e mola retraída) de pré-tensionamento, fornecendo assim um efeito reversível.

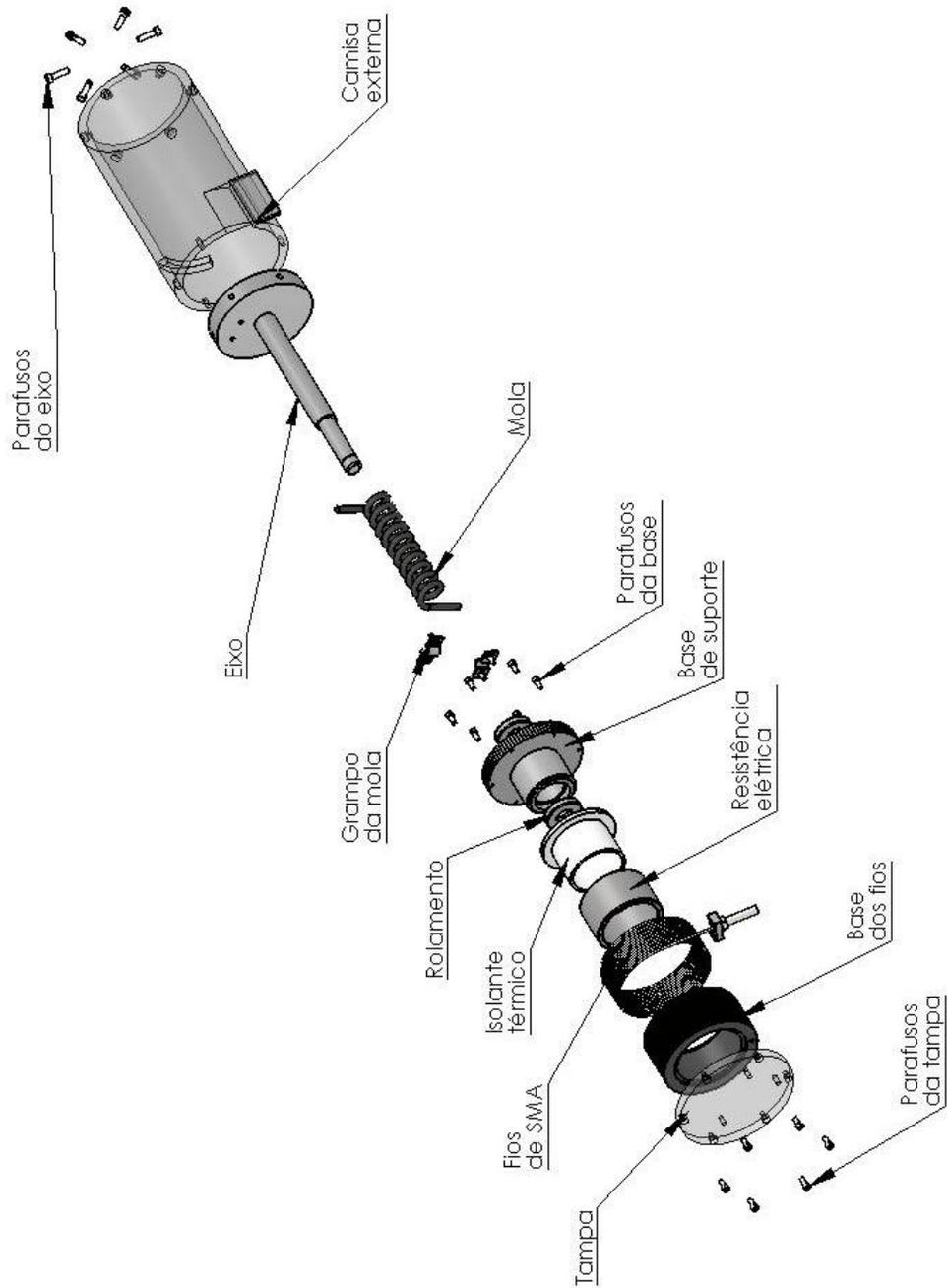


Figura 35: Desenho esquemático das partes do dispositivo de atuação tipo carretel.

Para representar a força necessária para a abertura e fechamento do dispositivo, inseriu-se uma força resistente F_R que sempre possui sentido contrário à força que o fio produz em sua contração.

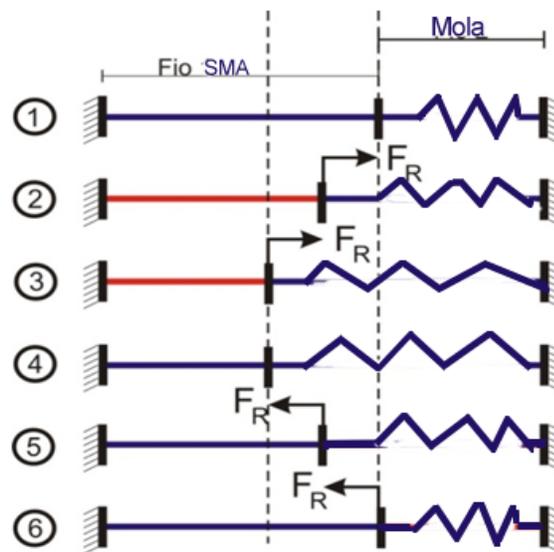


Figura 36 Desenho esquemático do funcionamento do dispositivo de atuação tipo carretel

- **Características do Atuador da Válvula tipo Carretel**

As características termomecânicas fornecidas pelo fabricante dos fios de memória de forma (faixas de temperatura de ativação em torno de 90°C e 140°C) utilizados satisfazem as demandas necessárias para o sucesso dos ensaios em campo. Para tal, foi feita uma análise em laboratório (sistema de aquecimento e resfriamento com um termômetro digital ICEL TD-870 conjugado com testes na máquina de ensaios de tração (Instron) para determinar de forma experimental os limites das faixas de temperatura de

ativação. Estas são mostradas a seguir nas figuras 37 a 40, sendo que M_s representa a temperatura em que se inicia o processo de transformação de fase $A \rightarrow M$; M_f é a temperatura abaixo da qual o material é totalmente martensítico, ou ainda a temperatura em que a transformação de $A \rightarrow M$ termina; A_s é a temperatura a partir da qual se inicia a transformação de $M \rightarrow A$ ou $M^+ \rightarrow A$, ou ainda a temperatura acima da qual o material é totalmente austenítico. Cada uma representa um estágio de aquecimento e resfriamento com ou sem tensão aplicada, ambas fazendo parte do ciclo de atuação dos efeitos SME (sem tensão) e SATWME (com tensão) respectivamente. Nas figuras 37 e 39 observam-se os resultados experimentais obtidos para os fios ativados sem presença de carga mecânica.

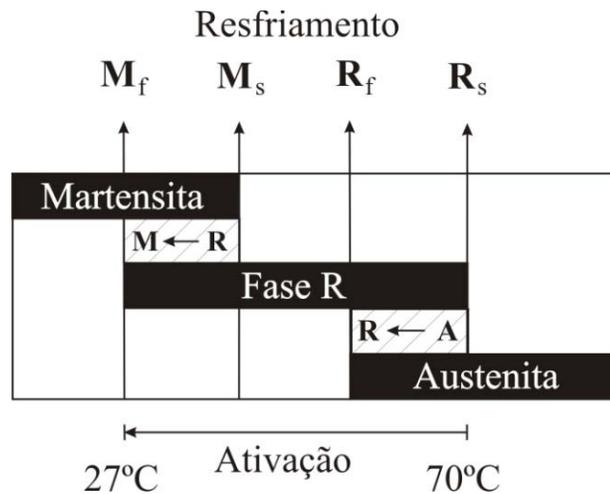


Figura 37: Ativação devido à transformação de fase durante o resfriamento.

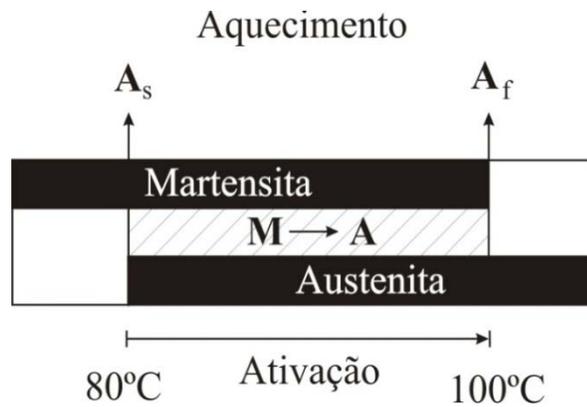


Figura 38: Ativação devido à transformação de fase inversa durante o aquecimento.

Ressalta-se que os valores encontrados para as temperaturas de transformação de fase foram inicialmente determinados sem a presença de carga mecânica. Entretanto, os resultados variam em presença de um campo de tensões, como pôde ser observado nos ensaios mecânicos. Os resultados para as temperaturas de ativação dos fios sob uma tensão equivalente de 480N imposta pela máquina de ensaio de tração podem ser vistos nas figuras 39 e 40.

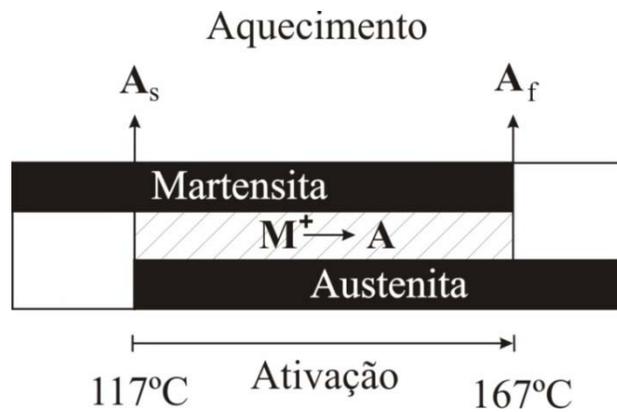


Figura 39, Transformação de fase e ativação durante o resfriamento sob tensão.

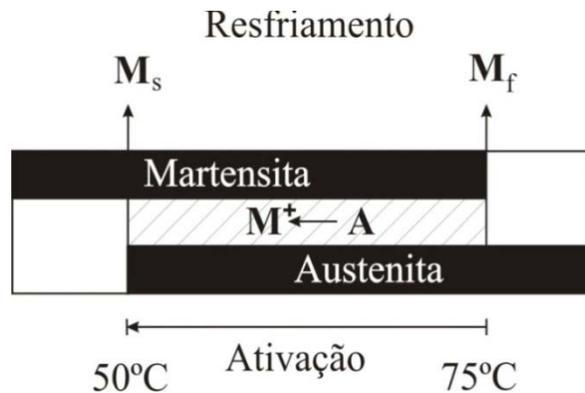


Figura 40, Transformação de fase e ativação durante o aquecimento sob tensão.

4.1.1 Testes com o Dispositivo de Atuação do Tipo Carretel.

A concepção deste dispositivo atuador da válvula tipo carretel visa uma mudança de caráter apenas geométrico e na forma de atuação. O efeito utilizado é o mesmo mencionado anteriormente, o SATWME. Para manter os fios constantemente atuados utilizou-se uma mola restauradora. A constante de rigidez torcional da mola define o ângulo no qual a parte interna gira, portanto, fazendo uso de vários tipos de mola com constantes distintas pode-se ajustar o quanto se obtém de rotação. A figura 41 apresenta a foto do experimento realizado com o dispositivo de atuação tipo carretel. Os resultados numéricos experimentais obtidos com o dispositivo de atuação tipo carretel (figuras 34 e 35) são apresentados na figura 42, onde são mostrados os ciclos de aquecimento/resfriamento que produzem rotação no dispositivo. Neste experimento com o dispositivo tipo carretel foi utilizado um único fio de 1,3 m de comprimento. A mola utilizada nos testes apresentados possui uma constante de rigidez torcional $K = 18,9$ Nm/rad. A medida de temperatura foi realizada com um termômetro digital ICEL TD-870 que apresenta uma resolução de $0,1^\circ\text{C} / 1^\circ\text{C}$ e exatidão de $\pm(0,1\% + 0,7^\circ\text{C})$. O ângulo foi medido com um sensor angular magnético modelo PRAS3 de 0 a 15° acoplado ao carretel que apresenta repetibilidade de 0,03% e linearidade de 0,3% do fundo de escala. Os ciclos de aquecimento foram impostos com um controlador eletrônico de temperatura acoplado ao fio que fornece a potência necessária para o aquecimento do fio (carga resistiva) até atingir

160°C. Os ciclos de resfriamento do fio foram obtidos com o corte da potência fornecida pelo controlador (mudança do setpoint do controlador) e a dissipação externa do fio no dispositivo (resfriamento por dissipação térmica). Os ciclos de resfriamento poderiam ser otimizados com o uso de pastilhas termoelétricas. Os parâmetros de atuação como, força, deslocamento e temperatura podem ser modificados através de combinações de quantidade, comprimento e tipo de liga utilizada nos fios de memória de forma, mostrando a flexibilidade do dispositivo de obter resultados compatíveis com diferentes demandas. Segundo a hipótese anterior, e contanto que o diâmetro do suporte dos fios seja o mesmo da camisa (o que implica em uma relação de atuação 1:1) pode-se estimar o número de fios e a rigidez torcional da mola adequados para obter a força de atuação necessária para abrir ou fechar o dispositivo.

A força média de restauração do fio NiTi ao sofrer transformação de fase está em torno de 480N (NETTO, T.A, et al., 2007). Neste dispositivo serão necessários em torno de 100fios e uma mola de rigidez torcional de aproximadamente $R=230\text{kNm/rad}$. O consumo de energia elétrica do dispositivo (devido ao aquecimento) aferido durante o experimento foi em torno de 41 kWh (11,39 W em 5 minutos - 3417J). O seu baixo consumo se deve ao fato de o elemento aquecedor (suporte dos fios) estar isolado do corpo, fazendo com que a perda por convecção e condução seja reduzida.



Figura 41: Foto do experimento realizado com o dispositivo de atuação tipo carretel

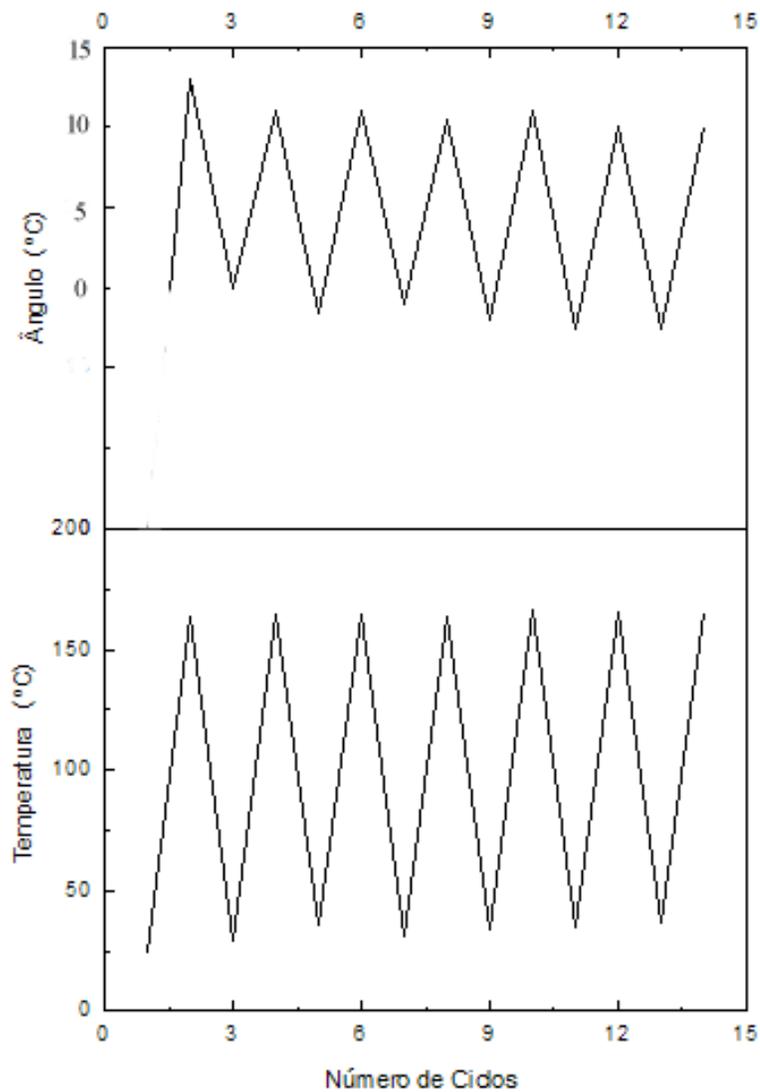


Figura 42: Deslocamento angular e temperatura do interior do dispositivo ao longo de 14 ciclos.

Para uma melhor análise da repetibilidade do dispositivo utilizou-se a média de variação de temperatura a cada ciclo, calculando-se também o desvio padrão. Note-se que a região entre $\Delta\theta + \sigma$ e $\Delta\theta - \sigma$ abrange a maior parte das variações térmicas, portanto estatisticamente, ela deve abranger em torno de 68% de todos os valores obtidos.

Utilizando-se análise similar à da figura 43, encontrou-se também a maior parte das variações de rotação dentro da faixa de $\Delta\theta - \sigma$ até $\Delta\theta + \sigma$, como esperado. A este

respeito ver a figura 44. Estes resultados nos permitem prever os limites máximos e mínimos de temperatura e rotação para o dispositivo.

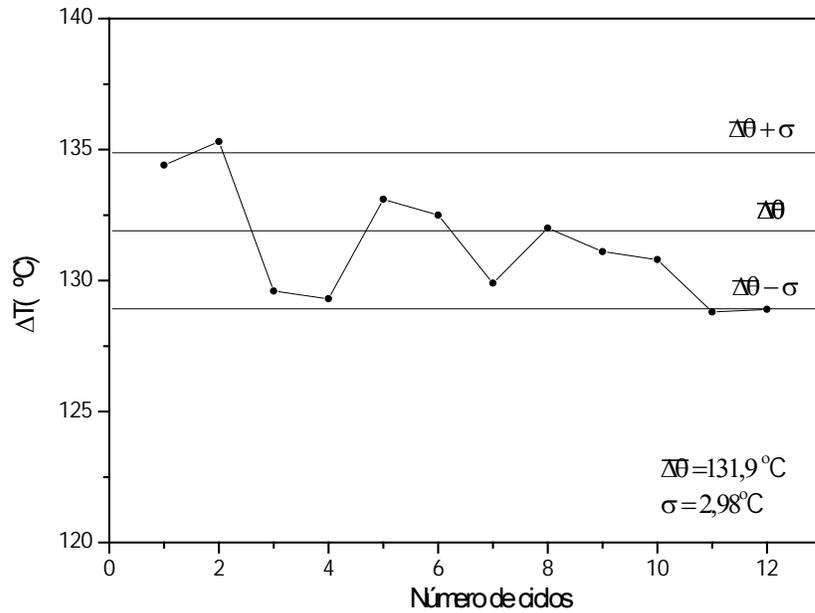


Figura 43: Variação da temperatura em cada ciclo no interior do dispositivo.

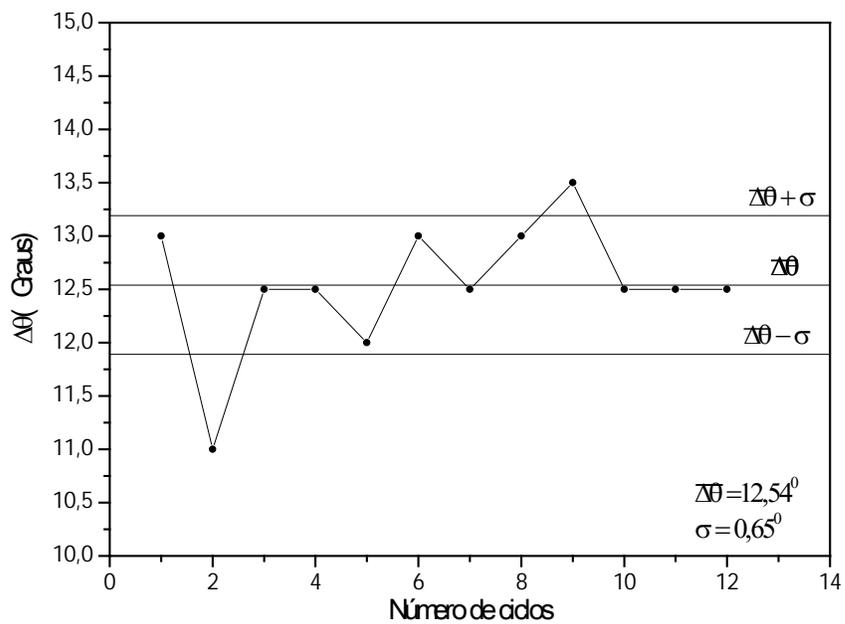


Figura 44: Variação da rotação em cada ciclo do interior do dispositivo.

4.1.1.1 Modelo de Atuador a Dois Fios.

O estudo e os resultados dos testes experimentais realizados com o modelo de dispositivo atuador acionado por fio de SMA (NiTi) e mola serviram de base para a proposição de um novo modelo de construção de dispositivo de atuação, que consiste na substituição da mola por um outro fio (NiTi). O dispositivo é composto por um ou mais pares de fios de SMA interligados no carretel, que são aquecidos e resfriados de forma alternada, produzindo o movimento do carretel (atuação). No processo de identificação das forças de atuação necessárias, número de fios e diâmetro dos fios, foi necessário realizar várias simulações, o que permitiu implementar diversas mudanças sem que fosse necessário modificar os aparatos de testes.

A figura 45 apresenta o desenho esquemático da simulação numérica feita no software de elementos finitos ABACUS que consiste de dois fios de memória de forma que são aquecidos ora de um lado, ora do outro. O modelo de simulação considerado foi um modelo uniaxial com a hipótese de deformação uniaxial, desconsiderando todos os atritos mecânicos do dispositivo. As constantes mecânicas das ligas NiTi empregadas no modelo estão relacionadas na tabela 10. Esta simulação visa reproduzir o efeito de memória de forma com tensão assistida para a válvula do tipo carretel, e seu acionamento se dá somente pelo aquecimento e resfriamento do feixe de fios em torno do carretel e abre/fecha a válvula. Inicialmente, em 1, os fios possuem comprimentos ligeiramente diferentes, pelo fato de o maior ter sido pré-tensionado (fase martensita). Ao aquecer o fio 1, este se contrai tensionando o outro em 2, até que atinge sua contração máxima em 3 e é posteriormente resfriado em 4. Este ciclo se repete agora com o fio 2 pré-tensionado (fase martensita) dando-se início ao seu aquecimento em 5 e, por conseguinte sua contração até o máximo em 6, fornecendo um efeito reversível. Para representar a força necessária para a abertura e fechamento da válvula, inseriu-se uma força resistente F_R que sempre possui sentido contrário à força que o fio produz em sua contração. Utilizaram-se diversos valores de F_R desde nenhuma força resistente (sem carga) até o máximo que o fio pode suportar, fornecendo uma deformação em torno de 3% (em torno de 1374N), obtendo assim a força máxima até a qual cada fio pode ser solicitado; esta força então multiplicada pelo número

de fios será à força de atuação da válvula. As simulações realizadas em elementos finitos visaram encontrar qual a força máxima possível e qual a sua deformação associada para utilizar esses valores no dimensionamento de todo o dispositivo (número de fios, comprimento dos fios, diâmetro, etc).

Tabela 10: Propriedades Mecânicas da Liga NiTi “AlloyBB” a 40°C

platô de stress de carregamento	400 MPa - 550 MPa
platô de stress de descarregamento	70 MPa - 210 MPa
tensão permanente após 8% de deformação	0,2% - 0,5%
resistência máxima à tração	1100 MPa - 1250 MPa
alongamento de tração	1% - 20%
módulo de Young (austenita)	80 GPa
módulo de Young (martensita)	30 GPa

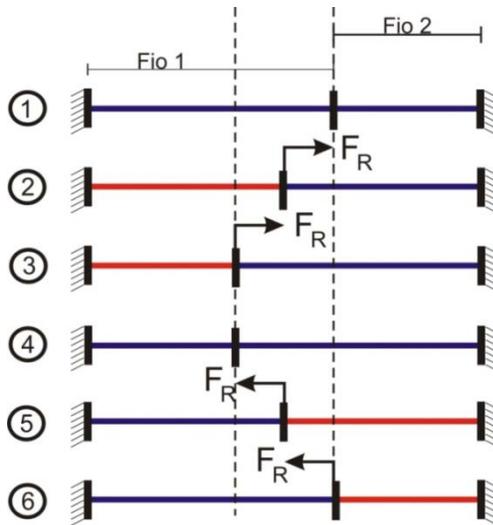


Figura 45: Desenho esquemático da simulação feita em elementos finitos.

Os resultados das simulações realizadas em elementos finitos estão apresentados nas figuras 46 e 47.

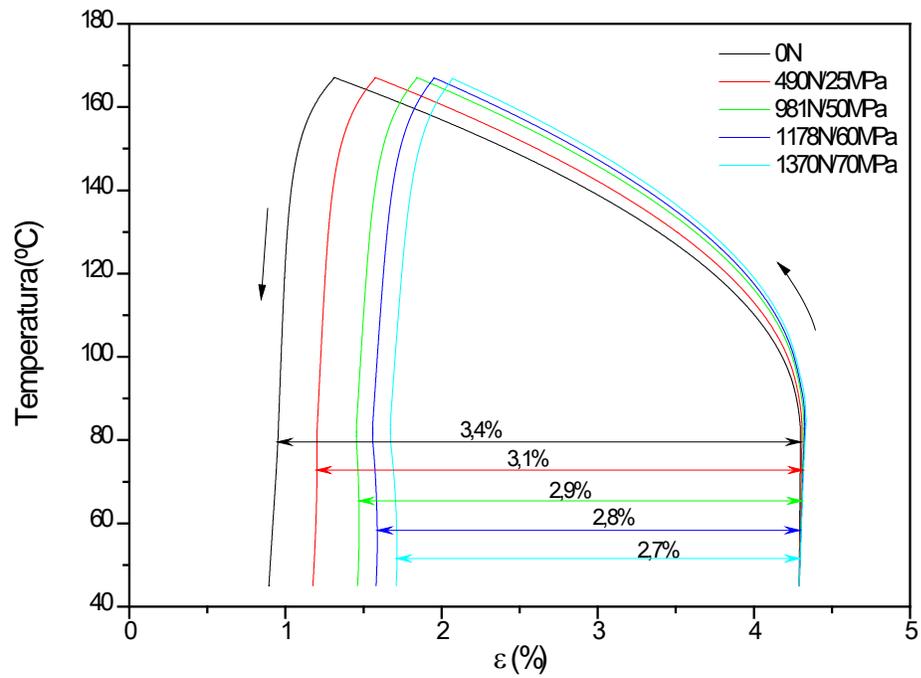


Figura 46: Resultados da simulação da deformação para várias forças de resistência.

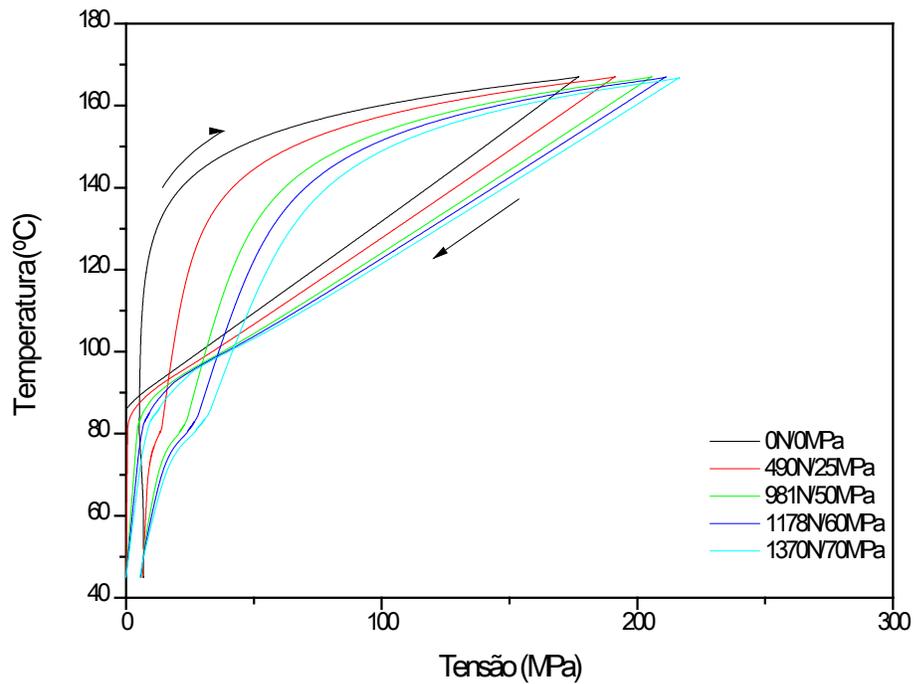


Figura 47: Resultados da simulação da força de atuação para várias forças de resistência.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 46 e 47, foi possível identificar que a força máxima que cada fio de NiTi com comprimento inicial de 300 mm e diâmetro de 5mm pode exercer no fechamento/abertura da válvula é de 1370 N ou aproximadamente 1,4 kN. A deformação máxima para uma força de fechamento de 1370 N é de 2,7% . Estes resultados estão apresentados a seguir na tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros para o dispositivo tipo carretel.

	Parâmetros do Dispositivo Tipo Carretel
Diâmetro do fio (mm)	5
Comprimento Inicial (mm)	300
Número de Fios	20
Força Máxima/fio (kN)	1,4

4.1.2 Válvula para Controle de Poço Tipo Rotativa

Com base no conceito inovador do dispositivo atuador tipo carretel, um novo modelo de válvula de controle de poço (válvula de completção inteligente) do tipo rotativa para abertura e fechamento foi desenvolvido. Este novo conceito foi aperfeiçoado com a substituição da mola por um fio de SMA.

O dispositivo de acionamento funciona com pares de fios SMA que contraem e tracionam de forma alternada em função do aquecimento e resfriamento alternado dos pares de SMA. A válvula tipo carretel funciona com um par de atuadores opostos de memória de forma, estes são aquecidos intercaladamente de forma a abrir e fechar a mesma. A figura 48 mostra em detalhes todos os seus componentes.

Projetada para funcionar em intervalos e fim de linha em um poço de petróleo a válvula SMA da figura 48 utiliza cabos de memória de forma (SMA – Shape Memory Alloy) ativados por resistência elétrica.

A válvula apresentada na figura 48 funciona normalmente aberta e a admissão do óleo no poço é feita através de frestas laterais abertas na camisa e no castelo, quando alinhadas. O sistema de comutação da válvula funciona da seguinte forma:

a) Cada grupo de 20 cabos SMA é fixado pelas extremidades a dois terminais, formando um feixe, que será enrolado no tubo de arraste. Um desses feixes sofrerá uma pré-carga, até um alongamento de 3% aproximadamente.

b) Cada válvula funciona com dois conjuntos de feixes, assim formados, que trabalham um contra o outro (ver corte B-B aberto e fechado), montados em extremidades opostas no castelo.

c) A válvula trabalha normalmente aberta, o que promove a comutação (abertura ou fechamento) e o aquecimento do conjunto de cabos montados com pré-tracionamento conforme visto em B-B aberto.

d) O aquecimento promove o retorno dos cabos SMA ao seu comprimento inicial, fazendo com que o terminal livre se desloque 5° (cinco graus) carregando o tubo de arraste, que gira o castelo, abrindo ou fechando a válvula. Este deslocamento também promove o alongamento do feixe na outra extremidade do castelo, deixando-o suscetível à próxima inversão.

e) O castelo, na posição fechada, possui, para garantia de posicionamento, 16 reténs, cuja pressão de travamento pode ser regulada pela mola. A reabertura da válvula será efetuada da mesma forma que o fechamento, atuando-se da mesma forma sobre o feixe de cabos oposto.

f) As resistências elétricas, individuais para cada feixe, são alimentadas pelo módulo gerador e promovem o aquecimento dos feixes de cabos SMA, retraindo-os aos seus comprimentos originais.

Para melhor compreensão do mecanismo, podemos dividir a válvula em 2 partes:

Sistema gerador: geradores piezelétricos autônomos com três módulos cada, que serão os captadores de vibração induzida no interior do poço e conversores de energia para o dispositivo. Estes geradores são os responsáveis pelo fornecimento de energia necessária

para selecionar as operações da válvula em fechamento ou abertura. Serão utilizadas 6 unidades no total.

Sistema SMA: atuador rotativo (tipo carretel) composto de 20 pares de cabos com aproximadamente 250 mm cada um. São usados para girar o castelo através do tubo de arraste, promovendo a comutação da válvula. Na posição aberta, esses cabos são montados com um alongamento equivalente a 3% do seu comprimento inicial. As características mecânicas do atuador tipo carretel são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12: Características do atuador tipo carretel.

Atuador Tipo Carretel	
Número de atuadores	2
Força de fechamento (kN)	2,75
Curso do êmbolo (graus)	11
Número de fios	20
Diâmetro do fio (mm)	5

4.2 Sistemas de Geração e Armazenamento de Energia

4.2.1 Modelo de Geração de Energia.

Avanços recentes na eletrônica de baixo consumo têm gerado muito interesse e novas oportunidades para o uso de tecnologias capazes de alimentar dispositivos sem a necessidade de baterias. Um termo que tem sido usado com frequência tanto na indústria quanto no meio acadêmico é o "*Energy Harvesting* ou *Energy Scavenging*" que consiste de tecnologias para capturar, armazenar e converter energia de fontes ambientes como diferença de potenciais térmicos, eólica, solar ou vibração. As principais aplicações destas tecnologias consistem justamente em viabilizar sistemas eletrônicos sem a necessidade de baterias para operarem em ambientes onde suas substituições ou até manutenção seriam extremamente onerosas ou até impossíveis de serem feitas.

A necessidade de desenvolver um sistema de geração e acúmulo de energia para operar em ambiente de elevada temperatura, elevadas pressões e vibrações se deve ao fato de que as baterias de lítio encontradas no mercado e comumente empregadas em sistemas de instrumentação e controle têm sua vida útil drasticamente reduzida quando em operação em temperaturas acima de 80°C, e trocas periódicas seriam extremamente custosas. Turbinas, por possuírem partes móveis, estão sujeitas a desgastes e travamentos por partículas de sujeira.

Levando-se em conta as peculiaridades do ambiente onde as válvulas serão empregadas, foram consideradas duas abordagens: coletar energia a partir da vibração através do uso de materiais piezelétricos ou a partir da diferença de pressão na linha. Inicialmente considerou-se a possibilidade de geração de energia através da diferença de pressão hidráulica na linha que poderia ser obtida com a introdução de um *v-cone*. Esta alternativa foi descartada posteriormente, pois além de necessitar da introdução de um elemento para estrangular o fluxo viscoso, seriam necessárias partes móveis para a conversão eletromecânica de energia, que poderiam sofrer desgastes ou mesmo ser bloqueadas por detritos.

A alternativa de utilização do método de geração de energia a partir de elementos ou módulos piezelétricos, que tem como princípio o uso de materiais que desenvolvem um diferencial elétrico quando submetidos às tensões mecânicas, mostra-se viável. Pretende-se explorar as vibrações inerentes a um poço de petróleo (causadas pelo fluxo multifásico turbulento e equipamentos solidários aos tubos de produção) para causar tensões mecânicas nos elementos. Existem atualmente no mercado diversos produtos comerciais que exploram essa possibilidade de geração de energia em outros ambientes.

Verificou-se grande variação na capacidade de geração de energia destes módulos. Estudos mostram que temos atualmente disponíveis módulos capazes de gerar entre de 0,4 a 5 mW em condições ideais de funcionamento. Consideramos por hipótese uma potência de 6 mW com 60% de eficiência devido às condições não-ideais de operação gerando, portanto 3,6 mW. Na Figura 49 pode-se ver um transdutor piezelétrico comercial do tipo laminar. A figura 50 mostra a proposta de um módulo de geração de energia através de elementos piezelétricos. Seu funcionamento é baseado na captura da vibração da coluna e transformação da mesma em energia. Sua configuração é dependente de vários fatores, porém a capacidade máxima de armazenamento depende principalmente do espaço físico disponível dentro da coluna.

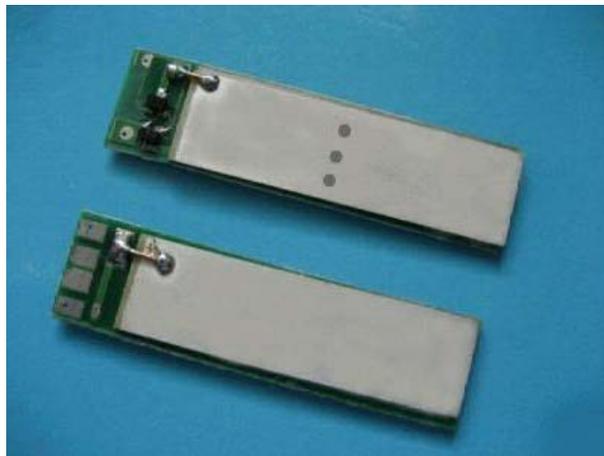


Figura 49: Transdutor piezelétrico da Steiner & Martins

Além destes módulos de formato laminar, existem fitas e folhas de materiais piezelétricos para aplicações diversas da geração de energia que, todavia poderiam se adaptar melhor à geometria de um poço de petróleo.

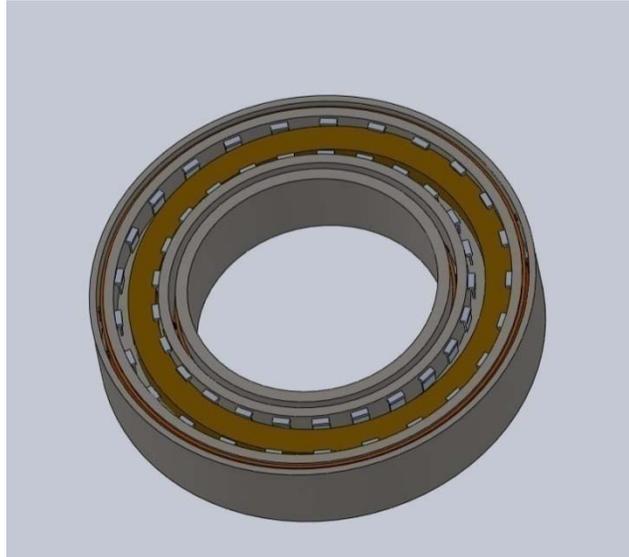


Figura 50: Desenho esquemático do módulo de geração de energia

Para utilizar estes módulos com o máximo de eficiência será necessário desenvolver um circuito para capturar sua energia e armazená-la em supercapacitores.

Considerando neste estudo de caso um sistema de comunicação por injeção de corrente de 1A, temos uma potência de 71mW segundo a tabela 13 que equivale a 0,71J em 10 segundos. E em uma comunicação por injeção de corrente de 10A, temos 718 mW que equivalem a 7,18 J em 10 segundos. O valor estimado do consumo de energia da válvula segundo os parâmetros da tabela 11 é de 14,67W (20 fios de NiTi com 300mm de comprimento e 5mm de diâmetro) . Considerando um tempo de atuação de 5 minutos, teremos um consumo de 4400J. O consumo de energia da válvula acionada por meio de uma resistência elétrica de 25W com tempo de atuação de 5 minutos é da ordem de 7500J.

A tabela 13 mostra a energia necessária requerida para o funcionamento da válvula (controle) e da comunicação (transmissão) em Joules (simuladas para 1A e 10A). Na Tabela 13, **MG** significa a quantidade de módulos de geração, **EJ** significa aquecimento por efeito Joule, **RE** significa aquecimento por por resistência elétrica, e **TDLT** significa técnica de transmissão por linha de transmissão. Cada módulo pode ser composto de um conjunto de até 25 transdutores piezelétricos com capacidade de 3,6mW.

A tabela 13 mostra que o número de módulos de geração necessários para a implantação do sistema de geração é de três módulos de geração para o atuador por efeito joule (atuador da válvula tipo carretel por efeito joule mais um módulo TDLT para a comunicação em 1A ou 10 A), ou quatro módulos de geração para o atuador por resistência elétrica (atuador da válvula tipo carretel por resistência elétrica mais um módulo TDLT para a comunicação em 1A ou 10 A).

Tabela 13: Número de módulos de geração necessários.

Fonte	Energia de Acionamento (J)	MG
Módulo Carretel (EJ)	4400(300s)	2
Módulo Carretel (RE)	7500(300s)	3
TDLT - 1A	0,7 (10s)	1
TDLT - 10A	7,2 (10s)	1

4.3 Modelo de Armazenamento de Energia.

A tecnologia mais promissora para o armazenamento de energia nas condições encontradas em um poço de petróleo é a dos supercapacitores. Diferentemente das baterias, que armazenam energia elétrica através de reações químicas, os capacitores armazenam energia sob a forma de um desequilíbrio interno de cargas elétricas submetidas a um campo. Os supercapacitores são dispositivos que possuem grande capacidade de armazenamento de energia em relação ao seu tamanho ou peso.

A temperatura é um fator de grande importância na velocidade de reações químicas. É exatamente este fato que prejudica o uso de baterias em ambientes de altas temperaturas: é difícil controlar a autodescarga das mesmas, o que limita severamente a sua vida útil.

Por não depender de reações químicas, os supercapacitores são limitados unicamente pela máxima temperatura suportada pelos seus elementos constituintes, temperatura esta que tem crescido com o desenvolvimento tecnológico ano após ano.

Avanços em nanotecnologia devem fazer surgir produtos ainda mais promissores nos próximos anos, visto que a capacidade de gerar campos elétricos em distâncias microscópicas é o principal motor no desenvolvimento de supercapacitores. As vantagens da utilização dos supercapacitores são mostradas a seguir:

- Ciclo de vida alto: podem ser carregados e descarregados milhões de vezes;
- São capazes de serem carregados em segundos;
- Método simples de carregamento sem perigo de sobrecarga;
- Vida útil entre 10 e 12 anos;
- Baixa impedância.

Outro avanço recente nesta área é o desenvolvimento de supercapacitores de poliacenos (PAS – PolyAcenic Semiconductor). Já estão disponíveis comercialmente dispositivos baseados nesta tecnologia com capacitâncias entre 0,04 F e 120 F e tensões de operação entre 2,5V e 3,3V. Espera-se que este material seja favorável ao desenvolvimento de supercapacitores que operam em temperaturas mais altas do que os modelos convencionais.

Com base nos modelos hoje disponíveis comercialmente pelos fabricantes, capacitores de 10 F e 5,5V serão utilizados neste estudo. A Tabela 14 mostra a quantidade de módulos de armazenamento (MA) necessários para a energia de ativação de cada sistema de ativação e transmissão.

Cada módulo contém no máximo 16 capacitores.

O tempo necessário para a carga completa é de $t = RC$ ($8K\Omega \times 20F = 44h \cong$ **2dias**).

Tabela 14- Número de módulos de armazenamento necessários.

Fonte	Energia para acionamento (J)	MA
Módulo Carretel (EJ)	4400(300s)	4
Módulo Carretel (RE)	7500(300s)	6
TDLT - 1A	0,7 (10s)	1
TDLT - 10A	7,2 (10s)	1

As figuras 51 e 52 mostram a proposta para este circuito, onde um módulo piezolétrico capaz de gerar 3,6 mW fornece energia para dois supercapacitores de 10F cada com 5,5V de tensão máxima (cada um). E desta forma são necessários 4 módulos de armazenamento para o modelo de acionamento EJ e 6 módulos de armazenamento para o modelo de acionamento RE.

Neste circuito a cada semiciclo um dos capacitores é carregado. A vantagem desta arquitetura reside no fato de existir apenas um diodo entre o gerador e o capacitor, diminuindo as perdas. Além disso, cada conjunto pode ser associado em série ou paralelo com outros, de forma a aumentar a tensão ou a corrente do conjunto final, conforme as necessidades.

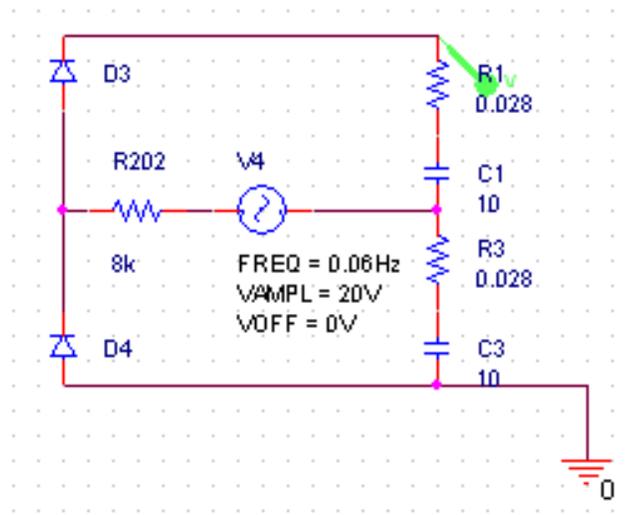


Figura 51: Circuito de armazenamento de energia.

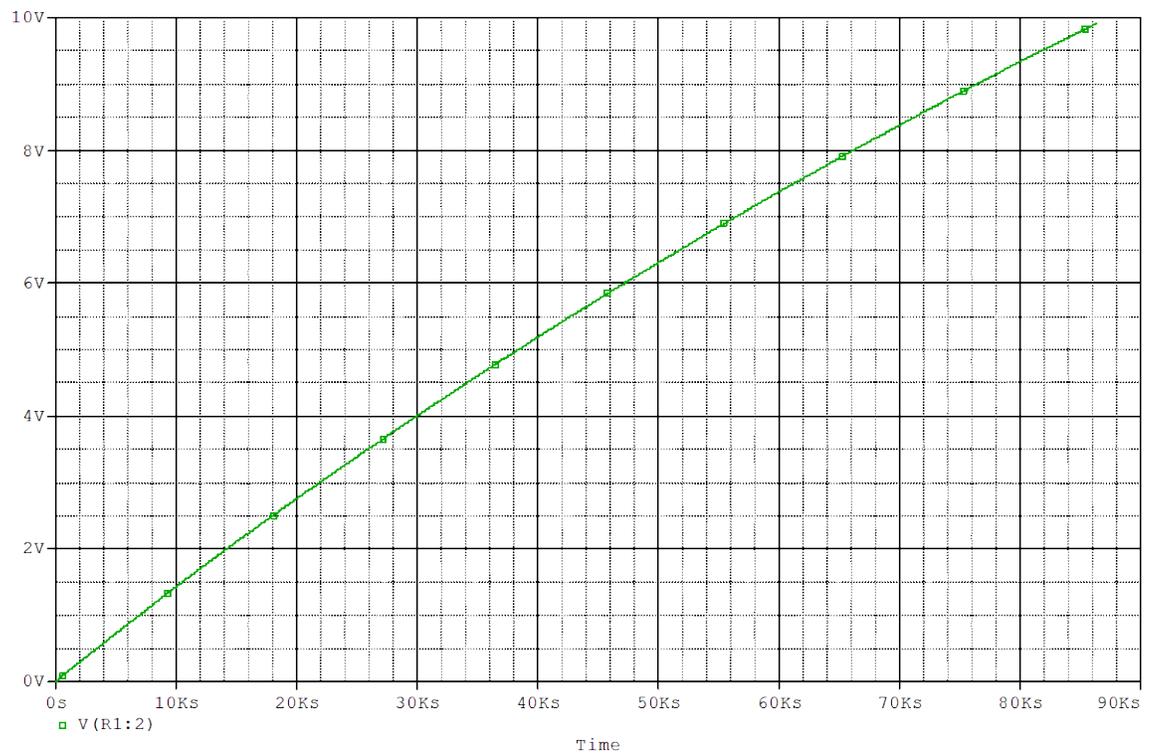


Figura 52: Simulação da operação do circuito de armazenamento durante 1 dia.

- **Consumo de Energia da Válvula Rotacional**

As características da Válvula Rotacional e seu gasto energético são mostrados nas Tabelas 15 e 16:

Tabela 15: Características do dispositivo tipo carretel.

Ativação dos Fios de SMA	
Número de fios	20
Variação de Temperatura (°C)	70
Tempo de Ativação (min.)	1-5

Tabela 16: Consumo da válvula rotacional.

Energia Gerada e Armazenada		
	Efeito Joule	Resistência
Energia total/ativação (J)	4400	7500
Número de módulos de geração	2	3
Número de módulos de armazenamento	4	6
Tempo de carga (dias)	2	2
Tempo de ativação (min.)	5	5
Massa total (kg)	2,5	3,7

Capítulo 5

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo, pesquisa, e desenvolvimento de novas tecnologias capazes de viabilizar tecnicamente de forma totalmente inovadora novos sistemas de controle e monitoração de dados em poços de petróleo. As novas tecnologias abordadas e propostas foram: comunicação com dispositivos sem fio no interior de poços de petróleo (novos modelos de sistemas de comunicação sem fio em meios multifásicos), válvulas de controle para ambiente de poço de petróleo sem uso de umbilical elétrico ou hidráulico (atuadores para válvulas de controle que possibilitem o controle sem fio e baixo consumo de energia) e novos sistemas de geração e armazenamento de energia que possibilitem a comunicação e controle com dispositivos (válvulas e sensores) localizados no interior dos poços de petróleo (alternativas tecnológicas para turbinas mecânicas e baterias).

As principais conclusões do trabalho de tese foram: a aplicação da tecnologia sem fio proposta e estudada em poços de petróleo é totalmente viável tecnologicamente.

O modelo de comunicação eletromagnética em VLF (baixas frequências) é o melhor modelo, o mais abrangente e eficaz, pois os sinais são transmitidos pela estrutura da coluna de produção ou revestimento, formando um dipolo elétrico com a terra. Os parâmetros operacionais que tornam a tecnologia viável são: a necessidade de isolamento entre as colunas de produção no trecho de coluna próximo ao dispositivo de transmissão para que o sinal de transmissão seja injetado ou recebido, a resistividade das camadas superiores (próximas à superfície) devem possuir uma resistividade próxima a 100Ω , e a frequência de transmissão deve estar na faixa de 3 a 100Hz para um bom alcance. A

frequência ideal para a comunicação em altas profundidades (profundidade da ordem de 2 a 3Km) é de 3Hz.

Este modelo pode ser aplicado em poços “*on shore*” e “*off shore*”, sendo que em poços “*on shore*” o sinal propagado pode ser transmitido até a estação via as linhas de produção. E no caso dos poços “*off shore*” seria necessário o uso de repetidores para retransmitir os sinais em VLF desde a árvore de natal ou módulo de controle até as plataformas.

O modelo de comunicação por injeção de corrente demonstrou que apesar das grandes atenuações a comunicação pode ser estabelecida com injeções de corrente na faixa de 1A a 10A em uma linha de até 1800m, obtendo potências da ordem de 71,8mW a 718mW. Os parâmetros operacionais que tornam a tecnologia viável são: o sinal de comunicação deve ser aplicado longe dos “*packers*” e da cabeça já que representam um curto-circuito; a necessidade do isolamento entre o revestimento e a coluna de produção; e a necessidade de packers e centralizadores especiais (isolados). Analisando o aspecto da propagação do sinal, verifica-se a dependência das características dielétricas do fluido que ocupa a região anular, e desta forma a tecnologia seria bem aplicada em poços produtores de gás.

O modelo de comunicação por indução magnética somente seria possível com o uso de vários conjuntos de bobinas repetidoras para a retransmissão dos dados. Esta limitação se deve ao fato que a transmissão se propaga por meio da excitação do campo magnético \vec{H} que é menos eficaz que a excitação do campo elétrico \vec{E} . O uso de várias bobinas transmissoras e receptoras (repetidoras) ao longo do poço com a finalidade de alcançar maiores distâncias (profundidades dos poços de petróleo) não seria prático. O custo energético para aplicar uma corrente de 10A em uma bobina com 4000 espiras com impedância de 350Ω é elevado. O estudo confirma o baixo alcance de 50 m com uma corrente de excitação da ordem de 10 A em 1Hz.

Este modelo pode ser aplicado em conexões móveis onde a distância entre as bobinas é reduzida (conexão magnética).

O modelo de geração e armazenamento de energia inovador estudado e proposto, provou ser viável tecnologicamente. O uso de banco de supercapacitores possibilita um melhor aproveitamento da energia (ciclos de carga) em condições de extrema temperatura ($> 80^{\circ}\text{C}$) e uma vida útil maior que o uso de baterias especiais. O estudo da demanda de energia necessária para o controle da válvula e comunicação (4400J ou 7500J) demonstra que os módulos piezelétricos acoplados ao gerador são capazes de suprir com eficiência a demanda do controle da válvula de SMA tipo carretel, dos circuitos de comunicação, e carregar o banco de armazenamento de energia composto de supercapacitores. Os parâmetros operacionais que tornam a tecnologia de geração e armazenamento viável são: número de módulos de geração piezelétricos 2, número de módulos de armazenamento 4, tempo de carga 2 dias e tempo de ativação 5 minutos.

O novo e inovador modelo de controle da válvula rotativa de tipo carretel (atuador) baseada no efeito (“SATWME”) com dois fios NiTi introduzido neste estudo é uma concepção inédita que atende aos requisitos necessários para uma válvula de controle operada em sistemas sem fio. Aspectos importantes tais como consumo de energia, força de fechamento (força de atuação) e complexidade são atendidos pela válvula. A baixa velocidade de acionamento não é fator crítico para a aplicação de poço. O tempo de resfriamento do fio pode ser otimizado com o uso de pastilhas termoelétricas. Os parâmetros operacionais que tornam a tecnologia de válvula rotativas com atuadores do tipo carretel viável são: tempo de ativação de 5 minutos, energia gasta 4400J e variação de temperatura 70°C (90°C a 160°C). O uso da tecnologia de materiais inteligentes é altamente promissor para aplicações em válvulas industriais no segmento de óleo e gás.

5.2 Contribuições da Tese

O modelo representativo da comunicação baseada em propagação ondas eletromagnéticas de baixa frequência (“ VLF- very low frequency”) em meios multifásicos

contempla os aspectos representativos de uma propagação em uma coluna de produção imersa em meio multifásico. O estudo possibilita a determinação das características do canal baseados nos aspectos mais importantes que configuram a forma de comunicação, tais como frequência de transmissão, geometria de propagação, características elétricas dos meios, atenuações, alcance e potência. O modelo criado pelo trabalho pode servir de base para o desenvolvimento de uma ferramenta de software para análise e escolha da faixa de frequência ideal para, que se obtenha um grande alcance do enlace de comunicação, sem que tenha que reduzir muito a taxa de transmissão (o equilíbrio) e a determinação das características do canal de comunicação.

O estudo e modelo criado para avaliar a comunicação por injeção de corrente, que simula uma linha de transmissão ativa (desprezando as cargas reativas) entre a coluna e o revestimento é uma ferramenta importante que simula um cabo coaxial. O modelo teve como objetivo determinar o comportamento de uma linha de transmissão baseada na estrutura de um poço produtor de petróleo, de forma a determinar a demanda de potência necessária para se estabelecer a comunicação e alimentação de um dispositivo por esta mesma linha. Este modelo é uma ferramenta ideal para avaliar aspectos importantes, tais como a geometria ideal para a injeção de corrente e os níveis de sinal na superfície do poço, considerando todas as perdas.

O modelo de comunicação por indução magnética composto por pares de bobinas acopladas por um núcleo comum (coluna de produção), que é abordado neste trabalho, fornece informações importantes para a escolha de parâmetros construtivos das bobinas, alcance máximo (distância entre as bobinas) e estudo dos efeitos externos sobre a propagação do sinal por indução magnética. Este mecanismo de comunicação pode ser aplicado na substituição de conectores rotativos e como alternativa para o uso de penetradores elétricos em vasos de alta pressão.

A proposta inovadora da criação do novo sistema de geração de energia elétrica que converte a energia da vibração na coluna de produção em energia elétrica no interior do

poço, produto do estudo de caso, tem alto potencial de aplicação em sistemas no segmento de óleo e gás. A vibração é convertida em energia elétrica pelos elementos piezelétricos, que por sua vez carregam o banco de supercapacitores. O uso de supercapacitores como elementos de armazenamento de energia viabiliza o desenvolvimento de sistemas sem fio autônomos em ambientes críticos (altas temperaturas) onde as baterias não podem ser aplicadas (durabilidade em condições de altas temperaturas).

O modelo de válvula de controle com SMA proposto é altamente inovador. O conceito de atuação por meio de um atuador do tipo carretel com pares opostos de fios SMA operando de forma alternada (SATWME) possibilita a construção de atuadores compactos com características adequadas à aplicação (força de fechamento, faixa de temperatura de operação e dimensões construtivas). O projeto conceitual da válvula descrita no estudo de caso é um dos subprodutos importantes deste estudo.

5.3 Trabalhos Futuros.

As modelagens dos sistemas de comunicação sem fio em poços de petróleo apresentam muitos pontos a serem explorados para uma completa descrição do comportamento da propagação dos sinais de comunicação, seja no sistema de transmissão em baixas frequências, injeção de corrente ou indução magnética. Desta forma, deverão ser realizados testes experimentais em escala real (poços de testes) objetivando a caracterização e o aprimoramento dos modelos. Ferramentas de software deverão ser criadas com base neste estudo com o objetivo do estudo dos enlaces de comunicação (canal de comunicação).

Um protótipo da válvula rotativa tipo carretel conforme proposto no estudo de caso, deve ser construído com a finalidade de realizar testes experimentais, desenvolver e projetar um módulo controlador para o acionamento (aquecimento e resfriamento) da válvula. Aspectos como estabilidade térmica, fadiga e repetibilidade poderão ser avaliados.

O sistema proposto deve ser construído com a finalidade de comprovar a eficiência da conversão (sintonia das frequências de vibração), geração e o comportamento dos ciclos de carga e descarga do sistema de armazenamento com o banco de supercapacitores.

Um sistema completo (protótipo) integrado composto com válvula, sistema de comunicação, sistema de geração e armazenamento de energia será construído com a finalidade de realizar testes experimentais em escala real com a finalidade de comprovar a eficiência e funcionalidade do sistema proposto pelo trabalho de tese.

Referências Bibliográficas

- BAETA-NEVES, A. P., 2002, *Efeito das Deformações Plásticas no Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma*, Tese de M.Sc., IME , Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- BAETA-NEVES, A. P., SAVI, M.A, PACHECO, P. M. C. L, 2003,. “Horizontal Enlargement of Stress-Strain Loop on a Thermo-Plastic-Phase Transformation Coupled Model for Shape Memory Alloys”, *XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, São Paulo, SP Brasil.
- BANDEIRA, E. L., 2005, *Análise de Treliças Adaptativas com Memória de Forma e Não-Linearidades Geométricas Através do Método dos Elementos Finitos*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- BANDEIRA, E. L., SAVI, M. A., NETTO, T. A., et al., 2006, "Finite Element Analysis of Shape Memory Alloy Adaptive Trusses with Geometrical Nonlinearities", Archive of *Applied Mechanics*, v.76, n.3-4, pp.133-144.
- BIGEON, M. J., MORIN, M., 1996, "Thermomechanical Study of the Stress Assisted Two Way Memory Effect Fatigue in TiNi and CuZnAl Wires" *Scripta Materialia*, v. 35, Issue 12, n.15, pp. 1373-1378.
- BO, Z., LAGOUDAS, D. C., 1999, “Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under Cyclic Loading, Part I: Theoretical Derivations”, *International Journal of Engineering Science*, n.37, 1089–1140.
- BOYD, J. G., LAGOUDAS, D. C., 1996, “A Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials. Part I. The Monolithic Shape Memory Alloy”, *International Journal of Plasticity*, v.12, n.6, pp.805–842.

- BUTLER, L., 1987, “Underwater Radio Communication”, *International Journal of Amateur Radio*, Wireless Institute of Australia.
- COLEMAN, B. D., GURTIN, M. E., 1967, “Thermodynamics with Internal State Variables”, *The Journal of Chemical Physics* v.47, n.2, pp.597–613.
- CUI, J., SHIELD, T. W., JAMES, R. D., 2004, “Phase Transformation and Magnetic Anisotropy of an Iron-Palladium Ferromagnetic Shape-Memory Alloy”, *Acta Materialia* v 52, pp.35–47.
- DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., TAS, H., 1974, “Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations. Part 1”. *Journal of Materials Science*, v. 9 , pp.1521-1535.
- DESIMONE, A. 1993, “Energy Minimizers for Large Ferromagnetic Bodies”, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, pp.125, 99–143.
- ENTCHEV, P. B., LAGOUDAS, D. C., 2001, “Modeling Porous Shape Memory Alloys using Micromechanical Averaging Techniques”, *Mechanics of Materials*, v. 34, n° 1, pp 1–24.
- FREMOND, M., 1987, “Matériaux à Memoire de Forme”. *C. R. Acad. Sc. Paris*, v. 304-s II, n.7, pp. 239-244.
- FREMOND, M. 1996, “Shape Memory Alloy, A Thermo Mechanical Macroscopic Theory” *CISM Courses and Lectures*- New York, v.351, pp. 3-68.
- FUJITA, A., FUKAMICHI, K., GEJIMA, F., et al., 2000, “Magnetic Properties and Large Magnetic-Field-Induced Strains in Off-Stoichiometric Ni-Mn-Al Heusler Alloys”, *Applied Physics Letters*, v. 77,n. 19, pp. 3054–3056.

- FUNAKUBO, H., 1987, "Shape Memory Alloys", Gordon & Bleach, New York, chapter 25, pp.166-169.
- HECZKO ,O., STRAKA. L., 2003, "Temperature Dependence and Temperature L limits of Magnetic Shape Memory Effect", *Journal Applied Physics Letters* , v .94, pp. 7139-7143.
- HIRSINGER, L., LEXCELLENT, C., 2003, "Internal Variable Model for Magneto-Mechanical Behaviour of Ferromagnetic Shape Memory Alloys Ni-Mn-Ga", *Journal de Physique*, v.4, pp. 112, 977–980.
- HODGSON, D. E, WU, M. H., BIERMANN, R. J., 1990, *Shape Memory Alloy Metals Handbook*, v. 2, ASM International, Ohio, pp. 897-902.
- HODGSON, D. E, WU, M. H., BIERMANN, R. J., 1992, "Shape Memory Alloy", *ASM Handbook*, Vol. 2, pp. 887-902.
- HODGSON, D. E., BROWN, J. W., 2000, "Using Nitinol Alloys Shape Memory Applications" *INC*.
- JAMES, R. D, TICKLES, R.,WUTTIG, M.,1998, "Large Field-Induced Strains in Ferromagnetic Shape Memory Materials", *Materials Science and Engineering*, n. A273-275, pp. 320-325.3.
- JILES, D. C., 2003, "Recent Advances and Future Directions in Magnetic Materials", *ACTA Materialia*, v. 51, pp. 5907-5939.
- KAKESHITA, T.,TAKEUCHI, T., FUKUDA, T. et al., 2000, "Giant Magnetostriction in an Ordered Fe₃Pt Single Crystal Exhibiting a Martensitic Transformation", *Applied Physics Letters*, v. 77, n.10, pp. 1502–1504.

- KARACA, H. E., KARAMAN, I., LAGOUDAS, D. C., et al, 2003, “Recoverable Stressinduced Martensitic Transformation in a Ferromagnetic CoNiAl Alloy”, *Scripta Materialia* , v.49, pp. 831–836.
- KARACA, H. E., KARAMAN, I.;LAGOUDAS, D. C., et al., 2007, "On the Stress-Assisted Magnetic-Field-Induced Phase Transformation in Ni₂MnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloys", *Acta Materialia*, v. 55, n.13, pp. 4253-4269.
- KIEFER, B.; LAGOUDAS, D. C. 2003, “Magnetic field-induced Martensitic Variant Reorientation in Magnetic Shape Memory Alloys”, *Department of Aerospace Engineering*, Texas A & M University, USA.
- KIEFER, B., LAGOUDAS, D. C., 2004, “Phenomenological Modeling of Ferromagnetic Shape Memory Alloys”, *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Active Materials: Behavior and Mechanics*, San Diego, CA, 14–18, v. 5387, pp.164–176.
- KIEFER, B., LAGOUDAS, D. C., 2005, “Modeling of the Magnetic Field-Induced Martensitic Variant Reorientation and the Associated Magnetic Shape Memory Effect in MSMAs”, *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Active Materials, Behavior and Mechanics*, San Diego, CA, v. 5761,pp. 6–10.
- KUCHPIL, C., ROBERTO, AL., FILHO, ARTHUR FERREIRA, et al., 1994, *Sensor Permanente de Fundo de Poço sem Cabo Elétrico de Sub Superfície*, Relatório Técnico PETROBRAS/CENPES.
- LAGOUDAS, D. C; BO, Z.; QIDWAI, M. A., 1996, “A Unified Thermodynamic Constitutive Model for SMA and Finite Element Analysis of Active Metal Matrix Composites”, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, v.3, pp. 153–179.

- LIANG, Y.; SUTOU, Y., WADA, T., et al., 2003, “Magnetic Field-Induced Reversible Actuation Using Ferromagnetic Shape Memory Alloys”, *Scripta Materialia*, v. 48, pp. 1415-1419.
- LINNEMAN, K., KLINKEL, S., WAGNER, W. A., 1987, “Constitutive Model for Magnetostrictive and Piezoelectric Materials” *International Journal of Solids and Structures*, Volume 46, Issue 5, 1 March 2009, Pages 1149-1166.
- MALINEN, P. A., SADOVSKI, V. D., SMIRNOV, L. V., et al., 1967, “Reasons for the Influence of a Pulsating Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys”, *Fiz Metal Metalloved*, v. 23, n. 3, pp. 535.
- MILLER, D. A.; LAGOUDAS, D. C., 2000, “Thermo-Mechanical Characterization of NI-TI-CU and NI-Ti SMA Actuators: Influence of Plastic Strains”. *Smart Materials & Structures*, v.5, pp. 640-652.
- MONTEIRO, JR., P. C. C., 2007, *Análise do Acoplamento Termomecânico em Ligas com Memória de Forma*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MURRAY, S., MARIONI, M., KUKLA, A., ROBINSON, J., et al., 2000, “Large Field Induced Strain in single Crystalline Ni-Mn-Ga Ferromagnetic Shape Memory Alloy”, *Journal of Applied Physics*, v.87, n.9, pp. 5774-5776.
- MURRAY, S., MARIONI, M., Tello, P. G., ALLEN, S. M., et al., 2001, “Giant Magnetic-Field-Induced Strain in Ni-Mn-Ga crystals: Experimental Results and Modeling”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 945-947.
- NETTO, T.A., SAVI, M.A., MIRANDA, P. P. E., et al., 2005, *Utilização de Dispositivos com Memória de Forma para Válvulas de Controle de Poço Acionadas com Tecnologia Wireless Parte I*, Relatório Técnico PETROBRAS/CENPES.

- NETTO, T.A., SAVI, M.A., MIRANDA, P. P. E. et. al., 2006, *Utilização de Dispositivos com Memória de Forma para Válvulas de Controle de Poço Acionadas com Tecnologia Wireless Parte II*, Relatório Técnico PETROBRAS/CENPES.
- NETTO, T.A., SAVI, M.A., SILVA, L.L, et al., 2007, *Utilização de Dispositivos com Memória de Forma para Válvulas de Controle de Poço Acionadas com Tecnologia Wireless Parte III*, Relatório Técnico PETROBRAS.
- OTSUKA, K., REN, X., 1999, “Recent Developments in the Research of Shape Memory Alloys”, *Intermetallics*, v.7, pp. 511-528.
- OTTMAN, GEOFFREY, K., LESIEUTRE, et al., 2003, “Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v.18, n.2.
- PACHECO, M. C. L. P., SAVI, A. M., 2000, “Modeling and Simulation of a Shape Memory Release Device for Aerospace Applications”, *Revista de Engenharia e Ciências Aplicadas*.
- PAIVA, A., 2000, *Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma*, Tese de M.Sc., IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PAIVA, A., SAVI, M. A. , PACHECO, P. M. C. L., 2001, “Modeling of Shape Memory Alloys Including an Austenitic Phase and Three Variants Martensit: One-Dimensional Case”. *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*.
- PAIVA, A., 2004, *Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma*, Tese de D.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- PAIVA, A., SAVI, M. A., 2004, “An Overview on Constitutive Models for Shape Memory Alloys”, *Mathematical Problems in Engineering*.

- PAIVA, A., SAVI, M. A., BRAGA, A. M. B. & PACHECO, P. M. C. L., 2005, “A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity”, *International Journal of Solids and Structures*, v. 42, n. 11-12, pp. 3439-3457.
- POH, V., DAVID, R., ANDRE, W. M., 2005, “Modeling an Electromagnetic Telemetry System for Signal Transmission in Fill Fields”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 41, n. 5.
- SATO, Y., TANAKA, K., 1988, “Estimation of energy dissipation in alloys due to stress-induced martensitic transformation”, *Res Mechanical*, v. 23, pp.381–392.
- SAVI, M. A., BRAGA, M., 1993, “Chaotic Vibration of an Oscillator with Shape Memory”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science*, v.15, n.1, pp. 1-20.,
- SAVI, M. A., et al., 2002, “Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of Shape Memory Alloys”: A Thermo-Plastic-Phase Transformation Coupled Model, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.3, n.5, pp. 261-273.
- SHAW, J. A, KYRIADES, S., 1995, “Thermo mechanical Aspects off Ni-Ti”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 43, n. 8, pp. 1243-1281.
- SUORSA, J., TELLINEN, K., ULLAKKO, E., PAGOUNIS, 2004, “Voltage Generation Induced by Mechanical Straining in Magnetic Shape Memory Materials”, *American Institute of Physics*.
- TELLINEN, J., SUORSA, I., JAASKELAINEN, A., et al., 2002, “Basic Properties of Magnetic Shape Memory Actuators”, *8th International Conference Actuator.*, Bremen, Germany.

- TICKLE, R., JAMES, R. D. 1999, "Magnetic and Magneto Mechanical Properties' of Ni₂MnGa", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v.195, n. 3, pp. 627–638.
- TICKLE, R., 2000, *Ferromagnetic Shape Memory Materials*, Ph.D. thesis, University of Minnesota, USA.
- TOBUSHI, H. et al., 1991, "Deformation Behavior of Ni-Ti Shape Memory Alloy Subjected to Variable Stress and Temperature." *Continuum Mechanics Thermodynamics*, v.3: pp. 79-93.
- TROFIMENKOFF, F.N.; SEGA, MICHAEL; HASLETT, J.H. et al., 2000, "Characterization of E.M. Downhole-to-Surface Communication Links".
- WU, S. K., LIN, H. C., 2000, "Recent Development of Ni-Ti-Based Shape Memory Alloys in Taiwan", *Materials Chemistry and Physics*, v. 64, pp. 81-92.
- XIA, M.Y., CHEN Z.Y., et al., 1993 "Attenuation Predictions at Low Frequencies for Measurement While-Drilling Electromagnetic Telemetry System".
- ZHANG, J. X. et al., 1997, "The Mechanism of Two-Way Shape Memory Effect in a Cu-Zn-Al Alloy, *Materials Letters*, v. 33, pp. 211-214.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)