



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
AUTOMAÇÃO

JOSÉ DIAS DE ANDRADE NETO

**SIMULAÇÃO DE AQUECIMENTO DE FLUIDOS EM DUTOS DE PETRÓLEO
USANDO ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.**

MOSSORÓ - RN

2016

JOSÉ DIAS DE ANDRADE NETO

**SIMULAÇÃO DE AQUECIMENTO DE FLUIDOS EM DUTOS DE PETRÓLEO
USANDO ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Recuperação de Campos Maduros

Orientador: Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto.

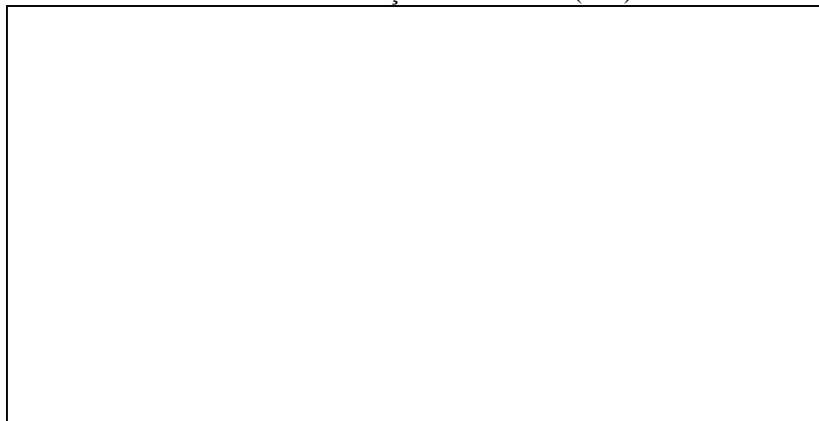
Co-orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior.

MOSSORÓ

2016

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the entry of International Cataloging in Publication (CIP) data.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

JOSÉ DIAS DE ANDRADE NETO

SIMULAÇÃO DE AQUECIMENTO DE FLUIDOS EM DUTOS DE PETRÓLEO
USANDO ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.

Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Sistemas de Comunicação
e Automação, como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Sistemas
de Comunicação e Automação.


Linha de Pesquisa: Recuperação de
Campos Maduros

Defendida em: 02 / 06 / 2016.

BANCA EXAMINADORA



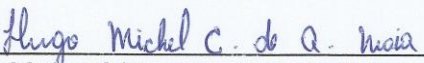
Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto (UFERSA)
Presidente



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior (UFERSA)
Primeiro Membro



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (UFERSA)
Segundo Membro



Prof. Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia (UFERSA)
Terceiro Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida que me deu e por ter permitido que eu alcançasse meus sonhos e objetivos.

A minha família e amigos pelo apoio e incentivo.

Aos professores Dr. André Pedro Fernandes Neto e Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior, pela orientação no desenvolvimento desse trabalho.

Ao professor Dr. Wilson da Mata por disponibilizar sua tese de doutorado que foi base para o desenvolvimento desse trabalho.

O apoio financeiro da ANP/PRH, além dos laboratórios CITED / UFERSA , LAMOTRIZ / UFC e dos pesquisadores PhD Ricardo Silva Thé Pontes e o PhD Tobias Rafael Fernandes Neto por ceder gentilmente o laboratório e o software COMSOL .

RESUMO

Com a crescente demanda dos produtos derivados do petróleo, surge a necessidade de buscar cada vez mais novas técnicas de extração que aumente a produção de barris com o menor custo possível. Com isso, surge também a preocupação com o meio ambiente e todo o eco sistema próximo aos campos de extração. Técnicas para aumentar o fator de recuperação desses poços vem sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos anos. O método de aquecimento por micro-ondas é um processo onde a energia eletromagnética em alta frequência é transformada em energia térmica por perdas dielétricas e/ou absorção eletromagnética. As pesquisas usando como base as técnicas de aumento do fator de recuperação por aquecimento eletromagnético ainda são pouco desenvolvidas. O intuito do presente trabalho é o de desenvolver um modelo de duto totalmente preenchido por água salobra e óleo pesado, principais componentes presentes em poços de petróleo da região nordeste, e aquecer o mesmo usando micro-ondas para diminuir sua viscosidade. Esse processo tem por finalidade evitar que o sistema de extração seja obstruído por acúmulo de parafina. Cinco modelos foram desenvolvidos para a realização dos estudos de aquecimento por radiação eletromagnética e as potencias foram variadas em três etapas. As simulações foram todas desenvolvidas usando o software multifísico COMSOL. Os resultados das simulações foram plotados em gráficos em uma e duas dimensões, com o intuito de comparar o desempenho de cada modelo adotado, descrever a eficiência de conversão de energia no sistema e analisar a propagação e absorção da radiação eletromagnética no dielétrico.

Palavras-chave: Aquecimento por Micro-ondas, método de recuperação, fluido, salobra.

ABSTRACT

With the increasing demand of oil products, the need arises to seek more and more new extraction techniques to increase the production of barrels at the lowest possible cost. With this also comes the concern for the environment and the entire ecosystem near the mining fields. Techniques to increase the recovery factor of these wells has been developed and refined over the past few years. The heating method by microwave is a process where the electromagnetic energy at high frequency is transformed into thermal energy dielectric loss and / or electromagnetic absorption. Research using as a basis the increase of technical electromagnetic heating recovery factor is still poorly developed. The present work aim is to develop a pipeline model filled by brackish water and heavy oil, the main components present in oil wells the Northeast, and heating it using microwaves to reduce its viscosity. This process is intended to prevent the extraction system is blocked by paraffin buildup. Five models were developed for the realization of studies heating by electromagnetic radiation and potential were varied in three steps. The simulations were all developed using multifisico software COMSOL. The simulation results are plotted in graphs in one and two dimensions, in order to compare the performance of each model used to describe the energy conversion efficiency in the system and analyzing the propagation and absorption of electromagnetic radiation in the dielectric.

Keywords: Microwave heating, recovery method, fluid, brackish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de Petróleo Bruto.	4
Figura 2.2 - Sistema de aquecimento de poços Petrotrace.	6
Figura 2.3 - Modelo básico de um sistema de aquecimento por condução.....	7
Figura 2.4 - Guia de ondas Elíptico, Retangular e Cilíndrico.	9
Figura 2.5 - comportamento dos modos de propagação em um guia de ondas retangular.....	10
Figura 2.6 - Sistema de coordenadas cilíndricas.	11
Figura 2.7 - Representação gráfica da função de Bessel de primeira ordem.	21
Figura 2.8 - Representação gráfica da função de Bessel de segunda ordem.	22
Figura 2.9 - Atenuação ao longo da distância da penetração do sinal eletromagnético.	28
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada.	32
Figura 3.2 - Modelo de duto totalmente preenchido.	33
Figura 3.3 - Perda de retorno do sistema.....	35
Figura 3.4 - Energia absorvida pelo sistema.....	35
Figura 3.5 - Gráfico da penetração do campo elétrico no fluido.....	36
Figura 3.6 - Representação em 2D da penetração do campo elétrico no fluido.....	37
Figura 3.7 - Modelos para simulação do aquecimento gerado por uma fonte de radiação eletromagnética.....	39
Figura 3.8 - Modelos de simulação com múltiplas antenas.....	40

Figura 3.9 - Pontos definidos para a leitura das temperaturas.	41
Figura 4.1 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 0.1KW ...	44
Figura 4.2 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 0.1KW.....	45
Figura 4.3 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 1KW.	46
Figura 4.4 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 1KW.....	47
Figura 4.5 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 10KW....	48
Figura 4.6 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 10KW.....	49
Figura 4.7 – Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P5.....	50
Figura 4.8 – Gráficos de propagação térmica para as três potencias adotadas.....	51
Figura 4.9 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0.1KW.....	52
Figura 4.10 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.....	53
Figura 4.11 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.....	54
Figura 4.12 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P1.....	55
Figura 4.13 - Gráficos de propagação térmica para as três potencias adotadas.	56

Figura 4.14 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 0.1KW.....	57
Figura 4.15 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 1KW.....	57
Figura 4.16 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 10KW.....	58
Figura 4.17 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P2.....	59
Figura 4.18 - Gráficos de propagação térmica para as três potencias adotadas.	60
Figura 4.19 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0.1KW.....	61
Figura 4.20 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.....	61
Figura 4.21 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.....	62
Figura 4.22 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P2.....	63
Figura 4.23 - Gráficos de propagação térmica para as três potencias adotadas.	64
Figura 4.24 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0.1KW.....	65
Figura 4.25 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por agua salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.....	65

Figura 4.26 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.....	66
Figura 4.27 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P3.....	67
Figura 4.28 – Gráfico comparativo entre os modelos com uma e múltiplas fontes de micro-ondas.....	68
Figura 4.29 - Gráfico comparativo entre os modelos com múltiplas fontes de micro-ondas.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Raízes de $J'_n(x)$	23
Tabela 2.2 - Raízes de $J_n(x)$	25
Tabela 3.1 - Propriedades dielétricas da água + sal.	34
Tabela 3.2 - Comparativo entre as profundidades de penetração teóricas e simuladas.	37
Tabela 3.3 - Propriedades dielétricas da salobra e óleo.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Corrente Alternada

API - American Petroleum Institute

RAP – Recuperação Avançada de Petróleo

CC – Corrente Contínua

MEF – Método dos Elementos Finitos

HFSS - high frequency structural simulator

FDTD - Finite Difference Time Domain

RF – Radio Frequência

ISM - Industrial Scientific Medical

TE - Transverse Electric

TM – Transverse Magnetic

TEM – Transverse Electromagnetic

LAMOTRIZ - Laboratório de Sistemas Motrizes

UFC - Universidade Federal do Ceará

2D – Segunda dimensões

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-arido

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

c - velocidade da luz;

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celsius;

\vec{B} - densidade de fluxo magnético;

\vec{D} - densidade de fluxo elétrico;

\vec{E} - campo elétrico;

f_c - frequência de corte;

\vec{H} - campo magnético;

J - densidade de corrente de condução;

K_c - número de onda de corte;

P - potência;

S - vetor de Poynting;

V_f - velocidade de fase;

V_g - velocidade de grupo;

Letras Gregas

δ – incremento espacial;

ϵ – permissividade elétrica do meio;

ϵ' – componente real da permissividade do meio;

μ - permeabilidade magnética;

λ - comprimento de onda;

σ - condutividade elétrica finita;

ω – frequência angular;

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	TIPOS DE PETROLEO	4
2.2	MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO	5
2.2.1	Combustão In-situ	5
2.2.2	Injeção de Vapor	5
2.2.3	Aquecimento Resistivo	6
2.2.4	Aquecimento por Indução Magnética	8
2.2.5	Aquecimento Eletromagnético	8
2.2.6	Guia de Onda	9
2.2.7	Equações de Maxwell	10
2.2.8	Profundidade de Penetração	28
2.2.9	Propriedades dielétricas	29
2.2.10	Estado da Arte	29
3	METODOLOGIA E MODELAGEM	31
3.1	DESCRIÇÃO DO TRABALHO	31
3.1.1	Simulação do campo elétrico	34
3.1.2	Simulações do aquecimento eletromagnético usando uma fonte	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	SIMULAÇÕES COM UMA FONTE DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	43
4.1.1	Duto totalmente preenchido por salobra	43
4.1.2	Duto totalmente preenchido por agua salobra e um cilindro de óleo	50
4.1.3	Duto totalmente preenchido por agua salobra e óleo dividido em 5 esferas	55
4.2	SIMULAÇÕES COM MULTIPLAS FONTES DE MICROONDAS	59
4.2.1	Duto totalmente preenchido por água salobra e um cilindro de óleo	59
4.2.2	Duto totalmente preenchido por água salobra e óleo dividido em 5 esferas	63
4.3	COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES	67

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1	TRABALHOS FUTUROS	71
6	BIBLIOGRAFIA	72

1 INTRODUÇÃO

A extração de petróleo vem crescendo nos últimos anos devido ao aumento no consumo dos produtos derivados do mesmo. Para acompanhar o aumento na demanda dos produtos, as indústrias petrolíferas estão investindo cada vez mais em pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas de extração e refinamento do petróleo bruto. Uma área de grande interesse por parte das indústrias e que vem sendo amplamente pesquisada é a viabilidade de extração em poços com baixo rendimento produtivo, e que são considerados maduros.

O poço de petróleo que apresenta baixa pressão e não atinge um número mínimo de barris extraídos e possui certa idade em atividade, é considerado maduro. Em um determinado ponto, a extração do petróleo bruto chega a ser inviável economicamente, sendo necessária à perfuração de novos poços. O abandono dos poços pouco produtivos e a perfuração de novos poços acarretam em problemas ecológicos, sendo esse um fator importante na recuperação dos campos maduros. Existem técnicas desenvolvidas para prolongar a vida dos poços em campos maduros, como a injeção de fluidos em altas temperaturas para aumentar a pressão do reservatório. O princípio dessas técnicas para prolongar a vida do poço, consiste em fornecer calor ao reservatório de modo a reduzir a viscosidade do fluido e aumentar a pressão no mesmo. Essa técnica é conhecida como recuperação térmica e o processo envolve a injeção de vapor. Outro método de recuperação é o de combustão "In-situ" que é mais recente e consiste em aquecer o reservatório com energia elétrica. A aplicação de energia elétrica é interessante porque oferece menos restrições em algumas aplicações práticas, em comparação com os métodos de injeção de vapor convencionais que podem ser dificultadas em poços mais profundos ou no oceano.

O método de aquecimento por injeção de radiação eletromagnética é um processo onde a energia em alta frequência é transformada em energia térmica por perdas dielétricas e/ou absorção eletromagnética. Como a energia eletromagnética se propaga para dentro da formação rochosa, os fluidos e outros materiais do reservatório impedem a passagem da radiação, provocando resistência a mesma. Com isso, a intensidade da onda propagante é reduzida e a energia é convertida em calor, aumentando a temperatura dos componentes

presentes na formação e como consequência, ocorre a redução da viscosidade do óleo.

Esse método pode proporcionar muitos benefícios na extração de petróleo porque há uma vasta gama de frequências disponíveis no espectro elétrico que podem ser utilizadas em diversas formas de aquecimento.

As simulações foram desenvolvidas usando o software e toda a estrutura computacional do laboratório LAMOTRIZ, sediado na Universidade Federal do Ceará, UFC.

1.1 JUSTIFICATIVA

O princípio de aquecimento eletromagnético já é amplamente conhecido e usado comercialmente nas áreas industriais, médica e doméstica. Como exemplo de aplicação temos os fornos de micro-ondas, tratamento de células cancerígenas, aceleração de reações químicas, entre outros (OSEPCHUK, 2002). Esse efeito ainda é pouco explorado na recuperação de poços em campos maduros, o que torna essa área carente em pesquisas.

As técnicas de recuperação por injeção de vapor e combustão “In-situ” são amplamente usadas em campo, porém apresentam suas limitações. Em comparação a esses métodos, a técnica de aquecimento eletromagnético pode apresentar vantagens de desempenho energético, profundidade de alcance, dispensar cabos muito espessos, entre outros.

Óleos considerados parafínicos, causam problemas de entupimento total ou parcial do duto de extração devido a parafina aderir as paredes do mesmo. A empresa “Pentair” apresenta uma solução usando resistência elétrica para aquecer o fluido dentro do poço, facilitando assim a recuperação do óleo pesado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A proposta desse trabalho é o de estudar o comportamento térmico em um guia de ondas submetido à radiação eletromagnética em alta frequência,

preenchido por um dielétrico usando uma mistura de água salobra e óleo, que são componentes presentes em poços de petróleo pesado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver modelos de guia de ondas parcialmente preenchido por água salobra e uma pequena porcentagem de óleo.
- Simular a estrutura usando o software multifísico COMSOL.
- Fazer observações sobre o comportamento do dielétrico submetido a determinadas potências e frequências.
- Analisar a propagação e absorção da radiação eletromagnética no dielétrico.
- Descrever a eficiência de conversão de energia no sistema.

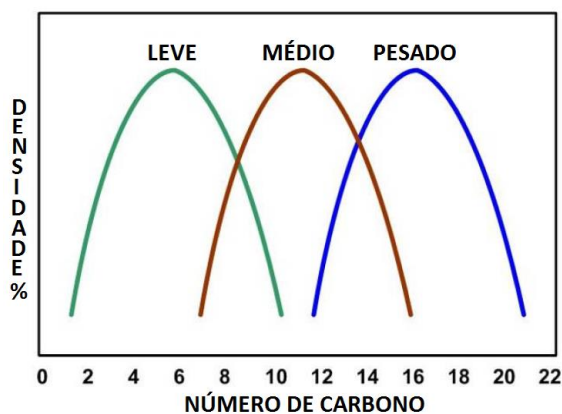
2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são abordados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho, como os tipos de petróleo, métodos de recuperação, levantamento teórico e bibliográfico específicos para o estudo do aquecimento do óleo em um duto, usando radiação eletromagnética.

2.1 TIPOS DE PETROLEO

O óleo bruto é uma mistura complexa formada em média por 200 tipos de compostos orgânicos, sendo em sua maioria hidrocarbonetos. As concentrações da mistura influenciam na densidade do óleo bruto e variam conforme os diferentes tipos do mesmo. O grau API (American Petroleum Institute) parametriza densidade do fluido. Quanto maior for a densidade do fluido, menor será o grau de API e vice-versa (HÅVARD DEVOLD, 2006). Na Figura 2.1, é apresentado um gráfico para distinção dos tipos de óleo bruto.

Figura 2.1 - Tipos de Petróleo Bruto.



Fonte: Havard Devold, 2006

Os tipos de petróleo podem ser divididos em classes de acordo com sua concentração de hidrocarbonetos. A classe de óleo parafínica é composta por 75% ou mais de parafina. É um tipo de petróleo leve, usado na produção de querosene, óleo diesel, gasolina de baixa octanagem, óleo lubrificante e parafina. O Nordeste é rico em óleo parafínico (BEZERRA, 2015).

Esse tipo de óleo bruto costuma causar problemas de formação de hidratos ou de cera no tubo de produção (SISTEMAS, 2009), dificultando a passagem do fluido pelo duto e como consequência, diminui a produção.

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO

2.2.1 Combustão In-situ

A combustão “In-situ” é um tipo de técnica usada para aumentar o fator de recuperação em poços normalmente verticais, onde a pressão é elevada através de combustão controlada. Os componentes presentes no reservatório são aproveitados nesse método para gerar a combustão. O processo consiste basicamente na injeção de ar no reservatório com o intuito de oxidar o óleo presente no poço. A oxidação do petróleo libera calor até alcançar a condição conhecida como “ponto de ignição”, onde ocorre a combustão (OLIVEIRA, 2009).

2.2.2 Injeção de Vapor

Essa técnica de recuperação consiste em injetar vapor com elevada temperatura no reservatório com o intuito de aquecer o óleo pesado presente, facilitando a extração do mesmo. Existem dois modos de aplicação dessa técnica em campo segundo (LACERDA, 2000), citado por (MANICHAND, 2002) o cíclico e o contínuo.

O método de injeção de vapor cíclico é composto basicamente por três fases denominadas como: fase de injeção, fase de “*soaking*” e fase de produção. Na primeira fase do processo ocorre a injeção de vapor controlada que pode durar de cinco a quinze dias. Em seguida, é necessário aguardar um tempo para ocorrer a condensação do vapor, transferindo o calor para a formação rochosa e para o petróleo. Por fim, a última fase consiste na etapa de produção.

A técnica de injeção de vapor contínua, também denominada de “*steamdrive*”, é realizada através da injeção de vapor em um poço com localização central, fazendo com que o petróleo se desloque até poços periféricos, onde ocorre a extração. Esse método de extração apresenta como

vantagem em relação ao anterior, o processo de produção contínuo, porém, seu rendimento energético é bem menor em relação ao modo cíclico.

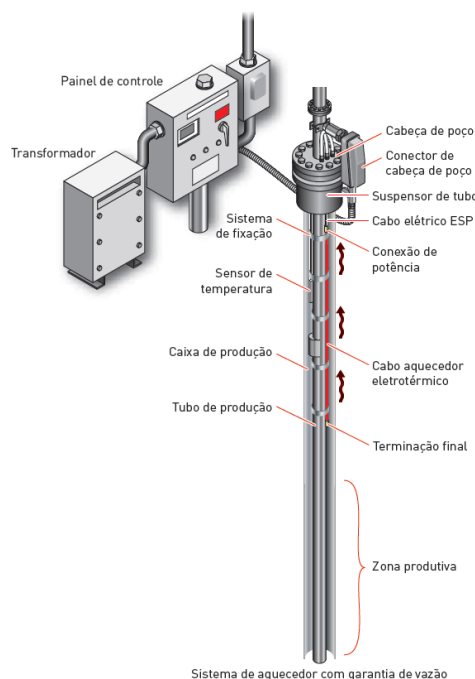
2.2.3 Aquecimento Resistivo

2.2.3.1 Aquecimento por resistência elétrica

Esse método de recuperação usa resistência elétrica como fonte geradora de calor. A resistência é inserida no reservatório e alimentada por uma fonte externa, através de um cabo elétrico. Segundo (MATA, 1993) esse método depende da condutividade térmica dos componentes presentes no reservatório, devido a transmissão de calor ser realizada por convecção.

Um exemplo de equipamento de Recuperação Avançada de Petróleo (RAP) baseado nesse método de aquecimento por resistência elétrica, é visto na Figura 2.2. Esse equipamento é denominado de “Sistema Petrotrace” e é desenvolvido pela empresa “Pentair”. O objetivo desse projeto é o de garantir a vasão no duto de produção, eliminando a obstrução causada por parafina e hidratos.

Figura 2.2 - Sistema de aquecimento de poços “Petrotrace”.



Fonte: “Sistemas Petrotrace”, 2009

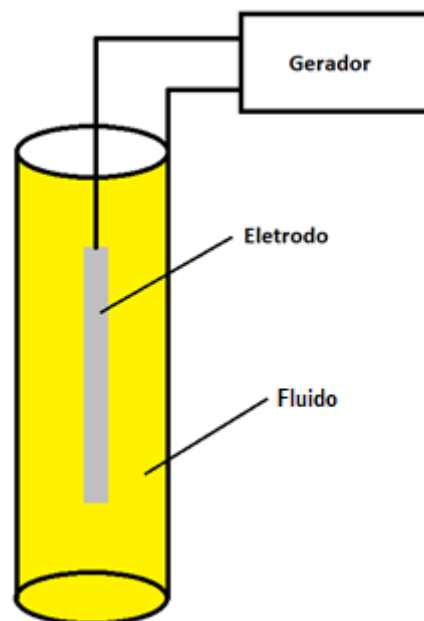
2.2.3.2 Aquecimento por Condução

No aquecimento por condução, as propriedades resistivas dos componentes presentes no reservatório são utilizadas para gerar calor através da injeção de corrente elétrica no meio. A fonte de alimentação pode gerar correntes CC ou AC com frequência abaixo de 300KHz, geralmente 60 Hertz (SAHNI; KUMAR; KNAPP, 2000).

Segundo (OLIVEIRA, 2009), com a passagem de corrente elétrica pelo fluido, o calor é gerado graças ao efeito “Joule”. Esse fenômeno ocorre devido a colisão dos elétrons com os átomos do material condutor. Os átomos do condutor passam a aumentar o seu estado de agitação e como consequência, o material aquece. Parte da corrente elétrica é dissipada nesse processo de aquecimento por perdas ôhmicas.

Um fator importante para que ocorra o aquecimento nesse processo de recuperação é que o meio apresente moléculas polares e íons, que são características de água salina. O fluido atua como uma resistência elétrica e a análise do sistema passa a ser realizada através da lei de “kirchhoff”. A Figura 2.3 apresenta um esquema de aquecimento por condução básico.

Figura 2.3 - Modelo básico de um sistema de aquecimento por condução.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.4 Aquecimento por Indução Magnética

Ao aplicar um campo variante no tempo em um reservatório, uma corrente elétrica é induzida nos componentes presentes no poço. A corrente induzida faz com que a temperatura do fluido seja elevada devido ao efeito “Joule” (MATA, 1993). Esse princípio de funcionamento é semelhante ao de um transformador e pode ser entendido através da “Lei de Faraday”. A “lei de Faraday” determina que um campo magnético variante no tempo, induzido, produz corrente elétrica também variante no tempo (OLIVEIRA, 2009).

2.2.5 Aquecimento Eletromagnético

O aquecimento eletromagnético de um material ocorre devido a absorção do campo pelo mesmo. Ao interagir com as moléculas do fluido, o campo eletromagnético em alta frequência movimenta as mesmas de forma que o atrito resulta em uma reação exotérmica. O aquecimento gerado é influenciado pelo tipo de material utilizado, sendo os fluidos, os mais propensos (MATA, 1993).

As ondas eletromagnéticas conseguem transportar grandes quantidades de energia, não necessitando de matéria como meio de propagação (OLIVEIRA, 2009). A velocidade na geração de calor é bastante elevada nesse método de aquecimento (MUKENDI, 2006).

A técnica de aquecimento usando radiação eletromagnética tem como limitação, a penetração em meios dielétricos como a água salobra exigindo assim, uma forma para melhorar a distribuição do campo (MATA, 1993). Quanto maior for a frequência de oscilação do campo, menor será a penetração no meio dielétrico.

O espectro de RF é amplo, porém a frequência mais usada para o aquecimento de materiais dielétricos é 2,45 GHz. Um dos principais motivos para esta frequência ser adotada, é por ela fazer parte do ISM (Industrial Scientific Medical), ou seja, é uma banda aberta, de propósito geral e para uso comercial em todo o mundo (WIKIPEDIA, 2015). Outro fator que influencia diretamente na escolha dessa frequência, é a facilidade de encontrar equipamento capaz de gerar radiação eletromagnética com potência elevada.

2.2.6 Guia de Onda

Segundo (PINHO; ROCHA; PEREIRA, 2014), um guia de onda eletromagnética é uma estrutura em forma de tubo, produzido usando algum tipo de material condutor, podendo ser oco ou preenchido. Sua principal função é guiar o sinal gerado na fonte até uma antena, semelhante a uma linha de transmissão. Eles podem ser classificados conforme sua geometria em Retangular, Cilíndrico e Elíptico. A Figura 2.4 ilustra os três principais tipos de guias de ondas.

Figura 2.4 - Guia de ondas Elíptico, Retangular e Cilíndrico.



Fonte: Gomez, 2016.

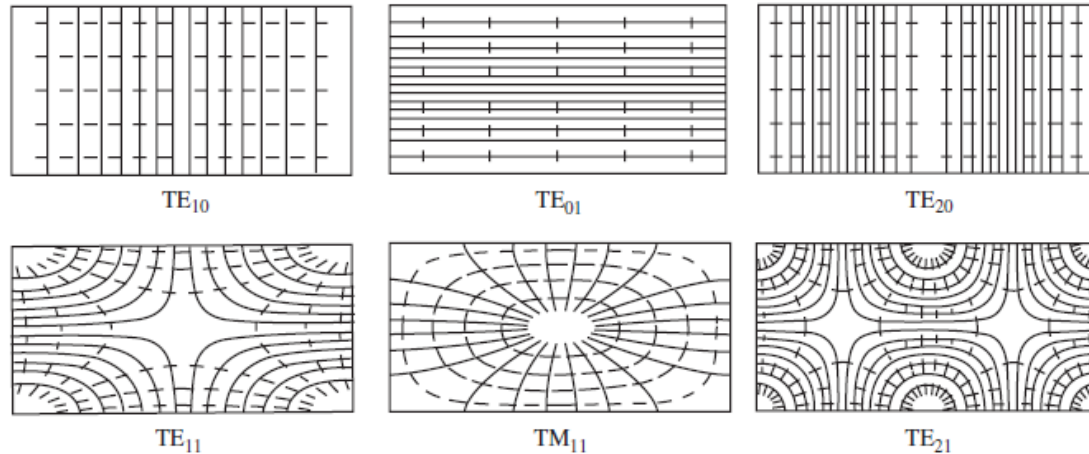
Os guias de ondas conseguem transportar sinais de RF com menor perda de potência se comparado aos cabos coaxiais e linhas de micro fitas. O sistema

apresenta perdas de potência devido a conversão de parte da energia em calor (LIAO, 1996).

Em um guia de ondas é possível propagar sinais eletromagnéticos nos modos “*Transverse Electric*” (TE) ou “*Transverse Magnetic*” (TM) (PINHO; ROCHA; PEREIRA, 2014). O modo de propagação “*Transverse Electromagnetic*” (TEM) não ocorre em guias de ondas devido a impossibilidade de obter uma solução para os campos deduzidos nas equações de Maxwell (FONTANA, 2013).

Para ocorrer o modo de propagação TE, é necessário que a única componente longitudinal seja a do campo magnético, ou seja, E_z tem que ser igual a zero. Já para que ocorra o modo TM, é necessário que a única componente longitudinal seja a do campo Elétrico, ou seja, H_z tem que ser igual a zero (BALANIS, 1938). A Figura 2.5 mostra o comportamento dos modos de propagação em um guia de ondas retangular.

Figura 2.5 - comportamento dos modos de propagação em um guia de ondas retangular.

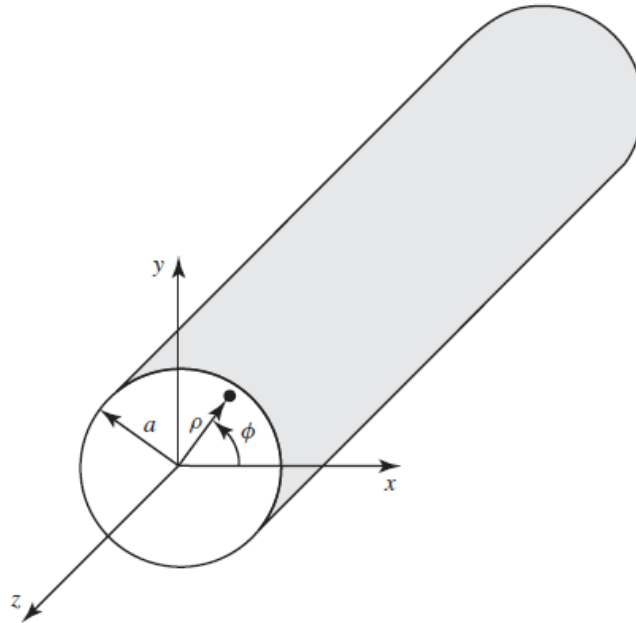


Fonte: BALANIS, 1938

2.2.7 Equações de Maxwell

Para o desenvolvimento das deduções a seguir, foi usado como base o sistema de coordenadas cilíndricas conforme visto na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Sistema de coordenadas cilíndricas.



Fonte: Balanis, 1938

Partindo das equações de Maxwell na forma derivada,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

Com,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

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

E aplicando o operador $\nabla \times$ em (1), temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial (\nabla \times \vec{B})}{\partial t} \quad (7)$$

Substituindo a equação (6) em (7), temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \quad (8)$$

Usando a identidade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \nabla \cdot \vec{E} - \nabla^2 \vec{E}$ na equação (8), resulta na equação abaixo:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Refazendo os cálculos anteriores em função da equação (4), temos:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (10)$$

As equações (9) e (10), assumem a forma da equação de onda homogênea $\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0$, onde, A representa seis equações escalares homogêneas, tendo a forma geral da equação de onda escalar apresentada abaixo.

$$\nabla^2 \vec{\varphi} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{\varphi}}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

Os campos elétricos e magnéticos variam de forma harmônica e podem ser representados pelas equações abaixo.

$$\vec{E}_{T(\rho,\phi,z)} = \vec{E}_{(\rho,\phi,z)} e^{-i\omega t} \quad (12)$$

$$\vec{H}_{T(\rho,\phi,z)} = \vec{H}_{(\rho,\phi,z)} e^{-i\omega t} \quad (13)$$

As equações de Maxwell harmônicas tomam a forma apresentada a seguir:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega \vec{B} \rightarrow \nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu \vec{H} \quad (14)$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega \vec{D} \rightarrow \nabla \times \vec{H} = i\omega\epsilon \vec{E} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (17)$$

Aplicando o rotacional nas equações (14) e (15), temos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu\nabla \times \vec{H} \quad (18)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -i\omega\mu\nabla \times \vec{E} \quad (19)$$

Substituindo as equações (14) e (15) em (19) e (18) respectivamente e usando a identidade $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$, são obtidas as seguintes equações:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu(-i\omega\varepsilon\vec{E}) \quad (20)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = -i\omega\varepsilon(i\omega\mu\vec{H}) \quad (21)$$

Substituindo as equações (16) e (17) em (20) e (21), são obtidas as equações homogêneas de "Helmholtz".

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega\mu\varepsilon\vec{E} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega\mu\varepsilon\vec{H} = 0 \quad (23)$$

O laplaciano escalar em coordenadas cilíndricas é representado pela definição, pelas equações abaixo.

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (24)$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (25)$$

Resumindo a equação anterior, separando a componente z, pode ser reescrita como:

$$\nabla^2 = \nabla_T^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (26)$$

Onde, $\nabla_T^2 = \frac{\partial}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$.

Reescrevendo as equações (22) e (23) conforme (26), temos:

$$(\nabla_T^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2})\vec{E} + \omega\mu\epsilon\vec{E} = 0 \quad (27)$$

$$(\nabla_T^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2})\vec{H} + \omega\mu\epsilon\vec{H} = 0 \quad (28)$$

Como \vec{E} e \vec{H} obedecem a equação de onda, considerando que se propaga na direção do eixo z, no sentido positivo, temos:

$$\vec{E}_{(\rho,\phi,z)} = \vec{E}_{(\rho,\phi)} e^{-i(K_z z + \omega t)} \quad (29)$$

$$\vec{H}_{(\rho,\phi,z)} = \vec{H}_{(\rho,\phi)} e^{-i(K_z z + \omega t)} \quad (30)$$

K_z é o número de onda complexo na direção z.

Substituindo (29) e (30) em (27) e (28), temos:

$$(\nabla_T^2 - K_z + \omega^2\mu\epsilon)\vec{E} = \vec{0} \quad (31)$$

$$(\nabla_T^2 - K_z + \omega^2\mu\epsilon)\vec{H} = \vec{0} \quad (32)$$

As equações de onda passam a ser representadas pelas equações (31) e (32), respectivamente.

Os campos \vec{E} e \vec{H} decompostos são:

$$\vec{E} = \vec{E}_\rho \hat{\rho} + \vec{E}_\phi \hat{\phi} + \vec{E}_z \hat{z} = \vec{E}_T + \vec{E}_z \hat{z} \quad (33)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_\rho \hat{\rho} + \vec{H}_\phi \hat{\phi} + \vec{H}_z \hat{z} = \vec{H}_T + \vec{H}_z \hat{z} \quad (34)$$

Com isso os campos passam a ser escritos como:

$$\vec{E} = [\vec{E}_{T(\rho,\phi)} + \vec{E}_{z(\rho,\phi)}]e^{-i(K_z z + \omega t)} \quad (35)$$

$$\vec{H} = [\vec{H}_{T(\rho,\phi)} + \vec{H}_{z(\rho,\phi)}]e^{-i(K_z z + \omega t)} \quad (36)$$

Reescrevendo as equações de Maxwell, temos:

Eq.(14):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho E_\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi} = -i\omega\mu H_z \quad (37a)$$

$$\frac{\partial E_\rho}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial \rho} = -i\omega\mu H_\phi \quad (38b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi}{\partial z} = -i\omega\mu H_\rho \quad (37c)$$

Eq.(15):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho H_\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \phi} = i\omega\varepsilon E_z \quad (38a)$$

$$\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} = i\omega\varepsilon E_\phi \quad (38b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} = i\omega\varepsilon E_\rho \quad (38c)$$

Eq.(16):

$$\nabla_T \vec{E} = iK_z E_z \quad (39)$$

Eq.(17):

$$\nabla_T \vec{H} = iK_z H_z \quad (40)$$

Reescrevendo (37b), substituindo $\frac{\partial}{\partial z} = -iK_z$ e em seguida, fazendo a substituição em (38c), temos:

$$E_\rho = -\frac{i\omega\mu}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \Phi} + \frac{K_z}{\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right] \quad (41)$$

Reescrevendo (37c), substituindo $\frac{\partial}{\partial z} = -iK_z$ e em seguida, fazendo a substituição em (38b), temos:

$$E_\Phi = -\frac{i\omega\mu}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[-\frac{\partial H_z}{\partial \rho} + \frac{K_z}{\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \right] \quad (42)$$

Substituindo (41) em (37b), temos:

$$H_\Phi = -\frac{i\omega\varepsilon}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[\frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{K_z}{\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \Phi} \right] \quad (43)$$

Substituindo (42) em (37c), temos:

$$H_\rho = -\frac{i\omega\varepsilon}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} + \frac{K_z}{\omega\mu} \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right] \quad (44)$$

As equações (41) e (42) podem ser reescritas como:

$$\vec{E}_T = -\frac{i\omega\mu}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[\frac{K_z}{\omega\mu} \nabla_T E_z + \hat{K} \times \nabla_T H_z \right] \quad (45)$$

As equações (43) e (44) podem ser reescritas como:

$$\vec{H}_T = -\frac{i\omega\varepsilon}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \left[\frac{K_z}{\omega\varepsilon} \nabla_T H_z - \hat{K} \times \nabla_T E_z \right] \quad (46)$$

Se E_z e H_z forem nulos não haverá propagação de sinal dentro do guia de ondas. Quando E_z e H_z se anulam, esse tipo de propagação é denominada de transversal eletromagnética (TEM), que ocorre no espaço livre, numa linha de transmissão formada por dois condutores ou no cabo coaxial.

Se somente E_z for nulo, o tipo de propagação passa a ser o modo transversal elétrico (TE). Caso somente H_z for nulo, esse tipo de propagação passa a ser no modo transversal magnético TM.

As condições de contorno afirmam que o campo elétrico perpendicular a uma superfície condutora é nulo, assim como o campo magnético paralelo a uma superfície condutora também é nulo.

Para o modo TE, as equações (45) e (46) passam a ser:

$$\vec{E}_T = -\frac{i\omega\mu}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \hat{K} \times \nabla_T H_z \quad (47)$$

$$\vec{H}_T = -\frac{iK_z^2}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \nabla_T H_z \rightarrow -\frac{iK_z}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \nabla_T H_z \quad (48)$$

E para o modo TE, as equações (45) e (46) passam a ser:

$$\vec{E}_T = -\frac{iK_z}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \nabla_T E_z \rightarrow -\frac{iK_z}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \nabla_T E_z \quad (49)$$

$$\vec{H}_T = -\frac{i\omega\varepsilon}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} (-\hat{K} \times \nabla_T E_z) \rightarrow -\frac{i\omega\varepsilon}{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2} \hat{K} \times \nabla_T E_z \quad (50)$$

O termo $K_0^2 = \omega^2\mu\varepsilon$ representa o número de onda, enquanto que $K_c = \sqrt{\omega^2\mu\varepsilon - K_z^2}$ representa o número de onda de corte.

O modo TE pode ser reescrito como:

$$\vec{E}_T = -i \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{K_0}{K_c^2} \hat{K} \times \nabla_T H_z \quad (51)$$

$$\vec{H}_T = -i \frac{K_z}{K_c^2} \nabla_T H_z \quad (52)$$

E o modo TM pode ser reescrito como:

$$\vec{E}_T = -i \frac{K_z}{K_c^2} \nabla_T E_z \quad (53)$$

$$\vec{H}_T = -i \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{K_0}{K_c^2} \hat{K} \times \nabla_T E_z \quad (54)$$

Substituindo as equações (43) e (44) em (52) e (53), temos:

$$\nabla_T^2 H_z + K_c^2 H_z = 0 \quad (55)$$

$$\nabla_T^2 E_z + K_c^2 E_z = 0 \quad (56)$$

As equações (55) e (56) são equações de “Helmholtz” juntamente com as condições de contorno.

Aplicando o produto vetorial $\hat{K} \times$ a equação (51) e usando a equação (52), temos:

$$\vec{H}_T = -\frac{K_z}{\omega\mu} \hat{K} \times \vec{E}_T \quad (57)$$

E fazendo o passo anterior para as equações (53) e (54), temos:

$$\vec{E}_T = -\frac{K_z}{\omega\varepsilon} \hat{K} \times \vec{H}_T \quad (58)$$

Como pode ser observado das equações (57) e (58), E_T e H_T são ortogonais para os modos TE e TM, e também na direção de propagação \hat{K} . Além disso, as equações (55) e (56) mostram que só há solução harmônica se K_c^2 for maior ou igual a zero, ou seja, $K_c \geq 0$, logo,

$$K_c = \sqrt{K_0^2 - K_z^2} \rightarrow K_z = \sqrt{K_0^2 - K_c^2} \quad (59)$$

Se $K_0 > K_c$, K_z será real e a solução será harmônica. Porém se $K_0 < K_c$, K_z será imaginário e as soluções Harmônicas serão amortecidas na direção z.

Por isso, K_c é o número de onda de corte $\omega_c = \frac{K_c^2}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$. Podemos reescrever:

$$K_z = \sqrt{K_0^2 - K_c^2} = \sqrt{\omega^2 \mu \varepsilon - \omega_c^2 \mu \varepsilon} = \sqrt{\mu \varepsilon} \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2}. \quad (60)$$

Existem duas velocidades associadas a propagação de ondas, a velocidade de fase (V_f) e a velocidade de grupo (V_g). A primeira é referente a velocidade de cada comprimento de onda, enquanto a outra, é a velocidade de conjunto das ondas que formam a onda propagante. Elas são definidas por:

$$V_f = \frac{\omega}{K_z} \quad (61)$$

$$V_g = \frac{d\omega}{dK_z} \quad (62)$$

Dessas duas equações temos também:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (63)$$

$$V_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \quad (64)$$

Expandindo as equações (55) e (56) para as componentes do campo eletromagnético em coordenadas cilíndricas, temos:

$$\frac{\partial^2 E_\rho}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_\rho}{\partial \phi^2} + K_c^2 E_\rho = 0 \quad (65a)$$

$$\frac{\partial^2 E_\phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_\phi}{\partial \phi^2} + K_c^2 E_\phi = 0 \quad (65b)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + K_c^2 E_z = 0 \quad (65c)$$

$$\frac{\partial^2 H_\rho}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_\rho}{\partial \phi^2} + K_c^2 H_\rho = 0 \quad (65d)$$

$$\frac{\partial^2 H_\phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_\phi}{\partial \phi^2} + K_c^2 H_\phi = 0 \quad (65e)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + K_c^2 H_z = 0 \quad (65f)$$

A solução das equações (65c) e (65e), permitem a determinação das componentes longitudinais de suporte e são representadas pela equação geral (66) onde Ψ pode ser tanto E_z quanto H_z , dependendo apenas do modo de propagação.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} + K_c^2 \Psi = 0 \quad (66)$$

Para resolver a equação (66), pode ser aplicado o método da separação de variáveis, substituindo $\Psi_{(\rho,\phi)} = R_{(\rho)}\Phi_{(\phi)}$ e dividindo por $\frac{\Psi_{(\rho,\phi)}}{\rho^2}$, temos:

$$\frac{\rho^2}{R_{(\rho)}} \frac{d^2 R_{(\rho)}}{d\rho^2} + \frac{\rho}{R_{(\rho)}} \frac{dR_{(\rho)}}{d\rho} + K_c^2 \rho^2 = - \frac{1}{\Phi_{(\phi)}} \frac{d^2 \Phi_{(\phi)}}{d\phi^2} \quad (67)$$

Para a equação (67) seja satisfeita para todos os valores de ρ e ϕ , é importante que ambos os membros sejam iguais a uma constante. Definindo a constante como K_ϕ^2 , temos:

$$\frac{d^2 \Phi_{(\phi)}}{d\phi^2} + K_\phi^2 \Phi_{(\phi)} = 0 \quad (68)$$

A solução da equação diferencial de coeficientes constantes é:

$$\Phi_{(\phi)} = A \text{sen}(K_\phi \phi) + B \text{cos}(K_\phi \phi) \quad (69)$$

Devido a simetria cilíndrica do guia de ondas, a função $\Phi_{(\phi)}$ tem que ser periódica com período 2π .

$$\text{sen}(K_\phi \phi) = \text{sen}(K_\phi \phi + K_\phi 2\pi) \quad (70a)$$

$$\text{cos}(K_\phi \phi) = \text{cos}(K_\phi \phi + K_\phi 2\pi) \quad (70b)$$

Para que as equações anteriores sejam satisfeitas K_ϕ tem que ser inteira com $K_\phi = n$. A equação (69) passa a ser reescrita como:

$$\phi_{(\phi)} = B\cos(n\phi) \quad (71)$$

A equação (67) pode ser reescrita como:

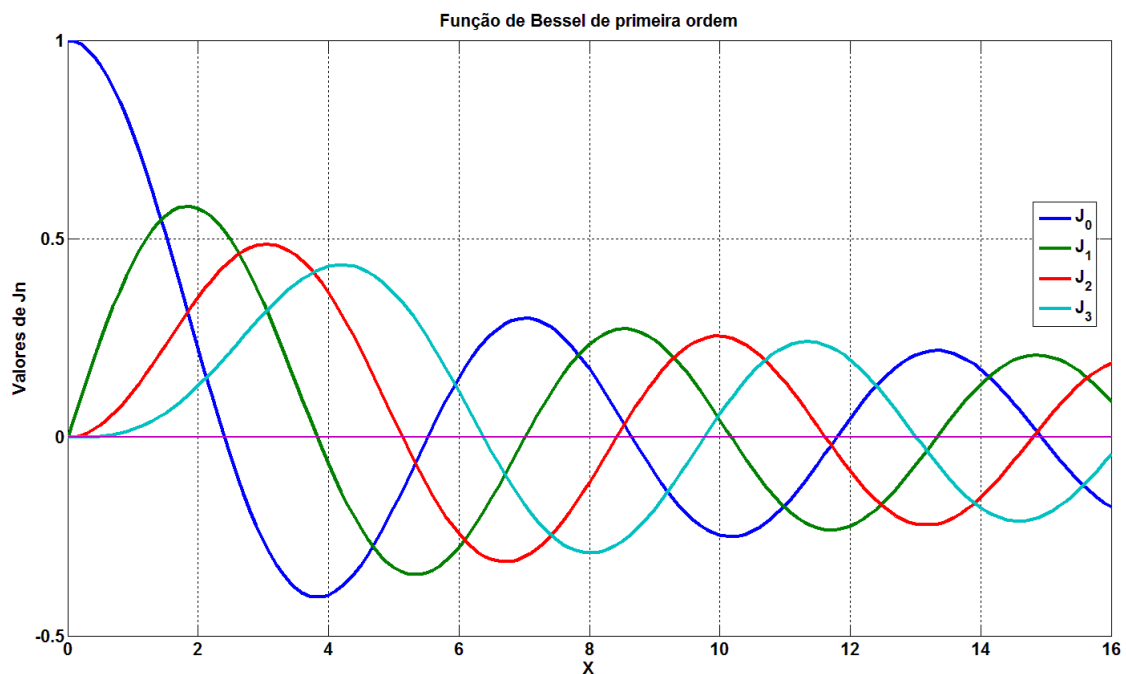
$$\rho^2 \frac{d^2 R_{(\rho)}}{d\rho^2} + \rho \frac{dR_{(\rho)}}{d\rho} + (K_c^2 \rho^2 - n^2) R_{(\rho)} = 0 \quad (72)$$

A equação (72) é uma solução diferencial de Bessel e a solução é dada pela equação (73).

$$R_{(\rho)} = C J_n(K_c \rho) + D N_n(K_c \rho) \quad (73)$$

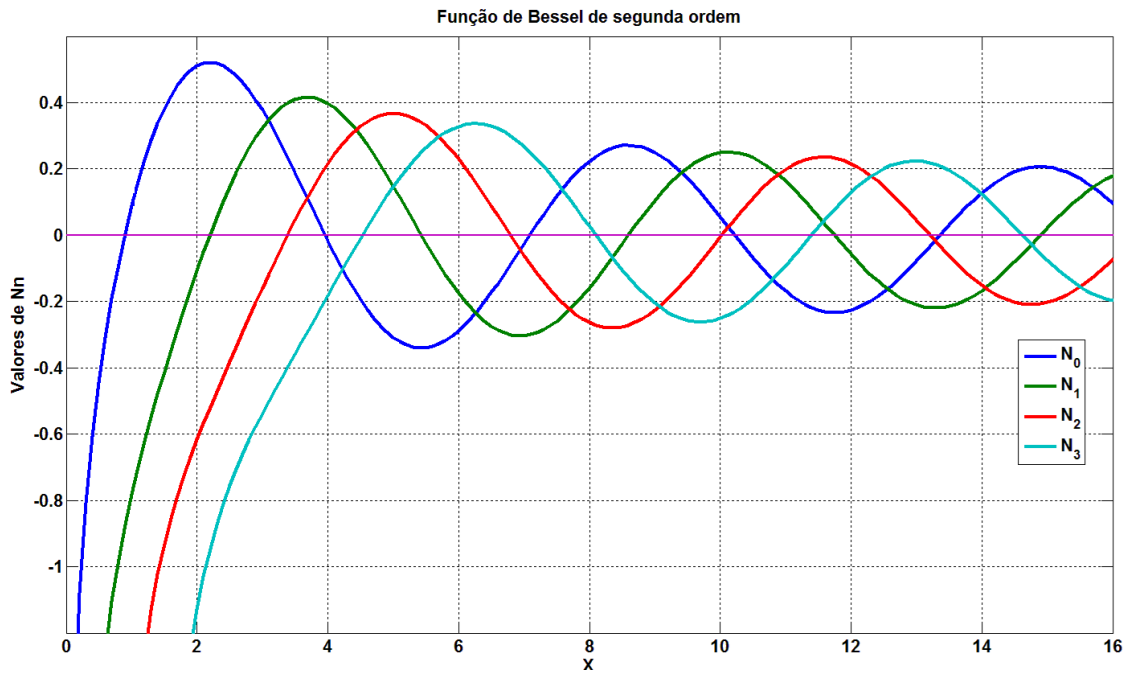
A representação gráfica da função de Bessel de primeira e segunda ordem 0, 1 e 2 é apresentada nas Figuras 2.7 e 2.8.

Figura 2.7 - Representação gráfica da função de Bessel de primeira ordem.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.8 - Representação gráfica da função de Bessel de segunda ordem.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado no gráfico, $N_n(x)$ tende ao infinito quando x tende a zero. Como o guia de ondas circular inclui a origem, $N_n(x)$ não pode compor a solução para $R_{(\rho)}$. A equação passa a ser:

$$R_{(\rho)} = C J_n(K_c \rho) \quad (74)$$

Para a solução da equação de onda

$$\Psi_{(\rho, \phi)} = C n J_n(K_c \rho) \cos(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (75)$$

2.2.7.1 Modo TE.

Para o modo de propagação TE, temos que $E_{z(\rho, \phi)} = 0$ e a componente H_z existe e é definida pela equação (76).

$$H_{z(\rho, \phi)} = H_0 J_n(K_c \rho) \cos(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (76)$$

Reescrevendo as equações (41), (42), (43) e (44) para $E_{z(\rho,\phi)} = 0$, temos:

$$E_\rho = -\frac{i\omega\mu}{K_c^2\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \quad (77a)$$

$$E_\phi = \frac{i\omega\mu}{K_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \quad (77b)$$

$$H_\rho = -\frac{iK_z}{K_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \quad (77c)$$

$$H_\phi = -\frac{iK_z}{K_c^2\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \quad (77d)$$

As condições de contorno implicam que a componente Φ do campo E_ϕ que é tangencial a superfície interior do guia de ondas para $\rho=0$, deve desaparecer ou que a componente ρ do campo magnético H_ρ , que é normal a superfície interior de $\rho=a$, deve desaparecer. Consequentemente,

$$E_\phi = 0 \text{ para } \rho=a, \quad \frac{\partial H_z}{\partial \rho} = 0$$

$$\text{Ou } H_\rho = 0 \text{ para } \rho=a, \quad \frac{\partial H_z}{\partial \rho} = 0$$

Onde,

$$\frac{\partial H_z}{\partial \rho} = H_0 J'_n(K_c\rho) \cos(n\phi) e^{-iK_z z}$$

Como consequência,

$$J'_n(K_c a) = 0$$

J'_n indica a derivada da função oscilatória J_n . Como J'_n também é função oscilatória e sendo conhecidos os valores de n , $K_c a$ será uma das raízes não nulas das funções de Bessel de ordem n , J_n . A Tabela 2.1 abaixo apresenta os primeiros valores das raízes $J_n(x)$ para alguns valores de n .

Tabela 2.1 – Raízes de $J'_n(x)$.

Raíz	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$J_2(x)$	$J_3(x)$
1	3,832	1,841	3,054	4,201
2	7,016	5,331	6,706	8,015
3	10,173	8,536	9,969	11,36
4	1,324	11,706	13,170	

Fonte: Pinho; Rocha; Pereira, 2014.

Os valores permitidos de K_c podem ser escritos como:

$$K_c = \frac{X'_{nr}}{a} \quad (78)$$

Substituindo as equações (74) em (75), temos:

$$E_\rho = -\frac{i\omega\mu}{K_c^2\rho} E_0 J_n\left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \text{sen}(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (79a)$$

$$E_\phi = \frac{i\omega\mu}{K_c^2} E_0 J'_n\left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \text{cos}(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (79b)$$

$$H_\rho = -\frac{iK_z}{K_c^2} H_0 J'_n\left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \text{cos}(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (79c)$$

$$H_\phi = \frac{iK_z}{K_c^2\rho} H_0 J_n\left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \text{sen}(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (79d)$$

2.2.7.2 Modo TM.

Para o modo de propagação TM, temos que $H_{z(\rho,\phi)} = 0$ e a componente H_z existe e é definida pela equação (80).

$$E_{z(\rho,\phi)} = E_0 J_n(K_c\rho) \text{cos}(n\phi) e^{-iK_z z} \quad (80)$$

Reescrevendo as equações (41), (42), (43) e (44) para $H_{z(\rho,\phi)} = 0$, temos:

$$E_\rho = -\frac{iK_z}{K_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (81a)$$

$$E_\phi = -\frac{iK_z}{K_c^2\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \quad (81b)$$

$$H_\rho = \frac{i\omega\varepsilon}{K_c^2\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (81c)$$

$$H_{\phi} = \frac{i\omega\varepsilon}{K_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \quad (81d)$$

As condições de contorno implicam que a componente E_z , que é tangencial a superfície interior do guia de ondas, deve ser nula, $H_z = 0$. Com isso, temos: $J_n(K_c a) = 0$

Como $J_n(K_c a)$ é função oscilatória e sendo conhecidos os valores de n , $K_c a$ será uma das raízes não nulas das funções de Bessel de ordem n , J_n . A tabela abaixo apresenta os primeiros valores das raízes $J_n(x)$ para alguns valores de n .

Tabela 2.2 - Raízes de $J_n(x)$.

Raiz	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$J_2(x)$	$J_3(x)$
1	3,832	1,841	3,054	4,201
2	7,016	5,331	6,706	8,015
3	10,173	8,536	9,969	11,36
4	1,324	11,706	13,170	

Fonte: Fonte: Pinho; Rocha; Pereira, 2014.

Os valores permitidos de K_c podem ser escritos como:

$$K_c = \frac{X_{nr}}{a} \quad (82)$$

Substituindo as equações (76) em (77), temos:

$$E_{\rho} = -\frac{iK_z}{K_c^2} E_0 J'_n\left(\frac{X_{nr}\rho}{a}\right) \cos(n_{\phi}) e^{-iK_z z} \quad (83a)$$

$$E_{\phi} = -\frac{iK_z}{K_c^2 \rho} E_0 J_n\left(\frac{X_{nr}\rho}{a}\right) \sin(n_{\phi}) e^{-iK_z z} \quad (83b)$$

$$H_{\rho} = \frac{i\omega\mu}{K_c^2 \rho} H_0 J'_n\left(\frac{X_{nr}\rho}{a}\right) \sin(n_{\phi}) e^{-iK_z z} \quad (83c)$$

$$H_{\phi} = -\frac{i\omega\mu}{K_c^2} H_0 J'_n\left(\frac{X_{nr}\rho}{a}\right) \cos(n_{\phi}) e^{-iK_z z} \quad (83d)$$

2.2.7.3 Frequência de Corte.

A frequência de corte em um guia de ondas é definida pela frequência mínima para um sinal se propagar no mesmo. Abaixo da frequência de corte, o sinal é atenuado. O guia de ondas se comporta como um filtro passa-altas.

Para o modo TE, partindo das equações (59) e (78), temos:

$$K_z = \sqrt{K_0^2 - \left(\frac{X'_{nr}}{a}\right)^2} \quad (84)$$

Para um modo se propagar, é necessário que K_z desapareça, assim temos:

$$\omega_c \sqrt{\mu\epsilon} = \frac{X'_{nr}}{a} \quad (85)$$

A frequência de corte para o modo TE passa a ser:

$$f_c = \frac{X'_{nr}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (86)$$

Para o modo TM, partindo das equações (59) e (82), temos:

$$f_c = \frac{X_{nr}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (87)$$

2.2.7.4 Cálculo da potência transmitida no guia de ondas.

A potência transmitida pelo guia de ondas pode ser calculada pelo vetor de Poynting.

$$P = \int \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (88)$$

Onde,

$$S = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} \quad (89)$$

E $d\vec{A}$ é o vetor elemento de área da seção transversal do guia de ondas.

Partindo das equações (33) e (34), o vetor \vec{S} passa a ser reescrito como:

$$S = \frac{1}{2} [Re\{E_\phi H^*_z - E_z H^*_\phi\}_{a\rho} + Re\{E_z H^*_\rho - E_\rho H^*_z\}_{a\phi} + Re\{E_\rho H^*_\phi - E_\phi H^*_\rho\}_{az}] \quad (90)$$

Como só as componentes transversais dos campos contribuem para a potência transmitida, o vetor \vec{S} passa a ser:

$$S = \frac{1}{2} Re\{E_\rho H^*_\phi - E_\phi H^*_\rho\} \quad (91)$$

Assim,

$$P = \frac{1}{2} \int Re\{E_\rho H^*_\phi - E_\phi H^*_\rho\} \rho d\rho d\phi \quad (92)$$

Sabendo que $Z = \frac{E_\rho}{H_\phi} = -\frac{E_\phi}{H_\rho}$, a equação (92) pode ser reescrita como:

$$P = \frac{1}{2Z} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} (|E_\rho|^2 + |E_\phi|^2) \rho d\rho d\phi \quad (93a)$$

$$P = \frac{1}{2Z} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} (|H_\rho|^2 + |H_\phi|^2) \rho d\rho d\phi \quad (93b)$$

2.2.7.5 Equação da potência para o modo TE.

Substituindo as equações (79c) e (79d) em (93b), temos:

$$P = \frac{H_0 K_z^2}{2K_c^4 Z} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} (J'_n n^2 \left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \cos^2(n\phi) + \frac{n^2}{\rho^2} J_n^2 \left(\frac{X'_{nr}\rho}{a}\right) \sin^2(n\phi)) \rho d\rho d\phi \quad (94)$$

2.2.7.6 Equação da potência para o modo TM.

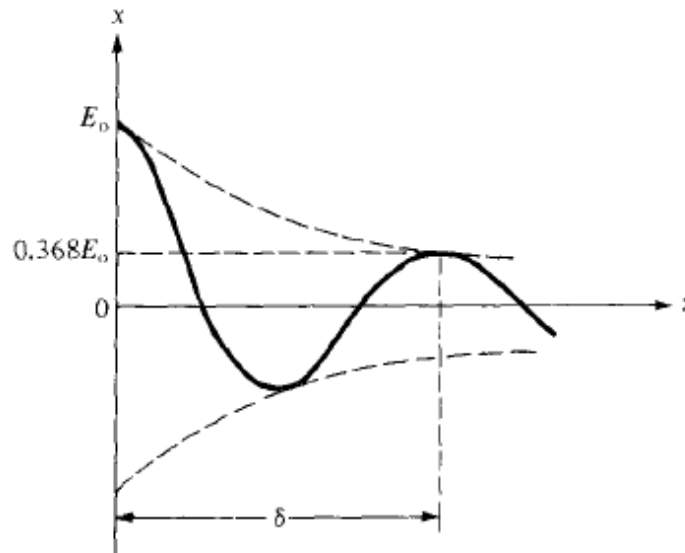
Substituindo as equações (83a) e (83b) em (93a), temos:

$$P = \frac{E_0 K_z^2}{2K_c^4 Z} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} \left(J' n^2 \left(\frac{X_{nr} \rho}{a} \right) \cos^2(n\phi) + \frac{n^2}{\rho^2} J n^2 \left(\frac{X_{nr} \rho}{a} \right) \sin^2(n\phi) \right) \rho d\rho d\phi \quad (95)$$

2.2.8 Profundidade de Penetração

Um sinal eletromagnético sofre atenuação ao tentar penetrar um meio dielétrico. Esse fator de atenuação decresce de forma exponencial, cerca de 37% da distância, sendo representada pela variável δ (SADIKU, 1993). O gráfico da Figura 2.8 ilustra o comportamento da atenuação ao longo da distância.

Figura 2.9 - Atenuação ao longo da distância da penetração do sinal eletromagnético.



Fonte: Sadiku, 1993.

O gráfico da Figura 2.8 representa o comportamento da atenuação de sinais eletromagnéticos em materiais bons condutores. Para essas condições, a profundidade de penetração pode ser aproximada pela Equação 96 (BALANIS, 1938).

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \cong \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (96)$$

2.2.9 Propriedades dielétricas

De acordo com (CARRIZALES, 2010), os componentes presentes na composição do óleo bruto não apresentam propriedades magnéticas assim, o valor da permeabilidade é considerado a mesma do vácuo $\mu' = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

A parte real da permissividade pode ser descrita pela equação 97.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (97)$$

Em que, ε_0 é a permissividade elétrica do espaço livre e seu valor é de $1/36\pi \times 10^{-9}$ F/m e ε_r é a constante relativa dielétrica do fluido (CHUTE and VERMEULEN, 1979).

2.2.10 Estado da Arte

A radiação eletromagnética é utilizada para o aquecimento de materiais em diversas áreas da indústria, da medicina, entre outras. Vários estudos foram desenvolvidos visando o aproveitamento das características de aquecimento gerado pela exposição de fluidos à radiação eletromagnética porém, na área de recuperação de petróleo o número de publicações ainda é baixa e geralmente limitado a empresas do ramo.

A maioria das publicações que desenvolvem estudos e modelos para o aquecimento eletromagnético de campos maduros, utilizam o método por condução elétrica. Essa técnica adota fontes geradoras de tensão em baixa frequência para elevar a temperatura dos reservatórios. Trabalhos como (Ljungstrom 1951) e (Harvey H. A., Arnold, M. D. 1980) utilizam essa técnica de aquecimento.

Na área de recuperação de petróleo usando fontes de alta frequência, um dos principais trabalhos foi o desenvolvido por (Mata 1993), onde ele criou um sistema de aquecimento para reservatório de petróleo, utilizando radiação eletromagnética como fonte de geração de calor. O sistema tem como base antenas de dipolo de alta frequência, que são inseridas na formação rochosa com o intuito de propagar a Rádio Frequência (RF) pela mesma. O projeto

consistiu em um sistema de irradiação adaptativo, onde um modelo de controle foi desenvolvido usando a perda de retorno do sinal transmitido para corrigir a frequência do oscilador, garantindo assim o melhor aproveitamento de energia na geração de calor. Durante o trabalho, foi feito um estudo teórico do aquecimento dos elementos presentes em uma formação rochosa e em seguida, foram confirmados através de experimentos usando um modelo geológico criado em laboratório. Através de experimentos, foram levantados os dados das características dielétricas dos componentes em um poço de petróleo.

O trabalho realizado por (OLIVEIRA, H. J. M., BARILES, J. L., MATA, W., DUTRA Jr, T. V. 2009), consistiu na criação de um modelo computacional para simular o Aquecimento Eletromagnético Resistivo em cinco poços de petróleo verticais produtores, usando um sistema elétrico trifásico com nível de tensão de 110 V.

Segundo (MANCHAND, 2002), a PETROBRAS na década de 80, realizou testes No Campo de Estreito, na Bacia Potiguar, localizada a 180 Km de natal onde, utilizou o método de aquecimento eletromagnético desenvolvido pela IITRI e a Universal Energy. Os resultados dos experimentos foram satisfatórios devido ao adicional de petróleo produzido em torno de 18000 m³. Na década de 90, outro teste foi iniciado na Fazenda Belém em Aracati, no estado do Ceará, porém, não foi possível concretizar o projeto devido a problemas com o fornecimento de energia por parte da companhia elétrica da região. Um terceiro teste foi iniciado em 2000 no campo Canto do Amaro no estado do Rio Grande do Norte. Essas regiões foram escolhidas devido o tipo de petróleo encontrado que é de alta viscosidade.

Este trabalho tem o intuito de estudar o aquecimento dos fluidos, presentes em poços de petróleo em campos maduros, expostos a radiação eletromagnética. Foi adotado como base para o desenvolvimento dos modelos, as características dos materiais presentes em reservatórios do nordeste brasileiro. O trabalho foi todo realizado através de simulações usando um software multifísico COMSOL.

3 METODOLOGIA E MODELAGEM

Nesse capítulo foram descritos os procedimentos e o software utilizados para a realização das simulações.

3.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo, estudar o aquecimento de fluidos presentes em dutos contendo petróleo de viscosidade elevada, através da injeção de radiação eletromagnética no mesmo.

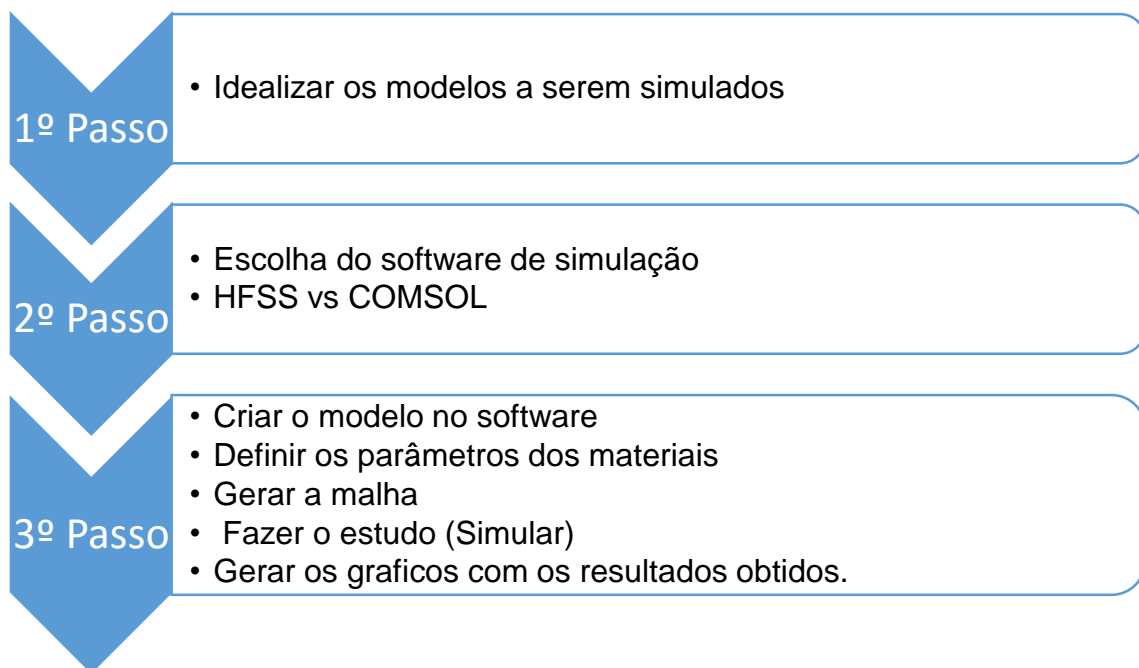
A metodologia adotada para o presente trabalho, foi baseada em simulações utilizando o software multifísico COMSOL, onde um modelo de guia de ondas totalmente preenchido foi elaborado com o intuito de se aproximar de um sistema de extração real.

Inicialmente foi utilizado como ferramenta para as simulações, o software desenvolvido para análises de antenas HFSS. Essa é uma ferramenta computacional designada para analisar sistemas eletromagnéticos em alta frequência usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) (WIKIPÉDIA, 2016). O MEF é bastante conhecido na literatura e amplamente testado e adotado como método de cálculo computacional por outros softwares de simulação. O HFSS é uma das ferramentas que compõe o pacote de softwares desenvolvidos pela ANSYS.

A ferramenta adotada para a realização das simulações foi o ambiente de simulações multifísica COMSOL. O programa utiliza o MEF para a realização dos cálculos computacionais. O ambiente de trabalho do software se mostrou bastante intuitivo, facilitando o desenvolvimento dos modelos. A forma de operação do COMSOL é baseada em uma interface de modelagem multidimensional, onde pode ser construído um modelo em uma, duas ou três dimensões. No parâmetro denominado "*Geometry*", são definidas as dimensões do modelo, as condições de contorno e inseridas as fontes de radiação. Em seguida, são definidos os parâmetros dos materiais em "*Materials*" e configuradas as variáveis do tipo de física empregada no estudo. O COMSOL trabalha com bibliotecas para cada tipo de física a ser utilizada. Como o MEF trabalha com um sistema de divisão do espaço do modelo em pequenas partes,

é importante configurar a malha com atenção para não ocorrerem problemas na precisão dos resultados simulados. O parâmetro “*Mesh*” é responsável por criar a malha para o cálculo do MEF. Na parte denominada como “*Study*”, são configurados os parâmetros de estudo, se os resultados serão estacionários ou obtidos ao longo do tempo. Finalizando o processo de simulação, no parâmetro “*Result*” é possível criar gráficos e exportar os resultados em formato de planilha. O diagrama da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada.



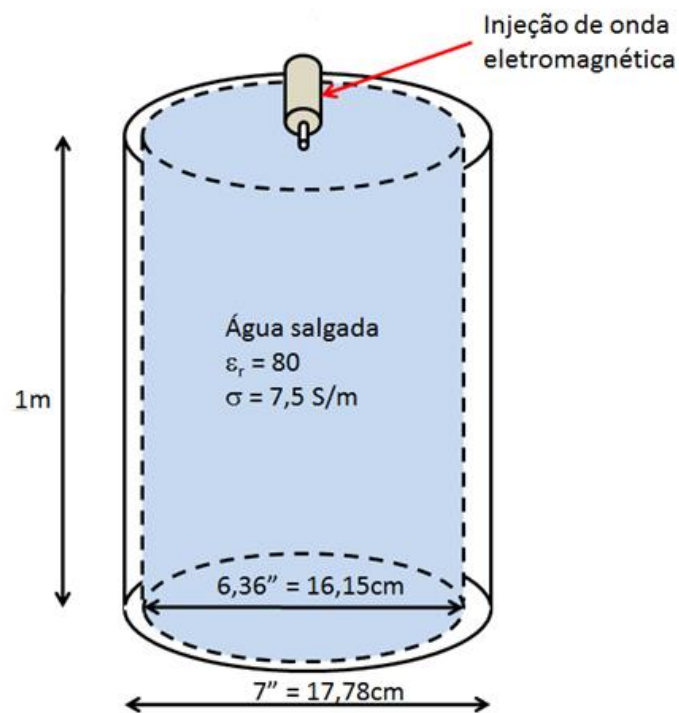
Fonte: Autoria Própria.

As simulações foram desenvolvidas no laboratório LAMOTRIZ (Laboratório de Sistemas Motrizes), situado na instituição UFC (Universidade Federal do Ceará), gentilmente cedido pelos professores e pesquisadores Dr. Ricardo Silva Thé Pontes e o Dr. Tobias Rafael Fernandes Neto, atual coordenador de pesquisas. As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core I7, operando a 3.90GHz, com 32Gb de memória RAM e HD de 1Tb. A versão do software utilizada foi a 4.3, instalado em um sistema operacional Linux Ubuntu. O aluno de Doutorado Ednardo Moreira Rodrigues prestou auxílio na operação do software e acesso a máquina de

simulações. Outros alunos também auxiliaram em alguns aspectos de operação do software e suas bibliotecas.

O desenvolvimento do trabalho foi todo baseado em um modelo aproximado de duto usado na extração de petróleo, com comprimento de um metro e raio de 6,36 polegadas interno. Essas dimensões de raio são comumente usadas em dutos comerciais e foram retiradas do Manual de Complementação da PETROBRAS. Para o material que compõe o duto, foi adotado um condutor perfeito em todas as simulações. A Figura 3.2 ilustra o modelo idealizado.

Figura 3.2 - Modelo de duto totalmente preenchido.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com (LIAO, 1996), o modo de propagação através de um guia de ondas circular é o TE_{11} . Para calcular a frequência de corte do sistema é necessário encontrar o valor de K_c para o modo descrito. Usando a Equação 2.86 e os dados da Tabela 2.1 temos os resultados da Equação 3.1:

$$F_c = \frac{1.841}{2\pi \times 8.075 \times 10^{-2} \sqrt{80 \times \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \times 4\pi \times 10^{-7}}} = 0.121 \times 10^9 \quad 3.1$$

A frequência de corte para o sistema adotado é de 121 MHz, o que permite usar frequências elevadas nas simulações. As simulações foram realizadas em três etapas que são descritas a seguir.

3.1.1 Simulação do campo elétrico

A primeira simulação foi baseada no modelo de duto descrito anteriormente, totalmente preenchido por uma solução de água e sal. Uma fonte de radiação eletromagnética foi inserida em uma das extremidades conforme o modelo descrito na Figura 3.2. Para tal, foi adotada uma fonte com potência de 100 Watts, e a frequência foi varrida de 500MHz até 5000MHz, com passos de 10MHz.

As constantes dielétricas adotadas para o fluido nessa etapa da simulação, foram retiradas do trabalho realizado por (MATA, 1993) e estão organizadas na Tabela 3.1. A biblioteca utilizada nessa simulação foi a de micro-ondas, onde são necessários definir a condutividade elétrica, permissividade e permeabilidade do fluido.

Tabela 3.1 - Propriedades dielétricas da água e sal.

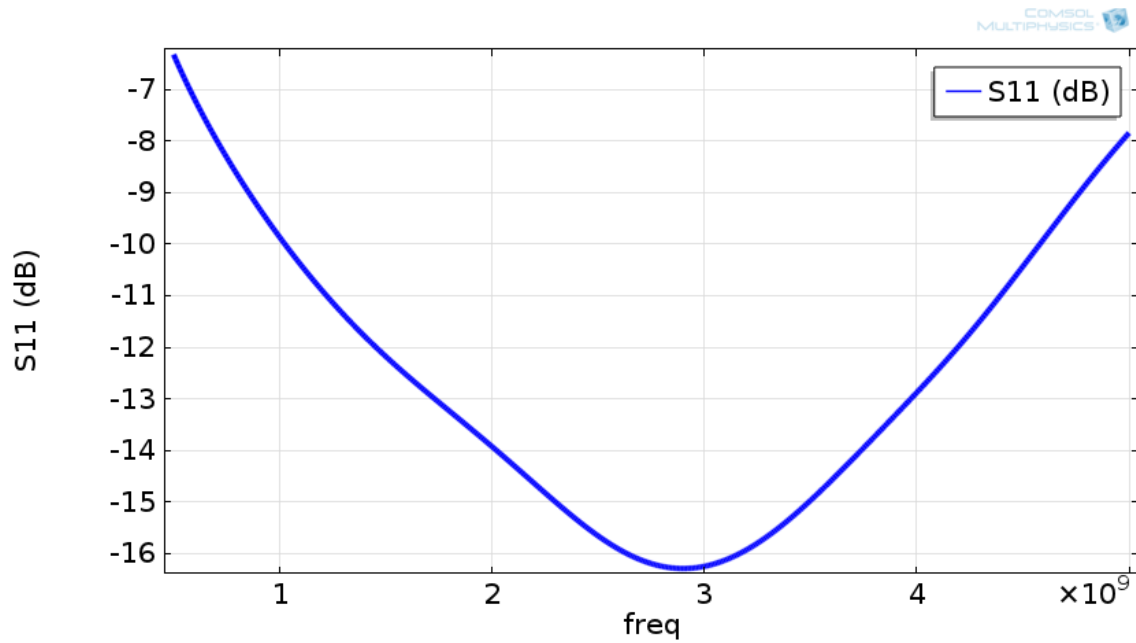
Propriedades da água e sal		
Condutividade Elétrica	7,5	S/m
Permissividade	80,0	1
Permeabilidade	1,0	1
Temperatura inicial	25,0	°C

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados das simulações, foram obtidos os gráficos em uma dimensão da curva de resposta em frequência e de máxima energia absorvida. Esses resultados são necessários para identificar a faixa de frequências de operação do sistema, em que ocorre a melhor dissipação de potência no fluido, para então poder prosseguir com as próximas etapas.

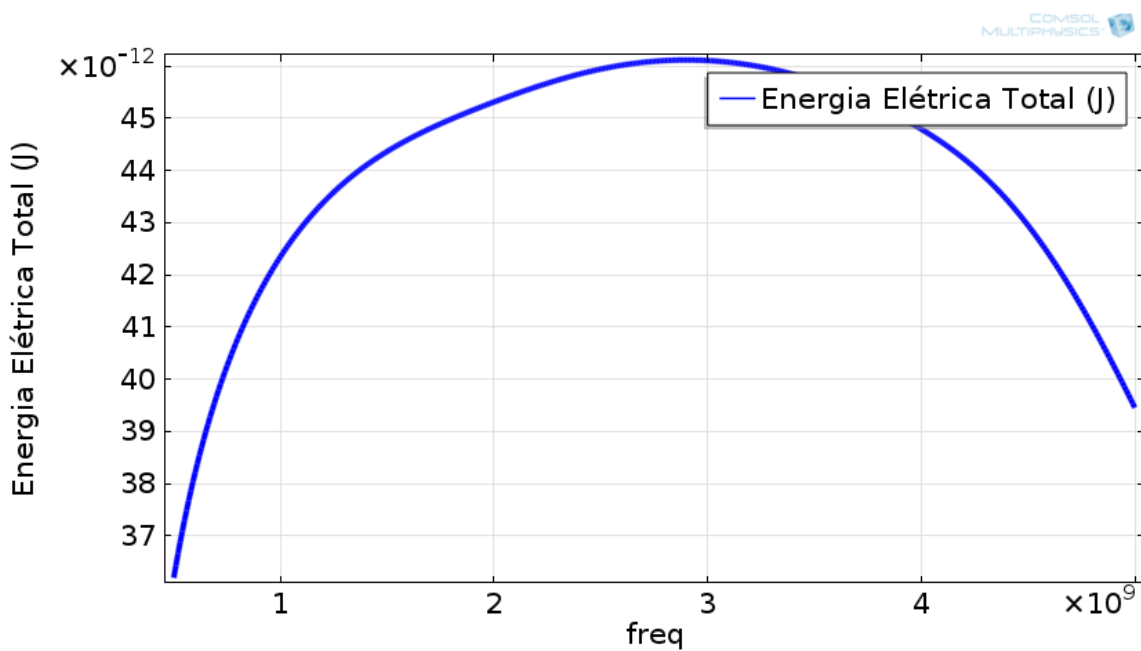
As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram os gráficos da perda de retorno e máxima energia absorvida pelo sistema, no domínio da frequência.

Figura 3.3 - Perda de retorno do sistema.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.4 - Energia absorvida pelo sistema.

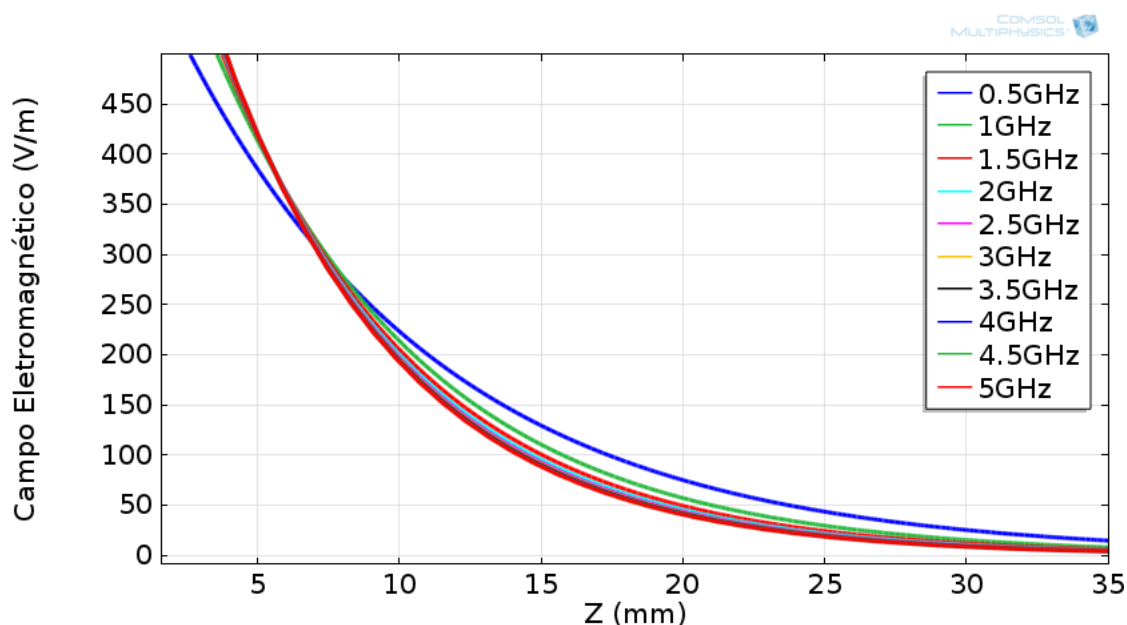


Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser observado nos gráficos de perda de retorno e máxima energia absorvida, a melhor frequência de operação para esse sistema está em torno dos 2,8GHz. Com isso, pode ser adotada 2,45GHz como frequência principal da fonte de aquecimento. Essa frequência é bastante usada comercialmente para essa finalidade.

Devido as propriedades dielétricas do fluido presente em poços de petróleo, o sinal de alta frequência sofre forte atenuação. A Figura 3.5 apresenta um gráfico da absorção do campo elétrico no fluido para 10 frequências compreendidas entre 0,5 GHz a 5 GHz, com passos de 0,5 GHz. As curvas do presente gráfico, indicam a perda de energia elétrica do campo ao penetrar o fluido, ao longo do eixo Z. Quando a perda atinge 63% do campo elétrico ao longo do eixo Z, é determinada a profundidade de penetração do mesmo.

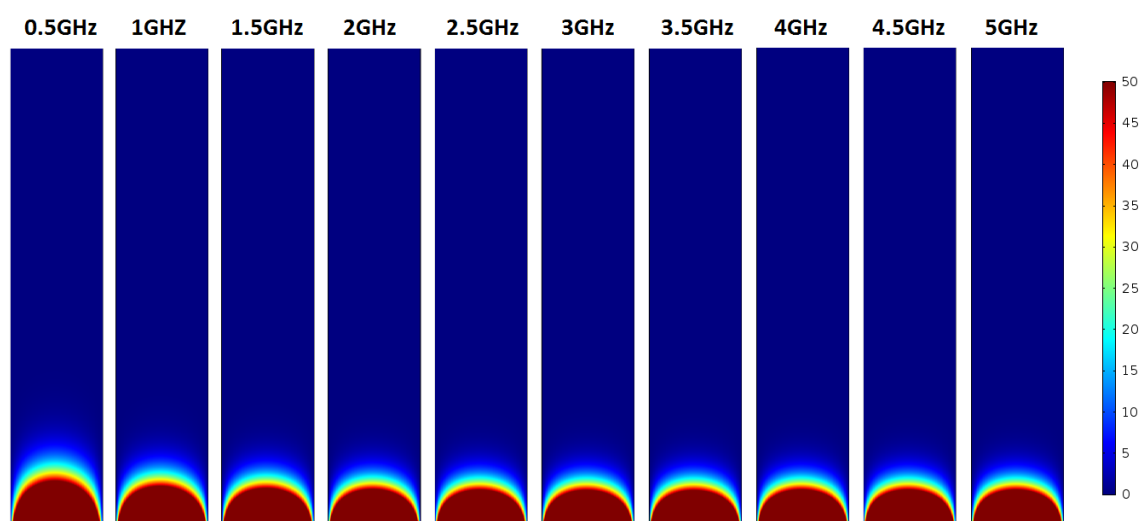
Figura 3.5 - Gráfico da penetração do campo elétrico no fluido.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3.6 apresenta um gráfico 2D comparando a penetração do campo elétrico no fluido para as frequências de 0,5GHz a 5GHz, com passos de 0,5GHz. A imagem foi ampliada com o intuito de observar melhor a diferença entre as profundidades de penetração do campo elétrico.

Figura 3.6 - Representação em 2D da penetração do campo elétrico no fluido.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o gráfico da Figura 3.5 e da representação 2D da Figura 3.6, existe pouca diferença na penetração do campo elétrico para as frequências compreendidas de 0,5GHz até 5GHz. Quanto menor a frequência, maior será a penetração do campo no fluido.

Com a Equação 2.96 foi possível calcular a profundidade de penetração para as frequências adotadas na simulação. Com os resultados obtidos, foi possível gerar a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Comparativo entre as profundidades de penetração teóricas e simuladas.

Frequência em (GHz)	Profundidade de penetração calculada em (mm)	Profundidade de penetração simulada (mm)
0,50	8,20	9,00
1,00	5,80	7,48
1,50	4,70	6,87
2,00	4,10	6,67
2,50	3,70	6,66
3,00	3,40	6,46
3,50	3,10	6,27
4,00	2,90	6,26
4,50	2,70	6,26
5,00	2,60	6,26

Fonte: Autoria própria.

Os resultados teóricos exibidos na Tabela 3.2 foram calculados usando os valores adotados para a realização das simulações, já apresentados na Tabela 3.1. Para obter os dados da penetração partindo dos resultados simulados, foi calculado a queda de 37% sobre os valores dos campos elétricos gerados para cada frequência, correspondentes ao eixo Y do gráfico apresentado na Figura 3.5. Com o resultado da perda de energia, o valor da distância foi determinado a partir dos resultados presentes no eixo X do gráfico. Os resultados foram obtidos usando os dados exportados da simulação.

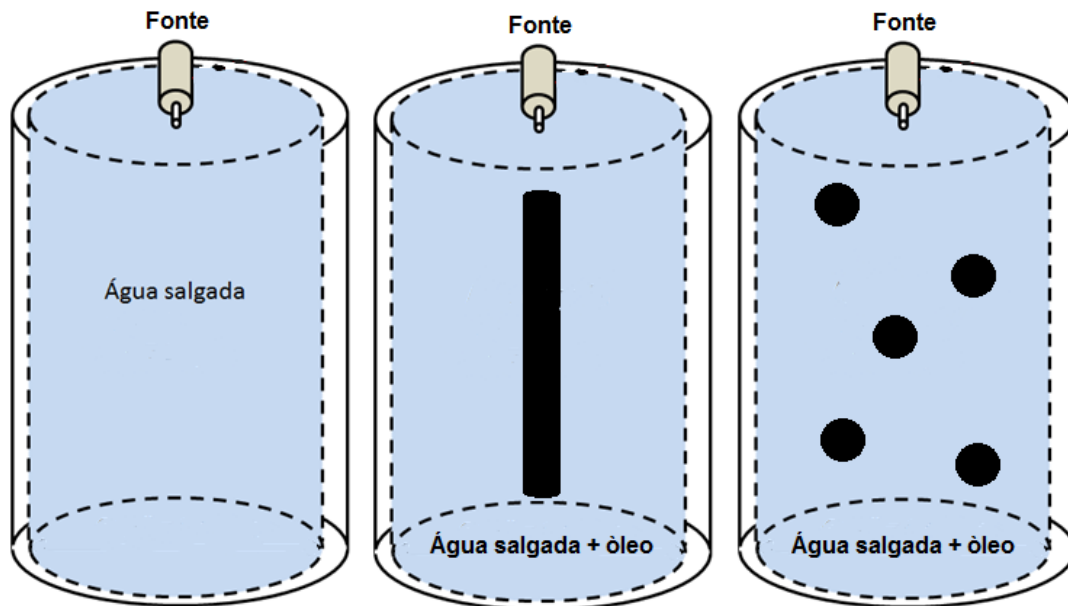
Conforme podem ser observados, os resultados para a profundidade de penetração obtidos nas simulações estão próximos aos valores teóricos. Mesmo apresentando baixa penetração, as frequências adotadas para as simulações conseguem ser absorvida e convertida em calor no material.

3.1.2 Simulações do aquecimento eletromagnético usando uma fonte

Nessa etapa do trabalho, foram realizadas as simulações do aquecimento gerado pela radiação eletromagnética injetada em uma das extremidades do duto.

Três modelos foram idealizados para estudar o comportamento do aquecimento gerado por uma fonte de radiação eletromagnética. O primeiro modelo é o mesmo utilizado na etapa anterior, onde é composto somente pela mistura de água e sal. Já no segundo modelo foi acrescentado um cilindro de óleo no centro do duto, ocupando 5% da sua capacidade e com um comprimento de 0,6 metros. O terceiro modelo foi desenhado para ser mais próximo de um sistema real, onde pequenas esferas de óleo foram distribuídas ao longo do duto. O somatório do volume das esferas corresponde a 5% da capacidade do duto. Em todos os modelos estão presentes a mistura de água e sal. A Figura 3.7 ilustra como foram idealizados os modelos utilizados nas simulações de aquecimento por radiação eletromagnética usando uma fonte.

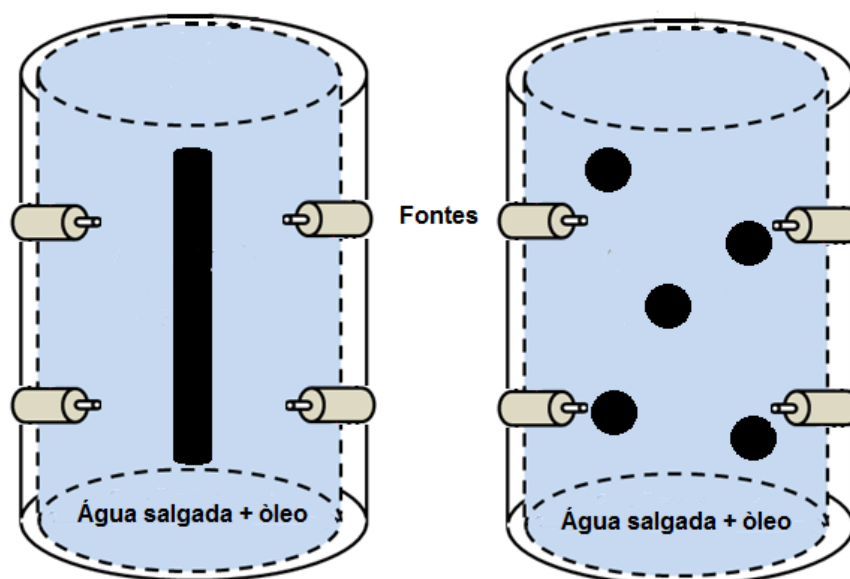
Figura 3.7 - Modelos para simulação do aquecimento gerado por uma fonte de radiação eletromagnética.



Fonte: Autoria própria.

Para as simulações de aquecimento usando múltiplas fontes, foi adotado o mesmo procedimento descrito para as simulações anteriores com mudanças na distribuição das antenas. Agora as fontes de radiação eletromagnética foram posicionadas na lateral do duto, com um espaçamento de 180° e 0,5 metros entre elas. A distância de cada fonte até a extremidade do duto foi de 0,25 metros. Foram adotadas 4 fontes para esse modelo com o intuito de estudar o desempenho do aquecimento gerado pela distribuição da irradiação. Nesse sistema, cada antena é tida como uma fonte geradora de micro-ondas, portanto, a potência adotada é a mesma para cada elemento irradiador.

Figura 3.8 - Modelos de simulação com múltiplas antenas.



Fonte: Autoria própria.

As constantes dielétricas adotadas para as simulações de aquecimentos, foram retiradas do trabalho realizado por (MATA, 1993) e (CHUTE; VERMEULEN, 1982), e foram organizadas na Tabela 3.3. A biblioteca utilizada nas simulações de aquecimento por radiação eletromagnética foram a de aquecimento por micro-ondas e transferência de calor em sólidos, onde são necessários definir a condutividade elétrica, permissividade, permeabilidade, condutividade térmica, densidade e a capacidade de aquecimento.

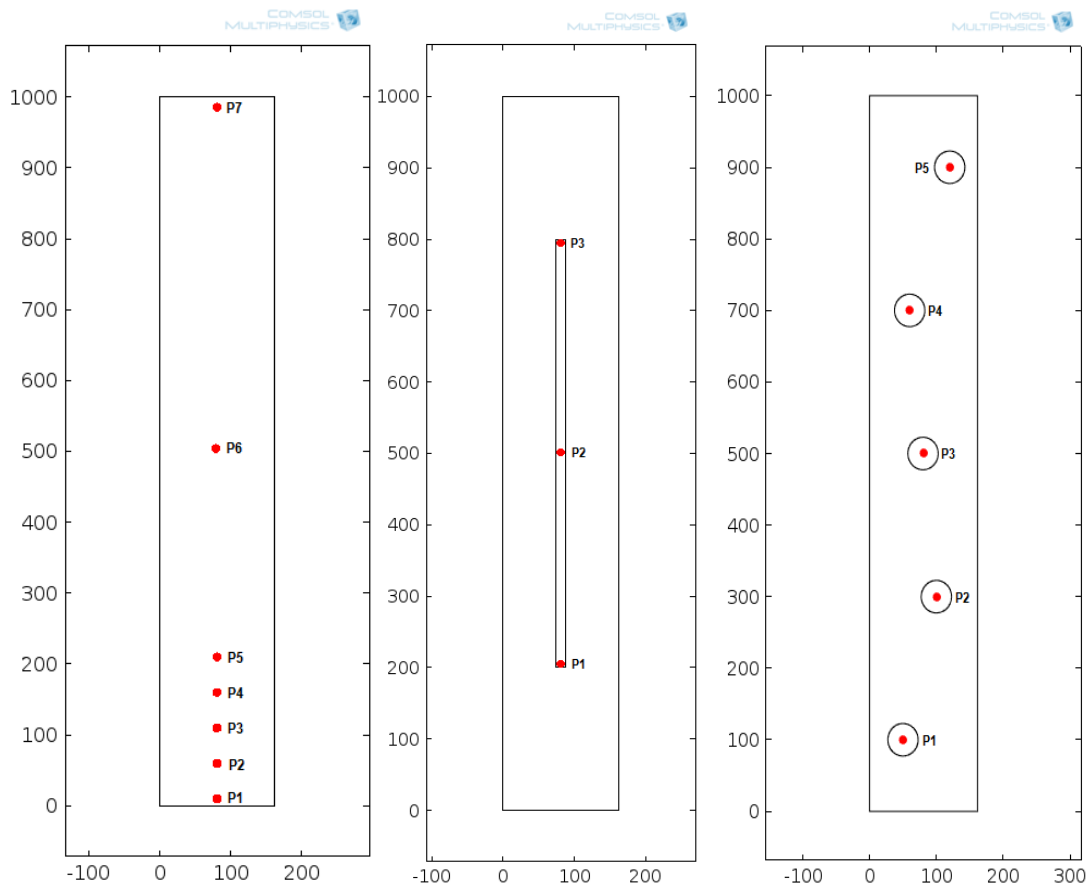
Tabela 3.3 - Propriedades dielétricas da salobra e óleo.

	Água + Sal	Óleo	Unidades
Condutividade Elétrica	7,500	1,100	S/m
Permissividade	80,000	2,800	1
Permeabilidade	1,000	1,000	1
Condutividade Térmica	0,609	0,168	W/m.K
Densidade	1000,000	900,000	Kg/m ³
Capacidade de Aquecimento	4190,000	2000,000	J/kg.K
Temperatura Inicial	25,000	-	°C

Fonte: Autoria própria.

Após a finalização da simulação, é necessário definir os pontos em que serão mostrados os dados da temperatura resultante. Para isso, é possível definir pontos de leitura de dados no software simulador. A Figura 3.9 mostra os pontos adotados no modelo.

Figura 3.9 - Pontos definidos para a leitura das temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de distribuição adotado para os pontos, foi utilizado em todas as simulações de temperatura para efeito de comparação. Os gráficos foram gerados tendo como base esse sistema.

Todas as simulações foram realizadas tendo como base os modelos já descritos, sendo variadas as potências das fontes de micro-ondas em 0,1KW, 1KW e 10KW respectivamente. Foi considerado a temperatura inicial de 25 °C em todos os casos.

Os modelos foram criados usando como base os guias de usuário escritos pela companhia desenvolvedora do software COMSOL. Esses são guias de

usuário contendo explicações das funções das bibliotecas e modelos para demonstração. O modelo de guia de ondas foi usado como base para o desenvolvimento dos modelos descrito nesse capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são abordados os resultados das simulações realizadas seguindo os modelos descritos no capítulo anterior. As simulações foram realizadas usando fontes com potências de 0,1KW, 1KW e 10KW e os dados do aquecimento gerados pela radiação eletromagnética foram obtidos ao longo do tempo.

O tempo de exposição dos fluidos a radiação eletromagnética foi de 12 horas para todas as simulações. Os resultados foram representados em segundos por gráficos em uma e duas dimensões. As medidas de temperaturas foram obtidas ao longo de 24 horas, com passos de 1000 segundos.

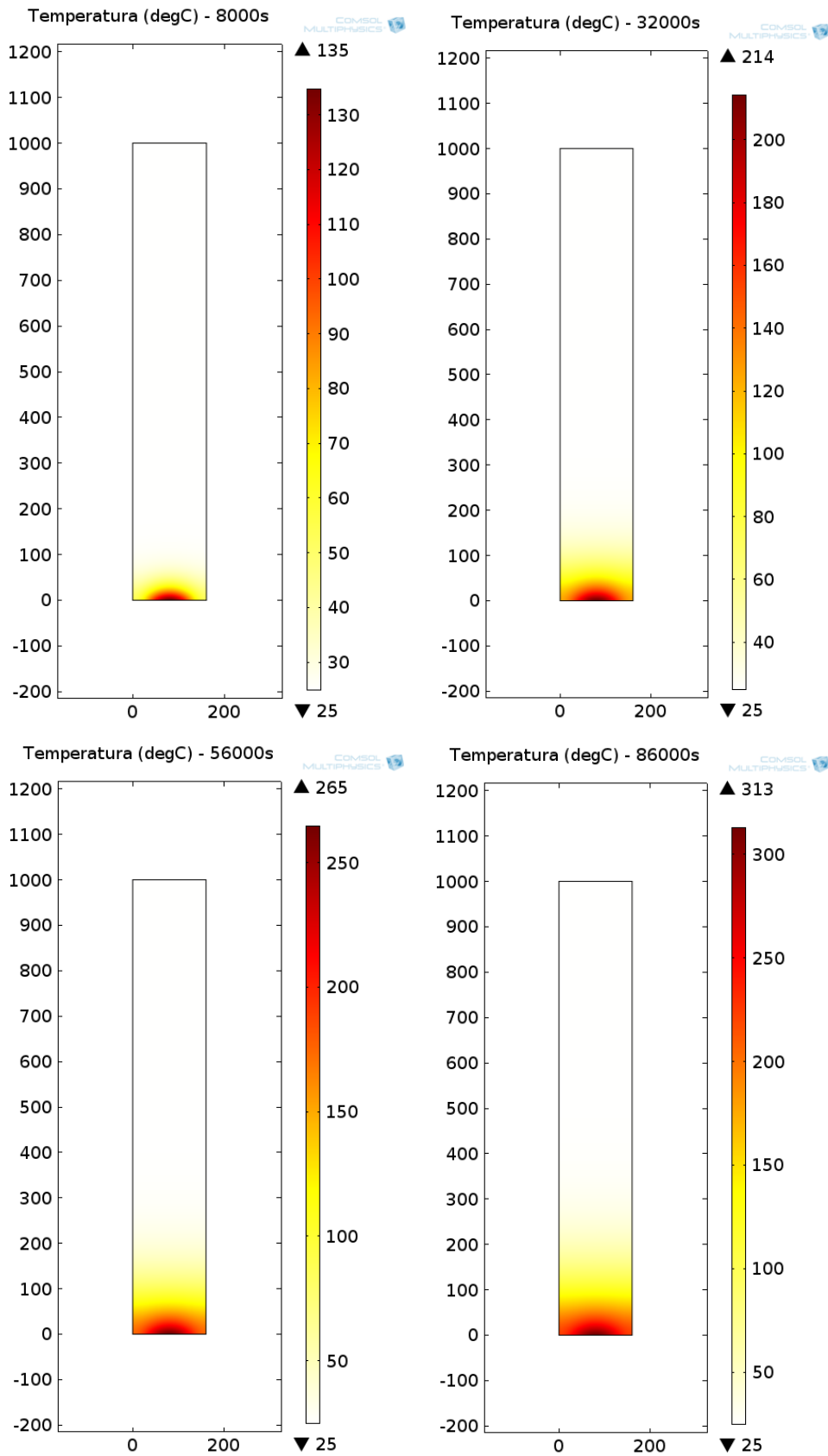
4.1 SIMULAÇÕES COM UMA FONTE DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Essa primeira etapa do trabalho, tem como finalidade mostrar o aquecimento gerado usando uma fonte de micro-ondas, conforme o modelo já descrito no capítulo anterior e ilustrado na Figura 3.7.

4.1.1 Duto totalmente preenchido por salobra.

Nessa etapa do trabalho foi realizada a simulação do modelo de duto totalmente preenchido por uma solução de água salobra já descrita no capítulo anterior. Os pontos de medição adotados foram os já representados na primeira imagem da Figura 3.9. A potência da fonte geradora de micro-ondas usada inicialmente foi 0,1 KW. Os resultados obtidos, podem ser visualizados nas Figuras 4.1 e 4.2. Elas representam a propagação do aquecimento gerado pela fonte de micro-ondas no fluido ao longo do tempo, em 1D e 2D.

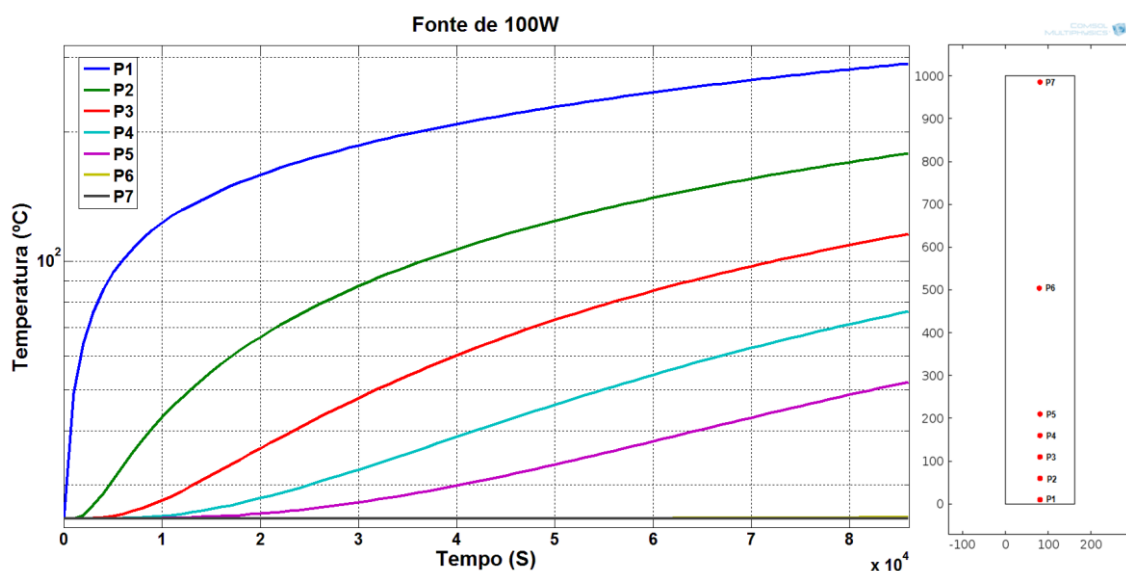
Figura 4.1 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 0,1KW.



Fonte: Autoria própria.

Os passos escolhidos para a representação da propagação térmica no gráfico 2D da Figura 4.1, foram respectivamente em 8000, 32000, 56000 e 86000 segundos que correspondem a um tempo de aproximadamente 2:13, 8:53, 15:33 e 23:53 horas. Esse espaço de tempo foi adotado para obter uma melhor visualização da propagação térmica ao longo do fluido.

Figura 4.2 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 0,1KW.



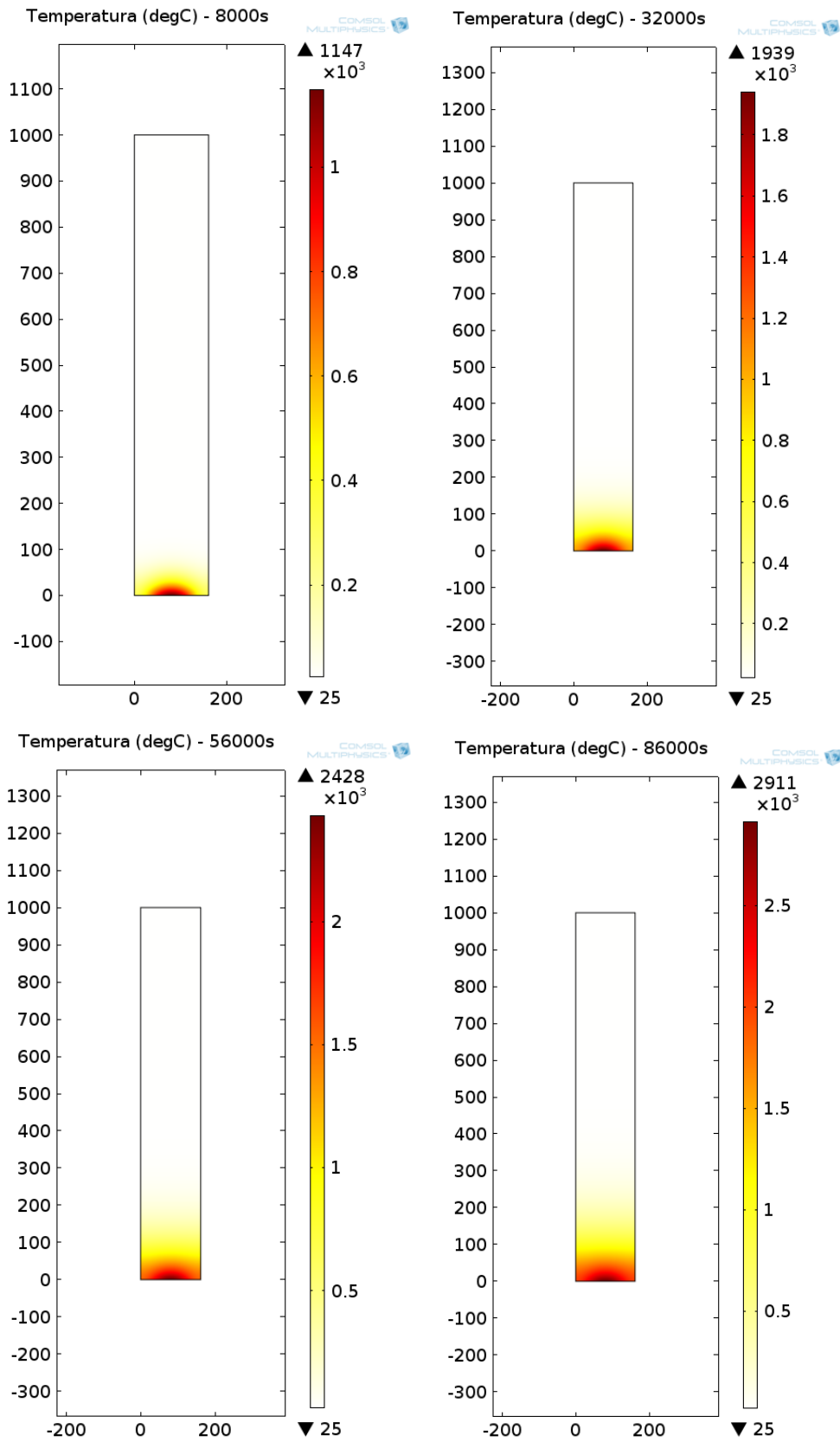
Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 4.2 mostra a curva de propagação de calor no fluido em cada ponto adotado conforme descrito no capítulo anterior e ilustrado na Figura 3.9. O gráfico foi gerado pelo software de simulação utilizando escala linear no eixo X e logarítmica no eixo Y para uma melhor visualização do comportamento da geração e propagação térmica ao longo do duto.

Foi possível observar que a temperatura gerada pela radiação eletromagnética, não alcançou os pontos mais distantes em relação a fonte, P6 e P7, ao longo das 24 horas de exposição as micro-ondas.

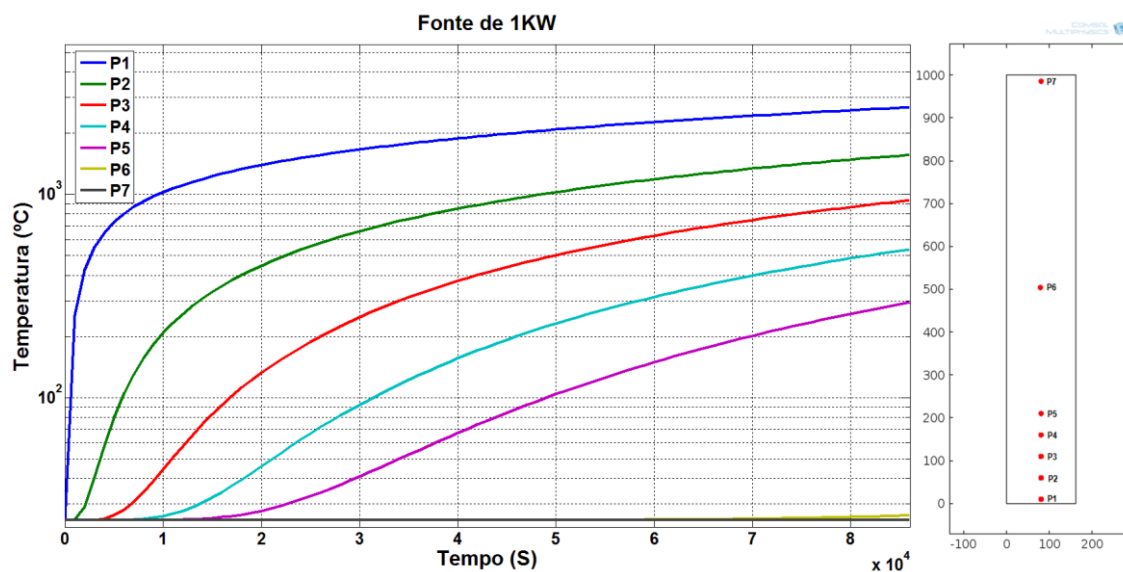
O passo seguinte consistiu em elevar a potência da fonte geradora de micro-ondas para 1KW e refazer a simulação mantendo o modelo anterior. Os resultados obtidos com o aumento de potência podem ser visualizados nos gráficos das Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 1KW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 1KW.



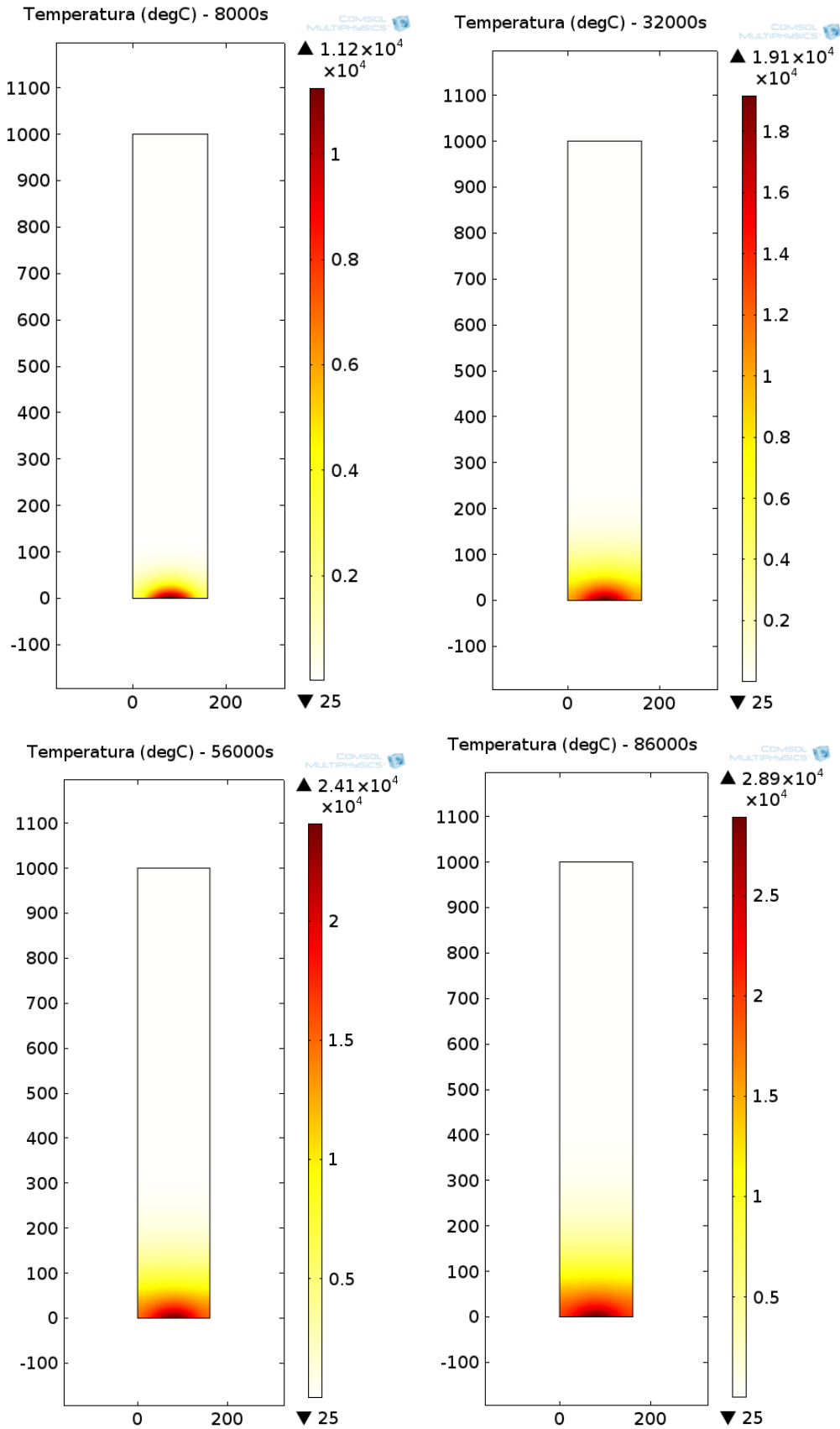
Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os resultados obtidos nos gráficos das Figuras 4.3 e 4.4 e comparando com os resultados da simulação anterior, percebe-se que ocorreu um aumento considerável na temperatura gerada ao elevar a potência da fonte de radiação eletromagnética.

Mesmo com o aumento considerável da potência da fonte de radiação eletromagnética, ainda não foi possível obter variação de temperatura nos pontos P6 e P7 ao longo das 24 horas de exposição às micro-ondas. Um aumento de temperatura considerável pode ser observado na curva gerada pelo ponto P1 se comparados os gráficos das Figuras 4.2 e 4.3.

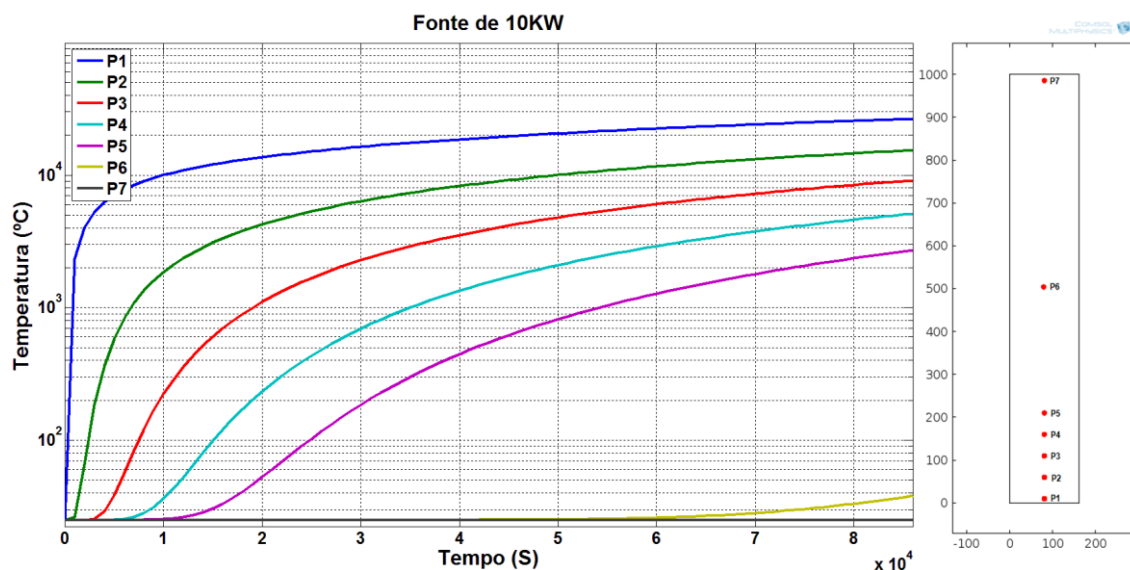
A próxima simulação consistiu em elevar a potência da fonte de radiação eletromagnética para 10KW. Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 - Gráfico 2D da propagação térmica no fluido para a potência de 10KW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6 - Gráfico da propagação térmica ao longo do tempo para uma fonte de 10KW.



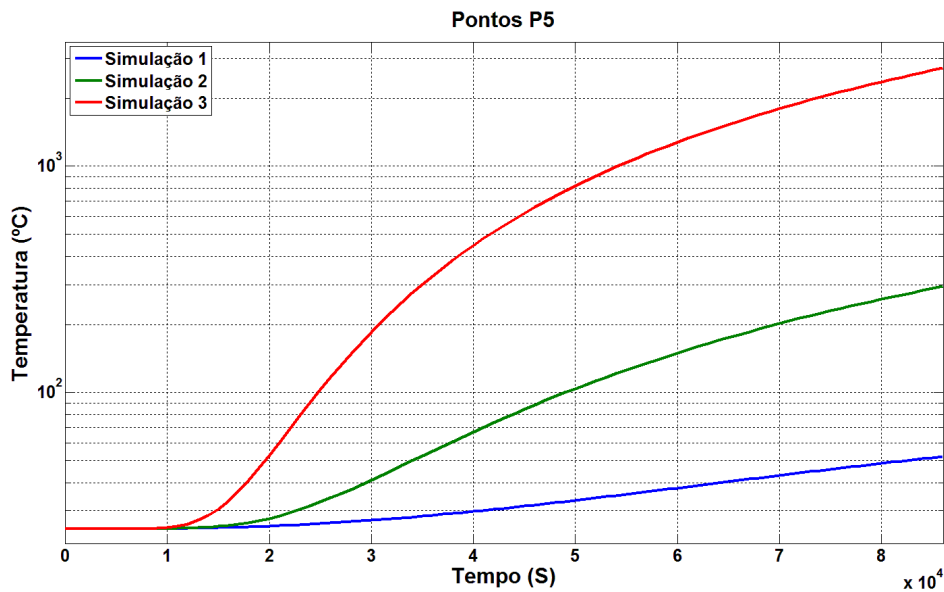
Fonte: Autoria própria.

Com os resultados obtidos nos gráficos das Figuras 4.5 e 4.6, e ao comparar com os da simulação anterior, percebe-se que ocorreu um aumento considerável na temperatura gerada ao elevar a potência da fonte de radiação eletromagnética, em relação as simulações anteriores.

Usando 10KW de potência na fonte de radiação eletromagnética, foi possível gerar temperatura suficiente para ser propagada até o ponto P6. O ponto P7 não apresentou variação de temperatura ao longo das 24 Horas de exposição do fluido à radiação eletromagnética.

Adotando o ponto P5 e extraíndo os dados com os resultados das simulações, foi possível plotar o gráfico da Figura 4.7. Esse gráfico compara os resultados do aquecimento gerado pela fonte de micro-ondas no ponto P5, ao longo do tempo, para as três potencias adotadas. O gráfico foi plotado usando o software Matlab, com escala linear no eixo X e logarítmica no eixo Y.

Figura 4.7 – Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P5.



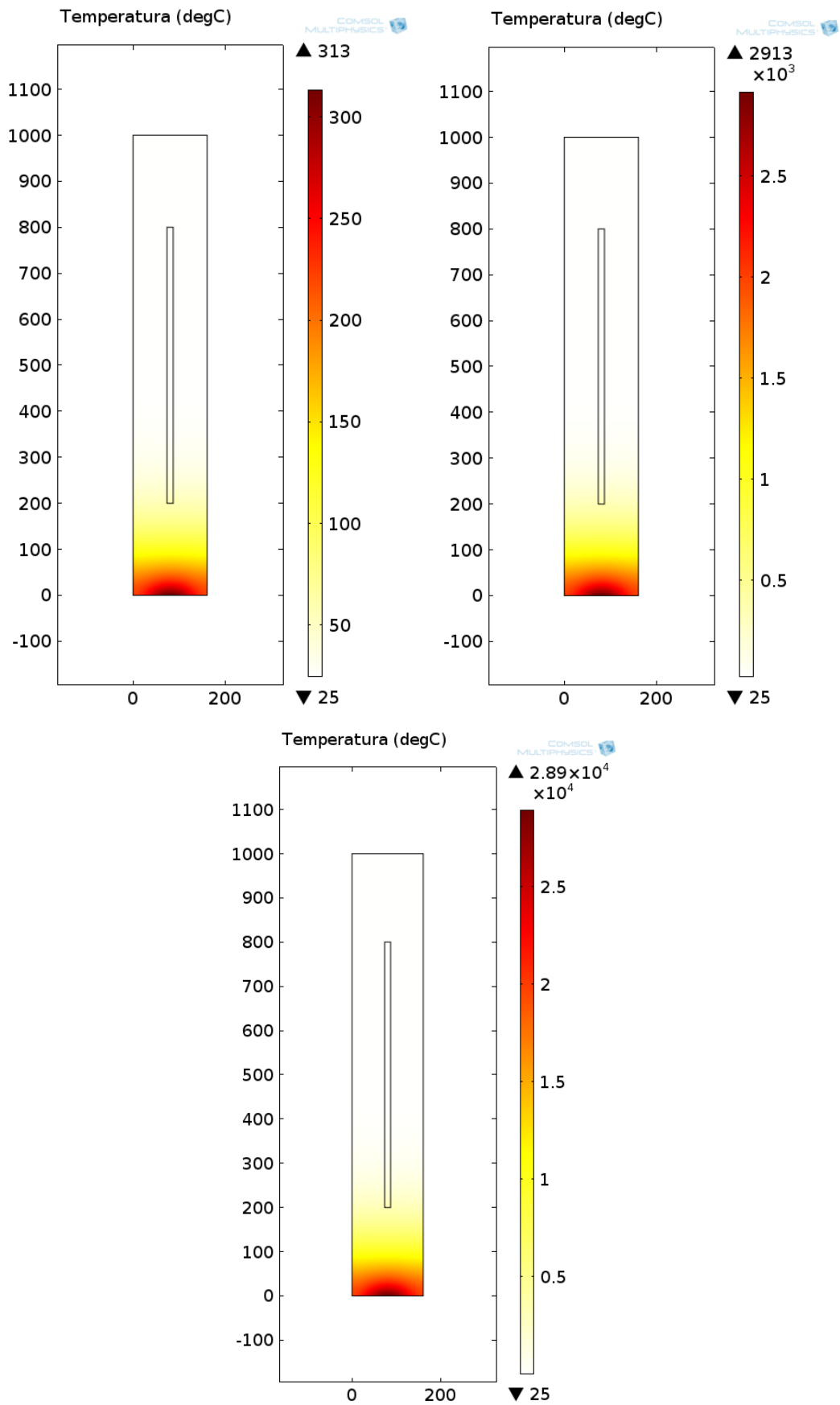
Fonte: Autoria própria.

Comparando as curvas de aquecimento geradas no ponto P5 para cada potência adotada, foi possível observar que o fluxo térmico se comporta de forma não linear. Para alcançar distâncias maiores, é necessária maior potência da fonte de radiação eletromagnética ou maior tempo de exposição do fluido às micro-ondas.

4.1.2 Duto totalmente preenchido por água salobra e um cilindro de óleo.

Tendo realizado as simulações do duto totalmente preenchido por água salobra, o passo seguinte foi simular o modelo contendo 5% de óleo, em forma de cilindro e centralizado. O modelo adotado foi descrito no capítulo anterior, seguindo o segundo diagrama da Figura 3.9. A primeira simulação foi realizada para a potência de 0,1KW. Os gráficos 2D da Figura 4.8, apresentam a propagação térmica gerada no sistema pela fonte de radiação eletromagnética para as três potências adotadas.

Figura 4.8 – Gráficos de propagação térmica para as três potências adotadas.

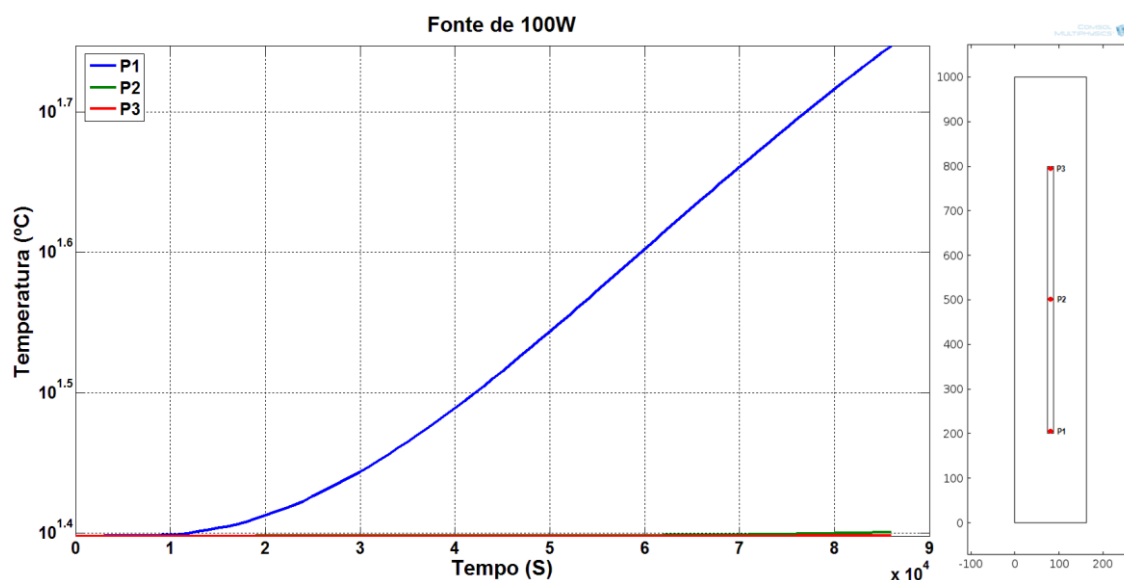


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 4.8, a variação de temperatura é propagada para o óleo por condução térmica. Devido à alta absorção do campo eletromagnético pela água salobra, as características dielétricas do óleo não influenciam na conversão da energia eletromagnética em térmica.

O gráfico da Figura 4.9 apresenta o comportamento da variação de temperatura nos pontos adotados para a potência da fonte de radiação eletromagnética de 0,1KW.

Figura 4.9 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0,1KW.

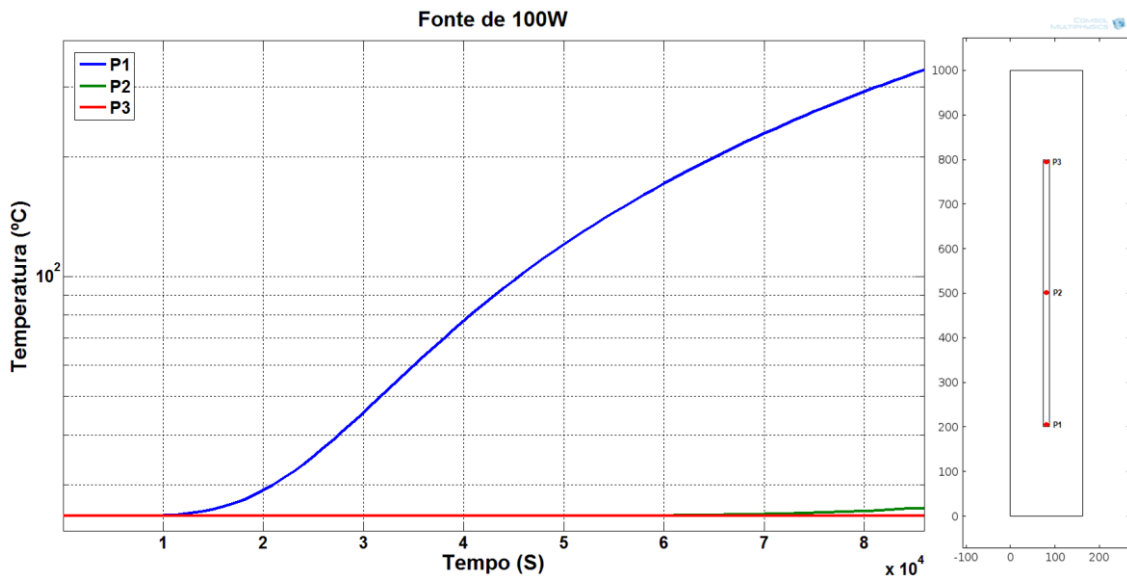


Fonte: Autoria própria.

Segundo o gráfico da Figura 4.9, a variação de temperatura no óleo foi relativamente baixa. O ponto P1 foi o que mais apresentou variação de temperatura ao longo do dia, por estar a 0,2 metros da fonte. O ponto P2 apresentou pouca variação de temperatura no final das 24 horas. Já o ponto P3 praticamente não recebeu aquecimento.

O gráfico da Figura 4.10 apresenta o comportamento da variação de temperatura nos pontos adotados para a potência da fonte de radiação eletromagnética de 1KW.

Figura 4.10 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.

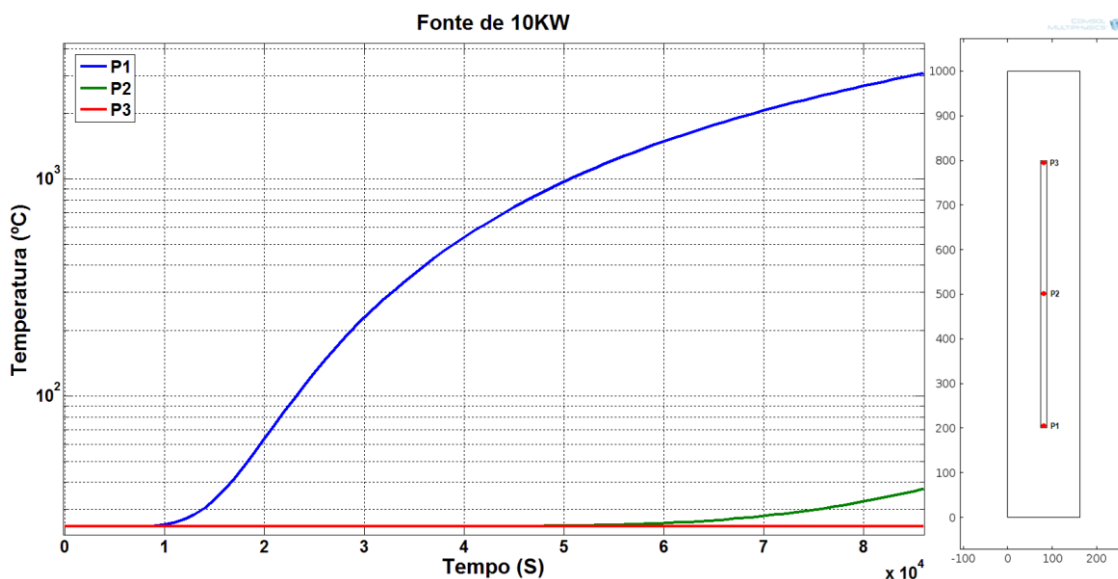


Fonte: Autoria própria.

Comparando os gráficos das Figuras 4.9 e 4.10, foi possível observar um aumento de temperatura considerável no ponto P1 porem. O ponto P2 também apresentou temperatura maior em relação a simulação anterior porem em menor relação se comparados a variação sofrida no ponto P1. O ponto P3 praticamente não sofreu variação de temperatura.

O gráfico da Figura 4.10 apresenta o comportamento da variação de temperatura nos pontos adotados para a potência da fonte de radiação eletromagnética de 10KW.

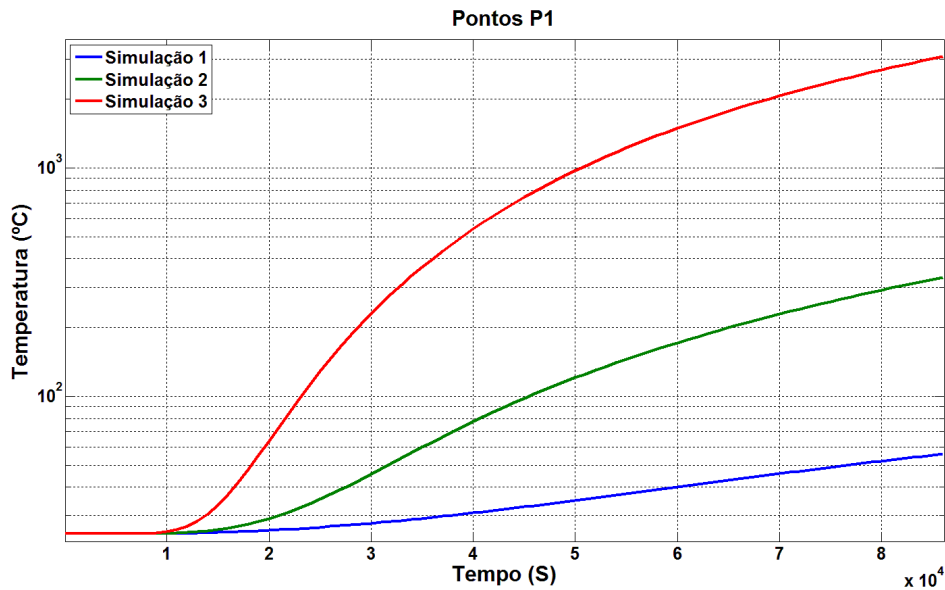
Figura 4.11 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.



Fonte: Autoria própria.

Nesse último gráfico, foi possível observar que a temperatura no ponto próximo a fonte de radiação eletromagnética aumentou consideravelmente em relação as simulações anteriores, porém, o último ponto não apresentou variação. A variação de temperatura no ponto P2 continua sendo muito pouca se comparada aos pontos mais próximos da fonte. Escolhendo o ponto P1 e extraíndo os resultados das simulações, foi possível plotar um gráfico comparativo para cada potência, que pode ser visto na Figura 4.12. Esse gráfico compara os resultados do aquecimento gerado pela fonte de micro-ondas no ponto P1, ao longo do tempo, para as três potencias adotadas. O gráfico foi plotado usando o software Matlab, com escala linear no eixo X e logarítmica no eixo Y.

Figura 4.12 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P1.



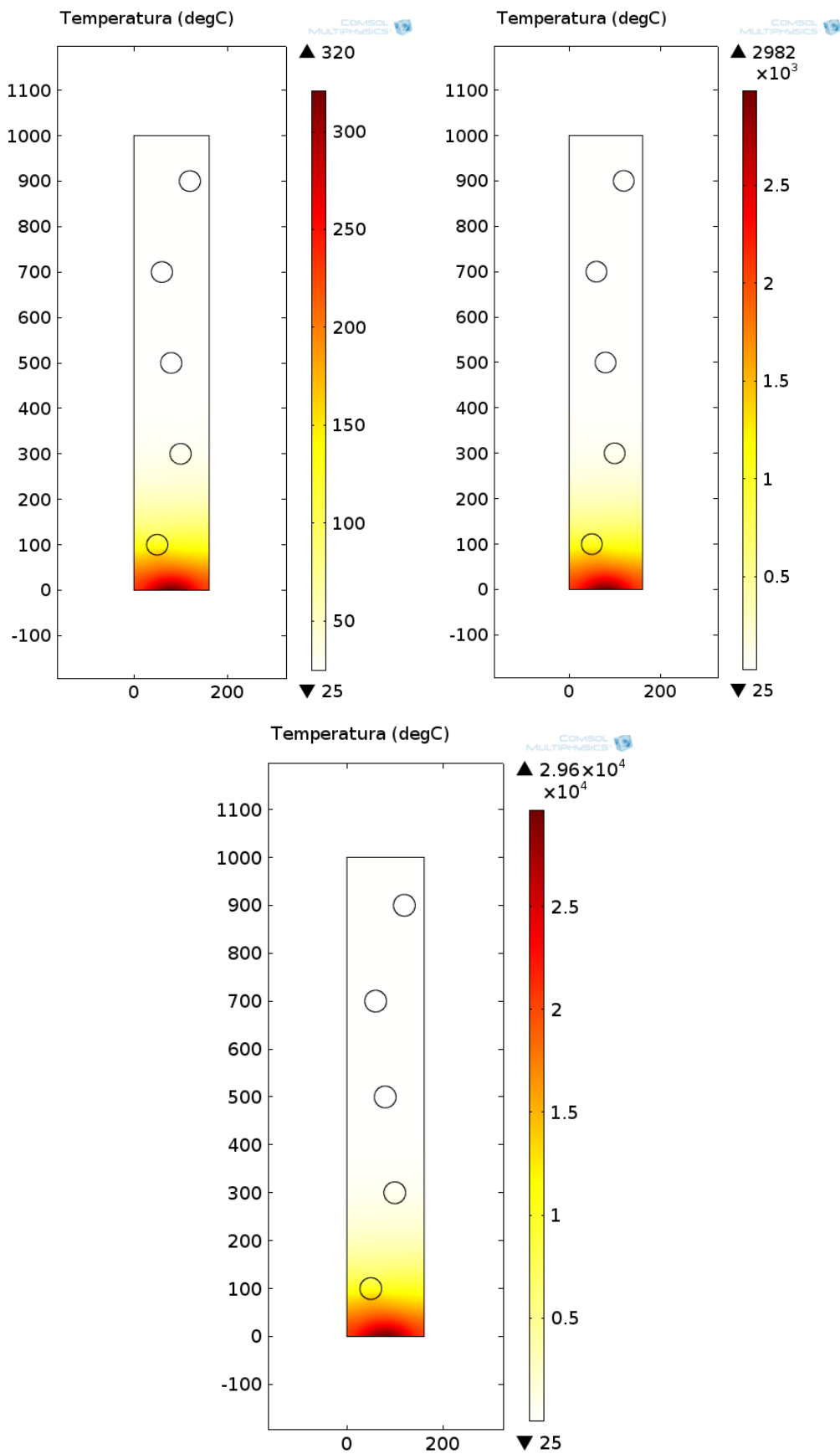
Fonte: Autoria própria.

A propagação térmica se comportou de forma semelhante ao da simulação anterior, mesmo tendo sido obtida as medidas de temperatura no óleo. Como a radiação eletromagnética não alcança o óleo, o aquecimento no mesmo ocorreu devido a transferência térmica por condução entre a água salobra e o óleo.

4.1.3 Duto totalmente preenchido por água salobra e óleo dividido em 5 esferas.

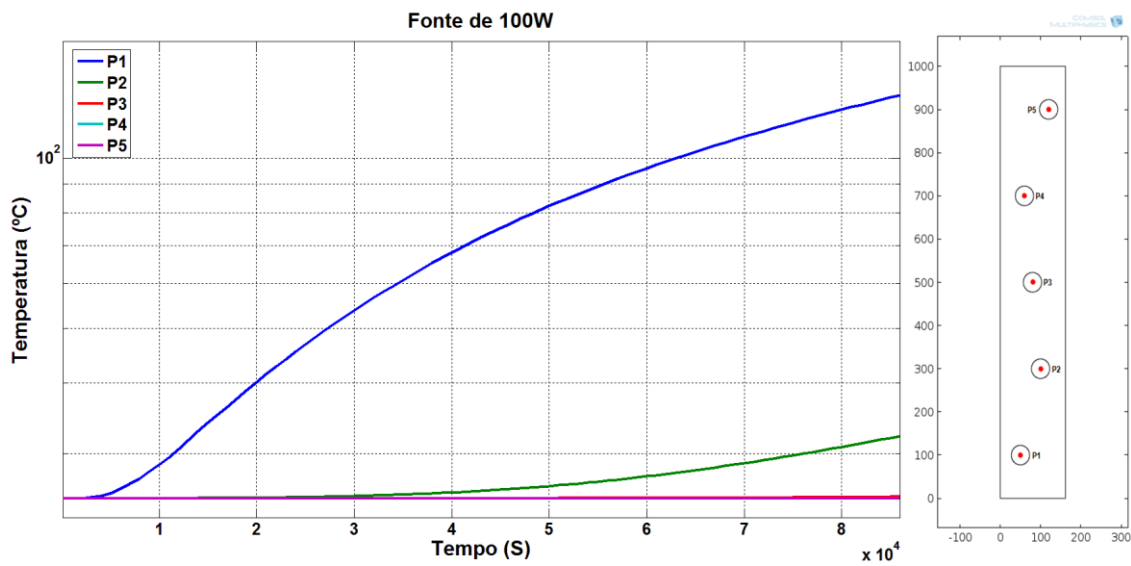
Para essa terceira simulação, o procedimento é o mesmo adotado e já descrito no capítulo anterior, seguindo o terceiro modelo ilustrado na Figura 3.7. Os pontos de leitura da temperatura foram adotados seguindo o terceiro modelo da Figura 3.9. Os resultados obtidos podem ser observados nos gráficos das Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

Figura 4.13 - Gráficos de propagação térmica para as três potências adotadas.



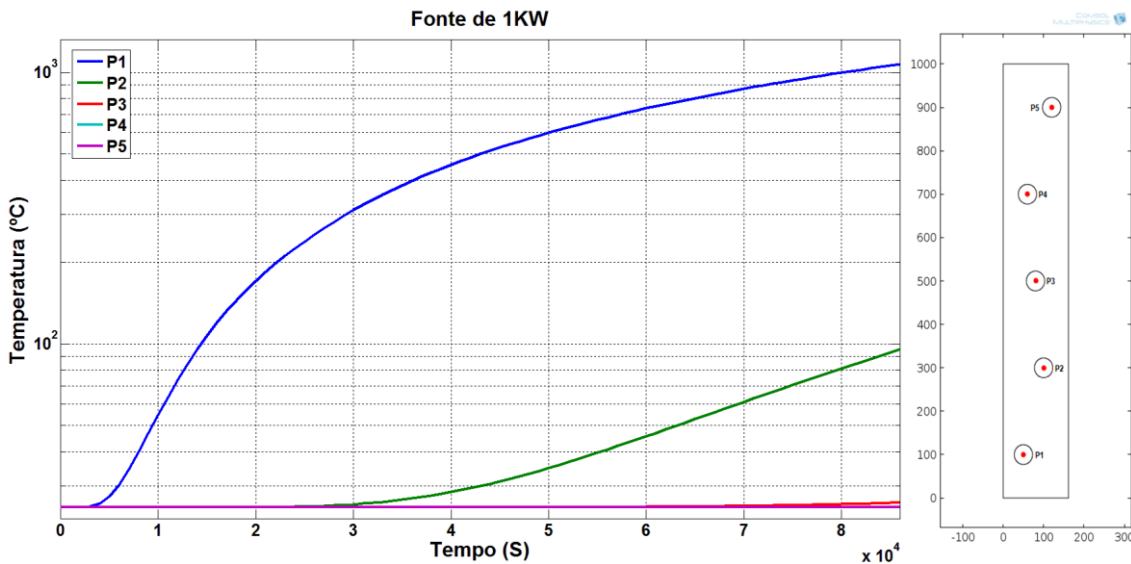
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 0,1KW.



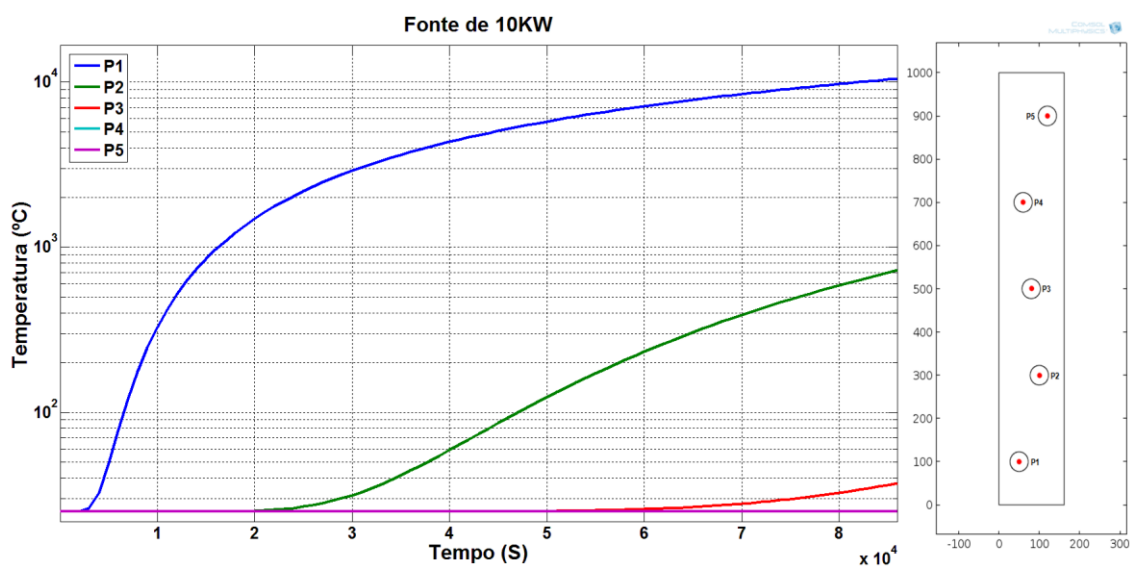
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.15 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 1KW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.16 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo, dividido em esferas e com uma fonte de 10KW.

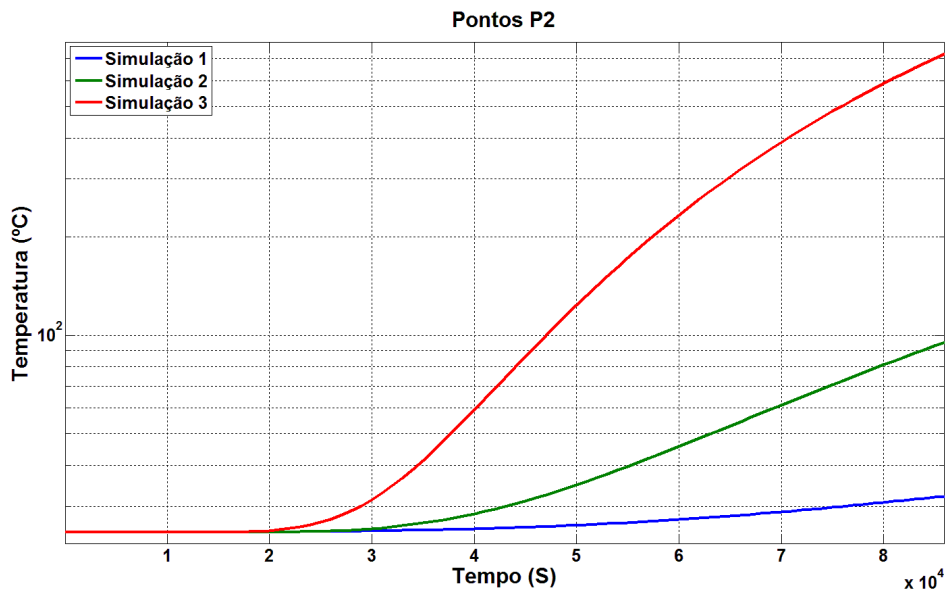


Os gráficos em 2D da Figura 4.13, representam a propagação térmica no fluido para as potências de 0,1KW, 1KW e 10KW respectivamente. Como pode ser observado, mesmo o óleo estando mais disperso, o campo eletromagnético não consegue alcançar o mesmo. A variação de temperatura no óleo ocorre por condução térmica.

Os gráficos das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, representam as curvas de aquecimento térmico ao longo do tempo para as potências de 0,1KW, 1KW e 10KW respectivamente. A distribuição dos pontos de medição seguiu a mesma organização das esferas de óleo adotada para uma aproximação de um sistema real. Os pontos que obtiveram maior variação de temperatura foram P1 e P2 que estão situados próximos a fonte de radiação eletromagnética. Ao observar os gráficos, o ponto P3 apresentou pouca variação de temperatura quando foi aumentada a potência da fonte de micro-ondas. Ele também apresentou comportamento similar aos pontos centrais definidos nas simulações anteriores. Já os pontos P4 e P5, não apresentaram variação térmica ao longo das 24 horas, devido a distância dos mesmos em relação a fonte.

Adotando o ponto P2 e variando a potência da fonte de radiação eletromagnética, foi gerado o gráfico comparativo visto na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P2.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico da figura 4.17 foi plotado no Matlab com os dados extraídos do software de simulação. O comportamento da curva de aquecimento segue o mesmo padrão não linear identificados nas simulações anteriores.

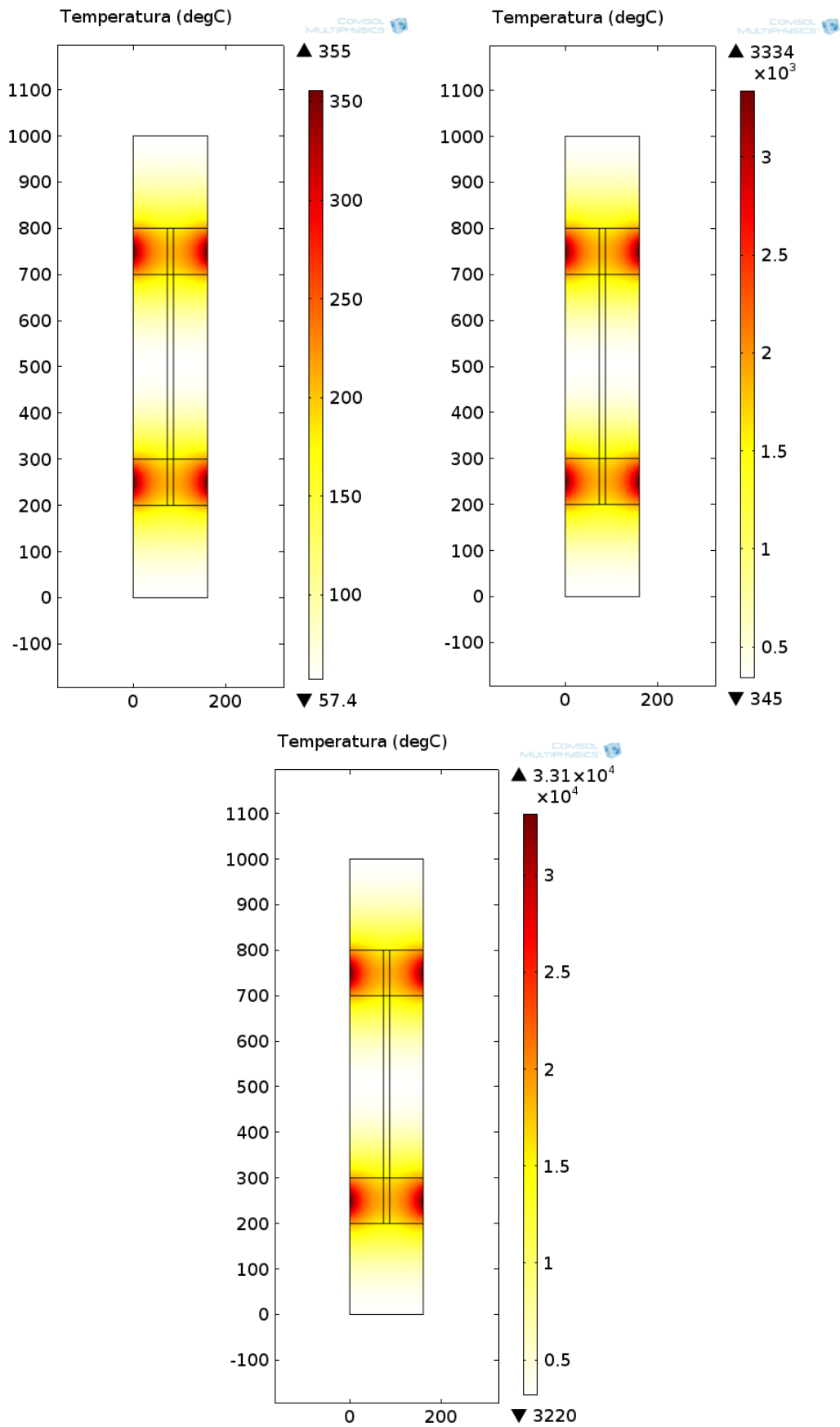
4.2 SIMULAÇÕES COM MULTIPLAS FONTES DE MICROONDAS.

Nessa etapa do trabalho, foi adotado os modelos já descritos no capítulo anterior e ilustrados na Figura 3.8. O intuito dessas simulações é o de estudar o comportamento do aquecimento gerado no fluido composto por água salobra e óleo, usando fontes de radiação eletromagnéticas uniformemente distribuídas.

4.2.1 Duto totalmente preenchido por água salobra e um cilindro de óleo.

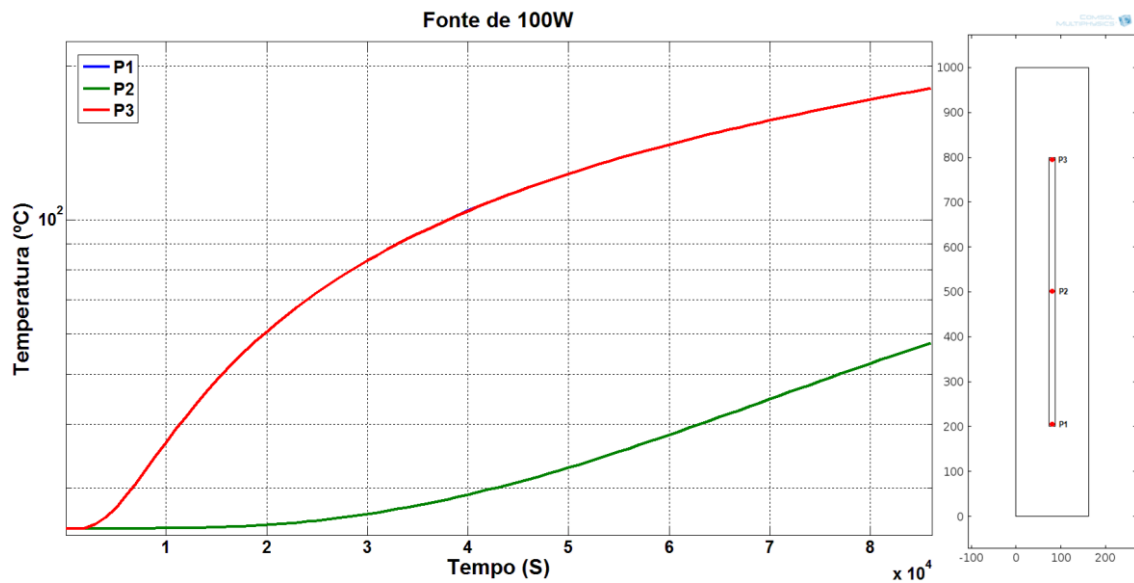
Essa simulação foi baseada no primeiro modelo apresentado na figura 3.8. Os pontos adotados para a medição da temperatura, seguem o sistema da segunda imagem da Figura 3.9. Os resultados foram plotados nos gráficos apresentados nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21.

Figura 4.18 - Gráficos de propagação térmica para as três potências adotadas.



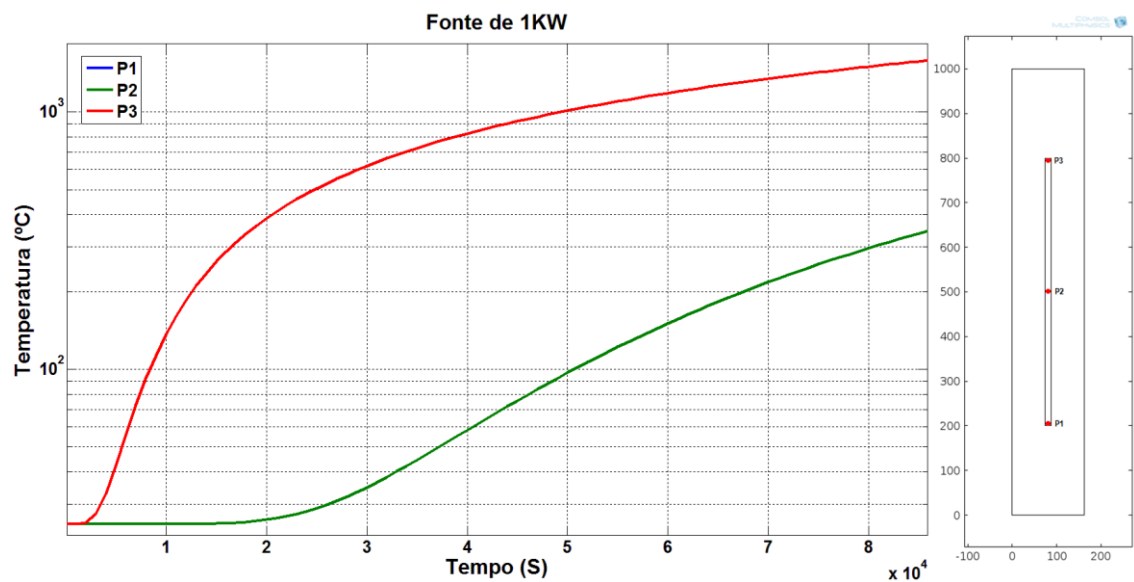
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.19 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0,1KW.



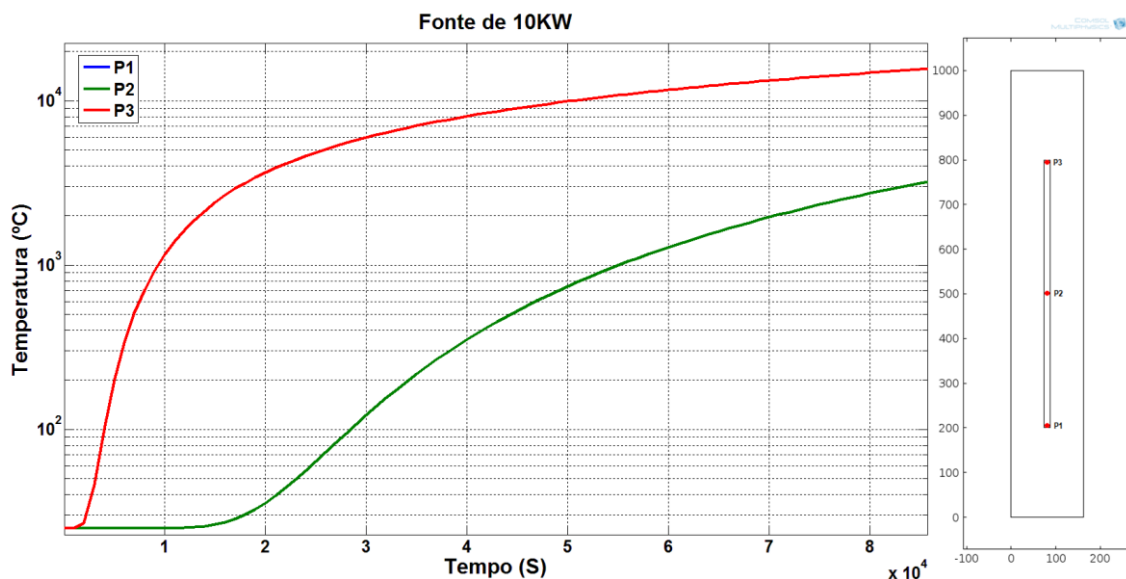
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.20 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.21 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.



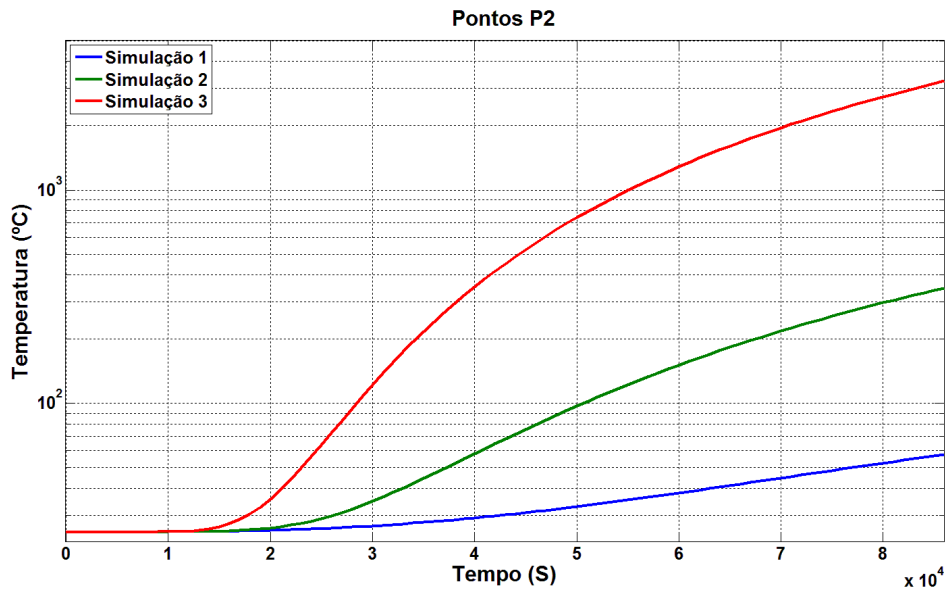
Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser observado no gráfico 2D da Figura 4.18, a propagação térmica é bastante beneficiada pela distribuição de fontes de radiação eletromagnética. O campo eletromagnético, mesmo com fontes distribuídas, não consegue alcançar o óleo. A temperatura continua sendo propagada por condução térmica.

Os gráficos das Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, mostraram curvas sobrepostas para os pontos de medição P1 e P3. Esse fenômeno ocorre por causa da concentração de potência próxima aos pontos, devido a distribuição uniforme das fontes. Todos os três pontos de medição, conseguiram receber boa quantidade de potência ao longo das 24 horas, em todas as três simulações.

Adotando o ponto de medição P3 como base devido o mesmo receber menor quantidade de calor, e variando a potência em 0,1KW, 1KW e 10KW, foi plotado o gráfico comparativo ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P2.



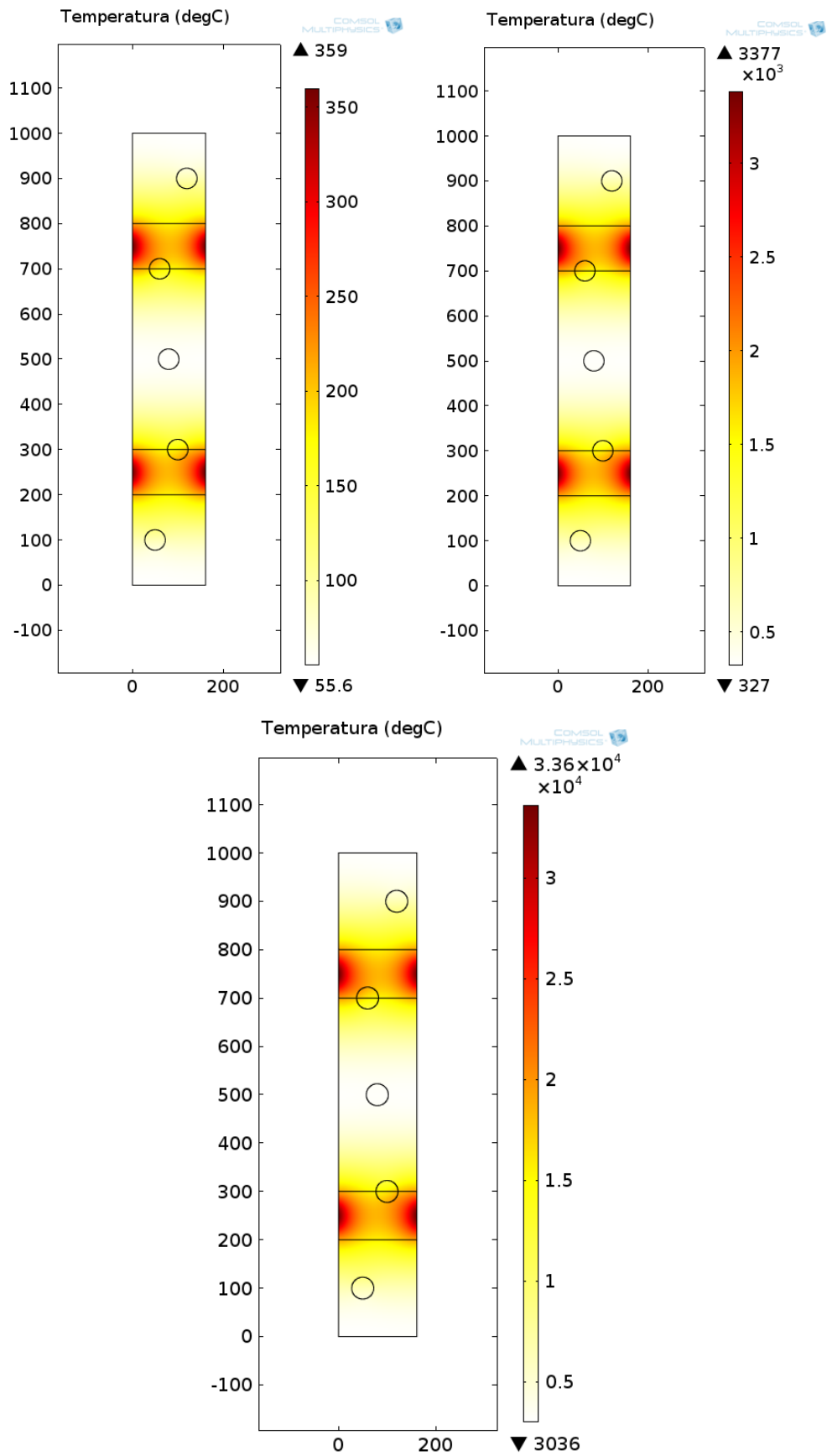
Fonte: Autoria própria.

O gráfico da figura 4.17 foi plotado no Matlab com os dados extraídos do software de simulação. O eixo X representa o tempo em segundos, com escala linear. O eixo Y representa o aquecimento medido no ponto adotado, com escala logarítmica. Os resultados se mostraram semelhantes em relação ao comportamento das simulações anteriores. A curva gerada pelo aquecimento, segue o mesmo padrão não linear identificados nas simulações anteriores.

4.2.2 Duto totalmente preenchido por água salobra e óleo dividido em 5 esferas.

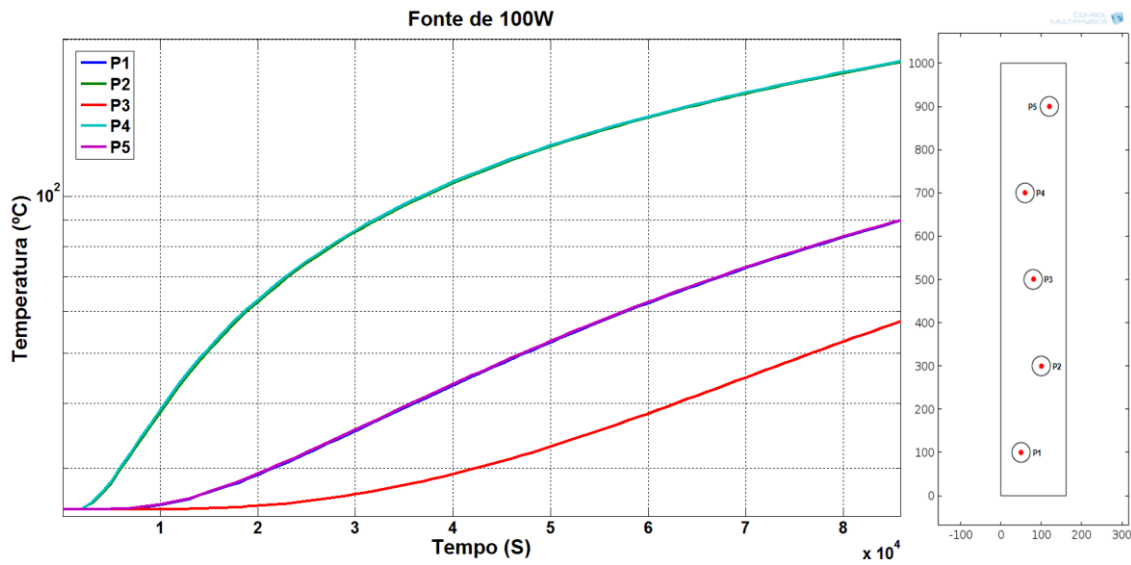
Essa última simulação teve como base, o segundo modelo apresentado na Figura 3.8. O sistema adotado para realizar as medições, seguiu o terceiro modelo apresentado na Figura 3.9. Com os resultados das simulações, foram plotados os gráficos apresentados nas Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26, respectivamente.

Figura 4.23 - Gráficos de propagação térmica para as três potências adotadas.



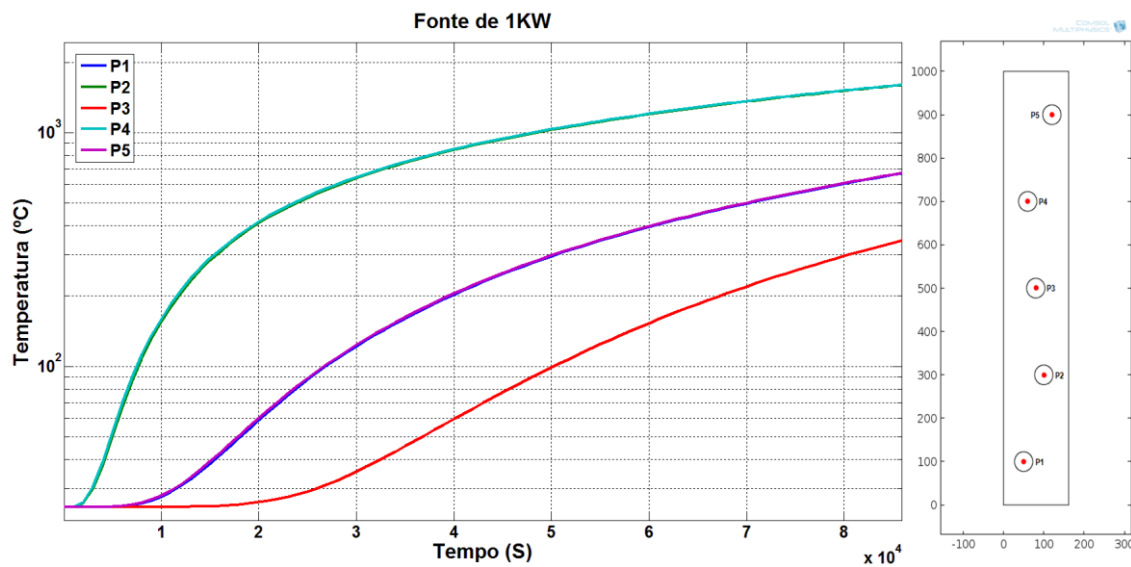
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.24 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 0,1KW.



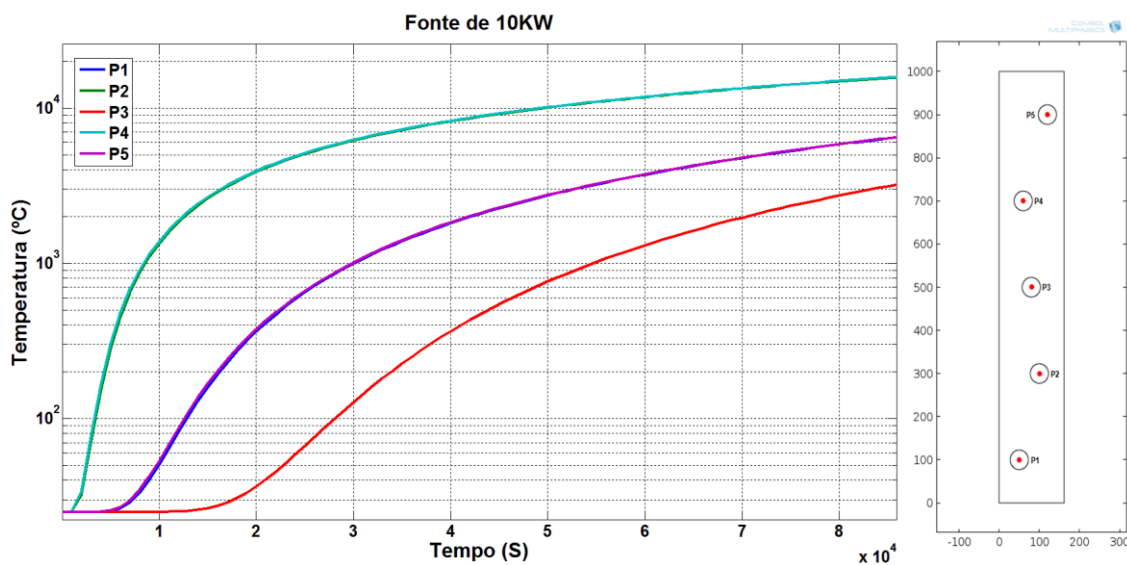
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.25 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 1KW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.26 - Propagação térmica nos pontos adotados para o modelo de duto totalmente preenchido por água salobra, contendo 5% de óleo e com uma fonte de 10KW.



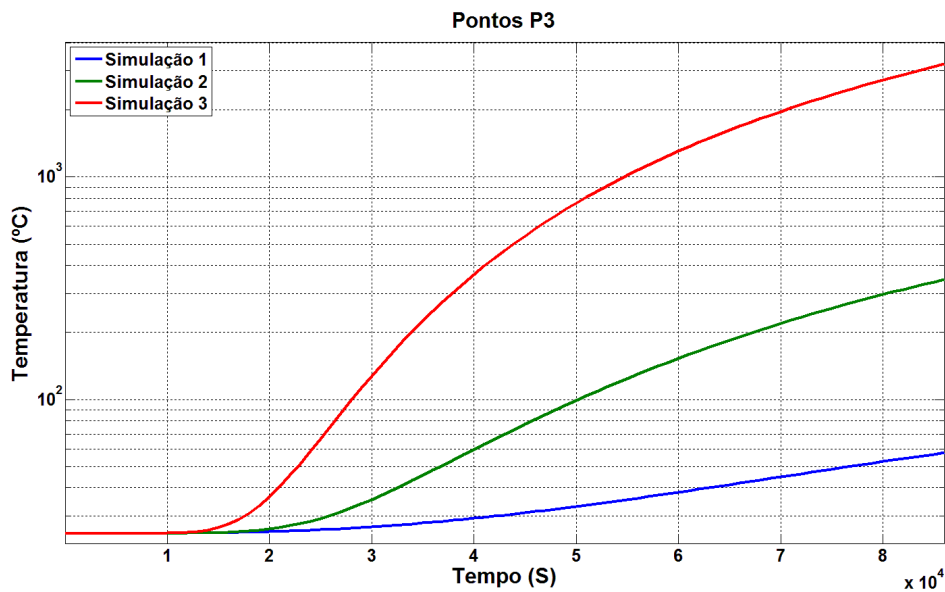
Fonte: Autoria própria.

Os resultados da propagação térmica observados no gráfico 2D da Figura 4.23 se comportam de forma semelhante ao da Figura 4.18 da simulação anterior. Mesmo com a distribuição das fontes e do óleo, o campo eletromagnético não consegue alcançar o mesmo. O aquecimento no óleo ocorre por condução térmica.

Devido a forma de distribuição adotada para as esferas de óleo e o sistema de posicionamento uniforme das antenas, o comportamento da temperatura nos pontos P1 e P5, P2 e P4 são praticamente os mesmos. Os pontos P1 e P5 seguem a mesma curva de aquecimento assim como P2 e P4. O ponto P3 foi o que menos recebeu aquecimento, porém, devido ao sistema de distribuição das fontes, o mesmo conseguiu alcançar uma temperatura elevada, próximo ao dos outros pontos.

Adotando o ponto de medição P3 como base devido o mesmo receber menor quantidade de calor, e variando a potência em 0,1KW, 1KW e 10KW, foi plotado o gráfico comparativo ilustrado na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Gráfico comparativo das temperaturas geradas pelas três potências adotadas no ponto P3.



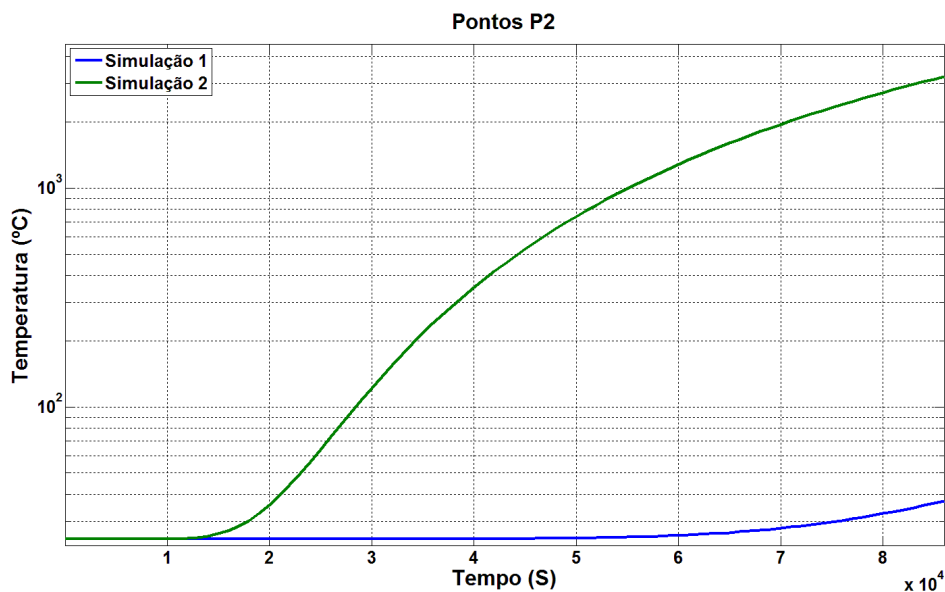
Fonte: Autoria própria.

O gráfico da figura 4.27 foi plotado no Matlab com os dados extraídos do software de simulação. O eixo X representa o tempo em segundos, com escala linear. O eixo Y representa o aquecimento medido no ponto adotado, com escala logarítmica. Os resultados se mostraram semelhantes em relação ao comportamento das simulações anteriores. A curva gerada pelo aquecimento, segue o mesmo padrão não linear identificados nas simulações anteriores.

4.3 COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES.

Nessa etapa do trabalho, foram criados dois gráficos usando os resultados extraídos das simulações anteriores, com o intuito de comparar a eficiência de cada modelo adotado. O primeiro gráfico foi criado adotando os pontos P2 das simulações usando os modelos de uma e múltiplas fontes de micro-ondas. O modelo adotado foi o que usa um cilindro de óleo no centro do duto, correspondendo a 5% do volume total do mesmo. A potência escolhida para criar o gráfico foi 10KW. O resultado foi ilustrado na Figura 4.28.

Figura 4.28 – Gráfico comparativo entre os modelos com uma e múltiplas fontes de micro-ondas.

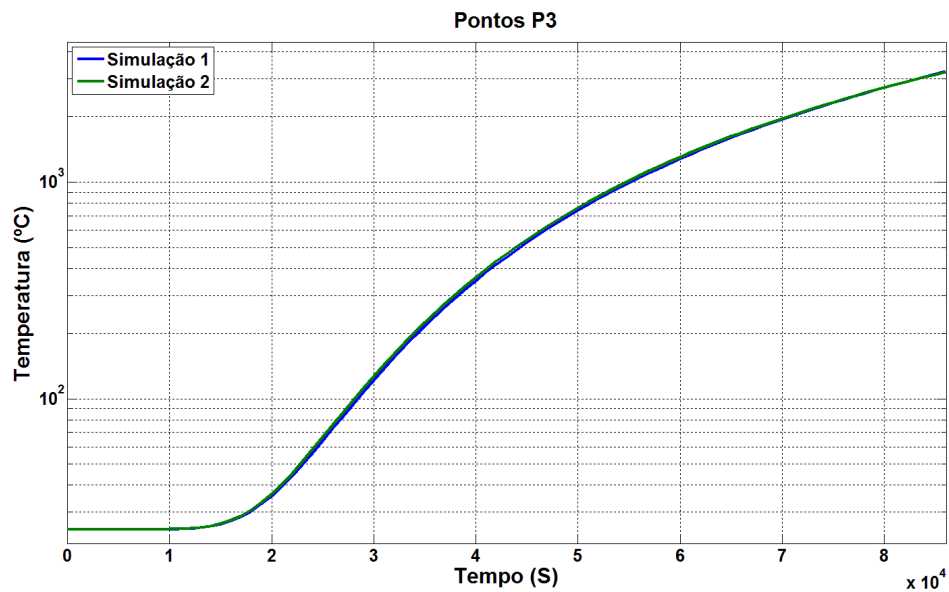


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 4.28, a transmissão de calor até o ponto central P2 do modelo era ineficiente no sistema usando uma fonte de micro-ondas. Já o modelo com múltiplas fontes, apresentou alta performance de aquecimento no mesmo ponto, tornando-o um sistema mais eficiente do ponto de vista térmico.

O segundo gráfico foi gerado usando como base os modelos com um cilindro de óleo no centro do duto e o de múltiplas esferas. Também foi adotado o sistema de múltiplas fontes para ambos os casos. Os pontos de medidas escolhidos foram os centrais, que no caso do primeiro modelo corresponde ao ponto P2 e no segundo, ao P3. A potência adotada para gerar os gráficos foi a de 10KW. O resultado foi ilustrado na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Gráfico comparativo entre os modelos com múltiplas fontes de micro-ondas.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico gerado pelos pontos centrais dos dois últimos modelos simulados, apresentado na Figura 4.29, demonstra o comportamento do aquecimento nos mesmos. Foi possível perceber uma pequena variação no aquecimento do ponto central presente no cilindro em relação ao modelo com esferas de óleo. Foi possível concluir que essa pequena diferença ocorre devido a propagação térmica que foi retardada devido a forma geométrica do óleo, no modelo com um cilindro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os problemas gerados na extração de petróleo parafínico, como o bloqueio parcial ou total do duto, foi desenvolvida a proposta do presente trabalho. Baseando-se no método pouco explorado de aquecimento por micro-ondas, foi desenvolvido um estudo na área de recuperação de campos maduros com o uso de fontes geradoras de ondas eletromagnéticas de alta frequência, com o intuito de elevar a temperatura dos fluidos presentes em um duto de extração. Para isso, foram desenvolvidos modelos usando características de dutos comumente empregados em perfuração de poços e dos fluidos presentes no mesmo, para ser simulados no software multifísico COMSOL.

O COMSOL se mostrou bastante preciso e prático nas simulações, gerando resultados satisfatórios de aquecimento por radiação eletromagnética em alta frequência. Os resultados gerados, mostraram temperaturas bastante elevadas, o que torna o sistema viável para testes práticos. A propagação térmica foi gerada pelo software como se o meio fosse estático, propositalmente devido ao não uso das bibliotecas de física dos fluidos. Esse fenômeno não ocorre num sistema real, pelo fato do mesmo apresentar dinâmica de fluido, e esse fator acarreta em forte influência na propagação da temperatura. As altas temperaturas alcançadas, principalmente próximo a fonte, ocorreram devido ao não uso das bibliotecas de fluidos, onde a água limitaria esse aquecimento em 100 °C. Outro fator que não foi considerado nas simulações, foi a dissipação de calor no meio, que no caso de um duto varia conforme o ambiente em que o mesmo está instalado.

O trabalho contribuiu com uma ideia de sistema de recuperação ainda não explorada. O método que foi adotado pode ser modificado e adaptado para outras formas de aquecimento, como por condução elétrica e indução magnética. Apesar de não apresentar total semelhança com um sistema real, os modelos criados e simulados passam uma ideia de funcionamento da conversão de energia eletromagnética em térmica, que é o foco do trabalho em questão. A simulação realizada se mostrou muito promissora, onde o aquecimento pode reduzir a viscosidade do fluido aumentando a taxa de recuperação e reduzindo o acúmulo de parafina nos dutos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Com os métodos e modelos adotados para a realização deste trabalho, os resultados obtidos e os conhecimentos adquiridos ao longo do mesmo, algumas ideias e melhorias podem ser realizados em trabalhos futuros tanto para o enriquecimento do acervo científico, quanto para a criação de patentes. São essas:

- Desenvolver as simulações dos modelos já descritos no presente trabalho, usando outras frequências.
- Aumentar o tempo de exposição do fluido a radiação eletromagnética.
- Usar as bibliotecas física dos fluidos para se aproximar mais de um sistema real.
- Adicionar todos os componentes presentes em um poço de petróleo, como a areia.
- Fazer um estudo da dissipação térmica dos modelos com o ambiente externo.
- Criar um protótipo para simulações práticas.
- Estudar um sistema de transmissão e distribuição da radiação eletromagnética.
- Usar potencias maiores que 10KW.

6 BIBLIOGRAFIA

BALANIS, Constantine A. Advanced Engineering Electromagnetics. 2. ed. : John Wiley & Sons, 1938. 1042 p.

BEACH, Ca, p. 01-10. 01 maio 2000. Disponível em: <<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/237930.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2015.

BEZERRA, Francisco Carlos. A Classificação do Petróleo. Disponível em: <<http://tecnoilgas.blogspot.com.br/2011/03/classificacao-do-petroleo.html>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

CARRIZALES, Maylin Alejandra. RECOVERY OF STRANDED HEAVY OIL BY ELECTROMAGNETIC HEATING. 2010. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Philosophy, The University Of Texas, Austin, 2010. Cap. 7.

CHUTE, F.S., VERMEULEN, F.E., CERVENAN, M.R., and McVEA, F.J. 1979. Electrical Properties of Athabasca Oil Sands. Can. J Earth Sci. 16, 2009-2021.

CHUTE, F. S.; VERMEULEN, F. E.. Eletromagnetic Technics in the In-Situ Recovery of Heavy Oils. Jornal Of Microwave Power & Electromagnetic Energy. Alberta, p. 15-29. 13 oct. 1982.

COMSOL. Introduction to the RF Module. USA nº 7,519,518; 7,596,474; 7,623,991, 8,457,932, nov. 2013.

COMSOL. RF MODULE USER'S GUIDE. Comsol Multiphysics, 7,519,518; 7,596,474; And 7,623,991, v. , n. 43, p.1-194, maio 2012.

De Oliveira, H.J.M., Barillas, J.L.M., da Mata, W., and Dutra, T.V. 2009. Energetic Optimization to Heavy Oil Recovery by Electromagnetic Resistive Heating (ERH). Paper SS-92-18 presented at the Fourth Petroleum Conference of the South Saskatchewan Section, Regina, 7-9 October.

FONTANA, Eduardo. Guias de Onda. 2013. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap10.htm>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

GOMEZ, Daniel. Algunos Componentes Fundamentales de las Guias de Onda. Disponível em: <<http://dago60.blogspot.com.br/2015/07/blog-post.html>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

HARVEY, HERBERT A., ARNOLD, M. D. Estimation of heat distribution in selective electric reservoir heating, In: JPT, June 1980, pp 965, Trabalho Técnico SPE 7907-PA.

HÅVARD DEVOLD. OIL AND GAS PRODUCTION HANDBOOK: An introduction to oil and gas production. 1.3 Oslo: Abb Atpa Oil And Gas, 2006. 84 p.

LACERDA J. A. Curso de métodos térmicos analíticos. E e P – RNCE/GERET/GEREV-II, Natal, outubro, 2000;

LIAO, Samuel y. Microwave Devices and Circuits. 3. ed. Fresno: Pearson Education, 1996. 542 p.

LJUNGSTRON F. Skifferoliljefragen-Gamla Och Nya Sgnpumker Tekuisk. Tidshrisft. Jan. 1951.

MANICHAND, Renuka Natalie. ANÁLISE DO DESEMPENHO DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO NA RECUPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO. 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

MATA, Wilson da. RECUPERATION ASSISTEE DES PETROLES VISQUEUX PAR ONDES ELECTROMANETIQUES.1993. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Eletronique, L'institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 1993.

MUKENDI, W. M. Modeling and Simulation of Heat Transfer Between Microwaves and a Leachate. Dissertação de Mestrado. University of

Johannesburg. Department of Mechanical Engineering Technology. South Africa, 2006.

OLIVEIRA, Henrique José Mendes de. ESTUDO PARAMÉTRICO DA RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO PESADO POR AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

OSEPCHUK, J. M. Microwave Power Applications. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 50, n. 3, p. 975-985, mar. 2002.

PETROBRAS. MANUAL DE COMPLEMENTAÇÃO IP / ARG. 1 ed. Petrobras, 2007.

PINHO, Pedro Renato Tavares; ROCHA, Armando Carlos Domingues; PEREIRA, José Ferreira da Rocha. PROPAGAÇÃO GUIADA DE ONDAS ELETROMAGNETICAS. Rio de Janeiro: Abdr, 2014. 311 p.

SADIKU, Matthew N. O. Elements of Electromagnetics. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1993. 770 p.

SAHNI, A.; KUMAR, M.; KNAPP, R.b.. Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. Society Of Petroleum Engineers Spe/aapg. Long

SISTEMAS PetroTrace de aquecimento de fundo de poço: serviços em campos petrolíferos. Serviços em campos petrolíferos. 2009. Disponível em: <http://www.pentair.com.br/pentair/_uploads/bp-petrotrace.pdf>. Acesso em: 09 out. 2015.

WIKIPEDIA. ISM Band. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band>. Acesso em: 01 out. 2015.

WIKIPÉDIA (Org.). HFSS. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>>. Acesso em: 26 fev. 2016.