

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Luiz Gustavo Vendrasco Tacin

**Sistema de Comunicação para Robôs Esféricos de Inspeção:
Análise e Avaliação de Performance em Tubulações via
Simulação**

São Carlos
2025

Luiz Gustavo Vendrasco Tacin

**Sistema de Comunicação para Robôs Esféricos de Inspeção:
Análise e Avaliação de Performance em Tubulações via
Simulação**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Becker

São Carlos

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

T118s Tacin, Luiz Gustavo Vendrasco
 Sistema de Comunicação para Robôs Esféricos de
Inspeção: Análise e Avaliação de Performance em
Tubulações via Simulação / Luiz Gustavo Vendrasco
Tacin; orientador Marcelo Becker. São Carlos, 2025.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

 1. Comunicação. 2. Robôs. 3. Esféricos. 4.
Antenas. 5. Tubulações. 6. Simulação. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Luiz Gustavo Vendrasco Tacin

Título: "Sistema de Comunicação para Robôs Esféricos de Inspeção: Análise e Avaliação de Performance em Tubulações via Simulação"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 26/06/2025,

com NOTA 9,0 (NINE, ZERO), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Associado Marcelo Becker - Orientador - SEM/EESC/USP

Prof. Associado Daniel Varela Magalhães - IFSC/USP

Prof. Dr. Vinicius Marrara Pepino - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

RESUMO

Tacin, L. G. V. **Sistema de Comunicação para Robôs Esféricos de Inspeção: Análise e Avaliação de Performance em Tubulações via Simulação.** 2025. 68p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

A utilização de tubulações, galerias e outras formas de conexão exercem função logística primordial no transporte de fluídos em longas distâncias. Por exercerem função essencial, a manutenção e a inspeção destas estruturas também devem ser rigorosas para garantir operabilidade ininterrupta. A robótica pode oferecer instrumentos para a realização de tais tarefas por apresentarem mobilidade e versatilidade para a coleta de dados. Por este motivo, o LabRoM, Laboratório de Robótica Móvel, propõe a utilização dos *RollerBots*, robôs esféricos de inspeção, para as atividades de inspeção internas de tubulações. Este projeto tem como objetivo a validação e avaliação de desempenho para estabelecer limitações e restrições de operação dos robôs nas atividades propostas. Para isto, este trabalho propõe o estudo do comportamento dos sinais de comunicação entre os *RollerBots* e o operador remoto via simulação, a análise técnica do hardware de comunicação, com destaque para as antenas, e, por fim, a análise comparativa entre os diferentes cenários de operação em tubulações estudadas.

Palavras-chave: Comunicação, Robôs, Esféricos, Antenas, Tubulações, Simulação

ABSTRACT

Tacin, L. G. V. **Communication System for Spherical Inspection Robots: Performance Analysis and Evaluation via Simulation in Pipeline Environments.** 2025. 68p. Monograph (Undergraduate Thesis) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

The use of pipelines, galleries, and other types of connections plays a fundamental logistical function in transporting fluids over long distances. Due to this essential function, the maintenance and inspection of these structures must also be rigorous to ensure uninterrupted operation. Robotics can provide tools for performing such tasks, offering mobility and versatility for data collection. For this reason, the Mobile Robotics Laboratory (LabRoM) proposes the use of RollerBots, spherical inspection robots, or internal pipeline inspection activities. This project is focused on validating and evaluating the performance of these robots, aiming to define operational limits and constraints for the proposed tasks. For this purpose, the study focuses on analyzing the behavior of communication signals between the RollerBots and the remote operator through simulation, performing a technical assessment of the communication hardware, especially the antennas, and conducting a comparative analysis of different operational scenarios in the pipelines under study.

Keywords: Communication, Robots, Spherical, Antennas, Pipelines, Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Infraestrutura de gasodutos de transporte no Brasil.....	17
Figura 2: Espectro Eletromagnético com destaque a ondas de rádio e microondas.....	21
Figura 3: Exemplo - Antena Omnidirecional.....	22
Figura 4: Diagrama de radiação - Antenas Omnidirecionais.....	22
Figura 5: Exemplo - Antena Direcional.....	23
Figura 6: Diagrama de radiação - Antena Direcional.....	23
Figura 7: Incidência de ondas - meio 1 para meio 2.....	24
Figura 8: Ondas eletromagnéticas confinadas no ar ao longo da tubulação.....	25
Figura 9: Mapa - Gasoduto Brasil-Bolívia.....	28
Figura 10: Referência - Medições com VNA.....	29
Figura 11: Referência - Atenuação ao longo das tubulações retas e curva.....	29
Figura 12: Imagem - RB23 e RB40 RollerBot.....	31
Figura 13: Controle remoto - SIYI MK32 com antena direcional de longo alcance.....	32
Figura 14: wave ports configuradas - Tubulação cilíndrica de 30cm em aço carbono.....	36
Figura 15: Configuração da potência de cada modo propagante.....	36
Figura 16: Configuração do setup de simulação.....	37
Figura 17: Exemplo - Iterações realizadas em simulação.....	38
Figura 18: Atenuação e alcance - Tubulações retangulares retas.....	49
Figura 19: Atenuação e alcance - Tubulações cilíndricas retas.....	49
Figura 20: Atenuação e alcance - Tubulações retangulares retas.....	50
Figura 21: Atenuação e alcance - Tubulações cilíndricas retas.....	50
Figura 22: Atenuação - Tubulações de 30 cm retangulares e cilíndricas retas.....	51
Figura 23: Atenuação - Tubulações de 50 cm retangulares e cilíndricas retas.....	51
Figura 24: Alcances de operação calculados.....	52
Figura 25: Decaimento da potência em tubulação reta, com 1 e 2 curvaturas.....	53
Figura 26: Modos de propagação simulados nas tubulações retangulares retas.....	61
Figura 27: Modos de propagação simulados nas tubulações cilíndricas retas.....	62
Figura 28: Modos de propagação simulados nas tubulações retangulares curvas.....	63
Figura 29: Modos de propagação simulados nas tubulações cilíndricas curvas.....	64
Figura 30: Campo elétricos nas tubulações retangulares retas.....	66
Figura 31: Campo elétricos nas tubulações retangulares curvas.....	68
Figura 32: Campo elétricos nas tubulações cilíndricas curvas.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo - robôs cabeados e robôs sem fio.....	18
Tabela 2: Especificações - Controle remoto SYIY MK32.....	33
Tabela 3: Especificações - Antena direcional de longo alcance.....	33
Tabela 4: Especificações - Antena omnidirecional.....	34
Tabela 5: Especificações - Módulo de recepção Quectel RM500Q-AE.....	34
Tabela 6: Dimensões aplicadas - tubulações retangulares e cilíndrica.....	35
Tabela 7: Simulações executadas.....	35
Tabela 8: Sensibilidade - LTE-TDD Quectel RM500Q-AE.....	41
Tabela 9: Resultados - S21 para Tubulações retas.....	42
Tabela 10: Resultados - S21 para Tubulações curvas.....	44
Tabela 11: Atenuações médias - tubulações retas.....	45
Tabela 12: Atenuações médias - tubulações curvas.....	46
Tabela 13: Alcance - tubulações retas.....	47
Tabela 14: Alcance - tubulações com 1 curva.....	48
Tabela 15: Alcance - tubulações com 2 curvas.....	48
Tabela 16: Especificações elétricas e magnéticas dos materiais.....	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Motivação.....	18
1.2. Objetivos.....	19
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	21
2.1. Antenas.....	21
2.2. Propagação de Ondas em Tubulações.....	24
2.3. Perdas e Atenuações em Guias de Ondas.....	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1. Tubulações.....	27
3.2. Comunicação de robôs em tubulações.....	28
4. RECURSOS UTILIZADOS.....	31
4.1. Plataforma robótica - RollerBots.....	31
4.2. Controle remoto e Antena transmissora.....	32
4.3. Ambientes de simulação.....	32
5. DESENVOLVIMENTO.....	33
5.1. Listagem das especificações do hardware de comunicação.....	33
5.2. Simulação das tubulações - ANSYS HFSS.....	34
5.2.1. Modos de propagação.....	38
5.2.2. Parâmetro S.....	39
5.3. Estimativa de alcance nas tubulações.....	39
6. RESULTADOS.....	42
6.1. Desenvolvimento das simulações.....	42
6.2. Resultados de simulações.....	42
6.3. Cálculo do alcance máximo.....	45
6.4. Compilação de resultados e discussão.....	49
6.4.1. Comparação entre os materiais das tubulações.....	49
6.4.2. Comparação entre os diâmetros das tubulações.....	50
6.4.3. Comparação entre tubulações retas e curvas.....	51
6.4.4. Limites de operação dos RollerBots.....	51
7. CONCLUSÕES.....	54
8. CONTINUIDADE DO PROJETO.....	55
9. BIBLIOGRAFIA.....	56
APÊNDICE.....	60
A. Especificações do materiais.....	60
B. Modos de propagação simulados.....	61
C. Propagação de ondas nas tubulações em 5.8GHz.....	65

1. INTRODUÇÃO

Tubulações, galerias e outros sistemas de conexão exercem papel fundamental na indústria: transporte. Com estas estruturas, é possível atravessar distâncias multi-quilométricas para suprir demandas de água, combustíveis, óleos, gases, entre mais exemplos.

No Brasil, as tubulações cumprem um papel logístico importante, possibilitando a interligação interestadual, conectando portos, centros químicos de processamento e indústrias. A Figura 1 apresenta o mapa de gasodutos de transporte existentes, em construção, em avaliação e estudados no Brasil.

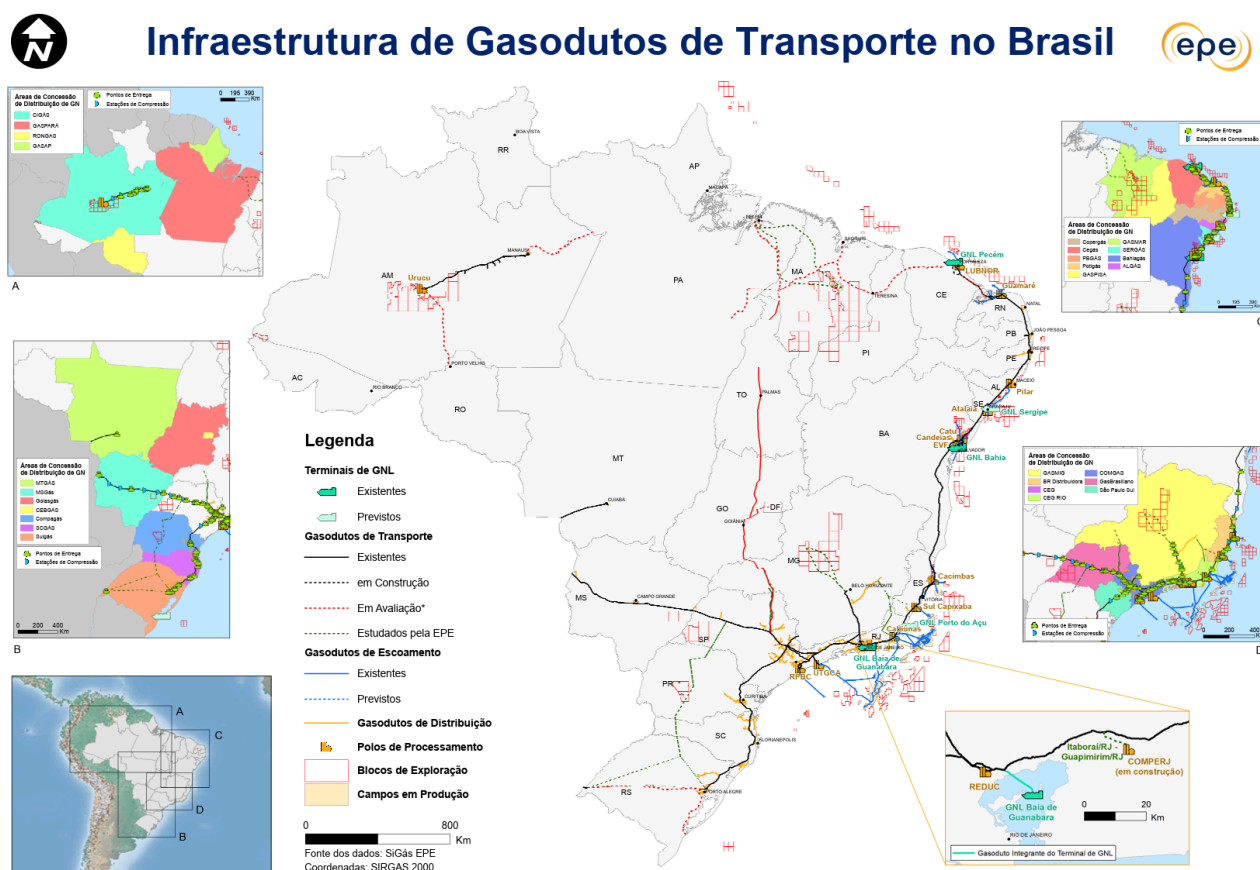


Figura 1: Infraestrutura de gasodutos de transporte no Brasil

Fonte: Retirado de (EPE, 2019).

Com tamanha extensão de tubulações, soluções de inspeção são altamente requisitadas para suprir demandas de mobilidade, de versatilidade e de coleta de dados. As adversidades as quais as tubulações estão submetidas, desde as condições ambientais variadas, como solo e clima, que os biomas brasileiros apresentam, ou as condições

internas à estas estruturas, como pressão, temperatura e umidade, além das exigências ecológicas de seguranças, fazem com que as inspeções e as manutenções sejam recorrentes e rigorosas.

1.1. Motivação

A aplicação da robótica em tarefas de inspeção e manutenção preditiva cumpre com uma demanda crescente de métodos eficientes e versáteis para atender adversidades de acesso e operabilidade. Particularmente, o acesso a tubulações requer soluções móveis capazes de acessar espaços estreitos e distantes e, além disso, apresentar mecanismos capazes de transmitir os dados coletados.

Especialmente devido às dimensões estreitas internas de tubulações, a robótica cumpre papel diferencial no que tange a realização de inspeções e coleta de dados, sendo capaz de oferecer a mobilidade e operabilidade requeridas para execução de tais tarefas. No entanto, as soluções robóticas possíveis possuem limitações de hardware, tanto por requerer soluções altamente móveis, como por compatibilidade física entre as demandas funcionais, o hardware capaz de executar tais funções e a bateria necessária para alimentação do sistema.

Uma alternativa viável é a utilização de comunicação sem fio entre a plataforma de inspeção e o controlador. Uma vez adotada tal alternativa, elimina-se a necessidade de hardware robusto capaz de exercer esforço mecânico para suportar a massa extra de cabos e, junto a isto, reduzir a demanda energética do sistema, o que levaria a uma redução da bateria, possibilitando uma diminuição física dos robôs e viabilizando a operação em espaços estreitos. Além disso, o fator mobilidade é destaque em uma plataforma robótica sem fio, dada as restrições físicas de arrasto em tubulações úmidas ou não retilíneas com as quais os cabos possam contribuir.

Abaixo, enumera-se o comparativo entre robôs cabeados e sem fio na operação em tubulação.

Tabela 1: Comparativo - robôs cabeados e robôs sem fio

	Robôs cabeados	Robôs sem fio
Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• Transmissão de dados e comandos sem risco de interferência	<ul style="list-style-type: none">• Solução altamente móvel• Redução de <i>payload</i>• Menor demanda energética• Permite a construção de robôs menores

	Robôs cabeados	Robôs sem fio
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Solução com mobilidade reduzida devido a arrasto do cabo e curvas na tubulação • Incremento do payload em hardware capazes de suportar os cabos • Maior demanda energética • Robôs maiores 	<ul style="list-style-type: none"> • Suscetível a interferência

Sob este contexto, o LabRoM, Laboratório de Robótica Móvel, propõe a utilização de robôs esféricos controlados remotamente, os *RollerBots*, para a realização das atividades de inspeção à infraestrutura. A utilização de robôs esféricos representa uma solução versátil de mobilidade em tubulações, o que, aliado a um sistema de comunicação de alta velocidade, permitirá a transmissão de dados e vídeo em tempo real, possibilitando monitoramento rápido e a tomada de decisão mais ágil.

Este projeto buscará realizar o estudo técnico do sistema de comunicação presente nos robôs esféricos de inspeção, com a observação das características operacionais do hardware e com a execução de atividades avaliativas de desempenho e confiabilidade nas condições de operação interna à tubulações para validar o uso dos *RollerBots*.

1.2. Objetivos

Dado a necessidade crescente dos aprimoramentos necessários nos métodos de manutenção preventiva, o objetivo deste projeto é avaliar o possível uso dos *RollerBots* na operação interna às tubulações e estimar restrições e limitações desta plataforma quando submetida à utilização proposta.

A validação do robô de inspeção acontecerá, inicialmente, por meio da listagem do hardware do sistema de comunicação disponível nas plataformas com especificações técnicas relevantes. Além disso, o estudo do comportamento dos sinais de comunicação entre o robô e o operador, quando transmitidos internamente às tubulações, deve ser realizado a fim de estabelecer comparativos entre os tipos de tubulações propostos e estimar atenuações geradas. Por fim, pode-se estimar o alcance de operação máximo, de forma que haja a transmissão garantida de dados com as devidas análises cabíveis.

Abaixo, enumeram-se as atividades previstas.

- Listagem das especificações do hardware de comunicação dos *RollerBots* e do controle remoto;
- Análise das tubulações via simulação, utilizando o ANSYS HFSS.
- Análise comparativa entre tubulações pelos resultados obtidos via simulação;
- Avaliação da operabilidade dos *RollerBots* nas tubulações pelas especificações do hardware de comunicação e pelos resultados da simulação;
- Compilação de resultados para estabelecer limitações operacionais.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Antenas

Antenas são dispositivos utilizados em telecomunicações para conversão de uma corrente elétrica em ondas eletromagnéticas e vice-versa. Elas são utilizadas para transmitir e receber campos EM não-ionizantes, principalmente ondas de rádio e microondas (SHELDON, 2023). Faixas de ondas de rádio e microondas são destacadas na Figura 2.

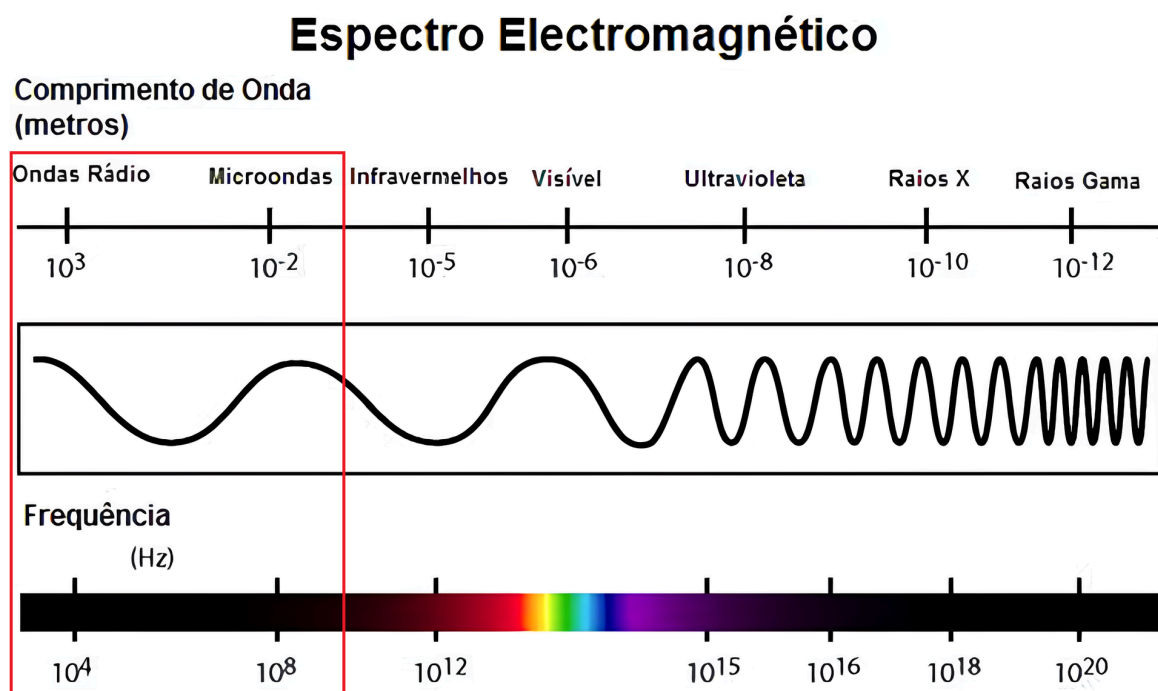


Figura 2: Espectro Eletromagnético com destaque a ondas de rádio e microondas

Fonte: Retirado de (FILHO et al., s.d.)

Destacam-se os seguintes parâmetros importantes de uma antena: largura de faixa de frequência, diretividade e ganho.

A largura de faixa de frequência é o intervalo de frequência onde há operação adequada pela antena. A largura de faixa de frequência é um parâmetro indicado em *datasheets* para uso correto em conjunto com o receptor elétrico apropriado. Além disso, as frequências compatíveis com a antena dependem de adequação com o sistema elétrico em conjunto. Para apresentar operação ótima da antena e sistema elétrico, utiliza-se o parâmetro ROE, Relação de Onda Estacionária. Quanto menor o ROE para determinada frequência, melhor aplicada será a antena.

Diretividade se refere a capacidade de uma antena para enviar ou receber sinais ao longo do espaço ao redor (MARTINS, 2016).

Antenas omnidirecionais operam em todas as direções, representando varredura de 360° ao redor da estrutura. Um caso típico de antenas direcionais são retas presentes em roteadores Wi-Fi, como mostrado na Figura 2. Estas antenas tem como objetivo a cobertura espacial completa para cobertura de sinal.



Figura 3: Exemplo - Antena Omnidirecional

Abaixo, na Figura 4, é apresentado um diagrama de radiação 3D de antenas omnidirecionais deste tipo, de forma que a máxima amplitude de campo é obtida perpendicularmente à antena, enquanto há ausência de sinal no eixo de posição da antena.

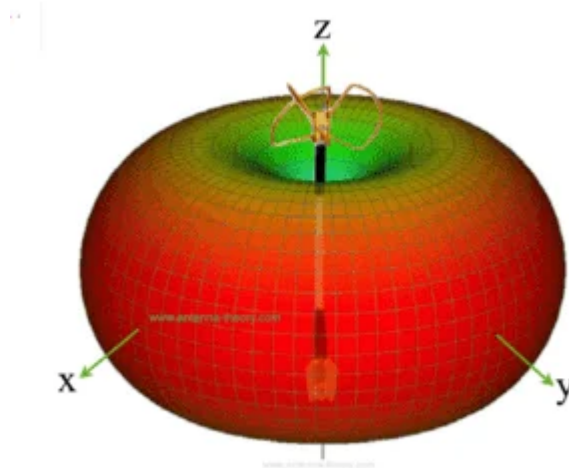


Figura 4: Diagrama de radiação - Antenas Omnidirecionais

Fonte: Retirado de (STROSKI, 2018)

Já as antenas direcionais possuem construção que focalizam a transmissão e recepção de sinais focalizam em direção específica, mas com maior eficiência (CISCO, 2007). Antenas direcionais podem alcançar alcances muito maiores que antenas omnidirecionais, sendo próprias para aplicações de longo alcance.

Antenas helicoidais, usadas em comunicações via satélite, HF e VHF, são exemplo de antenas direcionais (STROSKI, 2018). Uma antena helicoidal é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Exemplo - Antena Direcional

Abaixo, na Figura 6, é apresentado um diagrama de radiação 3D de antenas direcionais helicoidais, de forma que a máxima amplitude do campo é obtido no eixo ao longo do eixo de apontamento da antena e conforme o ângulo de abertura.

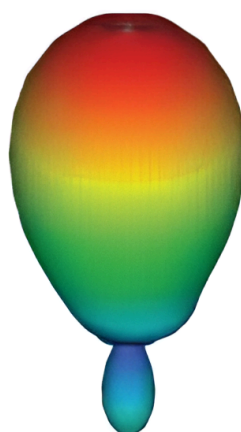


Figura 6: Diagrama de radiação - Antena Direcional

Fonte: Retirado de (STROSKI, 2018)

O ganho de uma antena, expresso em dBi em relação a uma antena isotrópica, é um parâmetro que quantifica a capacidade da antena de concentrar a potência irradiada em uma direção específica. A antena isotrópica, por sua vez, é um modelo teórico que irradia uniformemente em todas as direções do espaço tridimensional, servindo como referência. O valor em dBi corresponde à razão, entre a densidade de potência irradiada pela antena real em determinada direção e a densidade de potência da antena isotrópica. Ganho positivo em dBi indica que a antena analisada irradia mais energia naquela direção específica do que o modelo isotrópico (MARTINS, 2016).

2.2. Propagação de Ondas em Tubulações

A comunicação entre robôs quando operados em tubulações e controladores remotos são estudados levando em consideração modos de propagação de ondas, tal como em guias de ondas. (MIZUKAMI et al., 2023).

Em guias de onda, a incidência de ondas eletromagnéticas sobre a abertura fará com que estas sejam transmitidas e/ou refletidas. Para visualização, mostra-se, na Figura 7, um feixe de onda, ilustrada em vermelho, propagante no meio 1 e em incidência no meio 2 com os respectivos índices de refração dos materiais e ângulos de incidência e transmissão. Neste projeto, os sinais emitidos pelo controle remoto serão propagados por meio de múltiplas incidências na superfície da tubulação até o encontro com o robô.

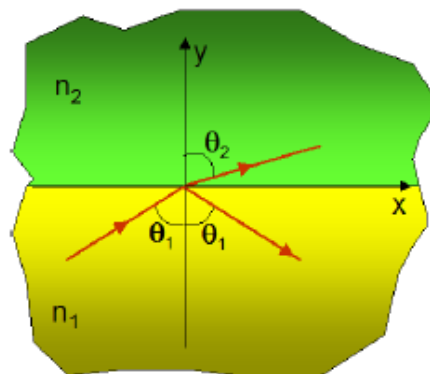


Figura 7: Incidência de ondas - meio 1 para meio 2

Fonte: Retirado de (BORGES, 2003)

Em um estudo de guias de ondas, múltiplos feixes de ondas alcançarão a abertura da tubulação, vindas do ar - meio 1-, com diferentes ângulos de incidência. As diferentes formas que estes múltiplos feixes alcançarão a abertura farão com que padrões de propagação sejam formados dentro do guia de onda. Estes padrões são conhecidos como modos de propagação.

Os feixes poderão ser totalmente transmitidos, parcialmente transmitidos ou totalmente refletidos. Em casos em que há alguma transmissão, parte da energia do sinal pode acoplar-se ao material da parede da tubulação, resultando em perdas por absorção. Neste caso, estes feixes apresentarão amplitude decrescente, resultando em rápida atenuação e ausência de propagação de energia ao longo do guia, conhecidos como modos evanescentes.

Para propagação dos sinais ao longo da tubulação, somente os sinais totalmente refletidos são úteis, uma vez que a energia ficará confinada no meio 1 e apresentarão menores perdas, conforme apresentado na Figura 8 (BORGES, 2003).

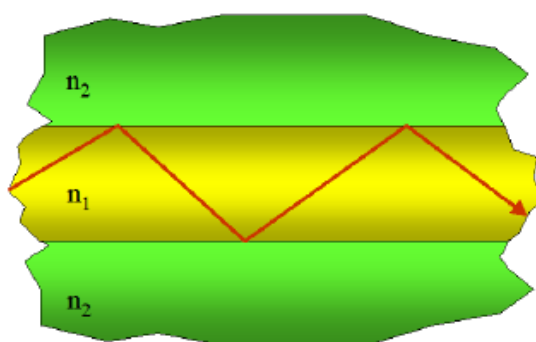


Figura 8: Ondas eletromagnéticas confinadas no ar ao longo da tubulação

Fonte: Retirado de (BORGES, 2003)

2.3. Perdas e Atenuações em Guias de Ondas

Em guias de onda, as perdas de sinal podem ocorrer pelos seguintes fatores: perdas por modo evanescente, perdas nas paredes condutoras, perdas dielétricas, e outros fatores que surgem em condições específicas, como perdas por radiação.

Perdas por modo evanescente, descritas na seção 2.2., acontecem devido a transferência de energia do meio 1 para o meio 2. No caso de tubulações, há transferência de energia do meio de preenchimento - ar-, para as paredes da tubulação, o que impede a propagação de energia.

As perdas por paredes condutoras ocorrem em guias de ondas metálicos devido à indução de correntes elétricas nas paredes do condutor. Essas correntes são geradas pela componente do campo magnético da onda eletromagnética, que incide sobre as superfícies metálicas. Como o metal possui baixa impedância, ele permite que essas correntes induzidas fluam com facilidade. Mas, devido à resistividade finita do material, parte da energia é dissipada na forma de calor pelo efeito Joule (CADENCE, 2021). Essa dissipação

resulta em perdas por condução, que se manifestam como atenuação da onda propagante ao longo do guia.

As perdas elétricas acontecem devido às propriedades elétricas e magnéticas do material de preenchimento dos guias de ondas. Quando materiais dielétricos são expostos a uma região de campo elétrico, o material tende a sofrer polarização de suas moléculas. A polarização do material dielétrico causará o aquecimento do material, representando perdas por calor no guia de onda (MUNDO EDUCAÇÃO, s.d.).

As perdas por radiação referem-se às ondas eletromagnéticas que, por defeito de fabricação do guia de onda ou por curvaturas excessivas, conseguem escapar do meio interno propagante para o meio externo, fazendo com que haja vazamento destes sinais confinados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tubulações

Os dutos podem ser construídos de diversos materiais a depender da utilização e os aspectos físicos envolvidos no transporte de fluídos, como pressão, temperatura, entre outros. No geral, a durabilidade e a resistência são, dentre muitos fatores, as principais características para construção de tubulações. Em gasodutos e em oleodutos, por exemplo, a resistência é fator primordial para a capacidade de transporte em altas temperaturas e pressões. Observa-se, neste caso, o aço como o principal composto utilizado para transporte, sendo o aço carbono amplamente utilizado, enquanto o polietileno ou o PEAD, polietileno de alta densidade, adequados para baixas pressões (BRASIL AÇOS, 2023) e (TUBOS ABC, s.d.).

Já para o transporte de água, os fatores de escolha do material para as tubulações são variados. Observa-se vazão, local de instalação subterrâneo ou exposto, exposição a umidade e temperatura, durabilidade, dentre outros fatores. Em geral, dutos de água podem cumprir com funções de drenagens ou abastecimento de centros urbanos ou industriais. Neste caso, a gama de opções é extensa e abrange o aço, cobre, PVC, polietileno, concreto, entre outros (TECHDUTO, 2021), (SILVA; MORAES; FRANÇA, 2017) e (DISPARCO, s.d.).

Um dos principais dutos de abastecimento em operação é o gasoduto Brasil-Bolívia. Esta infraestrutura possui 3150 Km de extensão, com diâmetros entre 16 e 32 polegadas dependendo do trecho, capaz do transporte de 30 milhões de metros cúbicos de gás por dia (MOTOMURA, 2024). Segundo a Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil, TBG, operadora deste gasoduto, o material das tubulações é o aço carbono especificada na norma API 5L X70, da American Petroleum Institute (TBG, s.d, rev. J). O mapa deste gasoduto é apresentado na Figura 4.



Figura 9: Mapa - Gasoduto Brasil-Bolívia

Fonte: Retirado de (GASNET, 2000)

3.2. Comunicação de robôs em tubulações

Nas referências encontradas, os estudos das viabilidades da comunicação de robôs em tubulações foram feitos empiricamente por meio de testes em bancada.

MIZUKAMI et al. (2023) propõem a utilização de um robô de alta mobilidade para a inspeção de tubulações estreitas. No desenvolvimento, é utilizado um duto de PVC com 140mm de diâmetro. O estudo da propagação de ondas foi conduzido por meio da utilização de antenas transmissora e receptora de 2.4 GHz a 5 GHz e o uso de um VNA, Vector Network Analyzer, para medição, entre 30 kHz a 9 GHz, das ondas guiadas pela parede de uma tubulação de 2 metros

MIZUKAMI et al. (2023) constata que, dentro das frequências testadas, há viabilidade da utilização desta faixa de frequência na comunicação de robôs. Na Figura 5, é apresentado os resultados das medições com a atenuação, em dB, obtida para cada valor de frequência, sendo desejado valores próximos menores para representar atenuação menor.

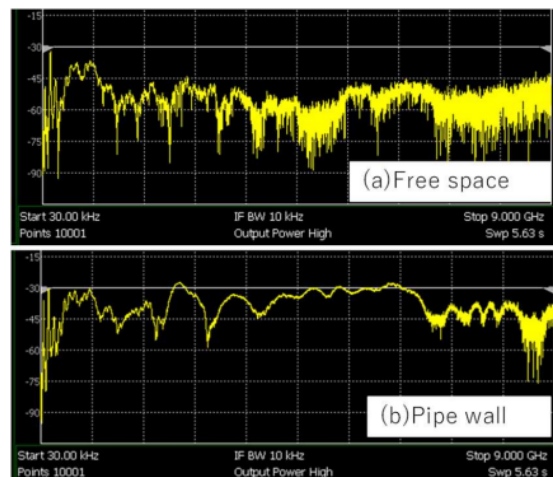


Figura 10: Referência - Medições com VNA

Fonte: Retirado de MIZUKAMI et al. (2023)

ZHAO et al. (2017) estuda a transmissão de sinais em 2.4 GHz com 20 dBm e 5.8 GHz com 14 dBm em tubulações de gás. No desenvolvimento, são empregadas antenas transmissoras na extremidade do tubo. O tubo utilizado é de aço e possui 1 metro de comprimento com variações de 25mm e 50mm de diâmetro.

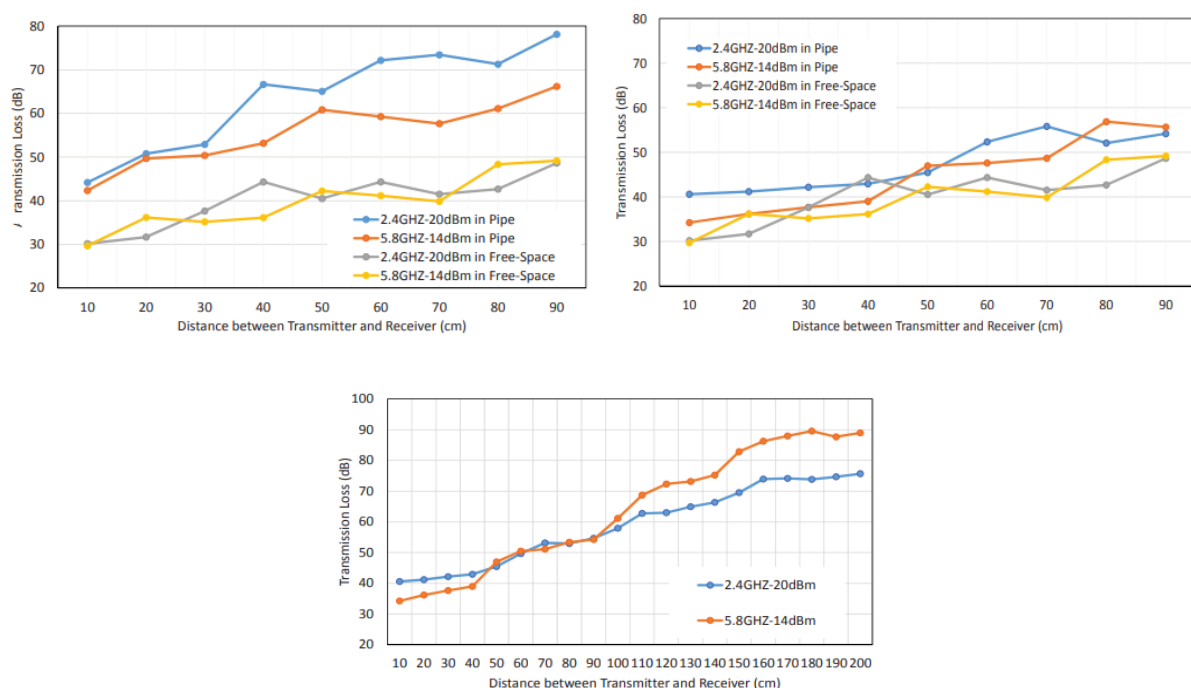


Figura 11: Referência - Atenuação ao longo das tubulações retas e curva

Fonte: Retirado de ZHAO et al. (2017).

Nos resultados, os autores modelam a relação entre o comprimento e a atenuação por meio de equações lineares do tipo apresentado abaixo:

$$\alpha_{dB} = A \cdot L + B \quad (\text{Eq. 1})$$

α_{dB} : Atenuação total

L : Comprimento (cm)

A, B : fatores de modelagem da equação linear

4. RECURSOS UTILIZADOS

4.1. Plataforma robótica - *RollerBots*

Os *RollerBots*, robôs esféricos controlados remotamente, são uma solução de plataforma móvel capaz de realizar atividades de mapeamento e monitoramento em áreas remotas ou de difícil acesso. Para execução do projeto, o LabRoM contará com quatro variações que diferem em tamanho e em funcionalidades. As variações possuem 23cm, 40cm, 60cm e 80cm de diâmetro.

Abaixo, são exibidos o RB23 e o RB40, variantes com diâmetro de 23cm e 40cm, sendo os primeiros modelos recebidos pelo LabRoM no primeiro semestre de 2025. Outros modelos serão recebidos posteriormente.



Figura 12: Imagem - RB23 e RB40 *RollerBot*

Para a análise de performance em tubulações, o *RollerBot* RB23 não será avaliado, pois este utiliza apenas de conexões em Wi-Fi e 4G/5G para comunicação, não sendo compatível com o controle remoto. Como a disponibilidade destes tipos de conexão é variável quanto a presença de antenas de redes móveis e a qualidade pode ser insuficiente em locais remotos, desconsidera-se este robô.

Para exercer as atividades de mapeamento e monitoramento, os *RollerBots* são equipamentos com sensores e antenas para captação de sinais e amostras de dados essenciais, tais como *LIDAR*, câmeras, sensores térmicos, entre outros. Toda operação de controle e guiagem dos *RollerBots* é realizada remotamente via controle compatível.

4.2. Controle remoto e Antena transmissora

Para o envio dos comandos e recepção dos dados coletados, os *RollerBots* utilizarão o controle remoto SIYI MK32 com uma antena direcional de longo alcance e display LCD de 7". O hardware de comunicação presente neste controle é compatível com transmissões FPV, *First Person View*, onde as imagens coletadas pelo robô são visualizadas pelo controlador em tempo real.



Figura 13: Controle remoto - SIYI MK32 com antena direcional de longo alcance

4.3. Ambientes de simulação

A execução das simulações para avaliação da operação dos *RollerBots* será feita através do software Ansys HFSS. A utilização deste software permitirá o estudo do comportamento das ondas eletromagnéticas emitidas e recebidas pelos *RollerBots* em comunicação com o controle remoto.

O estudo destas ondas eletromagnéticas é essencial para a avaliação da transmissão de dados nas tubulações, análise dos modos propagantes e cálculo de perdas e atenuações.

5. DESENVOLVIMENTO

5.1. Listagem das especificações do hardware de comunicação

O conjunto do hardware de comunicação pode ser dividido entre hardware de transmissão e de recepção.

Para o hardware de transmissão, são considerados o controle remoto MK32 e as antenas direcionais, mostrados na Figura 8. Abaixo, nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se as especificações.

Tabela 2: Especificações - Controle remoto SYIY MK32

Especificações	Valores
Sistema	Android 9.0
Memória RAM	4Gb
Display	7" LCD
Dimensões (C x L x A)	308 x 148 x 72 mm
Peso	1440 g
Bateria	10200 mAh
Potência de transmissão	27dBm (500mW)
Alcance	15Km LOS

Fonte: Adaptado de SIYI STORE e informações recebidas do fabricante dos *RollerBots*.

Tabela 3: Especificações - Antena direcional de longo alcance

Especificações	Valores
Frequência de Operação	5.1 a 5.825 GHz
Ganho na frequência de operação	14 dB
Dimensões (C x L x A)	60 x 69 x 60 mm
Peso	36 g

Fonte: Adaptado de SIYI STORE.

Para o hardware de recepção, são consideradas as antenas omnidirecionais, SIYI Standard, e o módulo de recepção Quectel RM500Q-AE. Abaixo, nas Tabelas 4 e 5 apresenta-se as especificações.

Tabela 4: Especificações - Antena omnidirecional

Especificações	Valores
Frequência de Operação	5.1 a 5.825 GHz
Ganho na frequência de operação	5 dB
Dimensões (C x L x A)	18 x 9 x 8 mm
Peso	16 g

Fonte: Adaptado de SIYI STORE.

Tabela 5: Especificações - Módulo de recepção Quectel RM500Q-AE

Especificações	Valores
Faixas de frequência de operação	617 a 960 MHz 1452 a 2690 MHz 3300 a 4200 MHz 4400 a 6000 MHz
Dimensões (C x L x A)	30 x 52 x 2.3 mm
Peso	8.7 g
Compatibilidade	5G NR / LTE / WCDMA

Fonte: Adaptado de QUECTEL.

5.2. Simulação das tubulações - ANSYS HFSS

Dados os materiais utilizados para a construção de tubulações apresentados na seção 2.1., utiliza-se o aço carbono, o polietileno e o concreto nas simulações. Para isso, utiliza-se as dimensões mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensões aplicadas - tubulações retangulares e cilíndrica

Dimensões	Tubulações retangulares	Tubulações cilíndrica
Abertura / Espessura	(30 x 30)cm / 0.75cm	Ø30cm / 0.75cm
Abertura / Espessura	(50 x 50)cm / 1.25cm	Ø50cm / 1.25cm
Abertura / Espessura	(70 x 70)cm / 1.75cm	Ø70cm / 1.75cm
Abertura / Espessura	(90 x 90)cm / 2.25cm	Ø90cm / 2.25cm

Ainda nesta etapa de simulação do projeto, desenvolve-se as diferentes combinações de tipos, aberturas, materiais e abertura conforme abaixo.

Tabela 7: Simulações executadas

Variações de tubulação	Simulações realizadas
Tubulação reta	<ul style="list-style-type: none"> • Tubulação retangular e cilíndrica • Materiais: aço carbono, concreto e polietileno • Aberturas de 30, 50, 70 e 90 cm • Comprimento de 25cm
Tubulação curvada em 90°	<ul style="list-style-type: none"> • Tubulação reta retangular e cilíndrica • Materiais: aço carbono, concreto e polietileno • Aberturas de 30cm e 50cm • Comprimentos: 50cm para abertura de 30cm e 70cm para abertura de 50cm.

O software ANSYS HFSS modela figuras geométricas com elementos finitos para representar os objetos de estudo. A partir desta modelagem, é possível atribuir materiais a estes objetos.

Para a simulação, considera-se que as ondas eletromagnéticas emitidas pela antena do controle remoto propagam através de uma extremidade da tubulação em sentido a outra extremidade em um meio preenchido completamente por ar. No software, as extremidades de entrada e de saída das ondas eletromagnéticas são designadas por *wave ports*, de forma

a serem configuradas de acordo com as especificações do controle remoto mostradas na Tabela 2.

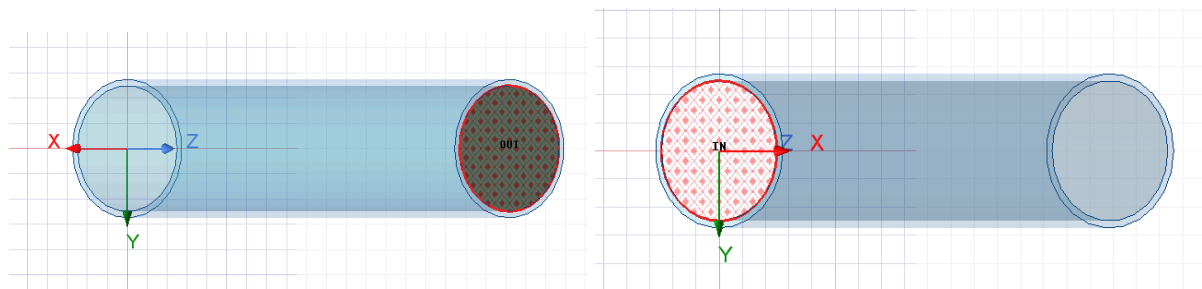


Figura 14: wave ports configuradas - Tubulação cilíndrica de 30cm em aço carbono

As wave ports foram configuradas de acordo com as especificações da antena transmissora. Desta forma, o wave port que representa a entrada de sinal receberá 27 dBm, equivalente a 500 mW. Como explicado a seguir, na seção 5.2.1, foram simulados 5 modos propagantes. Para este projeto, foi suposto os modos de propagação serem transmitidos com parcelas iguais, 100 mW, da potência de transmissão, conforme mostrado abaixo.

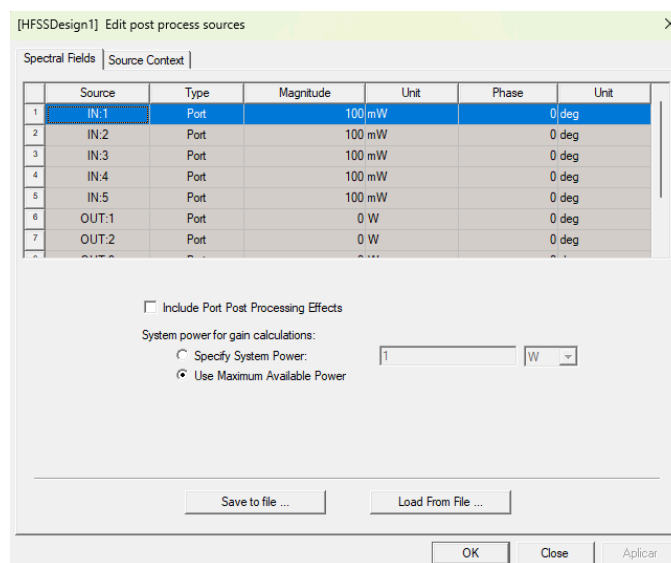


Figura 15: Configuração da potência de cada modo propagante

Ainda, as paredes das tubulações foram designadas como condutores perfeitos, selecionando a opção 'Perfect E'. Esta condição pode não representar fielmente a propagação interna nas tubulações de polietileno e concreto, pois estes materiais não são condutores perfeitos.

Por fim, para início das simulações, configura-se o setup de análise para estudo da frequência em 5.8GHz e da definição de high speed.

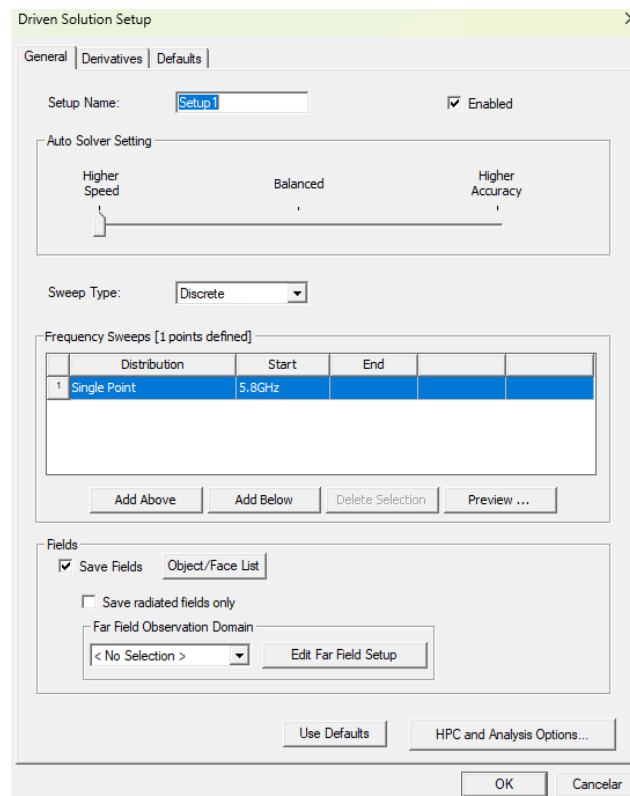


Figura 16: Configuração do *setup* de simulação

A configuração em *high speed* diz respeito ao critério de convergência da simulação. O ANSYS HFSS realiza iterações e, a cada passo, há o aumento da malha simulada. A cada passo, o resultado da iteração atual é comparado com o resultado da iteração anterior para obtenção do parâmetro *Max Magnitude Delta S*. A configuração em *high speed* define que a simulação será finalizada quando este parâmetro atingir valor menor que 0.1. Para efeito comparativo, a configuração em *balanced* define valor de 0.02 como critério de convergência.

A Figura 12 mostra um exemplo das iterações realizadas para a simulação do tubo retangular curvo de 50 cm em polietileno.

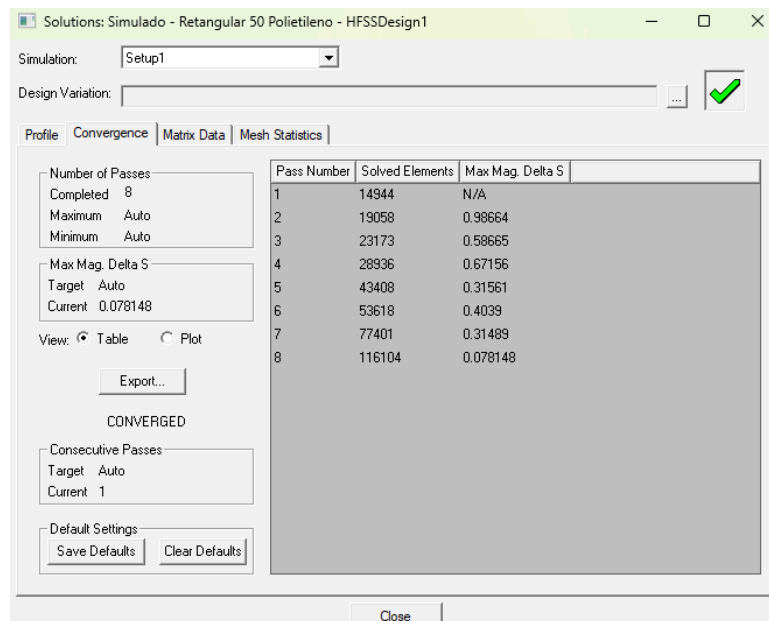


Figura 17: Exemplo - Iterações realizadas em simulação

Para as simulações das tubulações curvas, utiliza-se apenas as aberturas de 30cm e 50cm devido à complexidade da simulação e à limitação de hardware para executá-la.

As especificações elétricas e magnéticas dos materiais utilizados podem ser encontradas no Apêndice A.

Dadas as características geométricas e a forma de comunicação entre a plataforma robótica e o controle remoto, as tubulações serão estudadas como guias de ondas, de forma que a onda incidente na extremidade de entrada seja propagada ao longo do comprimento disponível e sujeita à atenuação. Portanto, desta simulação, busca-se obter as características da transmissão interna das ondas eletromagnéticas no guia de onda para a frequência de comunicação.

5.2.1. Modos de propagação

Os modos de propagação são um fator essencial para análise de guia de ondas e transmissão de ondas eletromagnéticas.

Para este projeto, é fundamental a determinação dos modos propagantes e dos evanescentes, para a compreensão do comportamento dos sinais emitidos pelo controle quando estes são transmitidos internamente pelas tubulações. Por isso, nas simulações considera-se os 5 primeiros modos de propagação para serem avaliados.

A análise preliminar dos modos de propagação permitirá que apenas os modos capazes de alcançar as distâncias relevantes sejam estudados para a estimativa de alcance de operação dos *RollerBots*.

Os modos de propagação calculados durante a simulação são mostrados no Apêndice B.

5.2.2. Parâmetro S

Das simulações, o resultado desejado é o parâmetro S para cada um dos 5 modos de propagação. O parâmetro S, também conhecido como parâmetro de espalhamento ou scattering, traduz as porções dos sinais que são refletidos ou transmitidos pelas extremidades de entrada e de saída dos sinais.

Abaixo, o parâmetro S é descrito em detalhes:

- S_{11} é o coeficiente de reflexão. Indica quanto do sinal que entra na porta 1 é refletido de volta para a porta 1;
- S_{21} é o coeficiente de transmissão. Indica quanto do sinal que entra na porta 1 é transmitido para a porta 2;
- S_{12} é o coeficiente de transmissão. Indica quanto do sinal que entra na porta 2 é transmitido para a porta 1;
- S_{22} é o coeficiente de reflexão. Indica quanto do sinal que entra na porta 2 é refletido de volta para a porta 2.

Neste projeto, considera-se que há apenas um controle em comunicação com o robô. Desta forma, há apenas 1 porta de entrada de sinal. Como é de interesse o estudo apenas das ondas eletromagnéticas que chegam na porta de entrada e alcançam a porta de saída, então apenas o parâmetro S_{21} será analisado.

Este resultado é importante para estabelecer uma relação, em dB, do sinal de entrada e de saída. Como a tubulação representará um meio de propagação atenuante à onda incidente, espera-se que um sinal de saída menor de menor intensidade comparado ao sinal de entrada, o que será traduzido em $S_{21} < 0$.

Parâmetro S_{11} pode ser consultado para constatação do modo ser propagante ou evanescente. Caso ambos S_{11} e S_{21} sejam de grande magnitude, então o modo será evanescente, já que toda onda eletromagnética será atenuada.

5.3. Estimativa de alcance nas tubulações

Para a estimativa do alcance dos *RollerBots*, primeiramente, realiza-se o cálculo da atenuação das ondas eletromagnéticas pela equação 2 abaixo.

$$\alpha = \frac{1}{L} S_{21} \quad (\text{Eq. 2})$$

α : Atenuação

L: Comprimento da tubulação simulada

Nas simulações, para as tubulações retas, o comprimento L vale 0.25m.

Também será utilizada a sensibilidade de antena receptora. Este parâmetro traduz a mínima potência perceptível pela antena.

Combinando a atenuação por unidade de comprimento com a sensibilidade e utilizando a equação 3, pode-se deduzir a expressão de alcance máximo.

$$P_{dBm}(L) = P_{dBm}(0) + \alpha_{dB/m} \cdot L \quad (\text{Eq. 3})$$

$P_{dBm}(L)$: Potência, em dBm, a uma distância L do transmissor

$P_{dBm}(0)$: Potência, em dBm, do transmissor

Como o alcance máximo será obtido quando $P_{dBm}(L)$ equivaler a potência mínima perceptível pela antena - sensibilidade -, e como a potência transmitida é conhecida, de 27dBm, então utilizam-se estes valores na equação 3. Rearranjando, obtém-se a expressão para o alcance na equação 4 abaixo.

$$L = \frac{S_{dBm} - 27}{\alpha_{dB/m}} \quad (\text{Eq. 4})$$

S_{dBm} : Sensibilidade da antena receptora

Para a sensibilidade do hardware receptor, a fabricante do hardware disponibiliza as informações por meio das bandas de frequência contidas em WCDMA, LTE-FDD, LTE-TDD e 5G NR-FDD. Para a frequência de interesse, 5.8GHz, a banda específica está inserida em LTE-TDD, designada como banda B46, entre 5.15GHz a 5.925GHz. Contudo, esta banda B46 especificamente não é informada no datasheet, pois somente é utilizada quando há 2 antenas transmissoras, conforme Figura 8, e duas antenas receptoras, mostrada na Figura 7, chamada operação em MIMO, *Multiple Input, Multiple Output*. Outras bandas LTE-TDD compatíveis com o hardware RM500Q-AE são apresentadas no datasheet e disponíveis na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8: Sensibilidade - LTE-TDD Quectel RM500Q-AE

Faixas de frequências	Sensibilidade (dBm) para antena principal	Sensibilidade (dBm) para operação em SIMO
LTE-TDD B34	-97.0	-100.5
LTE-TDD B38	-97.0	-100.5
LTE-TDD B39	-97.0	-100.0
LTE-TDD B40	-96.0	-100.0
LTE-TDD B41	-96.8	-100.5
LTE-TDD B42	-96.8	-100.5
LTE-TDD B43	-96.8	-100.5
LTE-TDD B48	-96.8	-99.0

Fonte: Adaptado de QUECTEL.

Para estabelecer a estimativa de alcance máximo, será utilizado o valor de -96dBm, pois este valor representa uma menor capacidade, dentre os valores mostrados na Tabela 8, para percepção das ondas eletromagnéticas, resultando em um alcance de operação menor. Apesar dessa utilização representar, possivelmente, uma limitação aos resultados a serem analisados, esta escolha garantirá uma margem segura para a operação do robô, com menor risco de perda de sinal.

6. RESULTADOS

6.1. Desenvolvimento das simulações

As simulações foram desenvolvidas em computador local.

Hardware utilizado:

- Processador: i5 - 12600K
- GPU: 4060 Ti
- Memória RAM: 32GB 3200MHz
- Armazenamento: 2.5TB SSD NVME

No geral, as simulações levaram entre 10 minutos e 6 horas para todas as variações de diâmetro, com exceção da tubulação retangular reta de 90 cm e curvada de 50 cm em concreto e da tubulação cilíndrica curvada de 50 cm em concreto. Estas exceções exigiram tempos de simulação entre 20 e 22 horas. Este aumento expressivo dos tempos de execução é atribuído à falta de memória RAM do hardware utilizado. Quando não há memória RAM suficiente, o simulador utiliza o disco de armazenamento, o que, apesar de suprir a falta de espaço, possui drástica redução no tempo de leitura e escrita.

6.2. Resultados de simulações

Das simulações, obtém-se os valores desejados de S_{21} para cada um dos 5 modos propagantes. Com estes valores, calcula-se o S_{21} médio com o objetivo da obtenção da atenuação média que as tubulações apresentarão. As Tabelas 9 e 10 mostram todos os valores obtidos.

O Apêndice C apresenta os perfis do campo elétrico para as tubulações simuladas.

Tabela 9: Resultados - S_{21} para Tubulações retas

Tubulação	S_{21} (dB) Modo 1	S_{21} (dB) Modo 2	S_{21} (dB) Modo 3	S_{21} (dB) Modo 4	S_{21} (dB) Modo 5	S_{21} (dB) Médio
Retangular 30cm Aço carbono	-6,0092211 19	-6,0091546 90	-0,000595 111	-0,000564 294	-0,002134 332	-1,548328 120
Retangular 30cm Polietileno	-25,02769 999	-25,652038 80	-27,61947 596	-27,88363 723	-3,321902 53	-10,22638 8567

Tubulação	S_{21} (dB) Modo 1	S_{21} (dB) Modo 2	S_{21} (dB) Modo 3	S_{21} (dB) Modo 4	S_{21} (dB) Modo 5	S_{21} (dB) Médio
Retangular 30cm Concreto	-36,76964 1816	-36,729911 187	-0,002657 038	-0,002562 542	-0,000785 011	-2,219876 747
Retangular 50cm Aço carbono	-9,204103 94	-9,1970145 6	-0,009303 81	-0,0131196 5	-0,007960 31	-1,893059 481
Retangular 50cm Polietileno	-0,313323 433	-0,3143820 29	-0,008782 362	-0,005526 933	-0,003846 038	-0,126566 891
Retangular 50cm Concreto	-2,533992 178	-2,5343137 94	-0,002872 367	-0,002880 954	-0,002518 233	-0,847090 079
Retangular 70cm Aço carbono	-1,4368854 1	-1,43694393	-0,0045907 7	-0,0046134 3	-0,0006678 0	-0,521413 240
Retangular 70cm Polietileno	-0,4810566 756634	-0,48102244 97552	-0,03437311 42653	-0,0343826 509942	-0,0051560 776323	-0,201471 516
Retangular 70cm Concreto	-0,4810566 7566370	-0,48102244 975545	-0,03437311 426493	-0,0343826 5099410	-0,0051560 7763218	-0,201471 516
Retangular 90cm Aço carbono	-13,588000 438070200	-13,5905015 07683800	-0,0771531 66963763	-0,0324206 25000357	-0,0331948 97163804	-2,139787 473
Retangular 90cm Polietileno	-11,7049079 76367500	-11,6381237 17900800	-0,0826449 74062349	-0,0695203 93234837	-0,1024891 96735544	-2,106932 557
Retangular 90cm Concreto	-20,679099 586105500	-20,6826011 02551400	-0,0037835 11600	-0,0585339 28676523	-0,0568648 20264258	-2,233233 048
Cilíndrica 30cm Aço carbono	-3,991556 0004963	-3,9907880 6095729	-0,005732 53877694	-0,071801 70126718	-0,073373 58100091	-1,233936 206
Cilíndrica 30cm Polietileno	-20,49569 99320965	-20,509926 77776970	-0,002594 79112776	-0,013525 60385437	-0,012319 57783869	-2,202197 305
Cilíndrica 30cm Concreto	-1,008252 02930496	-1,0105780 2103131	-0,004055 377685348	-47,77936 084482560	-47,70908 535595850	-2,866243 044
Cilíndrica 50cm Aço carbono	-0,447747 7611518	-0,4463198 1199041	-0,009784 85719157	-0,046465 54472045	-0,046186 05363087	-0,194600 438
Cilíndrica 50cm Polietileno	-3,553129 5307601	-3,5528448 8493204	-0,003874 34461071	-21,16063 396373060	-21,14405 815553860	-4,209070 417
Cilíndrica 50cm Concreto	-9,744163 4135878	-9,4936950 7301678	-0,041280 09889356	-21,22763 003680830	-21,68368 974848780	-6,1143825 31
Cilíndrica 70cm Aço carbono	-1,759559 8869897	-1,7958009 8758746	-0,0110064 3857486	-0,2965011 7750966	-0,297526 95577256	-0,763966 574

Tubulação	S_{21} (dB) Modo 1	S_{21} (dB) Modo 2	S_{21} (dB) Modo 3	S_{21} (dB) Modo 4	S_{21} (dB) Modo 5	S_{21} (dB) Médio
Cilíndrica 70cm Polietileno	-0,003081 6498775	-0,0030823 5289563	-0,003151 50197148	-0,250205 23089484	-0,250840 47477553	-0,100387 414
Cilíndrica 70cm Concreto	-3,151814 7298389	-3,1527499 9479457	-0,006397 71713225	-0,010889 98145661	-0,010771 86274617	-1,0112324 50
Cilíndrica 90cm Aço carbono	-7,6431185 775338	-7,6467715 5986874	-29,29794 385375220	-29,32164 336212390	-0,008136 22020551	-5,704238 370
Cilíndrica 90cm Polietileno	-0,774233 7497860	-0,7741889 2523199	-0,027941 74101140	-0,027479 19839760	-0,007140 30427868	-0,306706 035
Cilíndrica 90cm Concreto	-0,558485 2343449	-0,5575967 0394698	-0,008839 94559953	-0,0087118 1393588	-0,005945 84545939	-0,219626 511

Tabela 10: Resultados - S_{21} para Tubulações curvas

Tubulação	S_{21} (dB) Modo 1	S_{21} (dB) Modo 2	S_{21} (dB) Modo 3	S_{21} (dB) Modo 4	S_{21} (dB) Modo 5	S_{21} (dB) Médio
Retangular 30cm Aço carbono	-3,190897 72300286	-7,319976 09301543	-6,286619 83557672	-6,318258 79000455	-3,617276 33401991	-5,035251 065
Retangular 30cm Polietileno	-2,180741 51768495	-8,445506 97897705	-3,833580 67253379	-4,171059 49172666	-8,405004 1588277	-4,713295 061
Retangular 30cm Concreto	-10,65547 92408404	-8,545056 22754765	-4,448081 39182042	-3,520232 38722401	-5,266248 5834899	-5,761324 279
Retangular 50cm Aço carbono	-10,78335 87413565	-8,442366 5872102	-2,954873 21694532	-2,864256 98713259	-17,55463 12987534	-5,959470 660
Retangular 50cm Polietileno	-6,668221 55864973	-10,22564 10956933	-11,978736 4865465	-11,553554 1037389	-9,257617 54184407	-9,4901911 36
Retangular 50cm Concreto	-16,58757 3669445	-7,574540 29982275	-6,8112057 1670068	-6,727920 52633537	-15,587115 5039999	-8,892866 769
Cilíndrica 30cm Aço carbono	-21,00801 5713065	-16,07899 75214345	-1,715512 83537586	-2,638977 44135908	-2,957403 93721812	-4,541920 507
Cilíndrica 30cm Polietileno	-3,506497 02984577	-20,66847 71266446	-14,94991 52202795	-32,87445 36241377	-24,38194 37887039	-10,081180 070
Cilíndrica 30cm Concreto	-21,73110 88802464	-3,173780 46683197	-11,733664 8098991	-7,515686 66499244	-4,814797 68011212	-6,726333 628
Cilíndrica 50cm Aço carbono	-47,02193 05944139	-25,15775 69469809	-40,24104 61459547	-30,44550 11253364	-49,04089 57238708	-30,88427 0045

Tubulação	S_{21} (dB) Modo 1	S_{21} (dB) Modo 2	S_{21} (dB) Modo 3	S_{21} (dB) Modo 4	S_{21} (dB) Modo 5	S_{21} (dB) Médio
Cilíndrica 50cm Polietileno	-23,73364 77953413	-24,61882 71046786	-22,33749 67148616	-41,00075 32964828	-30,55181 07425452	-25,38106 7319
Cilíndrica 50cm Concreto	-14,55265 48944181	-32,21818 28961045	-30,18418 18528412	-35,75481 74982634	-27,03284 11284818	-21,09486 4301

6.3. Cálculo do alcance máximo

A partir dos valores obtidos para o parâmetro S_{21} , e aplicando a equação 2, é possível determinar a atenuação média por metro ao longo das tubulações analisadas. Essa atenuação média representa o impacto das tubulações na perda de potência do sinal à medida que ele se propaga pelo seu interior. Trata-se, portanto, de uma métrica fundamental para caracterizar a eficiência da transmissão em ambientes confinados.

Tabela 11: Atenuações médias - tubulações retas

Tubulação - Retangular	$\alpha_{dB/m}$ média	Tubulação - Retangular	$\alpha_{dB/m}$ média	Tubulação - Cilíndrica	$\alpha_{dB/m}$ média	Tubulação - Cilíndrica	$\alpha_{dB/m}$ média
30cm Aço carbono	-6,193312 479	70cm Aço carbono	-2,085652 960	30cm Aço carbono	-4,935744 823	70cm Aço carbono	-3,055866 295
30cm Polietileno	-40,90555 4268	70cm Polietileno	-0,805886 066	30cm Polietileno	-8,808789 220	70cm Polietileno	-0,401549 655
30cm Concreto	-8,879506 986	70cm Concreto	-0,805886 066	30cm Concreto	-11,46497 2175	70cm Concreto	-4,044929 800
50cm Aço carbono	-7,572237 923	90cm Aço carbono	-8,559149 891	50cm Aço carbono	-0,778401 752	90cm Aço carbono	-22,81695 3481
50cm Polietileno	-0,506267 564	90cm Polietileno	-8,427730 229	50cm Polietileno	-16,83628 1668	90cm Polietileno	-1,226824 139
50cm Concreto	-3,388360 315	90cm Concreto	-8,932932 190	50cm Concreto	-24,45753 0126	90cm Concreto	-0,878506 045

Tabela 12: Atenuações médias - tubulações curvas

Tubulação - Retangular	$\alpha_{dB/m}$ média	Tubulação - Cilíndrica	$\alpha_{dB/m}$ média
30cm Aço carbono	-10,07050 2130	30cm Aço carbono	-9,083841 014
30cm Polietileno	-9,426590 122	30cm Polietileno	-20,16236 0139
30cm Concreto	-11,52264 8557	30cm Concreto	-13,45266 7255
50cm Aço carbono	-8,513529 514	50cm Aço carbono	-44,12038 5779
50cm Polietileno	-13,55741 5908	50cm Polietileno	-36,25866 7599
50cm Concreto	-12,70409 5384	50cm Concreto	-30,13552 0430

Para o cálculo do alcance da operação dos *RollerBots*, três cenários são considerados: alcance em tubulação completamente reta, com uma curva e duas curvas. Esta estimativa é feita utilizando as combinações de resultados obtidos via simulação e apresentados nas atenuações por metro.

Para tanto, pode-se aplicar a Equação 4 diretamente para obter o alcance em tubulações retas. Para as tubulações curvas, utiliza-se a Equação 3 para estimar o decaimento de potência somente das curvas, uma ou duas, conforme apresentado na Equação 5, cujo comprimento L equivale aos valores informados na Tabela 7 para as respectivas variações de tubulações curvadas.

$$P_{TdBm}(L) = P_{dBm}(0) - \alpha_{dB/m} \cdot L \quad (\text{Eq. 5})$$

$P_{TdBm}(L)$: Potência, em dBm, após o decaimento nas curvas

$P_{dBm}(0)$: Potência, em dBm, do transmissor

Desta forma, conhecida qual é a potência que será perdida nas tubulações curvas e considerando que o comprimento restante será atenuado em tubulação reta, pode-se estimar o comprimento em tubulação reta pela equação 6.

$$L_R = \frac{S_{dBm} - P_{TdBm}(L)}{\alpha_{dB/m}} \quad (\text{Eq. 6})$$

L_R : Comprimento em tubulação reta

S_{dBm} : Sensibilidade da antena receptora

Por fim, o alcance máximo é dado pelo comprimento da tubulação mais o comprimento das curvas, conforme equação 7.

$$L_T = N \cdot L_C + \frac{S_{dBm} - P_{TdBm}(L)}{\alpha_{dB/m}} = N \cdot L_C + L_R \quad (\text{Eq. 7})$$

L_T : Comprimento em tubulação reta

N : Número de curvas

L_C : Comprimento da tubulação curva

Os resultados encontrados são mostrados nas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13: Alcance - tubulações retas

Tubulação - Retangular	Alcance (m)	Tubulação - Retangular	Alcance (m)	Tubulação - Cilíndrica	Alcance (m)	Tubulação - Cilíndrica	Alcance (m)
30cm Aço carbono	19,860131 460	70cm Aço carbono	58,974336 746	30cm Aço carbono	24,920251 027	70cm Aço carbono	40,250452 124
30cm Polietileno	3,0069266 19	70cm Polietileno	152,62703 4043	30cm Polietileno	13,963326 506	70cm Polietileno	306,31329 9801
30cm Concreto	13,600980 346	70cm Concreto	152,62703 4043	30cm Concreto	10,728329 570	70cm Concreto	30,408438 730
50cm Aço carbono	16,243546 656	90cm Aço carbono	14,370586 047	50cm Aço carbono	158,01608 8319	90cm Aço carbono	5,3907284 38
50cm Polietileno	242,95453 3689	90cm Polietileno	14,594676 936	50cm Polietileno	7,3056511 19	90cm Polietileno	100,25886 8495
50cm Concreto	36,300743 892	90cm Concreto	13,769275 013	50cm Concreto	5,0291259 73	90cm Concreto	140,01041 9597

Tabela 14: Alcance - tubulações com 1 curva

Tubulação - Retangular	Alcance (m)	Tubulação - Cilíndrica	Alcance (m)
30cm Aço carbono	19,0471172 5	30cm Aço carbono	24,0000412 8
30cm Polietileno	2,89170277 9	30cm Polietileno	12,8188809 1
30cm Concreto	13,2032866 1	30cm Concreto	10,1416440 1
50cm Aço carbono	15,6813925 3	50cm Aço carbono	129,675719 31
50cm Polietileno	229,564957 84	50cm Polietileno	6,22884959
50cm Concreto	34,4260767 7	50cm Concreto	4,41304740

Tabela 15: Alcance - tubulações com 2 curvas

Tubulação - Retangular	Alcance (m)	Tubulação - Cilíndrica	Alcance (m)
30cm Aço carbono	18,2341030 4	30cm Aço carbono	23,0798315 3
30cm Polietileno	2,77647893 8	30cm Polietileno	11,6744353
30cm Concreto	12,5544528 1	30cm Concreto	9,55495844 8
50cm Aço carbono	15,1192384 1	50cm Aço carbono	78,6630551
50cm Polietileno	205,463721 3	50cm Polietileno	4,29060684 5
50cm Concreto	32,5514096 4	50cm Concreto	3,79696883

6.4. Compilação de resultados e discussão

Com toda análise concluída, os dados de atenuação e alcance podem ser compilados e comparados para o estudo da influência dos parâmetros, como material, diâmetro, e curvaturas, na propagação de sinais em tubulações.

6.4.1. Comparação entre os materiais das tubulações

Os resultados compilados da atenuação e alcance foram compilados em função dos diâmetros das tubulações. Nos gráficos abaixo, pode-se visualizar as curvas para os materiais simulados.

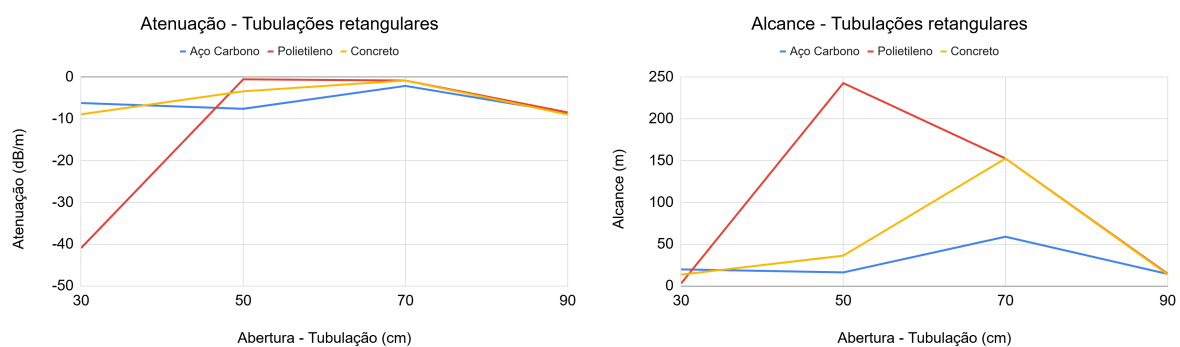


Figura 18: Atenuação e alcance - Tubulações retangulares retas

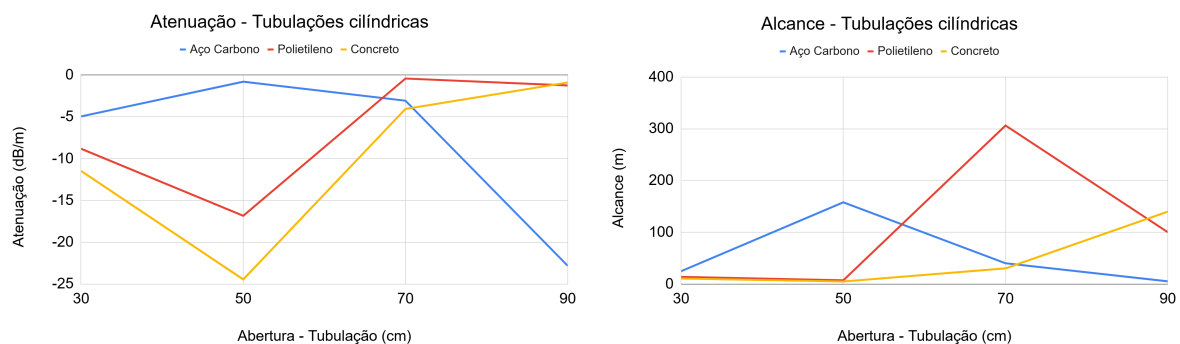


Figura 19: Atenuação e alcance - Tubulações cilíndricas retas

Observando os resultados, percebe-se comportamento semelhante nas tubulações de polietileno e concreto. Em ambos materiais, a atenuação segue a mesma tendência: para aberturas retangulares, a atenuação máxima é dada com diâmetro de 30 cm, seguida de uma queda acentuada quando em 50 cm de diâmetro, mantendo aproximadamente constante de 50 cm para 70 cm e finalizando com leve aumento em 90 cm. Na abertura cilíndrica, observa-se correlação entre estes dois materiais: atenuação moderada em 30 cm com significativo aumento em 50 cm, seguido de queda acentuada em 70 cm e relativa

estabilidade de 70 cm para 90 cm. As tubulações de aço carbono não apresentaram a mesma tendência dos outros materiais.

Atribui-se tal semelhança entre o polietileno e o concreto à baixa condutividade que estes materiais possuem, de forma que as perdas por condução apresentam comportamento parecido.

6.4.2. Comparação entre os diâmetros das tubulações

Os resultados compilados da atenuação e alcance foram compilados em função dos materiais utilizados nas tubulações. Nos gráficos abaixo, pode-se visualizar as curvas para os diferentes diâmetros.

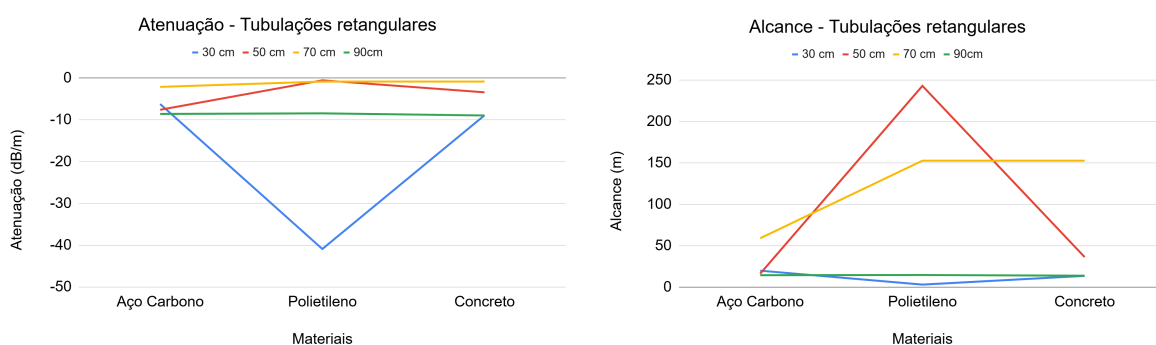


Figura 20: Atenuação e alcance - Tubulações retangulares retas

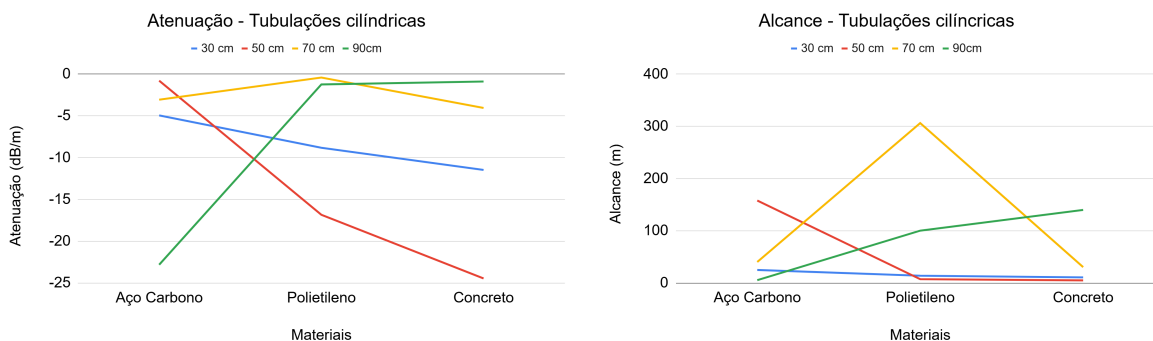


Figura 21: Atenuação e alcance - Tubulações cilíndricas retas

Observando os resultados, é possível concluir que, tanto para aberturas retangulares quanto para cilíndricas, o diâmetro de 70 cm apresentou pouca variação de atenuação e, na média, é uma configuração que, independente do material, oferecerá maiores alcances de comunicação.

6.4.3. Comparação entre tubulações retas e curvas

Os resultados compilados da atenuação função dos materiais utilizados nas tubulações. Nas figuras abaixo, pode-se visualizar as curvas para as topologias retas e curvas.

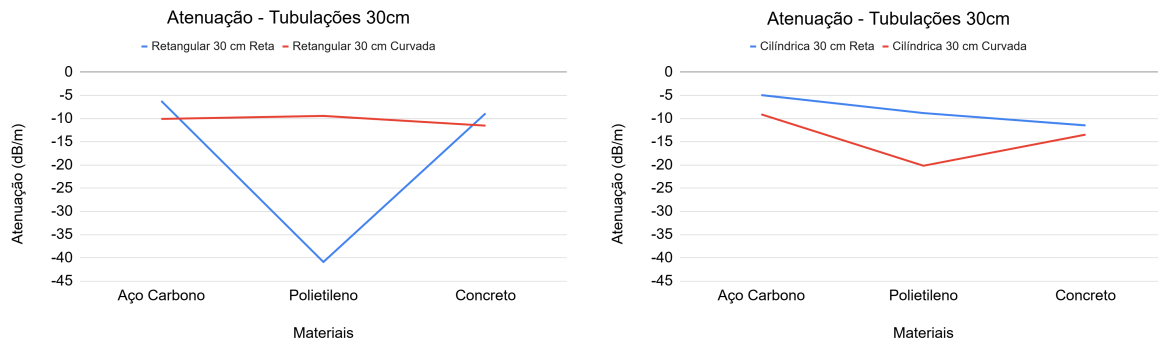


Figura 22: Atenuação - Tubulações de 30 cm retangulares e cilíndricas retas

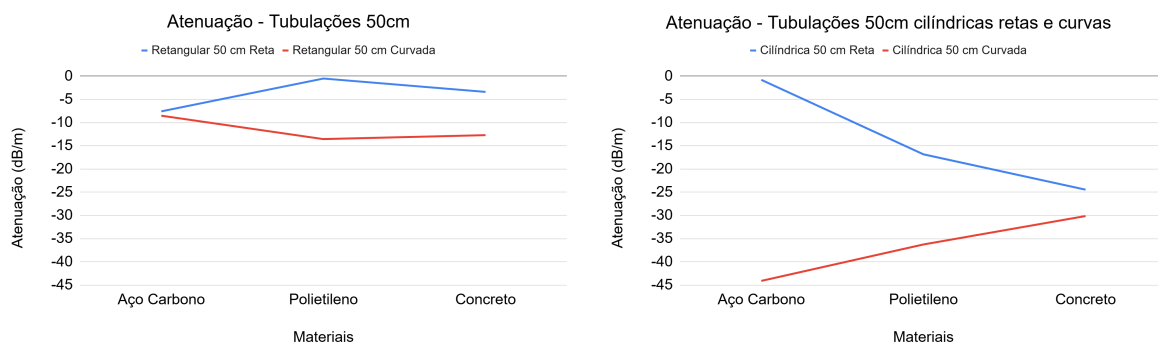


Figura 23: Atenuação - Tubulações de 50 cm retangulares e cilíndricas retas

Observando os resultados, é possível concluir que houve aumento significativo nas atenuações para as topologias curvadas, independente do material das tubulações. Por este motivo, é esperado que, quanto mais curvas uma tubulação apresentar, menor será o alcance de operação.

6.4.4. Limites de operação dos *RollerBots*

Pelos resultados obtidos, percebe-se uma capacidade relativamente curta de operação dos *RollerBots*. Em geral, para tubulações retas, com exceção das tubulações de 70 cm de diâmetro, nota-se que o alcance de operação ficará limitado a no máximo uma ou duas dezenas de metros em tubulações. Para 70 cm de diâmetro, segundo os resultados das

simulações, nota-se uma possibilidade da operação dos robôs alcançar a cada da centena de metros, sendo, portanto, o melhor cenário de aplicação dos robôs.

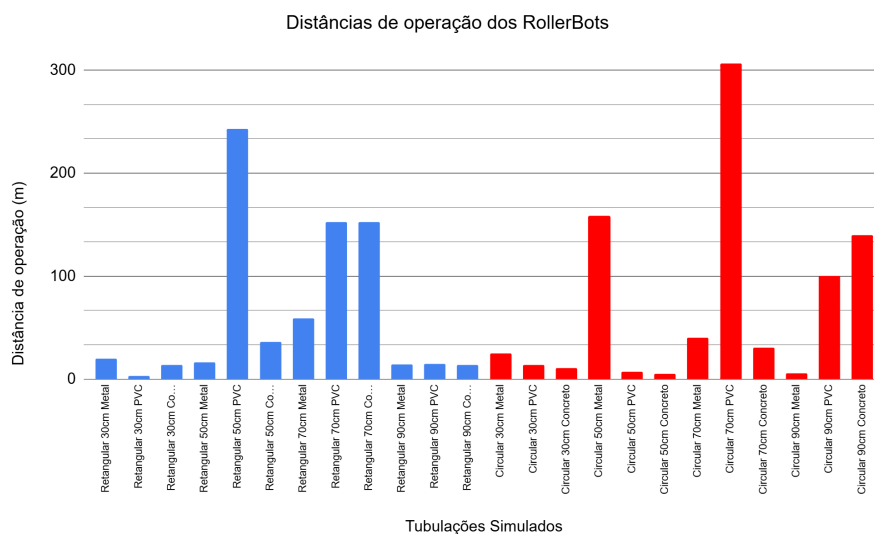


Figura 24: Alcances de operação calculados

Vale a ressalva de que a presença de curvaturas em meio a estrutura da tubulação pode acrescentar a atenuação ao sinal do controle remoto, o que reduzirá a distância de operação. Abaixo, mostra-se um comparativo de tubulações retas, com 1 e 2 curvas para a topologia retangular de 50 cm em polietileno. Neste caso, foram posicionadas curvaturas em 50 metros e 150 metros.

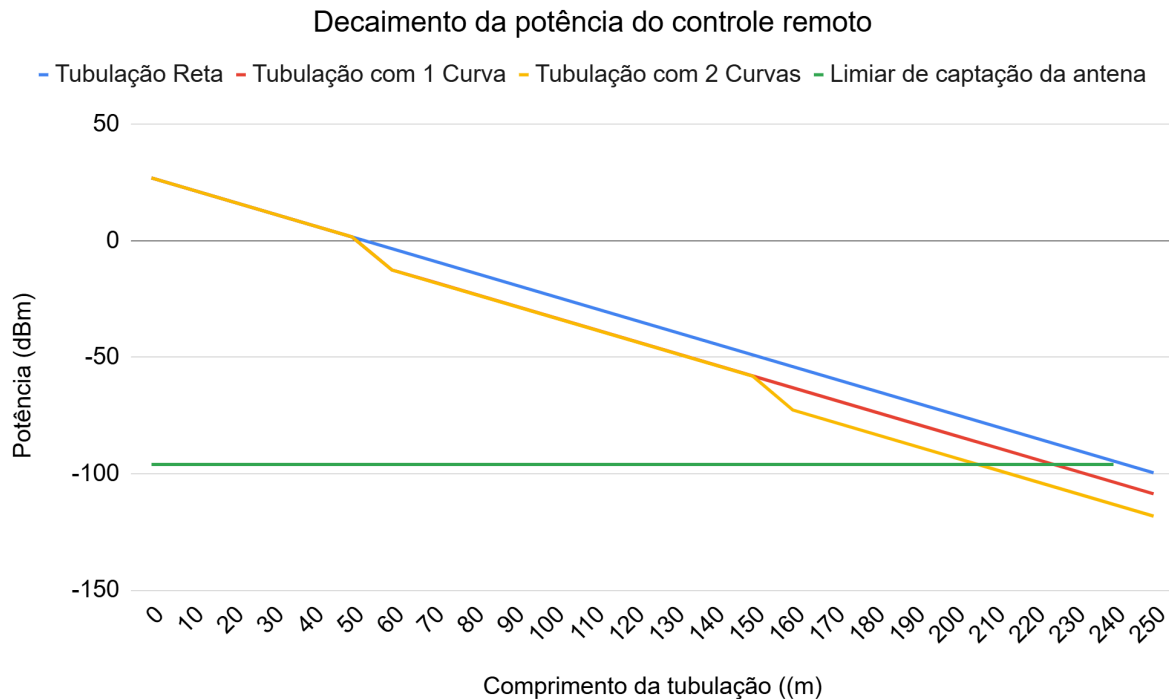


Figura 25: Decaimento da potência em tubulação reta, com 1 e 2 curvaturas

O decaimento da potência, mostrado no figura 15, é acentuado nas curvaturas de forma que há redução do alcance de operação.

Em aplicações práticas, além dos fatores citados acima, é necessário considerar o meio propagante que estará presente no interior das tubulações. Para as simulações, foi considerado meio preenchido completamente por ar. Em casos práticos, diferentes cenários podem ser encontrados, tanto pela presença de outros compostos ao longo da tubulação, como resíduos de água, umidade, ou outros produtos químicos. Os diferentes meios propagantes poderão ter efeito positivo, com compostos que contribuem com menor atenuação ao sinal do controle remoto, ou efeito negativo, reduzindo drasticamente o alcance de operação. Para isso, em aplicação prática, deve-se considerar tais fatores para uma análise mais aprofundada.-

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposto um estudo da viabilidade de aplicação de robôs esféricos de inspeção, os RollerBots, para aplicação no monitoramento interno de tubulações. A aplicação de soluções robóticas em tais tarefas cumpre com demandas cada vez mais crescentes de manutenção de tais infraestruturas, de acordo com requisitos de disponibilidade e segurança ecológica.

Em primeiro momento, realiza-se a listagem das especificações dos hardwares de comunicação que compõem tanto os robôs esféricos, quanto o controle remoto. Tais especificações traduzem diretamente o comportamento esperado de comunicação.

No decorrer do projeto, a simulação das ondas eletromagnéticas transmitidas pelo controle remoto propagadas pela tubulação foi simulada a fim de atestar a viabilidade técnica de comunicação em ambiente confinado. Pelos resultados obtidos, os 5 modos de propagação calculados para as diversas combinações de material, diâmetro e abertura apresentaram valores compatíveis dos parâmetros S_{21} de forma que a comunicação interna é atestada.

O cálculo das atenuações e alcances permitiu estabelecer tendências e comportamentos importantes dos padrões de propagação de sinais. Com esta análise, foi possível atestar que, no geral, o diâmetro de 70 cm representa a maior viabilidade de utilização por induzir menor atenuação, o que, conseqüentemente, resultará em maior alcance.

Por fim, estabelece-se que, para diâmetros de 30 cm, 50 cm e 90 cm, recomenda-se distância de uma a duas dezenas de metros. Tal distância mostra-se incompatível com demandas quilométricas de demandas de inspeção. Desta forma, nos cenários citados, a utilização somente do controle remoto e do robô esféricos é insuficiente e requer auxílio adicional. Para o diâmetro de 70 cm, o resultado é mais satisfatório. Os resultados obtidos mostram uma possível aplicabilidade na casa das centenas de metros. Mais uma vez, para demandas quilométricas, esta solução ainda requer auxílio adicional.

Para continuidade do projeto, recomenda-se o estudo de combinações adicionais de diâmetros, materiais e meios propagantes para expandir o embasamento prático e teórico para futuras aplicações *in loco*.

8. CONTINUIDADE DO PROJETO

Ao longo do projeto, foram discutidos fatores que foram considerados para este projeto e que podem contribuir diretamente para os resultados obtidos, como material da tubulação, diâmetro da tubulação, composição do meio propagante no interior da tubulação. Estes fatores podem ser expandidos em projetos futuros e estudos detalhados podem ser executados a partir deste trabalho.

Para isso, recomenda-se o estudo de outros cenários que os robôs poderão ser expostos quando em operação. Estes outros cenários são listados abaixo:

- Verificação de outros materiais para a tubulação, em especial outros metais
- Verificação de outros diâmetros
- Presença de porções de líquido na tubulação,
- Presença de outros meios de preenchimento da tubulação, como outros gases, além do ar.

Além disso, recomenda-se a elaboração de simulação da antena transmissora a certa distância da abertura da tubulação. Esta simulação permitirá a obtenção os devidos modos propagantes propriamente calculados para as incidências nas abertura da tubulação.

O estudo de diversos cenários contribuirá com o enriquecimento prático e teórico do projeto e contribuirá para uma aplicação segura e confiável dos *RollerBots* durante a operação.

9. BIBLIOGRAFIA

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Mapa da infraestrutura de gasodutos de transporte no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-da-infraestrutura-d-e-gasodutos-de-transporte-no-brasil>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SHELDON, Robert. Definition Antenna. 2023. Disponível em: <<https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/antenna>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FILHO, Alexandre Toccoli; MIZUKOSHI, José Kenichi. RADIAÇÕES IONIZANTES E NÃO IONIZANTES. s.d. Universidade Federal do ABC, UFABC. Disponível em: <https://radiacoes-ionizantes.propg.ufabc.edu.br/?page_id=20> Acesso em: 30 jun. 2025

MARTINS, Ramon Mayor. ANT - Antena e Propagação. [Apostila]. 2016. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. IFSC-SC.

STROSKI, Pedro Ney. Antenas (Parte 2). Electrical Library. 28 de Setembro de 2018. Disponível em: <<https://www.electricalibrary.com/2018/09/28/antenas-parte-2/>>. Acesso em: 30 Jun 2025.

CISCO. Antena omni vs. Antena direcional. 27 de fevereiro de 2007. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/pt_br/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html>. Acesso em: 30 jun. 2025

MIZUKAMI, Masato; YAMAGUCHI, Masami; MURATA, Hiroshi; HIRATA, Akihiko. *Small pipe inspection robots with wireless communication using microwave guided modes propagating along a pipe wall*. In: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2023, Oahu, Hawaii. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2023. DOI: 10.1109/SMC53992.2023.10394089. Acesso em: 15 jun. 2025.

BORGES, Ben-Hur Viana. *Teoria de Ondas Guiadas*. [Apostila]. Primeiro semestre de 2003. Material de aula do curso de graduação. Universidade de São Paulo, EESC-USP, 2003.

CADENCE. *The types of losses in a rectangular waveguide*. Cadence System Analysis Blog, 11 mar. 2021. Disponível em: <<https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-the-types-of-losses-in-a-rectangular-waveguide>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MUNDO EDUCAÇÃO. Dieletricos. s.d. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/dieletricos.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRASIL AÇOS. Tubulação de gás: conheça os tipos e características para comparar. 2023 Disponível em: <https://brasilacos.com.br/tubulacao-de-gas-conheca-os-tipos-e-caracteristicas-para-comparar/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

TUBOS ABC. Tubos para a indústria de gás e óleo. s.d. Disponível em: <https://www.tubosabc.com.br/tubos/tubos-para-a-industria-de-gas-e-oleo/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

TECHDUTO. Como funcionam os tubos de drenagem. 2021. Disponível em: <https://techduto.com.br/artigos/como-funcionam-os-tubos-de-drenagem/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SILVA, Pedro Alves; MORAES, Alisson Gomes de; FRANÇA, Francis Valter Pêpe. Análise comparativa entre materiais de tubulação para construção de redes adutoras de água. *TratamentoDeAgua*, publicado em 30 out. 2017. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/materiais-tubulacao-redes-adutoras-de-agua/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

DISPARCO. Como escolher a tubulação certa para transportar água com eficiência. s.d. Disponível em: <https://disparco.com.br/tubulacao-usada-no-transporte-de-agua/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MOTOMURA, Marina. Como funciona um gasoduto?. Mundo Estranho, Revista Superinteressante, [s.l.], 2024. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funciona-um-gasoduto/>>. Acesso em: 13 jun. 2025.

TBG – Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. MEMORIAL DESCRITIVO – Descrição das instalações do gasoduto Bolívia-Brasil; MD-5000-940-TOE-005. Revisão J.

São Paulo: TBG, s.d.. Disponível em: <https://www.tbg.com.br/documents/20124/353690/MD-5000-940-TOE-005-J.pdf/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

GASNET. Gasoduto Bolívia-Brasil chega ao sul. 03 abr. 2000. Disponível em: <https://www.gasnet.com.br/conteudo/35/Gasoduto-Bolivia-Brasil-chega-ao-sul>. Acesso em: 13 jun. 2025.

ZHAO, W.; KAMEZAKI, M.; YOSHIDA, K.; SUGANO, S.; KONNO, M.; TORIUMI, R. *Preliminary measurement and analysis of microwave transmission attenuation in small gas pipeline*. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS (ICM), 2017, Churchill, VIC. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2017. p. 342–347. DOI: 10.1109/ICMECH.2017.7921128.

SIYI STORE, SIYI MK15 MK32 Long Range Antenna 14dB Directional Patch Antenna with SMA Connector Compatible with MK15 MK32 Remote Controller and Antenna Trackers. Disponível em: <<https://shop.siyi.biz/products/mk15-long-range-antenna>>. Acesso em: 28 mai. 2025.

QUECTEL. RM500Q-AE & RM502Q-AE Hardware Design. [S.l.]: Quectel Wireless Solutions, 2021. 86 p. Disponível em: <<https://www.quectel.com>>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KIM, S.; SUREK, J.; BAKER-JARVIS, J. Electromagnetic Metrology on Concrete and Corrosion. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD, v. 116, n. 3, p. 655–669, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.6028/jres.116.011>>. Acesso em: 29 maio 2025.

MATMAKE. Magnetic Permeability Values for Common Materials. s.d. Disponível em: <<https://matmake.com/properties/magnetic-permeability-of-common-materials.html>>. Acesso em: 29 maio 2025.

ULTRATECH CEMENT. What is Density of Concrete?. s.d. Disponível em: <<https://www.ultratehcement.com/for-homebuilders/home-building-explained-single/descriptive-articles/what-is-density-of-concrete>>. Acesso em: 29 maio 2025.

MEEKER, David C. Finite Element Method Magnetics – *FEMM 4.2*. Biblioteca de materiais. Disponível em: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. Acesso em: 13 jun. 2025.

EDWARDS, Terry; STEER, Michael B. *Appendix B: Material Properties*. In: Foundations for Microstrip Circuit Design. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016. p. 635–642. DOI: 10.1002/9781118936160.app2. Acesso em: 14 jun. 2025. scholarsarchive.byu.edu+6colab.ws+6researchgate.net+6

APÊNDICE

A. Especificações do materiais

Tabela 16: Especificações elétricas e magnéticas dos materiais

Material	Permissividade Relativa ϵ_r	Permeabilidade Relativa μ_r	Condutividade Elétrica σ (S/m)	Tangente de Perda Dielétrica	Tangente de Perda Magnética
Aço carbono	1	902.6	5800000	0	0
Concreto	5.65	1	0	0.06	0
Polietileno	2.25	1	0	0.001	0

Material	Saturação Magnética (T)	Fator G de Landé	Delta H	Densidade de Massa (Kg/m^3)
Aço carbono	0	2	0	7850
Concreto	0	2	0	2350
Polietileno	0	2	0	930

Polietileno é um material cadastrado no ANSYS HFSS e as informações não foram alteradas.

Informações do concreto foram obtidas de: (AÇOS NOBRE, s.d.), (EDWARDS; STEER, 2016) e (MEEKER, David C, 2025).

Informações do concreto foram consideradas do concreto seco e obtidas de: (KIM, S.; SUREK, J.; BAKER-JARVIS, J, 2011), (MATMAKE, s.d.) e (ULTRATECH CEMENT, s.d.).

B. Modos de propagação simulados

Abaixo, são apresentados os modos de propagação simulados via ANSYS HFSS. Somente são apresentados os padrões para as tubulações de 30 cm de diâmetro. Porém, estes padrões são utilizados de forma semelhante em toda variação.

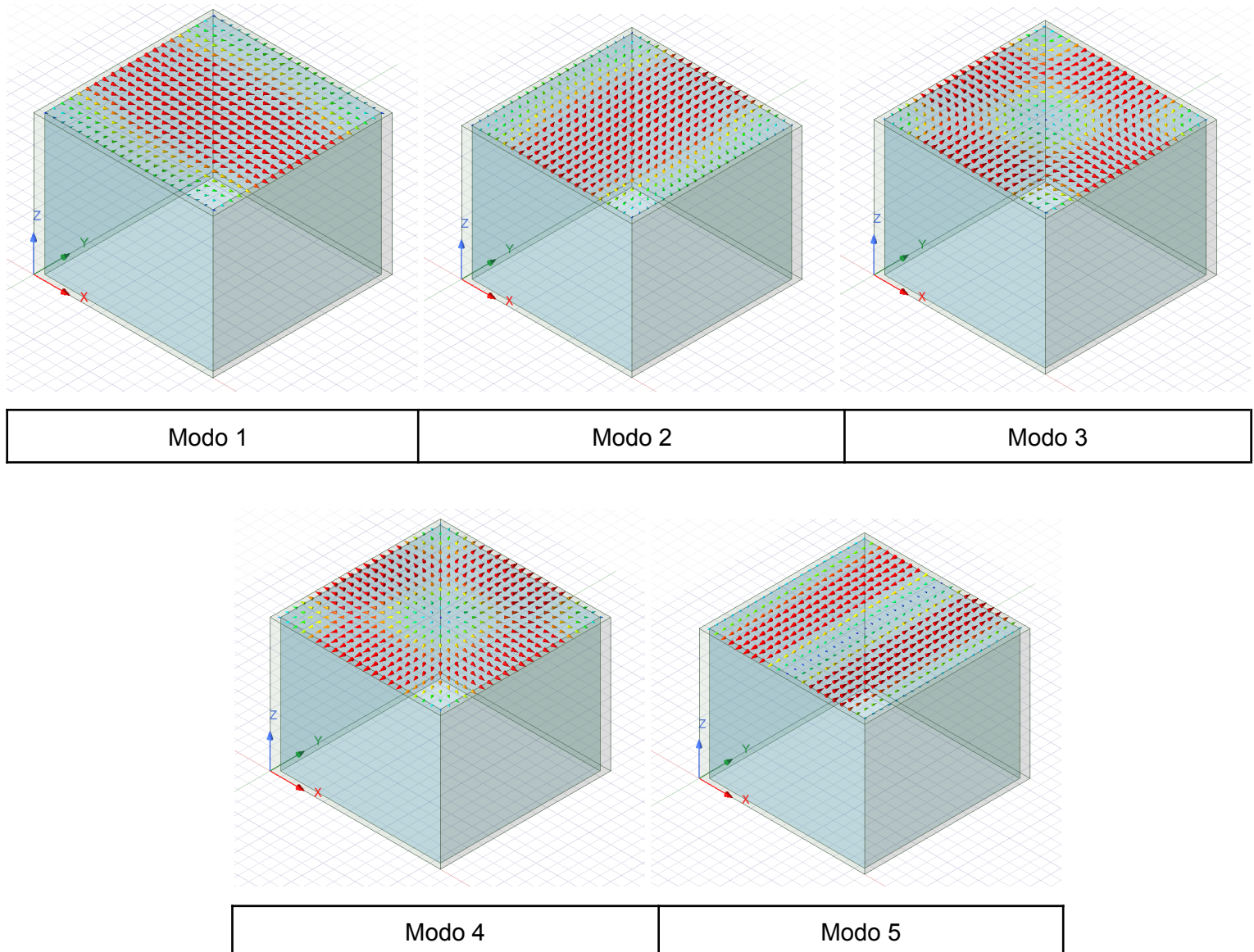


Figura 26: Modos de propagação simulados nas tubulações retangulares retas

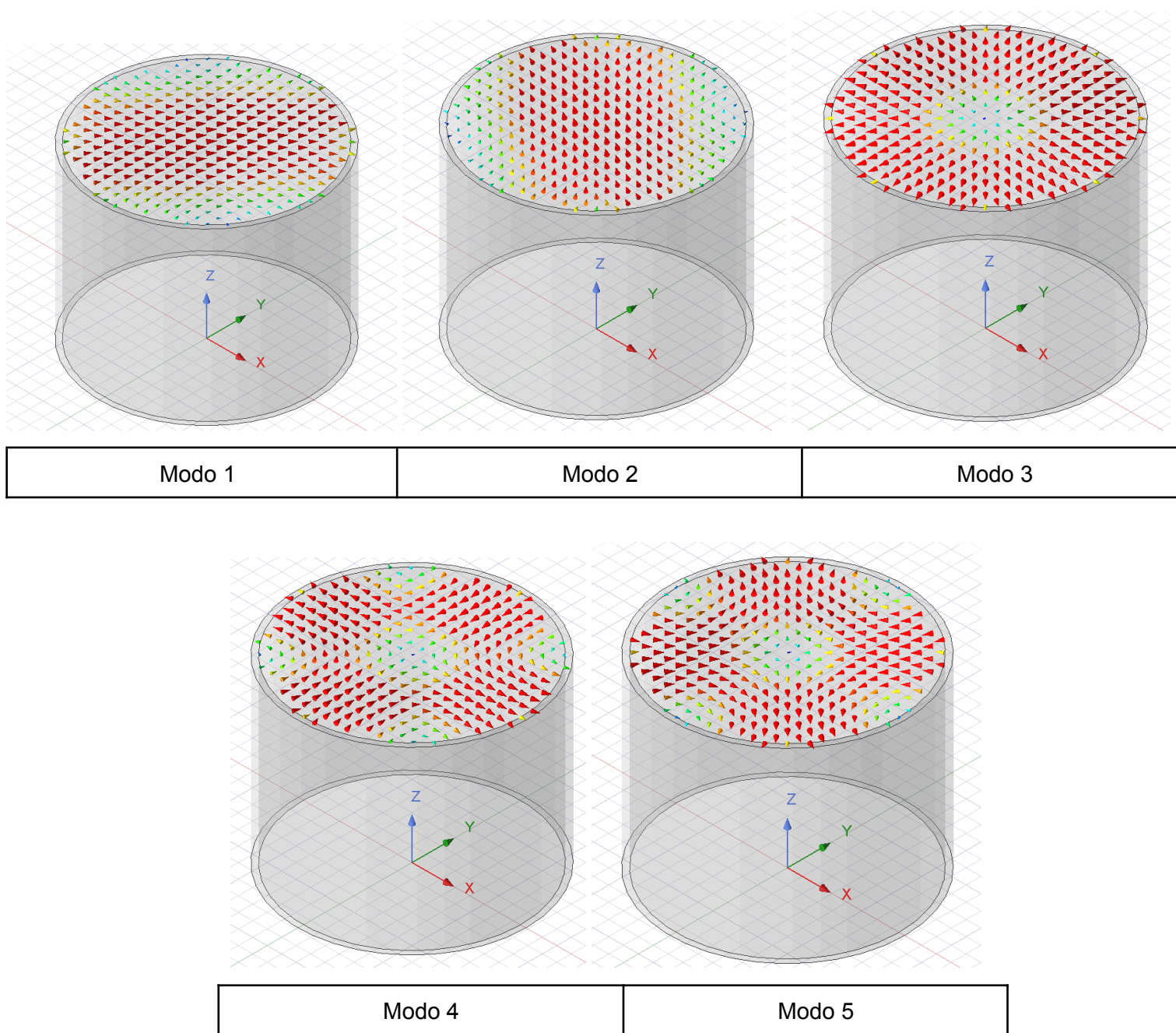
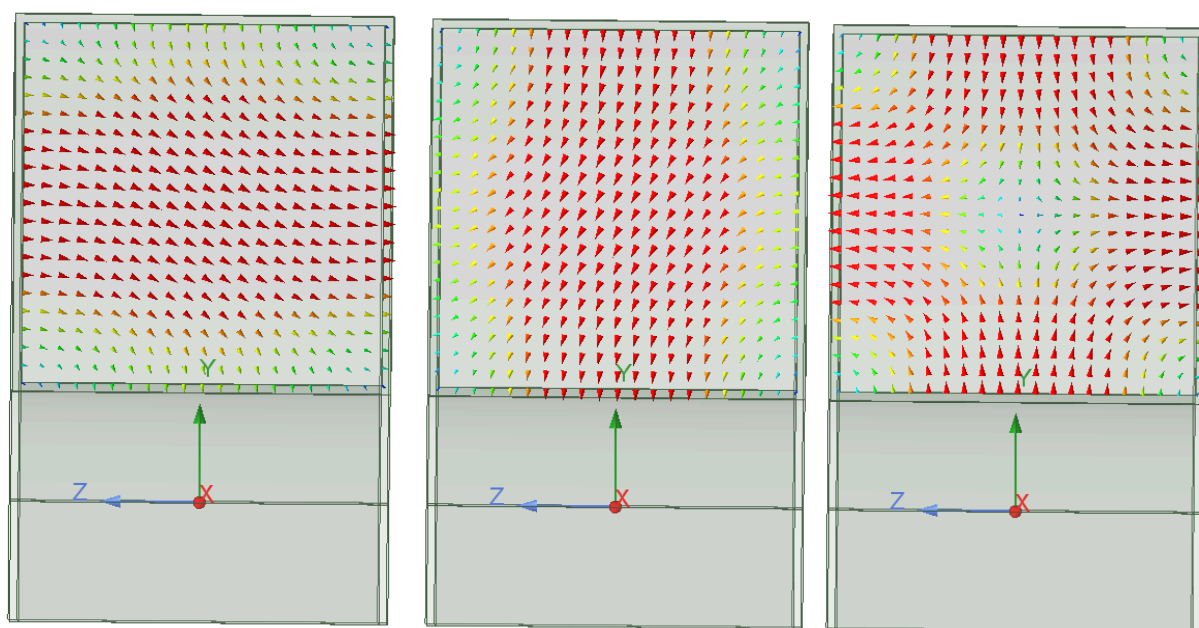


Figura 27: Modos de propagação simulados nas tubulações cilíndricas retas

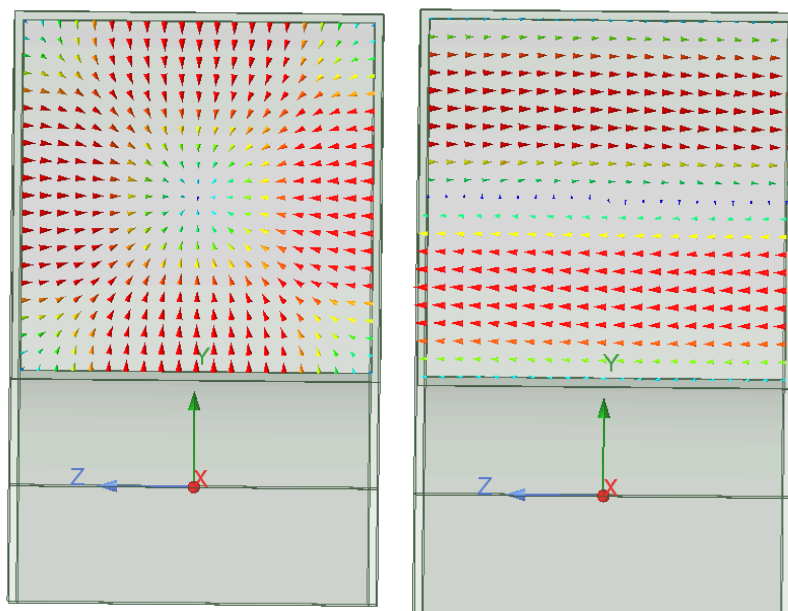
Abaixo, são apresentados os modos de propagação simulados via ANSYS HFSS. nas tubulações retangulares e circulares curvas.



Modo 1

Modo 2

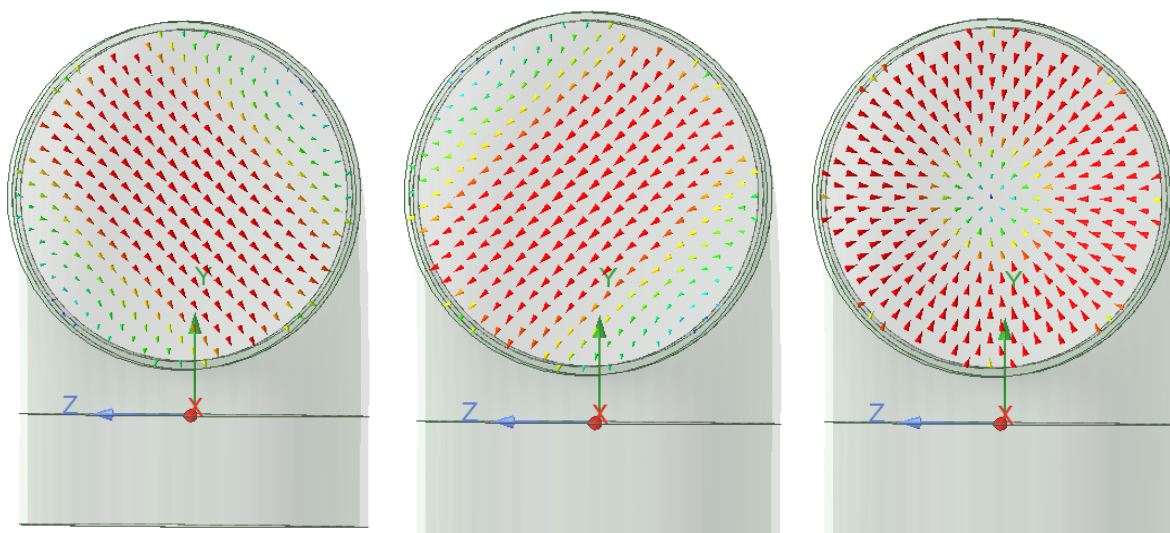
Modo 3



Modo 4

Modo 5

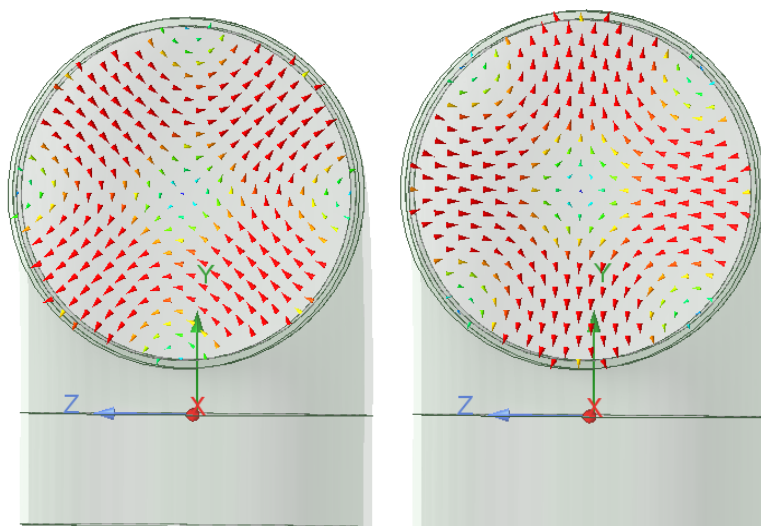
Figura 28: Modos de propagação simulados nas tubulações retangulares curvas



Modo 1

Modo 2

Modo 3



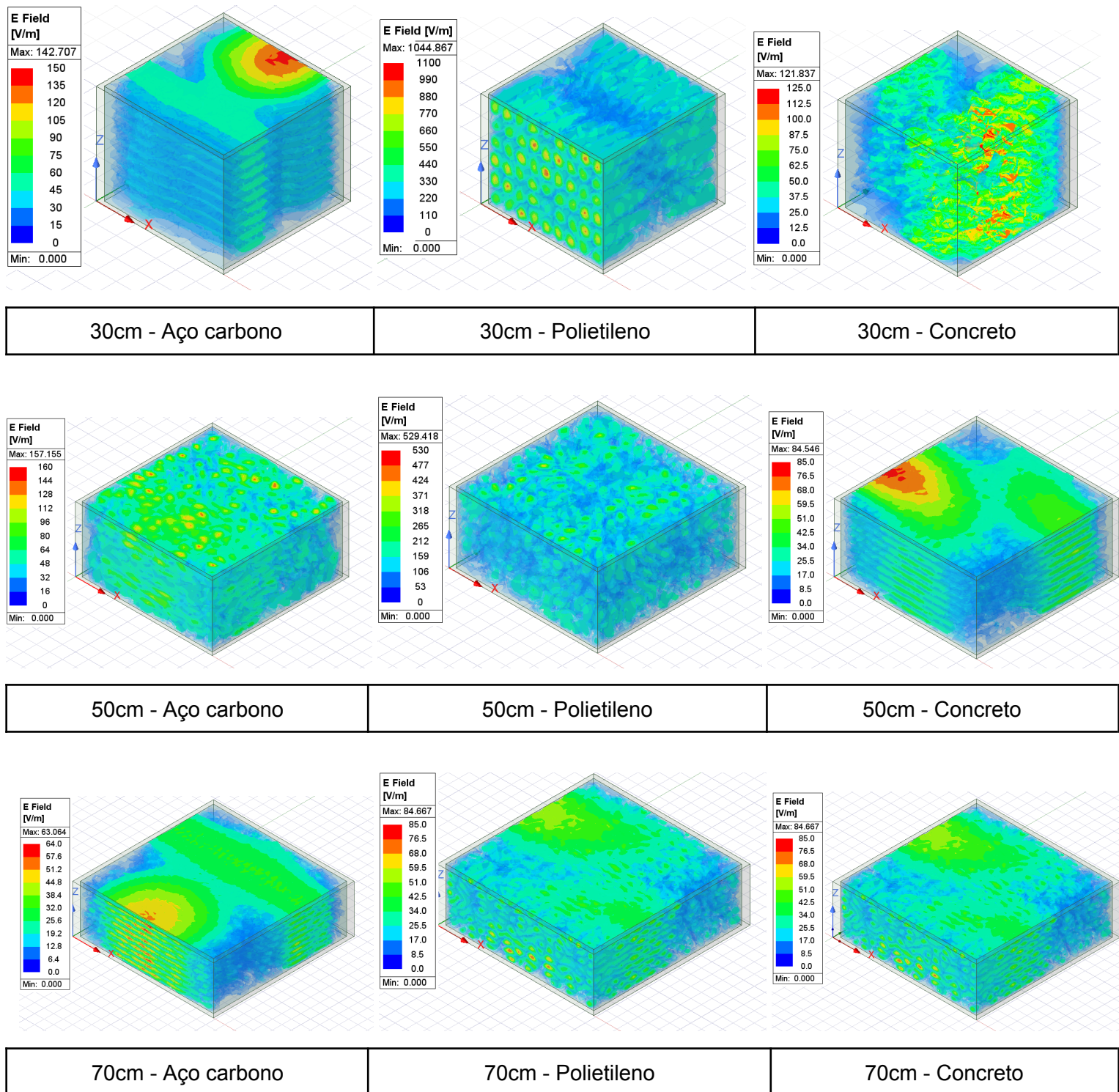
Modo 4

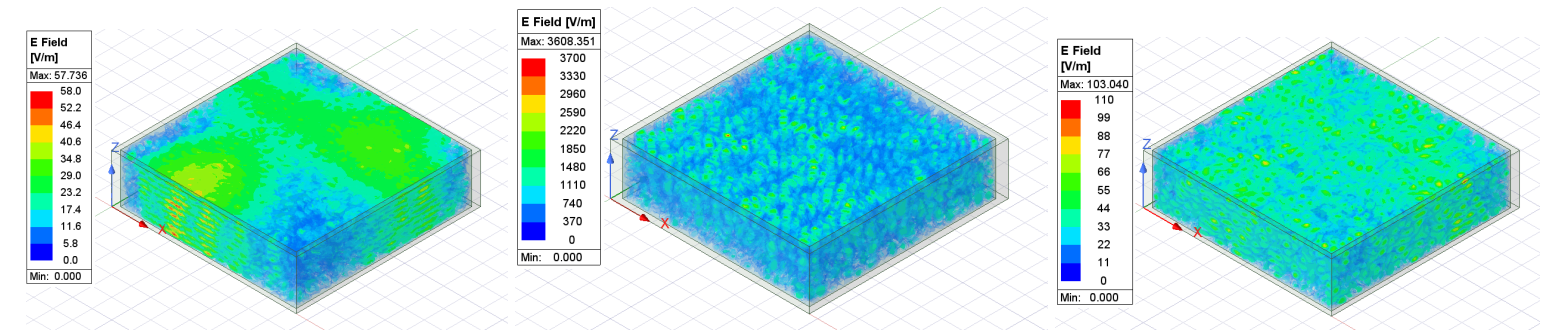
Modo 5

Figura 29: Modos de propagação simulados nas tubulações cilíndricas curvas

C. Propagação de ondas nas tubulações em 5.8GHz

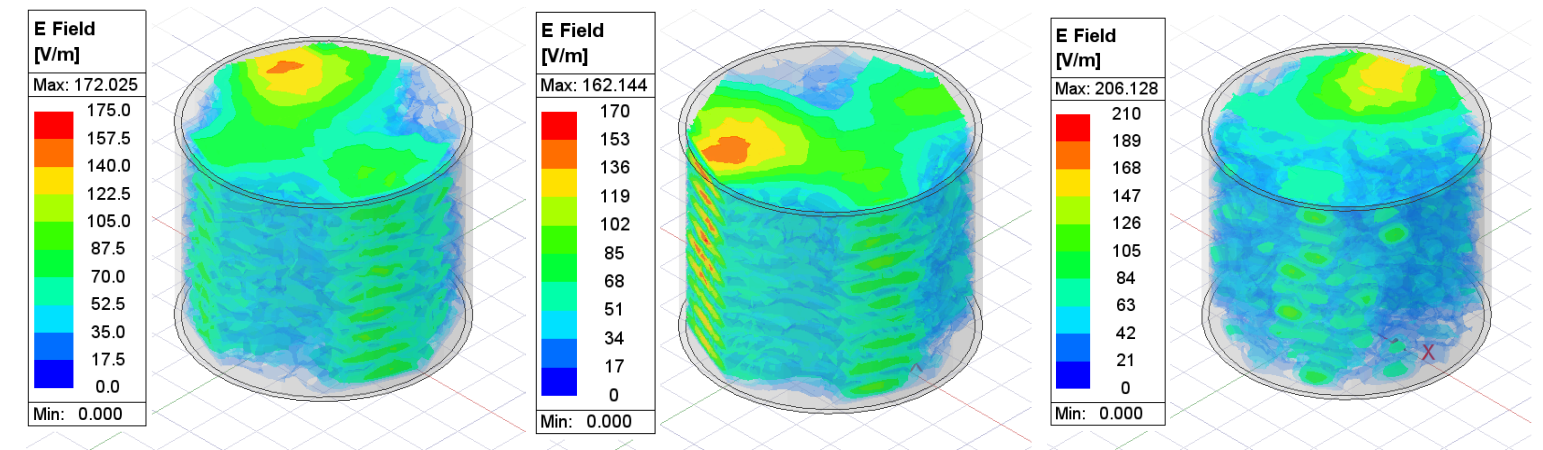
Abaixo, são apresentados os comportamentos das ondas eletromagnéticas nas tubulações retangulares e circulares retas.



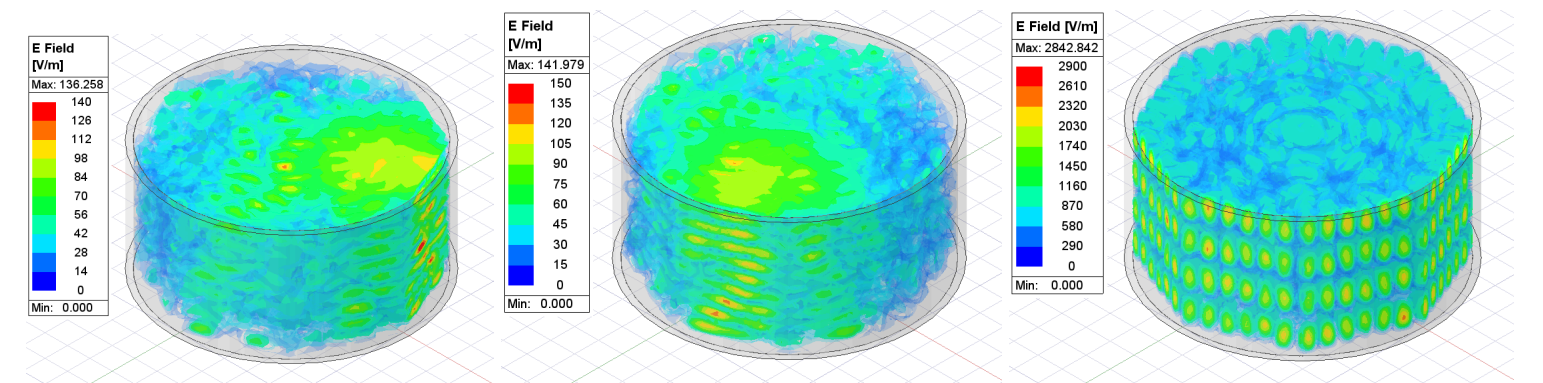


90cm - Aço carbono 90cm - Polietileno 90cm - Concreto

Figura 30: Campo elétricos nas tubulações retangulares retas



30cm - Aço carbono 30cm - Polietileno 30cm - Concreto



50cm - Aço carbono 50cm - Polietileno 50cm - Concreto

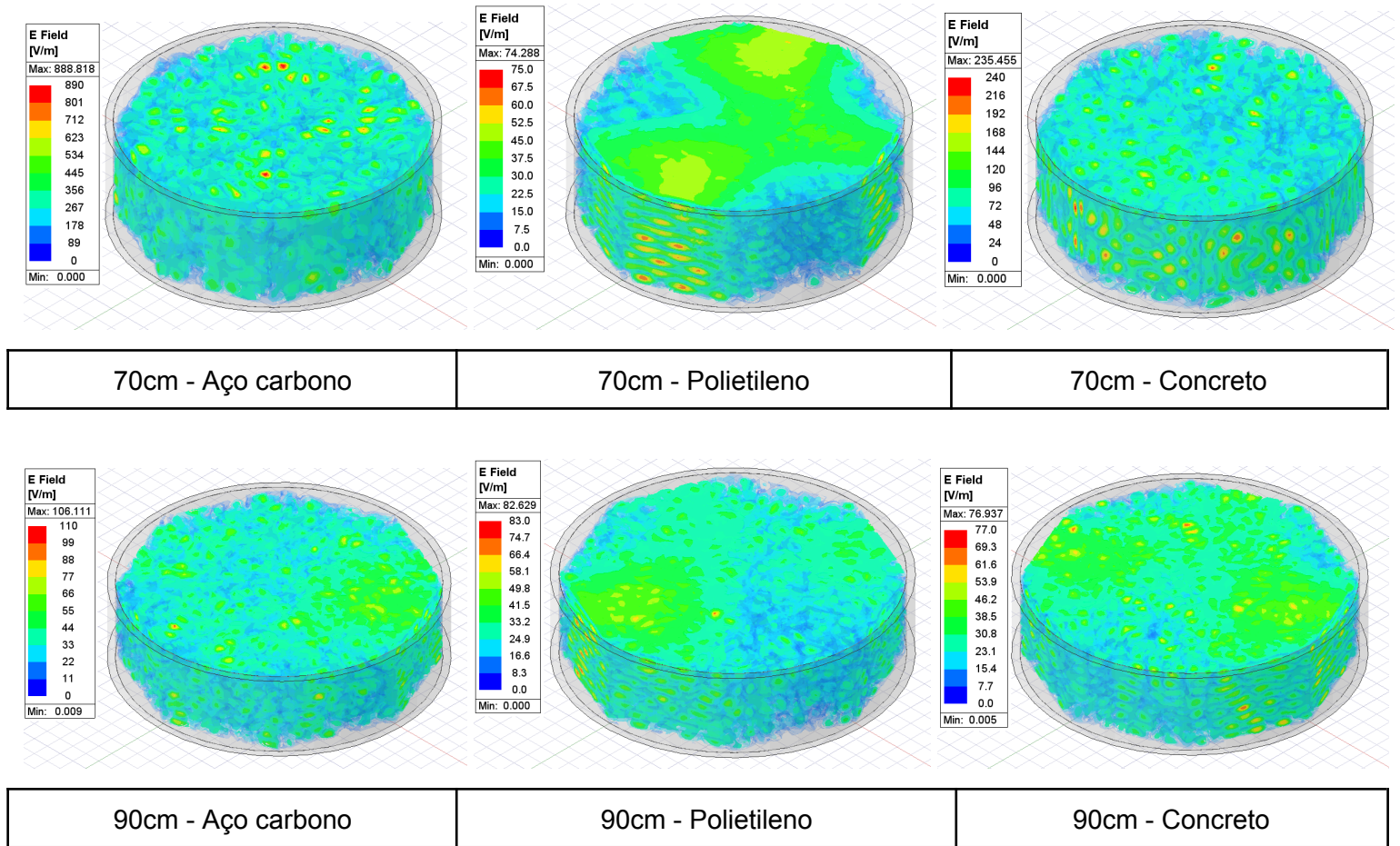
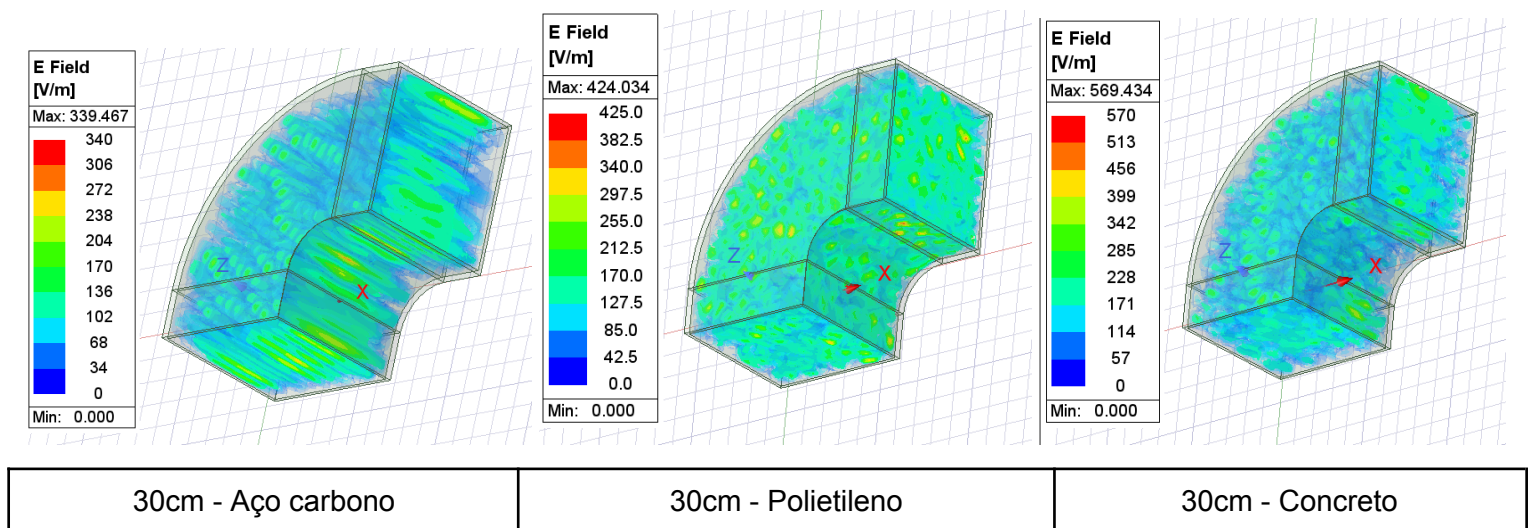


Figura 31: Campo elétricos nas tubulações circulares retas

Abaixo, são apresentados os comportamentos das ondas eletromagnéticas nas tubulações retangulares e circulares curvas.



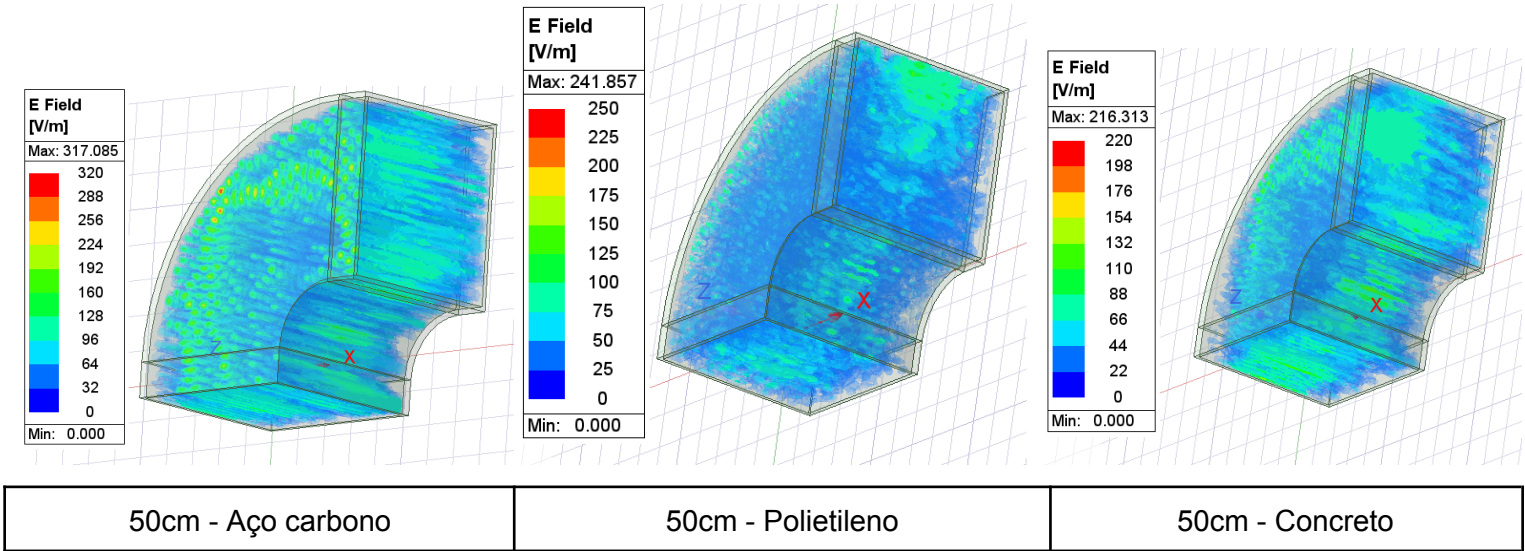


Figura 31: Campo elétricos nas tubulações retangulares curvas

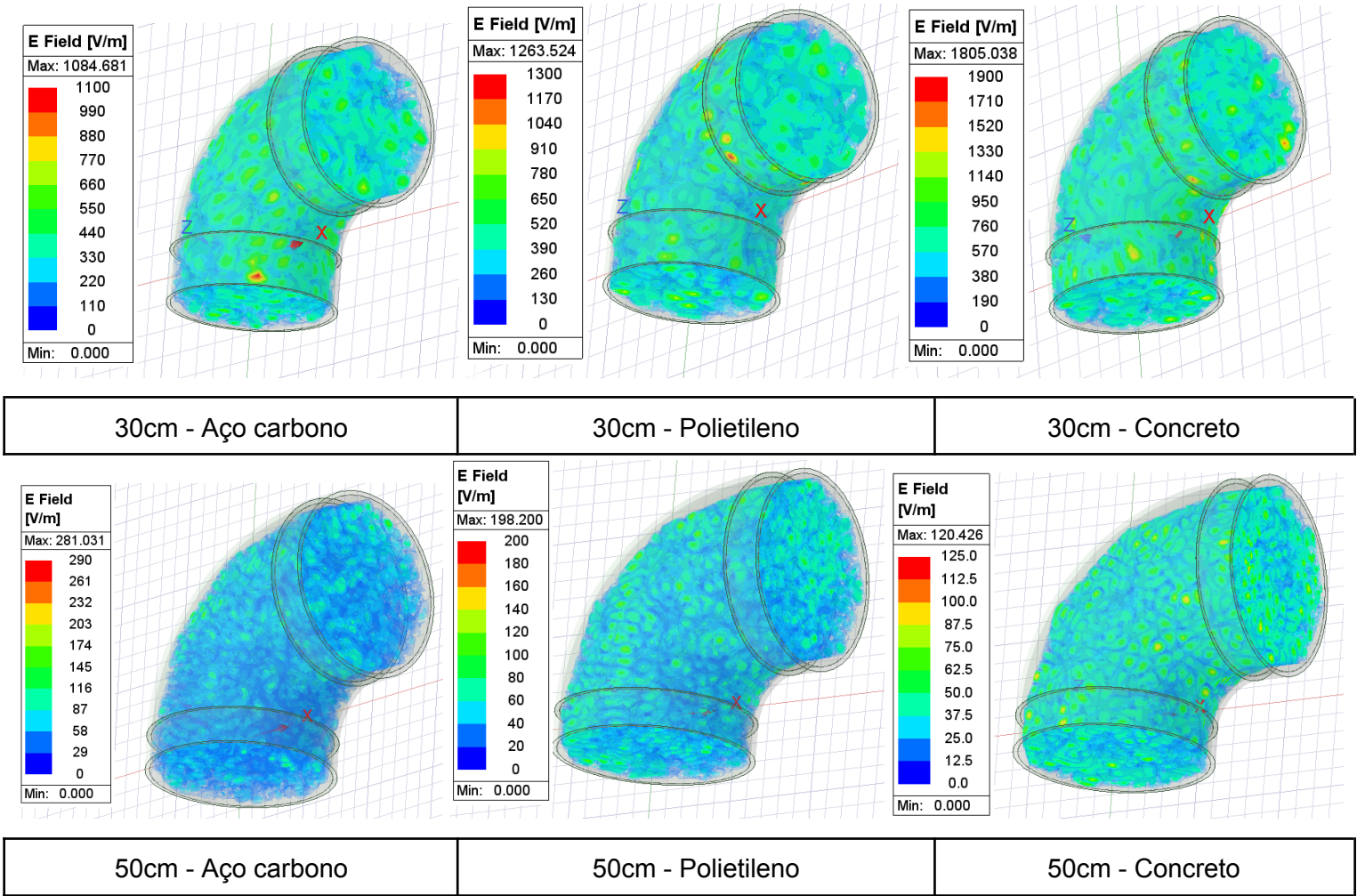


Figura 32: Campo elétricos nas tubulações cilíndricas curvas