



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ MARIO ALEXANDRE MELO DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE FASE E AMPLITUDE DE UM SISTEMA DE
ARRANJO DE ANTENAS INTELIGENTES**

Recife

2023

JOSÉ MARIO ALEXANDRE MELO DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E AUTOMATIZAÇÃO DE FASE E AMPLITUDE DE UM SISTEMA
DE ARRANJO DE ANTENAS INTELIGENTES**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Comunicação.

Orientador (a): Prof. Marcos Tavares de Melo Ph.D.

Coordenador (a): Prof.. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo

Recife

2023

O48o Oliveira, José Mario Alexandre Melo de.
Otimização e automação de fase e amplitude de um sistema de arranjo de antenas inteligentes / José Mário Alexandre Melo de Oliveira. – 2023.
155 folhas, il.; tab.

Orientador: Prof. Marcos Tavares de Melo Ph.D.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2023.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Circuito formador de feixe. 3. Antenas inteligentes. 4. Yagi-Uda. 5. PSO. 7. Sistema de antenas inteligentes comutado. 8. Automação de dispositivos. 9. Análise de desempenho do sistema. 10. Previsão de perda de pacotes. I. Melo, Marcos Tavares de (Orientador. II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-123

JOSÉ MARIO ALEXANDRE MELO DE OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO E AUTOMATIZAÇÃO DE FASE E AMPLITUDE DE UM SISTEMA
DE ARRANJO DE ANTENAS INTELIGENTES**

Tese de Doutorado submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Comunicação.

Aprovada em: 22 /12/ 2023

BANCA EXAMINADORA

Dr. Bruno Agra Kleinau,
CELPE
Examinador Externo À Instituição

Dr. Bruno Gomes Moura de Oliveira
IFPE
Examinador Externo À Instituição

Dra. Crislane Priscila do Nascimento Silva
Boeing
Examinadora Externa À Instituição

Dr. Daniel de Filgueiras Gomes
UFPE
Examinador Externo Ao Programa

Dr. Marcos Tavares de Melo
UFPE
Presidente

Dedico este trabalho aos meus filhos, Dante e Lara, e à minha esposa, Irene. Desejo que meus filhos continuem trilhando o caminho dos estudos e alcancem o sucesso, assim como eu consegui.

AGRADECIMENTOS

Antes de iniciar agradecendo a todos que me ajudaram a chegar até aqui, tanto diretamente quanto indiretamente, no desenvolvimento deste trabalho, gostaria de expressar minha gratidão a Deus, pois em muitos momentos ele me deu a força para não desistir, mesmo diante de todas as dificuldades que enfrentei ao longo deste período.

Agradeço de coração à minha esposa, Irene, e aos meus dois filhos, Dante e Lara, pois muitas vezes tive que me ausentar de suas vidas. Minha filha Lara frequentemente me questionava, dizendo: "Papai, você nunca tira férias, não é?".

A Irene, minha esposa, tenho uma gratidão que é imensa, pois ela me forneceu todo o apoio necessário para que eu pudesse chegar até aqui.

Expresso meu profundo agradecimento ao meu orientador, o Professor Marcos Tavares de Melo, por ter me aceitado como aluno e por sua orientação incansável na elaboração dos artigos, no projeto de pesquisa e no desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de aproveitar esta oportunidade para agradecer aos professores Belfort e Daniel Gomes, que responderam a muitas das minhas dúvidas durante o projeto de pesquisa e a elaboração dos artigos neste período.

Aos meus amigos do laboratório, Crislane, Daniel Lins, Amanda, Marina, Renan, João Henrique, Marcelo Alves, Marcelo Coutinho e Vinicius, agradeço por todas as parcerias que formamos ao longo do doutorado.

Ao Professor Douglas Contente, a quem conheço desde o início do meu mestrado, expresso minha gratidão por esclarecer muitas das minhas dúvidas.

Ao Professor Lauro Novo, agradeço por me incentivar a seguir o caminho do doutorado.

Aos meus colegas e amigos professores do IFPE, tenho muito a agradecer, pois precisei da ajuda deles para ministrar minhas aulas quando não pude estar presente devido ao doutorado.

À minha mãe, um agradecimento especial, por ter feito todos os esforços necessários para me mostrar o caminho do estudo, possibilitando que eu chegasse até aqui.

Aos professores que compõem a banca de doutorado, expresso minha gratidão por lerem este trabalho e por contribuírem com seus comentários valiosos.

Por fim, agradeço ao grupo NEOENERGIA pelo projeto de pesquisa desenvolvido em parceria com a UFPE, que me deu a oportunidade de participar e desenvolver este trabalho de doutorado.

RESUMO

O conceito de supervisor para monitoramento de uma *smart grid* de uma concessionária de distribuição de energia elétrica é introduzido nesta Tese de Doutorado. É descrito um sistema de antena inteligente comutada composto por: dois arranjos de quatro antenas Yagi-Uda montados em *back-to-back*; um circuito de formação de feixe (CFF); e um Controle de Arranjo de Antenas (CAT), cuja principal característica é que seu lóbulo principal seja maximizado usando o método de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), enquanto seus lóbulos laterais são minimizados. A aplicação do PSO integrado ao *software* de simulação eletromagnética 3D *Ansys HFSS* obteve excelentes resultados e foi validado em experimentos práticos. Os resultados medidos em campo aberto estão de acordo com as simulações e são comparáveis com o arranjo das concessionárias de distribuição de energia. Como esperado, os ganhos obtidos mostraram-se maiores que obtidos com um arranjo de antenas de dipolos dobrados, quando os lóbulos principais foram apontados para os ângulos objetivos. Essas características atendem às necessidades de um sistema de controle supervisor para empresas de distribuição de energia elétrica, que necessitam de redes de comunicação RF de alto ganho de potência para monitorar chaves religadoras elétricas distantes em uma área de abrangência das respectivas estações rádio base. Neste trabalho também apresenta as análises do desempenho do sistema de antenas inteligentes e é proposto um modo de realizar previsão de perdas de pacotes baseada nos parâmetros do CFF e índices de transmissão do rádio e do CAT. A configuração completa descrita neste trabalho foi testada de forma abrangente e demonstrou um bom desempenho. A taxa de perda de pacotes atendeu aos padrões desejados em condições reais e, quando comparada com o sistema atualmente utilizado pela concessionária de distribuição de energia elétrica, atendeu satisfatoriamente aos requisitos operacionais. Essa abordagem representa uma solução promissora para acessar estações remotas das empresas de distribuição de energia elétrica sem a necessidade de instalar repetidores adicionais.

Palavras-chave: Circuito Formador de Feixe; Antenas Inteligentes; Yagi-Uda; Pso; Sistema de Antenas Inteligentes Comutado; Automação de Dispositivos; Análise de Desempenho do Sistema; Previsão de Perda de Pacotes.

ABSTRACT

The concept of supervisory monitoring for a smart grid of an electric power distribution utility is introduced in this doctoral thesis. A switched smart antenna system is described, consisting of: two arrays of four Yagi-Uda antennas mounted back-to-back; a beamforming circuit (BFC); and an Antenna Array Control (CAT), whose main feature is to maximize its main lobe using the Particle Swarm Optimization (PSO) method, while minimizing its side lobes. The application of PSO integrated with the 3D electromagnetic simulation software Ansys HFSS achieved excellent results and was validated in practical experiments. The measured results in open field are consistent with the simulations and are comparable with the arrangement of electric distribution utilities. As expected, the gains obtained were higher than those obtained with a array of dipole antennas, when the main lobes were pointed to the target angles. These features meet the needs of a supervisory control system for electric distribution companies, which require RF communication networks with high power gain to monitor distant electric recloser switches in a coverage area of their respective base stations. This work also presents analyses of the performance of the smart antenna system and proposes a method for predicting packet losses based on the parameters of the BFC and transmission indices of the radio and the CAT. The entire configuration described herein was thoroughly tested and demonstrated good performance. The packet loss rate met the desired thresholds under real-world conditions and, when compared to the system currently utilized by the electric distribution utility, satisfactorily fulfilled the operational requirements. This approach represents a promising solution for accessing remote stations of electric distribution companies without the need for installing additional repeaters.

Keywords: Beamforming Circuit; Smart Antennas; Yagi-Uda; PSO; Switched Smart Antenna System; Device Automation; System Performance Analysis; Packet Loss Prediction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA

Figura 1 - Processo de otimização do ES.....	28
Figura 2 - Processo de otimização do GA.....	28
Figura 3 - Processo de otimização do PSO.....	29
Figura 4 - Representação da instalação do Arranjo de Antenas instalado na Torre.....	35
Figura 5 - Diagrama em Bloco do Sistema do montado para testes das métricas de comunicação.....	39
Figura 6 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ via CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição.....	41
Figura 7 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ via CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 240 minutos de medição.....	42
Figura 8 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição.....	42
Figura 9 - Taxa de transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 240 minutos de medição.....	43
Figura 10 - Teste de conectividade com ping do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição.....	44
Figura 11 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição de envio de pacotes ICMP.....	44
Figura 12 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation com duração de 60 minutos de medição	45
Figura 13 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation com duração de 60 minutos de medição	45
Figura 14 - Histograma das medições de tempo do RTT do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para 60 minutos	47
Figura 15 - Distribuição normal do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos	48
Figura 16 - Distribuição Rayleigh do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos.	49
Figura 17 - Distribuição Lognormal do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos.	49

Figura 18 - Histograma do teste ponto a ponto do Master (COI) $\Leftrightarrow$ OutStation com duração de 60 minutos	50
Figura 19 - Distribuição Lognormal do teste ponto a ponto do Master (COI) $\Leftrightarrow$ OutStation com duração de 60 minutos	50
Figura 20 - Histograma das amostras do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation do teste do ping para 60 minutos	51
Figura 21 - Distribuição Lognormal das amostras do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation do teste do ping para 60 minutos	51
Figura 22 - Histograma da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation com as medições de tempo do RTT para 240 minutos	52
Figura 23 - Distribuição normal da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos.....	53
Figura 24 - Distribuição Rayleigh da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos.....	53
Figura 25 - Distribuição Lognormal da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos	54
Figura 26 - Diagrama em Bloco do Sistema de Controle de Antenas com o Arranjo de Antenas Inteligentes Comutado	55
Figura 27 - Placas internas do CAT	56
Figura 28 - Encapsulamento de DNP3 sobre TCP/IP.....	56
Figura 29 - Aplicação da função objetivo, incluindo o detector de Lóbulos, a um digrama de radiação hipotético e seus dois componentes de erros resultantes para calcular uma pontuação de partícula para o PSO. O subscrito P indica o componente primário, enquanto o subscrito Si, $i = 1,2,3...$, indica os elementos no somatório do componente secundário	60
Figura 30 - (a) Comparação entre o momento de inércia atual (linha contínua) e o momento de inércia nas tentativas iniciais (linha tracejada); (b) Representação dos pesos de aceleração dinâmica cognitiva e social, indicados por linhas contínuas e tracejadas, respectivamente; (c) Declínio normalizado da saturação de velocidade para cada dimensão do intervalo de pesquisa.....	64
Figura 31 - Curvas normalizadas dos avanços do erro do Gbest durante as otimizações do PSO para as direções desejadas de 30° , 60° e 135°	64

Figura 32 - Desenho de uma antena Yagi-Uda – com 7 elementos para faixa de 440-470 MHz	67
Figura 33 - Desenho do arranjo de 4 antenas Yagi-Uda em polarização vertical e com as antenas paralela entre si.....	67
Figura 34 - Otimização resultante na tentativa de direcionar o diagrama de radiação para alguns ângulos de inclinação ξ aplicados nas antenas extremas do arranjo	68
Figura 35 - Desenho do arranjo de 4 antenas Yagi-Uda em polarização vertical: com as antenas extremas do arranjo numa abertura angular simétrica de ξ	68
Figura 36 - Diagrama de blocos do circuito de formação de feixes	70
Figura 37 - Diagrama de blocos do sistema de antenas inteligentes com estágio de amplificação e chave SPDT para cobrir uma região angular de 360°	71
Figura 38 - Placa para acomodação do CFF. (a) Placa em PVC com os dispositivos do CFF. (b) Vista superior da placa acomodada em uma bandeja do rack com os cabos de RF conectados. Abreviaturas - At.: atenuador, Ch.: Chave SPDT, Amp.; amplificador, Def.: Defasador	72
Figura 39 - Diagrama de uma câmara anecoica	74
Figura 40 - Esquema da vista superior da configuração para as medições do diagrama de uma antena isolada	75
Figura 41 - Montagem da antena para medição do diagrama de radiação em espaço aberto ..	76
Figura 42 - Esquema da vista superior da configuração para as medições do diagrama do arranjo	77
Figura 43- Montagem da Antena fixa utilizada como estação transmissora para medição do diagrama de radiação em espaço aberto.....	79
Figura 44- Montagem do arranjo de antenas para medição do diagrama de radiação em espaço aberto	79
Figura 45- (a) Antena utilizada na estação transmissora para realização do experimento. (b) Montagem da topologia final do arranjo de antenas em campo aberto realizada por min e pelo pesquisador Daniel Lins. (c) Circuito formador de feixe para realização de testes em campo conectado ao arranjo de antenas.....	81
Figura 46- Diagrama de equalização do circuito de formação de feixes.....	82
Figura 47- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 1 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz	83

Figura 48- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 2 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz	84
Figura 49- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 3 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz.....	84
Figura 50- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 4 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz.....	85
Figura 51- Resultados normalizados de otimização simulados no HFSS (em linha sólida azul) e os resultados medidos normalizados (em linha tracejada preta) dos padrões de radiação maximizados em: (a) $\varphi = 20^\circ$, (b) $\varphi = 60^\circ$, (c) $\varphi = 80^\circ$, (d) $\varphi = 100^\circ$, (e) $\varphi = 135^\circ$	87
Figura 52- Foto das Caixas metálica instalada nos postes do Campus da UFPE.....	88
Figura 53- Localização das Caixas remotas no Campus da UFPE.....	89
Figura 54- Rack com o rádio UHF, CAT e CFF instalados nas bandejas	90
Figura 55- Arranjos de Antenas 1 e 2 instalados lado a lado	90
Figura 56- Configuração de teste do divisor de potência	91
Figura 57- Teste do atenuador digital	92
Figura 58-Teste do atenuador digital conectado ao VNA controlado pelo CAT.....	93
Figura 59-Foto da tela do VNA medido a fase imposta ao atenuador digital pelo CAT.....	93
Figura 60-Foto da tela do VNA realizando medida do atenuador digital com fase imposta pelo CAT.....	94
Figura 61-Foto da tela do VNA realizando medida no atenuador digital imposta pelo CAT .	94
Figura 62-Resultado da medição do Defasador dos parâmetros S21 e S12.....	95
Figura 63-Teste da implementação das fases utilizando o analisador de Spectrum	96
Figura 64-Resultado do teste obtido no analisador de Spectrum	96
Figura 65-Gráfico com os resultados da medição com o analisador de Spectrum	97
Figura 66-Teste de medição do Amplificador Digital do CFF configurado para transmissão	97
Figura 67-Teste de medição do Amplificador Digital do CFF configurado para Recepção ...	98
Figura 68-Teste da chave SPDT com o rádio conectado na entrada JC e o analisador de spectrum na saída J1. A chave SPDT está configurada para a saída J1.....	98

Figura 69- Teste da chave SPDT com o rádio conectado na entrada JC e o analisador de spectrum na saída J1. A chave SPDT está configurada para a saída J2	99
Figura 71- Foto do rack com todos os dispositivos necessários para a medição de temperatura.do CFF	101
Figura 72-Resultado da medição de temperatura no divisor de potência.....	102
Figura 73-Resultado da medição de temperatura nos atenuadores.....	102
Figura 74-Resultado da medição de temperatura nos defasadores	103
Figura 75-Resultado da medição de temperatura nas chaves SPDT	103
Figura 76-Resultado da medição de temperatura nos amplificadores	104
Figura 77-Resultado da medição de temperatura na fonte dos amplificadores	104
Figura 78-Topologia para representar a rede de testes no campus da UFPE	106
Figura 79-Gráfico de monitoramento da caixa do CAC durante 24 horas	107
Figura 80-Gráfico de monitoramento da caixa do CCEN durante 24 horas	107
Figura 81-Gráfico de monitoramento da caixa da Biblioteca durante 24 horas.....	108
Figura 82- Medição da perda de pacotes do Sistema de Antenas Inteligentes	111
Figura 83- Variação da atenuação versus duração para envio dos pacotes curvas da regressão para os valores de mínimo, máximo e desvio padrão	112
Figura 84- Perda de pacotes versus a variação de atenuação aplicada nos atenuadores.....	112
Figura 85- Correlação entre os valores medidos durante o teste.....	114
Figura 86- Técnica de regressão Decision Tree aplicada nas 2500 amostras da medição.....	115
Figura 87- Erro entre o valor medido e o valor previsto pela regressão Decision Tree aplicada nas 2500 amostras da medição.....	115
Figura 88- Histograma do Erro entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista. .	115
Figura 89- Decision Tree para Perda de Pacotes com 100 amostras.....	116
Figura 90- Erro entre o valor medido e a regressão do Decision Tree para Perda de Pacotes com 100 amostras.....	116
Figura 91- Técnica Random Forest Regression aplicada nas 2500 amostras da medição.....	117
Figura 92- Histograma do Erro da Técnica Random Forest entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista.....	117
Figura 93- Randon Forest para 100 amostras da perda de pacotes.....	117
Figura 94- Resultado das perdas da rede Multi-Layer Perceptron para o conjunto de treinamento.....	120

Figura 95- Resultado da rede Multi-Layer Perceptron para 2500 amostras da perda de pacotes	120
Figura 96- Histograma do Erro da MLP entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista.....	121
Figura 97- Resultado da rede Multi-Layer Perceptron para Perda de Pacotes com 100 amostras.....	121
Figura 98- Erro entre o valor medido e a rede neural MLP para Perda de Pacotes com 100 amostras.....	121
Figura 99- Perspectiva frontal dos módulos do sistema de antenas inteligentes sobrepostos encapsulados em gabinetes de serviço.....	123
Figura 100- Perspectiva traseira dos módulos do sistema de antenas inteligentes sobrepostos	124
Figura 101- Diagrama em blocos de conexões dos dispositivos presentes no Módulo do CFF	124
Figura 102- Visão frontal do módulo do CFF.....	125
Figura 103- Visão traseira do módulo do CFF.....	126
Figura 104- Visão Frontal do módulo do CAT.....	127
Figura 105- Visão traseira do módulo do CAT.....	127
Figura 106- Visão frontal do módulo das fontes.....	128
Figura 107- Visão frontal do módulo das fontes.....	128
Figura 108- Foto dos três módulos instalados no rack na subestação de Suape.....	129
Figura 109- Foto dos arranjos de antenas instalados na subestação de Suape.....	129
Figura 110- Teste de curta distância da caixa instalada em frente ao Arranjo 1	130
Figura 111- Teste de curta distância da caixa instalada em frente ao Arranjo 2.....	131
Figura 112- Localização das caixas remotas que devem ser utilizadas para os testes.....	134
Figura 113- Diagrama de distribuição das antenas dos arranjos para cobertura das remotas.	135
Figura 114- Caixa instalada na RT3 Fonte: Acervo do autor (2023).....	136
Figura 115- RSSI obtido na remota da RT3.....	136
Figura 116- Teste de conectividade com aplicação ping da RT3 para o rádio da ERB.....	137
Figura 117- Caixa remota instalada na RT4.....	137
Figura 118- RSSI obtido na remota da RT4.....	138
Figura 119- RSSI obtido na remota da RT4 nova tentativa.....	138
Figura 120- RSSI obtido na ERB para acesso a RT4 nova tentativa.....	139

Figura 121- RSSI da RT5 utilizando o arranjo 1.....	140
Figura 122- RSSI da RT6 utilizando o arranjo 1.....	140
Figura 123- RSSI na ERB para as RT5 e RT6 utilizando o arranjo 1.....	140
Figura 124- Relatório do PRTG para o acesso a RT6.....	141
Figura 125- Relatório do PRTG para o acesso a RT5.....	141
Figura 126- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 60 graus.....	142
Figura 127- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 70 graus.....	142
Figura 128- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 80 graus.....	143
Figura 129- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 90 graus.....	143

QUADRO

Quadro 1- Característica técnica do divisor de potência.....	92
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da Amostra do RTT para 60 minutos.....	46
Tabela 2 : Dados dos parâmetros da Amostra do RTT coletados durante 240 minutos.....	52
Tabela 3: Características dos cabos e dos rádios utilizados na obtenção dos diagramas de radiação.....	75
Tabela 4: Características dos cabos utilizados para conectar o divisor e as antenas do arranjo a fim de se oferecer diferentes defasagens.....	78
Tabela 5: Quatro diferentes configurações de cabos para se obter quatro diferentes diagramas de radiação.....	78
Tabela 6: Amplitude e fase dos ramos do circuito de formação de feixe com os atenuadores e defasadores configurados de forma que o lóbulo atinja os ângulos objetivos de 20°, 60°, 80°, 100° e 135°.....	80
Tabela 7: Temperatura de funcionamento dos componentes do CFF.....	100
Tabela 8: Resultados do envio de arquivos para caixa do CAC.....	109
Tabela 9: Resultados do envio de arquivos para a caixa do CCEN.....	109
Tabela 10: Resultados do envio de arquivos para a caixa da Biblioteca.....	109
Tabela 11: Resultado do <i>Decision Tree</i>	116
Tabela 12: Resultado do Random Forest Regression.....	118
Tabela 13: Resultado da Multilayer Perceptron.....	120
Tabela 14: Medidas de atenuação e fase dos cabos RGC213 do Arranjo 1.....	131
Tabela 15: Medidas de atenuação e fase dos cabos RCG213 do Arranjo 2.....	132
Tabela 16: Medições de curta distância em frente ao Arranjo 2.....	132
Tabela 17: Medições de curta distância em frente ao Arranjo 1.....	133
Tabela 18: Endereços IPs dos rádios da RTs.....	135
Tabela 19: Endereços IPs dos rádios da RTs.....	143

LISTA DE ABREVIATURAS

ANAEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações
ASIC - Application – Specific Integrated Circuit
BER - Bit Error Rate
BTS - Base Transceiver Station
CAT - Controlador de Arranjo de Antenas
CFF - Circuito Formador de Feixe
COI - Centro de Operações Integrado
DNP3 - Distributed Network Protocol Version 3
DOA - Direction of Arrival
DSP - Digital Signal Processor
ERB – Estação Rádio Base
EQ - Equação
ES - Evolution Strategies
FA - Firefly algorithm
GA - Genetic Algorithm
GPIO - General Purpose Input Output
HFSS - High Frequency Structure Simulator
ICMP - Internet Control Message Protocols
IEC - International Electrotechnical Commission - Comissão Eletrotécnica Internacional
IED – Intelligent Electronic Device
IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers
IFPE - Instituto Federal de Pernambuco
IP - Internet Protocol
MAE - Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error)
MLP – Multilayer Perceptron
MSE - Erro Quadrado e Médio (Mean Square Error)
P&D – Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento
PRTG - Paessler Router Traffic Grapher
PSO - Particle Swarm Optimization
RF - Rádio Frequência
RSSI - Received signal strength indication

RTT - Round-Trip Time

RT - Rádio Remoto

RTU - Remote Terminal Unit

SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition

SCP - Secure Copy Protocol

SNMP - Simple Network Management Protocol

SPDT - Single-Pole-Double-Throw

TCP/IP - Transmission Control Protocol/ Internet Protocol

TTL - Time to Live

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. (1)	$v_i(k+1) = c_2 \cdot rand_2 \cdot (g_{best}(k) - x_i(k)) + c_1 \cdot rand_1 \cdot (p_{ibest}(k) - x_i(k)) + w \cdot v_i(k)$	61
Eq. (2)	$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1)$	61
Eq. (3)	$w = (w_{min} - w_{max}) \left(\frac{k}{K_{max}} \right)^2 - w_{max}$	62
Eq. (4)	$c_2 = c_{2max} - (c_{2max} - c_{2min}) \cdot \frac{k}{K_{max}}$	62
Eq. (5)	$c_1 = c_{1max} - (c_{1max} - c_{1min}) \cdot \frac{k}{K_{max}};$	62
Eq. (6)	$v_{max} = \left(K_v - \left(\frac{k}{K_{max}} \right)^p \right) V_{max}$	63
Eq. (7)	$D = 2 \left(\frac{\lambda^2}{L} \right)$	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	33
2.2	CARACTERIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO PROBLEMA.....	34
2.3	OBJETIVOS.....	35
3	O SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE ARRANJO DE ANTENAS INTELIGENTES.....	36
3.1	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADO NA TESE.....	56
3.2	ARRANJO DE ANTENAS.....	64
3.3	SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES APLICADO NA TESE DE DOUTORADO.....	68
4	METODOLOGIA.....	73
5	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	83
6	TESTES DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES COMPLETO NA UFPE.....	88
6.1	TESTES DOS DISPOSITIVOS DO CIRCUITO FORMADOR DE FEIXE.....	91
6.2	TESTES DE DESEMPENHO DE SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES MEDIÇÃO DE PERDA DE PACOTES.....	104
6.3	TESTES DE ROBUSTEZ DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES E PREDIÇÃO DE PERDAS DE PACOTES.....	110
6.4	INSTALAÇÃO FINAL DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES.....	122
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	144
7.1	TRABALHOS FUTUROS.....	146
7.2	PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO.....	147
7.3	ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS.....	147
7.4	ARTIGOS EM CONFERÊNCIA.....	147
7.5	PATENTE DEPOSITADA.....	49
	REFERÊNCIAS.....	150

1 INTRODUÇÃO

As empresas do setor de energia elétrica realizaram grandes investimentos em um sistema autônomo de supervisão e monitoramento de dispositivos eletrônicos inteligentes, que são controladores lógicos programáveis também identificados como IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Esse tipo de rede é conhecido como *smart grid*, que por sua vez é uma rede de comunicação e controle de geradores de energia, armazenamento de energia, atendimento a consumidores de energia elétrica e que tem como objetivo fornecer os melhores recursos de rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. As redes *smart grids* utiliza um protocolo chamado DNP3 (*Distributed Network Protocol Version 3*) com o padrão do IEEE 1815 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers 1815*) que foi definido como protocolo padrão pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O protocolo DNP3 foi desenvolvido para a aplicação SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e que é utilizado pelas concessionárias de distribuição de energia com objetivo de comandar equipamentos remotos, como por exemplo, chaves religadoras, que são dispositivos IEDs, que funcionam como um interruptor automático que abrem e fecham seus contatos repetidas vezes na eventualidade de uma falha do circuito por ele protegido.

As concessionárias de distribuição energia elétrica possuem um Centro de Operações Integrado que no caso aqui aplicado do projeto de pesquisa com o grupo NEOENERGIA é chamado pela sigla COI. O COI que tem o objetivo de realizar monitoramento do fornecimento de energia elétrica, pois caso ocorra uma sobrecarga ou falta de energia será necessário comandar remotamente as chaves religadoras. Desse local são enviados todos os comandos para as religadoras, para isso é necessária a utilização de um sistema de comunicação que em muitos casos utiliza um sistema de rádio frequência (RF) para comandar as IEDs. As chaves remotas ficam localizadas em pontos de difícil acesso e muitas vezes podem estar em regiões de falta de cobertura pelo sistema de comunicação, ou seja, o lóbulo principal da antena da estação rádio base pode não iluminar uma estação de rádio remoto e esse local é considerado uma região de sombra, ou seja, um local sem sinal de RF. Um aumento na intensidade do sinal seria suficiente para superar vários obstáculos e restabelecer o caminho de comunicação, eliminando as regiões de sombra¹ mas essa característica dificilmente é obtida utilizando uma única antena e sim utilizando arranjos de antenas que é uma das propostas dessa Tese de Doutorado.

Com objetivo de aumentar o ganho e manter a comunicação de RF sem interrupções pode ser utilizado o artifício de arranjos de antenas. Isso poderia ser alcançado pelo arranjo de dipolos omnidirecional, mas às custas de muitos dipolos, o que no final seria impraticável conforme é descrito em¹. Ou ainda é possível utilizar antenas Yagi-UDA para formar um arranjo com maior diretividade. O foco dessa tese é na utilização do arranjo de antenas Yagi-Uda, pois a proposta está na concentração da potência transmitida em uma direção específica com cobertura de 360 graus. Para isso são utilizados dois arranjos de antenas Yagi-Uda na configuração *back-to-back* com um total de oito antenas. O aumento da densidade de potência transmitida na direção desejada resulta naturalmente em uma melhoria na relação sinal/ruído na transmissão sem, contudo, exigir aumento da potência do rádio utilizado para transmissão e recepção do sinal, dessa forma evitando infringir as definições da agência de regulamentação de telecomunicações à ANATEL na resolução número 558. Para obter o controle do feixe do diagrama de radiação é utilizado um Sistema de Antenas Inteligentes conforme descrito em^{1,2} e³ Sistemas de Antenas Inteligentes fornecem muitos benefícios no aumento da diretividade do enlace, na redução de interferência *co-canal*, redução no efeito de desvanecimento, um fenômeno que surge quando os sinais de rádio são refletidos contra as diferentes camadas da atmosfera e a Terra, e na topologia dos sistemas de comunicação⁴. Dessa forma o sistema de antenas inteligentes é mais resistente as interferências eletromagnéticas e, consequentemente, tem uma menor taxa de erro de *bit*.

O desafio de se utilizar arranjos de antenas para cobrir regiões com descontinuidades é conseguir controlar automaticamente a direção do lóbulo principal do diagrama de radiação do arranjo de antenas, de forma a aumentar a potência na direção objetiva. Uma possibilidade é controlar a fase e a amplitude de excitação das antenas de forma a direcionar e concentrar o feixe de radiação para atingir tais direções. Para isso são utilizados os dispositivos no sistema de rádio frequência, como por exemplo, atenuadores digitais e defasadores digitais que são automatizados pelo *software* do controlador de arranjo de antenas (CAT)³.

A utilização de sistemas de antenas inteligentes com arranjo de antenas tem como principais motivações o de redirecionamento do lóbulo principal do diagrama de radiação e a atenuação de seus lóbulos secundários. Um dos desafios para a formação de um lóbulo principal em arranjo de antenas é conseguir controlar automaticamente sua direção. Além disso, controlar os erros de fases na chegada é importante, pois evita erros de *jitter* na

recepção dos dados, como apresentado em⁵, que utiliza uma matriz de covariância pré-processada.

Uma outra forma de controlar o feixe principal do diagrama de radiação é medir os parâmetros S de um sistema de rádio frequência e equalizar as defasagens e atenuações impostas a um arranjo de antenas com a finalidade de ajustá-lo para atingir a direção objetiva. Dessa forma determinando os parâmetros que devem ser utilizados nos dispositivos do circuito formador de feixe para atender as direções objetivas.

No trabalho³ é descrita tecnicamente a maneira de calibrar o sistema de formação de feixe onde é realizada a equalização de amplitudes e fases com a utilização de analisador rede vetorial, onde são medidos os parâmetros S do sistema e com seus resultados é aplicado uma das técnicas de otimização evolucionárias para obter os melhores resultados de potência do sinal recebido nas direções objetivas.

Essa técnica foi aplicada para equalização do circuito formador de feixe que é apresentada nesta tese de doutorado.

Neste trabalho os ajustes de fase e amplitude foram baseados no método de otimização por enxame de partículas PSO (do inglês: *Particle Swarm Optimization*). Utilizando o PSO para um design do arranjo de antenas, modelado no *software Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator)*, foi possível obter certos conjuntos de parâmetros S otimizados. Cada um desses conjuntos de excitações é capaz de gerar no arranjo de antenas um diagrama de radiação cujo lóbulo principal aponta na direção de um ângulo objetivo. A otimização também procurou minimizar os lóbulos secundários dos diagramas na tentativa de obter, dentro das limitações da topologia do arranjo, um feixe de radiação concentrado na direção de um ângulo que correspondesse a uma das chaves religadoras.

Os valores obtidos da otimização são implementados nos atenuadores e defasadores digitais comerciais que tem seus parâmetros automatizados pelo CAT.

São apresentadas nesta tese as comparações entre as simulações resultantes do PSO e medições preliminares com o CAT devidamente configurado e controlando um arranjo de antenas. Foram realizados testes em campo aberto, para isso foi utilizado o campo de futebol do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) campus Recife, para constatação da eficiência de direcionamento de feixe.

Para medir os valores de potência foi utilizado o indicador da força do sinal recebido (RSSI - *Received signal strength indication*) que é parâmetro de desempenho presente nos

rádios. Dessa forma foi capturado o RSSI dos rádios instalados na estação rádio base e na estação remota. Diferente do artigo⁶ onde os valores do RSSI foram utilizados com rádios instalados indoor, aqui foram utilizados os rádios instalados em *outdoor*.

Também foram realizados testes de funcionamento do sistema de antenas inteligentes no Campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde o sistema foi completamente montado e submetido a condições reais de funcionamento. Além disso ele foi testado de forma contínua e obtidos os valores de perdas de pacotes, os resultados estão apresentados nesta tese.

Com os resultados medidos durante os testes de funcionamento foram obtidos todos os valores de perda de pacotes do sistema.

Esta tese é desenvolvida com base no projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) entre a Universidade Federal de Pernambuco e do grupo NEOENERGIA. A primeira fase do projeto foi concluída e implementada em 2013 na subestação na região de Gravatá. Atualmente, o projeto de pesquisa está na segunda fase, na qual o sistema foi modernizado e teve suas dimensões reduzidas. Além disso, foi utilizado um sistema de comunicação baseado em rede de comutação de pacotes. A contribuição desta tese de doutorado foca na otimização da comunicação e na predição de perdas de pacotes para sistemas de arranjo de antenas inteligentes. São utilizados métodos de regressão baseado em árvore de decisão e também é aplicada uma rede neural com a finalidade de obter a previsibilidade da perda de pacotes do sistema de antenas inteligentes.

A tese está organizada da seguinte forma: no capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica sobre antenas inteligentes, métodos evolucionários para otimização do sistema, bem como métodos de regressão baseados em árvore de decisão e redes neurais. Além disso, é apresentado o problema a ser abordado na tese, incluindo sua caracterização, relevância e objetivos propostos. No capítulo 3, são detalhados o sistema de automação de arranjo de antenas inteligentes, o método de otimização, o arranjo de antenas e o sistema aplicado neste trabalho. A metodologia dos testes do arranjo de antenas é abordada no capítulo 4. Os resultados e discussões são tratados no capítulo 5. No capítulo 6, são realizados os testes do sistema de antenas inteligentes completo, incluindo testes dos dispositivos do circuito formador de feixe e testes de desempenho visando a predição das perdas de pacotes. Neste capítulo 1, também são aplicadas técnicas de regressão e uma rede neural com o objetivo de estimar as perdas de pacotes em um sistema de antenas inteligentes. Adicionalmente, é

descrita a instalação do sistema na subestação da região de SUAPE. O capítulo 7 apresenta as conclusões, sugere trabalhos futuros e discute a produção científica durante o doutorado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os Sistemas de Antenas Inteligentes são considerados uma extensão para a setorização celular em que a cobertura do setor é composta por múltiplos feixes. Isso acontece pelo uso de múltiplos arranjos de antenas, e o número de feixes em cada setor depende da geometria do arranjo. Como os Sistemas de Antenas Inteligentes têm a capacidade de concentrar seu diagrama de radiação nos terminais móveis desejados, ao mesmo tempo em que rejeitam as interferências, elas garantem uma grande área de cobertura para cada estação rádio base (ERB)⁷.

O objetivo das comunicações sem fio é permitir que o maior número possível de usuários se comunique de forma confiável independentemente da localização e da movimentação deles. Além disso, permitir a comunicação de longa distância entre a estação ERB e as estações remotas estabelecendo enlaces que levarão o serviço até os pontos mais remotos possíveis. No caso desta proposta de tese de Doutorado estamos interessados na questão do controle dos enlaces estabelecidos entre a ERB e as estações remotas. Diante disso, sabe-se que a comunicação sem fio sofre de três tipos de dificuldades que levam a deterioração de canal que são:

- o multipercurso (múltiplas versões atrasadas do sinal), que pode causar um desvanecimento intenso devido ao cancelamento do sinal recebido pela diferença de fase entre os sinais provenientes de diferentes percursos de propagação. O desvanecimento proporciona uma redução na potência do sinal transmitido e, portanto, um aumento de ruído, degradando ainda mais o sinal⁷;

- o espalhamento de atraso (do inglês *delay spread*), que resulta das diferenças nos atrasos de propagação dentre os múltiplos percursos de propagação. Quando os atrasos de espalhamento excedem cerca de 10% da duração do símbolo, a interferência intersimbólica sofrida pelo sinal recebido alcança um nível significativo, causando assim uma redução na taxa de dados atingível⁷;

- e a *interferência co-canal*, que limita a capacidade do sistema. A reutilização de frequência implica em determinar área de cobertura. A interferência *co-canal* não pode ser contornada apenas aumentando a potência da onda portadora do transmissor ⁷.

Devido à capacidade dos sistemas de antenas inteligentes de se adaptarem ao ambiente de propagação, eles são capazes de reduzir consideravelmente o efeito do multipercurso e o

espalhamento de atraso, aumentando assim a capacidade. Um benefício que os sistemas de antenas inteligentes têm é fornecer um maior alcance. Porque as antenas inteligentes são mais direcionais do que antenas omnidirecionais e setorizadas, conseqüentemente a potência do feixe atinge maiores distâncias de cobertura. Baseada nessa informação, os sistemas de antenas inteligentes são mais adequados para cobertura em áreas rurais devido ao seu longo alcance^{8 e 9}. As antenas inteligentes surpreenderam por suas melhorias na redução de interferência e aumento da capacidade do canal^{10, 11 e 12}. No sistema móvel celular as células omnidirecionais, refere-se a antenas de celular que irradiam sinais de forma uniforme em todas as direções, formando uma cobertura de sinal esférica ou semiesférica ao redor da antena, sofrem mais com a interferência *co-canal* do que as células setorizadas. Já os sistemas de antenas inteligentes, devido à sua capacidade de eliminar a interferência do *co-canal*, apresentam o melhor desempenho nesse ambiente⁹.

Muitos se referem a sistemas de arranjo de antenas como antenas inteligentes, mas na verdade, antenas não são inteligentes; o processamento digital de sinais é que, em conjunto com as antenas, torna o sistema inteligente. O processamento digital do sinal pode ser realizado por DSP (*Digital Signal Processor*). O DSP mede os atrasos de tempo do sinal de cada antena individual, e calcula a direção de chegada (DOA) do sinal desejado. Com isso modifica as fases e amplitudes do sinal para produzir um diagrama de radiação que se concentra no sinal desejado enquanto elimina o sinal indesejado^{5 e 9}. Uma outra forma de tornar o sistema inteligente é fazer um pré-ajuste de fase e amplitude como a realizada nesta proposta de tese de doutorado. Para isso é possível a utilização de um método de otimização aplicado aos simuladores eletromagnéticos de forma a equalizar os parâmetros de RF para atingir a direção objetiva. E com os valores pré-determinados de atenuação e defasagem carregar no *software* do sistema de controle de arranjo de antenas realizando a automação do sistema.

Como já dito antes os sistemas de antenas inteligentes são basicamente uma extensão do setor de células em que a cobertura do setor é composta por vários feixes. Porque as antenas inteligentes podem focar seu diagrama de radiação na direção dos usuários desejados enquanto rejeitam interferências, eles podem fornecer maior área de cobertura para cada estação ERB. Além disso, como as antenas inteligentes têm uma rejeição mais alta a interferência, portanto, uma taxa de erro de bits (BER) menor, elas podem fornecer uma

melhoria substancial de capacidade. Esses sistemas geralmente podem ser classificados como feixe comutado ou arranjo adaptativo^{8,9}.

Um sistema de feixe comutado é um sistema que pode escolher um dos muitos padrões predefinidos para melhorar o sinal recebido. O objetivo geral do sistema de feixe comutado é aumentar o ganho de acordo com a localização da estação remota⁹. No entanto, uma vez que os diagramas de radiação apresentam feixes fixos, o sistema não é adequado para atendimento de terminais móveis, mas pode ser utilizado para atendimento de estação remota fixa. Se ocorrer uma interferência próxima ao centro do feixe ativo, ele pode ser melhorado ainda mais, aumentando assim a cobertura para a estação remota.

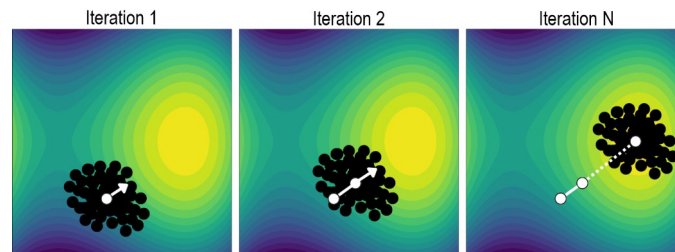
Um arranjo adaptativo provê maior liberdade, pois têm a capacidade de em tempo real, adaptar o diagrama de radiação ao terminal móvel. Ou seja, esse sistema pode orientar o feixe principal na direção do sinal de interesse e ao mesmo tempo suprimir o diagrama da antena nas direções de sinais interferentes^{8,9}. Dessa forma os sistemas adaptativos podem customizar o diagrama de radiação apropriado para cada terminal móvel.

A técnica de otimização de estratégia evolucionária (ES do inglês *Evolution Strategy*) é um algoritmo evolutivo. Sua formulação original é baseada na aplicação de mutação, recombinação e seleção em populações de soluções candidatas¹³. Tais soluções candidatas são aplicadas em um *loop*, cuja iteração termina quando um critério final é atendido.

Os algoritmos evolucionários compreendem um conjunto de técnicas inspirados em conceitos observados na evolução natural das espécies para resolver tarefas complexas, como a calibração de modelos ricos em parâmetros, a redução da complexidade do modelo por seleção de recursos e otimização.

A Figura 1, ilustra o processo de otimização ES em um gráfico de contorno usado como exemplo, onde a população amostral é indicada pelos pontos pretos, o candidato atual é indicado pelo ponto branco e o gradiente estimado é indicado pela seta branca. A cada iteração, os candidatos são movidos na direção do gradiente até que converjam para um ótimo local.

Figura 1- Processo de otimização do ES



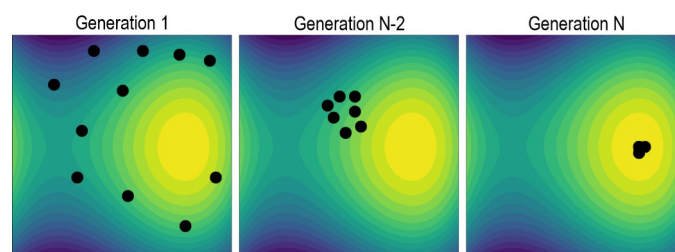
Fonte: Acervo do autor (2023)

Os algoritmos genéticos (GA do inglês *Genetic Algorithm*) pertencem ao campo da computação evolutiva, inspirados nos conceitos de seleção natural e hereditariedade. Eles são análogos ao processo biológico para a geração de cromossomos com variáveis como seleção, cruzamento e mutação juntas constituindo operações genéticas que seriam inicialmente aplicáveis em uma população aleatória¹⁴.

Após ser inicializado com uma população aleatória, o algoritmo GA, apresentado na Figura 2, cria uma sequência de múltiplas gerações com novas populações a partir dos indivíduos da geração atual, de forma que indivíduos com maiores aptidões sejam criados a cada geração, até que um critério de parada estabelecido seja atingido.

As novas gerações são compostas por indivíduos selecionados da geração atual com os melhores valores de *fitness*, dos cruzamentos formados pela combinação dos cromossomos de dois indivíduos e indivíduos da geração atual que sofreram mutações aleatórias.

Figura 2 - Processo de otimização do GA



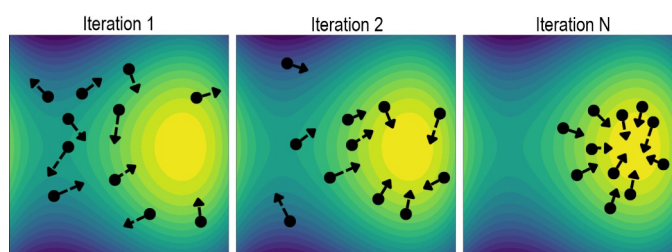
Fonte: Acervo do autor (2023)

O algoritmo PSO é um método de otimização relativamente recente, proposto em 1995¹⁵ e inspirado no comportamento social e biológico de bandos de aves. Neste algoritmo,

os indivíduos são referidos como partículas e voam pelo espaço de busca a procura da melhor posição global que minimize, ou maximize, um dado problema¹⁶.

O algoritmo PSO, apresentado na Figura 3, começa criando partículas e atribuindo-lhes velocidades iniciais¹⁷.

Figura 3 - Processo de otimização do PSO.



Fonte: Acervo do autor (2023)

Recentemente, os algoritmos evolucionários têm sido amplamente aplicados para otimizar diferentes tipos de arranjos de antenas. Um exemplo que podemos citar é a utilização do PSO que foi aplicado para otimizar a potência e a fase dos sinais de excitação de um arranjo de antenas microstrip¹⁸.

Técnicas de otimização evolucionarias são eficazes em solucionar problemas de otimização de funções e já foram aplicados em projetos de antenas e expandidos para projetos de arranjo de antenas Yagi-Uda lineares e bidimensionais (2D) é apresentada usando o PSO^{9, 20, 21}.

A melhor escolha de utilização do método de otimização pode variar de acordo com a aplicação. Para este trabalho, o PSO foi selecionado por ter se mostrado o método de agrupamento mais simples para tratar muitos parâmetros^{3, 22, 23}.

O projeto de arranjo de antenas está normalmente sujeito a uma variedade de requisitos tais como a topologia do arranjo de antenas e quais os lóbulos de maior potência. A topologia do arranjo de antenas refere-se à disposição física das antenas individuais dentro do sistema. Isso inclui a determinação da posição relativa, orientação e espaçamento entre as antenas. Além disso, a distribuição dos lóbulos é um aspecto crítico no projeto de arranjos de antenas. Os lóbulos representam as direções em que a antena emite ou recebe sinais com maior intensidade. Controlar a distribuição desses lóbulos é essencial para alcançar objetivos específicos de cobertura, minimizar interferências e maximizar a eficiência espectral. Este processo de design pode ser abstraído como diversos desafios de otimização, incluindo

problemas de otimização de objetivo único, com e sem restrições, bem como problemas de otimização multiobjetivo, novamente com ou sem restrições²⁴.

Realizando uma comparação entre o ES e o PSO ambos os algoritmos são inerentemente estocásticos. Nossos resultados demonstram a robustez e viabilidade de ambos os algoritmos para esta aplicação, sendo que a escolha do melhor algoritmo depende de requisitos específicos. No entanto, em nossos experimentos, observamos que o PSO exibiu maior sensibilidade à seleção de parâmetros em comparação ao ES.

Já em contraponto com outro algoritmo estocástico evolucionário como, por exemplo o GA, o PSO tem menos operações complicadas, menos linhas de código, incluindo o fato de que o algoritmo básico é muito fácil de entender e implementar conforme já descrito em¹⁹. Dessa forma o PSO tem recebido bastante atenção e aplicação em arranjo de antenas inteligentes.

Em¹⁸, o desempenho do PSO foi avaliado usando padrões de elementos únicos isotrópicos, simulados e medidos para otimização. Observou-se que a síntese do padrão radiação do arranjo de antenas pode fornecer resultados muito precisos usando PSO. Como era de se esperar, a congruência entre os padrões de radiação previstos e medidos foi excelente ou muito boa, especialmente quando os padrões dos elementos e os efeitos da plataforma foram completamente considerados

O desempenho do PSO provou ser pelo menos um pouco melhor em termos de tempo de otimização mais curto do que os algoritmos *Firefly* (FA) e *Taguchi* conforme apresentado em¹⁸. Além disso, o PSO tem a propriedade de otimizar projetos de antenas com relação a diferentes métricas de desempenho, por exemplo, coeficiente de reflexão, polarização cruzada ou largura de banda e é capaz de realizar buscas globais e locais simultaneamente, se a heurística for configurada de maneira adequada, o que é uma vantagem adicional sobre algoritmos genéticos (GA). O PSO é amplamente utilizado para otimizar projetos de antenas em relação a diferentes métricas de desempenho, como coeficiente de reflexão, polarização cruzada ou largura de banda conforme apresentado em^{3 e 18}.

Os métodos de otimização são utilizados para definir os parâmetros de atenuação e fase que devem ser aplicados nos dispositivos (atenuadores e defasadores) do circuito formador de feixe que compõem o sistema de antenas inteligentes, pois o direcionamento do lobo principal será realizado por esses componentes que são automatizados pelo controlador de arranjo de antenas.

Os circuitos formadores de feixe que são utilizados nos sistemas de telefonia móvel celular e tem seu uso na tecnologia de 5 G que tem sua aplicação na redução das perdas fazendo dessa forma que a transmissão se torne mais confiável em altas taxas de transmissão²⁵.

As técnicas de otimização e de inteligência artificial oferecem um caminho promissor em aplicações eletromagnéticas para otimizar vários parâmetros. Como por exemplo, o emprego de algoritmos como PSO permite a determinação automática dos pesos e das fases ideais necessários para alimentar o circuito formador de feixe que está conectado a um arranjo de antenas. Esta otimização possibilita que o feixe resultante, formado através da interação da radiação de elementos individuais, direcione de forma mais eficiente a potência máxima do lóbulo principal na direção de interesse, tornando assim o sistema mais eficiente.

A regressão desempenha um papel fundamental no aprendizado de máquina, consistindo na previsão de valores numéricos com base em dados de entrada. Embora muitas vezes os processos de classificação recebam maior destaque no campo do aprendizado de máquina, a regressão é igualmente essencial e amplamente aplicada em uma variedade de contextos.

Com a necessidade de avaliar os dados obtidos e prever valores podemos aplicar os métodos de regressão e classificação. O uso de ferramentas de classificação e regressão estão sendo aplicados na área do eletromagnetismo conforme descrito em²⁶. As árvores de decisão constituem a base de um método de classificação supervisionado. O conceito inspira-se no formato da estrutura de árvore, composta por uma raiz, nós (onde os ramos divergem), ramos e folhas. Analogamente, uma árvore de decisão é construída usando nós circulares conectados por segmentos que representam ramificações.

O *Decision Tree* é um modelo que divide repetidamente o espaço de entrada em subespaços menores, usando regras simples baseadas nos valores das características, até que seja alcançada uma determinada condição de parada.

Por outro lado, a Random Forest é uma técnica que cria múltiplas árvores de decisão durante o treinamento e, em seguida, combina suas previsões para obter uma previsão mais robusta e geral.

O algoritmo *Random Forests*, por meio de uma estratégia inteligente, aborda as limitações das árvores de decisão, construindo modelos conhecidos como "florestas aleatórias", reconhecidos por seu poder preditivo e desempenho satisfatório. Nesta tese de

doutorado, os métodos de regressão *Decision Tree* e *Random Forest* foram utilizados para prever as perdas de pacotes em um sistema de arranjo de antenas inteligentes.

Por outro lado, os trabalhos em redes neurais artificiais, conhecidas como "redes neurais", foram motivados pela diferença fundamental no processamento de informações entre o cérebro humano e os computadores digitais convencionais. O cérebro é altamente complexo, não-linear e paralelo, capaz de realizar processamentos muito mais rápidos que os computadores atuais, graças à sua organização em neurônios²⁷.

O perceptron, uma forma básica de rede neural, é usado para classificação de padrões linearmente separáveis. Composto por um único neurônio com pesos ajustáveis e bias, seu algoritmo de aprendizagem foi desenvolvido por Rosenblatt. Embora inicialmente limitado à classificação de padrões em duas classes, sua extensão para múltiplas classes é viável, desde que linearmente separáveis²⁷.

Uma rede neural típica, como a *Multi-Layer Perceptron* (MLP), consiste em várias camadas de neurônios interconectados, que processam os dados de entrada por meio de operações de ponderação e ativação. Por meio de algoritmos de treinamento como *backpropagation*, as MLPs ajustam os pesos das conexões entre os neurônios para minimizar a discrepância entre as previsões do modelo e os valores reais dos dados de treinamento. Essas redes são capazes de aprender padrões complexos e realizar uma variedade de tarefas, incluindo classificação, regressão e processamento de linguagem natural²⁷. As redes neurais artificiais têm sido combinadas com algoritmos de árvore de decisão, como na estimativa da taxa de corrosão²⁶.

Atualmente, a aplicação de tecnologias relacionadas à inteligência artificial, como redes neurais, estão presentes em todos os campos da indústria, incluindo comunicações sem fio.

Uma possível forma de calibrar um sistema de arranjo de antenas para aplicações para aplicações na banda K (20 GHz) é utilizar redes neurais realizando medidas dos canais de transmissão e recepção obtendo os valores previstos para as atenuações e fases conforme descrito em²⁵. Segundo os resultados obtidos por²⁶ indicam que o modelo de regressão *Random Forests* possui os menores valores de erro quadrático médio (MSE) e erro absoluto médio (MAE), que podem ser aproximados a zero. O MAE é uma métrica de comparação de modelos que calcula a média dos erros absolutos entre os valores verdadeiros e estimados. Por outro lado, o MSE é outra métrica de comparação de modelos que calcula a média dos

quadrados dos erros entre os valores verdadeiros e estimados. O MSE também é uma medida de dispersão dos erros, mas ele tende a penalizar erros grandes mais severamente do que o MAE, devido ao fato de ele elevar os erros ao quadrado antes de calcular a média.

Dentro deste contexto, a aplicação de árvores de decisão e redes neurais se destaca como uma abordagem viável para prever perdas de pacotes em sistemas de antenas inteligentes. Essas previsões baseiam-se em uma combinação de parâmetros extraídos do circuito de formação de feixe e índices gerados pelo controlador de arranjo de antenas. Vale ressaltar que, de acordo com a literatura existente, ainda não foi identificado um estimador de perda de pacotes baseado especificamente nos parâmetros e índices de sistemas de antenas inteligentes. A contribuição dessa tese está no estimador de perda de pacotes para um sistema de arranjo de antenas sendo este otimizado pelo PSO e os parâmetros automatizado pelo CAT são implementados no circuito formador de feixe.

2.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de RF atual utilizado pela concessionária de distribuição de energia do grupo NEOENRGIA é composto por um rádio UHF e um arranjo de dipolos dobrados, esse sistema não possui um controle automatizado sobre o diagrama de radiação sendo ele irradiado em todas as direções, dessa forma desperdiçando potência do sinal em locais que não possui chaves religadoras. Como a principal motivação é ampliar o alcance em todas as direções otimizando o diagrama de radiação de uma forma mais bem direcionada. A potência do sinal pode ainda ser concentrada em locais de difícil acesso de modo que o lóbulo fosse direcionado para essa região.

Com o objetivo de otimizar a comunicação entre a ERB e as estações remotas, este trabalho propõe substituir o arranjo de dipolos dobrados por dois arranjos de 4 antenas Yagi-Uda e um circuito formador de feixe sendo automatizado pelo controlador de arranjo de antenas (CAT). Com a finalidade de obter maior aproveitamento do sinal em regiões que não possuem uma cobertura boa, garantir a comunicação com a caixa remota onde está a chave religadora e também com os outros dispositivos IEDs como por exemplo, medidores de energia.

Como o arranjo de antenas utilizado atualmente pela empresa não possui um circuito formador de feixe, bem como um controlador de arranjo de antenas, os índices de desempenho só podem ser obtidos a partir de medições externas, ou seja, mobilizando a

equipe de campo de manutenção gerando custos adicionais para empresa. A nossa proposta é implementar um novo sistema de arranjo de antenas de modo que esse seja controlado e automatizado pelo CAT. A partir dos índices de desempenho do sistema de antenas inteligentes poder prever as perdas de pacotes com base em técnicas de regressão e redes neurais.

2.2 CARACTERIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

A capacidade do arranjo de antenas inteligentes é muito boa na supressão de interferência e maximização do ganho na direção desejada. Este recurso pode ser usado para melhorar a eficiência espectral, como por exemplo, aplicado em telefonia móvel celular com o arranjo adaptativo. Nesse caso o controle do Sistema de Antenas Inteligentes é realizado com DSP como apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho.

A proposta desta tese de doutorado é realizar o controle do lóbulo principal na faixa angular de 360° de forma automatizada no Sistema de Antenas Inteligentes comutado via Controle de Arranjo de Antenas (CAT), que será definido no capítulo 3, onde este irá realizar o ajuste de fase e amplitude baseada na localização da estação remota que se deseja alcançar. Para o operador técnico de monitoramento o sistema será completamente automático. Ele entrará apenas com o comando para acionar a chave religadora que está com alarme no sistema supervisorio SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) vai interpretar o comando e encaminhará as posições de geolocalização para o CAT e este irá traduzir para valores de atenuação e defasagem, nos respectivos atenuadores e defasadores, para atingir a posição objetiva da estação remota.

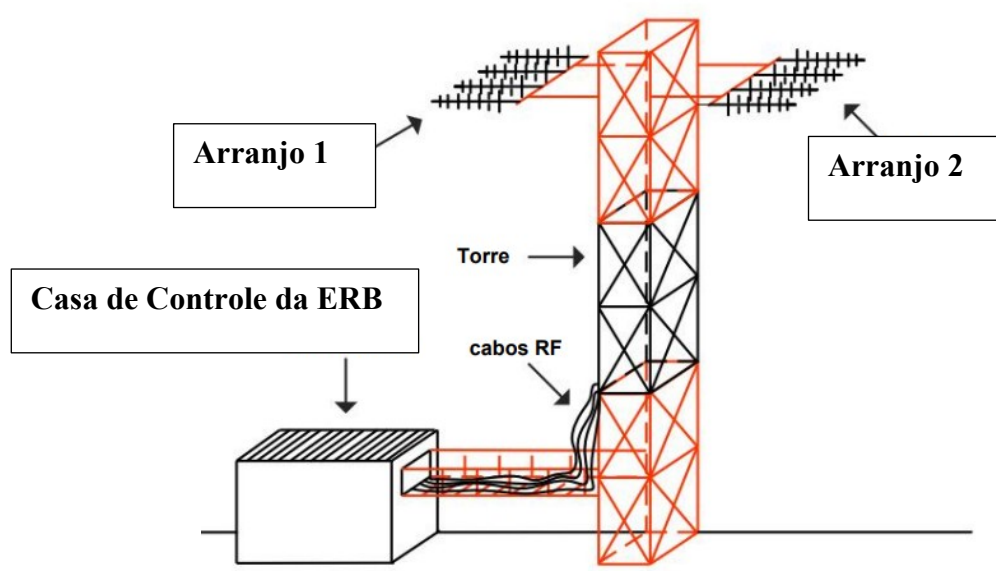
O objetivo dessa tese de doutorado é mostrar a grande relevância da aplicação do sistema de antenas inteligentes aplicado em uma situação real de uma distribuidora de energia do grupo NEOENERGIA, onde provamos o desempenho do sistema com índices de transmissão que o qualificam como grande aproveitamento do sistema. Além disso, nesta proposta de tese é apresentado uma forma de estimar a perda de pacotes nos enlaces que a compõem e que são atendidos pelo sistema de arranjo de antenas inteligentes.

O sistema é bastante complexo, mas trará para empresa uma redução de custo. Ele é composto de controle de arranjo de antenas, circuito formador de feixe que será explicado detalhadamente na seção 2.3 e dois arranjos de antenas Yagi-Uda cada um composto de 4

antenas em quadro e instalados em uma torre de transmissão na posição *back-to-back* como apresentado na Figura 4.

O desafio está em realizar a integração em um único circuito que combine os dispositivos de RF e os dispositivos utilizados para automação do controlador de arranjo de antenas, para assim formar um sistema de antenas inteligentes comutado e que realize a cobertura de uma região de 360° em relação a ERB, atendendo a todos os requisitos de alta diretividade, redução de interferência *co-canal*, baixo desvanecimento e aumentando assim a capacidade do canal de comunicação.

Figura 4 - Representação da instalação do Arranjo de Antenas instalado na Torre



Fonte: Acervo do autor (2023)

2.3 OBJETIVOS

Esta tese de doutorado tem os seguintes objetivos:

Objetivo Geral:

Projetar a implementação e compatibilização do circuito formador de feixe (dispositivos de RF) com controlador de arranjo de antenas (dispositivos de automação). Com a finalidade de realizar o controle de 360° das estações remotas em relação a estação rádio base. Realizando a integração do controlador de arranjo de antenas ao supervisor.

Implementar uma técnica de previsão de perda de pacotes baseadas nos parâmetros e índices gerados pelo sistema de arranjo de antenas inteligentes.

Objetivos Específicos:

- Fazer o estudo térmico do funcionamento de todos os dispositivos da placa do circuito formador de feixe em modo de transmissão e recepção dos sinais.
- Levantar os requisitos para integração do circuito formador de feixe (RF) com o controlador de arranjo de antenas (automação dos dispositivos de RF).
- Fazer a integração do circuito formador de feixe com o controlador de arranjo de antenas. Atendendo a demanda de cobertura de 360⁰ em relação a estação rádio base;
- Instalar o sistema de antenas inteligentes na rede da concessionária de energia;
- Realizar medições e análise de desempenho do sistema de antenas inteligentes;
- Prever perdas de pacotes baseados nos parâmetros e índices do sistema.

3 O SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE ARRANJO DE ANTENAS INTELIGENTES

A comunicação entre o supervisor e os dispositivos elétricos inteligentes (IEDs) instalados em campo em uma rede elétrica inteligente, do inglês *smart grid*, segue protocolos e normas definidas nas normas que são as do IEEE 1815 e a IEC 61850 (*International Electrotechnical Commission 61850*) que são as principais.

O padrão IEEE 1815, também conhecido como DNP3 (*Distributed Network Protocol Version 3*), define um conjunto de protocolos de comunicação usado em sistemas de automação de processos industriais. Ele foi desenvolvido para a comunicação entre os equipamentos de aquisição de dados e controle, sendo muito utilizado em supervisor SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*)². O DNP3 utiliza o método de acesso determinístico do tipo mestre-escravo, garantindo uma transferência confiável em meios físicos com banda estreita como o aplicado em transmissão via canais de rádio²⁸.

O protocolo DNP3 é transportado sobre as redes que utilizam o modelo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*) que é bem difundido nas concessionárias de distribuição de energia elétrica para comunicação com os dispositivos elétricos inteligentes (IEDs), como por exemplo, as chaves religadoras. O DNP3 utiliza dois tipos de comunicação que são: solicitada/resposta e não-solicitada/resposta. O protocolo é orientado a requisição, ou seja, são enviadas respostas às mensagens de solicitação do SCADA ou mensagens não-solicitadas são enviadas dos IEDs em direção ao sistema de supervisão. No SCADA temos a identificação dos dispositivos por *Master* e *Outstation* que realizam as funções em uma rede de cliente e servidor.

O Centro de Operação Integrado (COI) é o local onde estão os técnicos que monitoram e supervisionam a rede elétrica. É deste local que são enviados todos os comandos para ligar e desligar as chaves religadoras.

O COI utiliza o sistema SCADA com o endereço DNP3 para acionar as estações remotas onde as chaves religadoras conectadas no sistema SCADA são identificadas como *Outstation*. A fim de estabelecer a comunicação entre o COI(*Master*) e as estações remotas são utilizadas unidades repetidoras de sinal, onde essas são conectadas via cabo de fibra óptica, ou enlaces de RF ponta a ponta.

Essas unidades repetidoras são chamadas de estações rádio base (ERB), que utilizam a infraestrutura de rede de dados e tem seu acesso via fibra óptica e/ou RF até o centro de

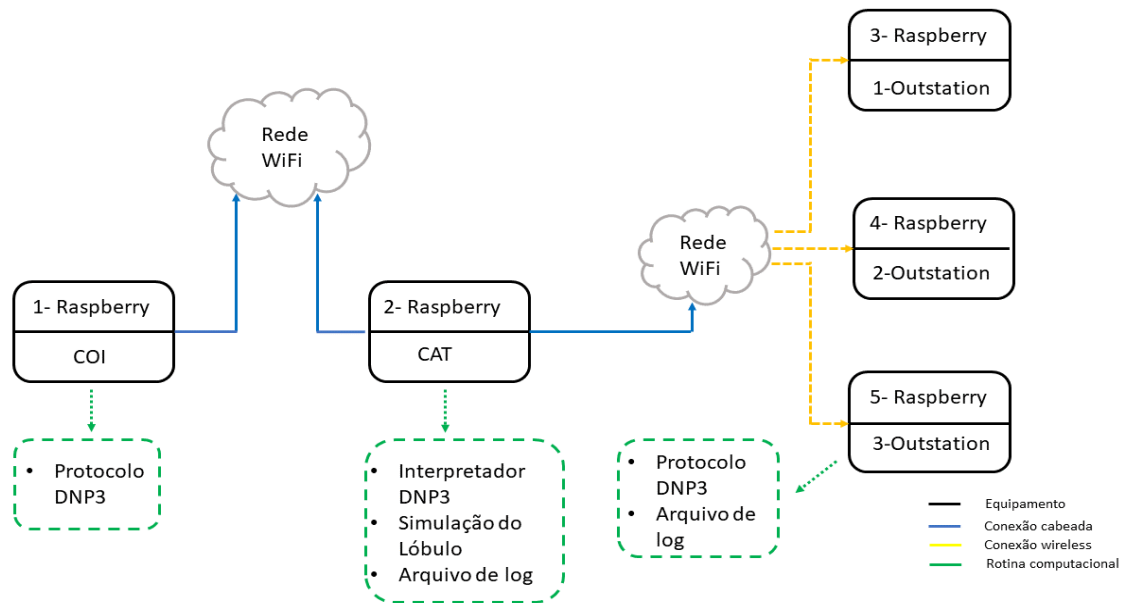
gerência. As ERBs estão distribuídas em várias cidades do estado. Na ERB de cada região possui um *switch* padrão *Ethernet* conectado na infraestrutura de rede de dados da concessionária de distribuição de energia, onde uma porta desse é conectado na *Ethernet* de um rádio UHF. O rádio UHF está interligado a um arranjo de antenas de dipolos dobrados.

O arranjo de antenas de dipolos dobrados prover o sistema de RF com objetivo de atender às estações remotas. Nas estações remotas existe um rádio UHF conectado a uma antena Yagi-Uda com objetivo de estabelecer o enlace com a ERB e provendo assim a comunicação com a chave religadora que são efetivamente comandadas pelo COI²⁹.

A proposta desta tese de doutorado é utilizar um novo arranjo de antenas direcionais que devem estar conectados a um circuito formador de feixe (CFF), onde esse tem seus parâmetros definidos pelo PSO que é automatizado por um controlador de arranjo de antenas (CAT). Dessa forma na ERB será instalado um Sistema Inteligente de Arranjo de Antenas, que é comandado por um sistema de automação que torna as antenas inteligentes. Esse Sistema de Antenas Inteligentes é composto por um arranjo de antenas diretivas que terá o feixe principal do seu diagrama de radiação controlado com o objetivo de cobrir as caixas remotas onde estão conectadas as chaves religadoras³.

Durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a concessionária de distribuição de energia do grupo NEOENERGIA foram realizados testes em laboratório com a finalidade de definir as métricas que devem ser seguidas para o bom funcionamento do sistema. Uma dessas métricas foi o tempo de resposta do sistema. Para isso foi montado um cenário de testes com minicomputadores (*Raspberry Pi 4*) simulando o COI, CAT e as estações remotas (*Outstation*) onde as chaves religadoras estariam conectadas. Foram utilizadas duas redes WiFi para realizar a conexão entre o COI e as estações remotas como a apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama em Bloco do Sistema do montado para testes das métricas de comunicação



Fonte: Acervo do autor (2023)

Para validar o desempenho do *software* implementado no CAT, foram empregados métricas como tempo de entrega de pacotes, taxa de transmissão e confirmação de chegada bem-sucedida ao destino²⁹.

Foram determinadas essas métricas transmitindo *frames* DNP3 encapsulados no *Internet Protocol* (IP) do *Master* (COI) para a *Outstation* via CAT. Posteriormente, o CAT roteou esses pacotes e as respostas foram recebidas no *Master*.

Esses índices de medição foram aplicados em redes baseadas em IP, visto que a concessionária de distribuição de energia utiliza o conjunto de protocolos TCP/IP para acessar caixas remotas onde estão conectadas às chaves de religadoras. Também foram realizadas a medição dos tempos de comunicação direta *Master* (COI) com a *Outstation* sem que os pacotes atravessassem o CAT.

Em cenários de verificação de desempenho, torna-se necessário determinar o tempo que uma mensagem leva para percorrer de uma extremidade à outra da rede e depois retornar com uma confirmação de recebimento, em vez de medir a latência (tempo que o pacote leva para ser enviado de uma extremidade da rede a outra) em uma única direção. Esta métrica

tem importância significativa para avaliar o desempenho de um sistema autônomo, e é denominado *Round-Trip Time* (RTT).

No contexto do sistema implementado, o RTT representa o tempo que leva para uma pequena mensagem de 101 *bytes* viajar do COI (*Master*) passando pelo CAT até chegar a *Outstation* e então retornar com uma resposta ao COI (*Master*). Foi escolhido este tamanho para verificação e confirmação da integridade no destino.

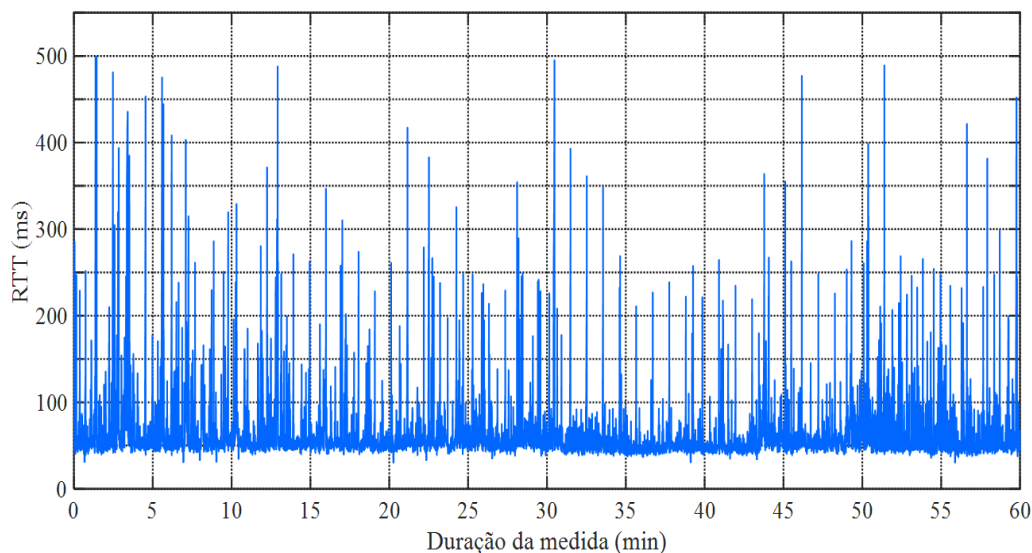
O RTT abrange vários fatores, incluindo atraso de propagação de pacotes, duração de transmissão de pacotes, tempo de fila de processamento de pacotes e o tempo necessário para que a mensagem de resposta retorne sem sofrer processamento adicional na volta.

Realizamos testes de conectividade do *Master* com a *Outstation* com transmissão de pacotes IP encapsulando o protocolo DNP3. Os dados resultantes dos tempos do RTT estão apresentados nas Figuras 6 e 7. Com os tempos de respostas medidos obtemos também a taxa de transmissão efetiva como pode ser visualizado nas Figuras 8 e 9. O envio dos pacotes foi em forma de rajadas a cada 500 ms com objetivo de verificar a disponibilidade de resposta do sistema.

Os testes realizados forneceram uma cobertura das funcionalidades das principais características de um sistema de comunicação, incluindo capacidades de conectividade, encaminhamento de pacotes DNP3, tempo de resposta da aplicação, taxa de transmissão suportada pela aplicação e um teste de estresse para avaliar a capacidade de resposta do sistema.

A Figura 6, demonstra a medição do RTT da comunicação do *Master* (COI) com a *Outstation* passando pelo CAT e retornando com a resposta. O fluxo de comunicação pode ser resumido da seguinte forma: *Master* (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ *Outstation*. As solicitações são realizadas cada 500 ms durante um intervalo de 60 minutos.

Figura 6 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ via CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição

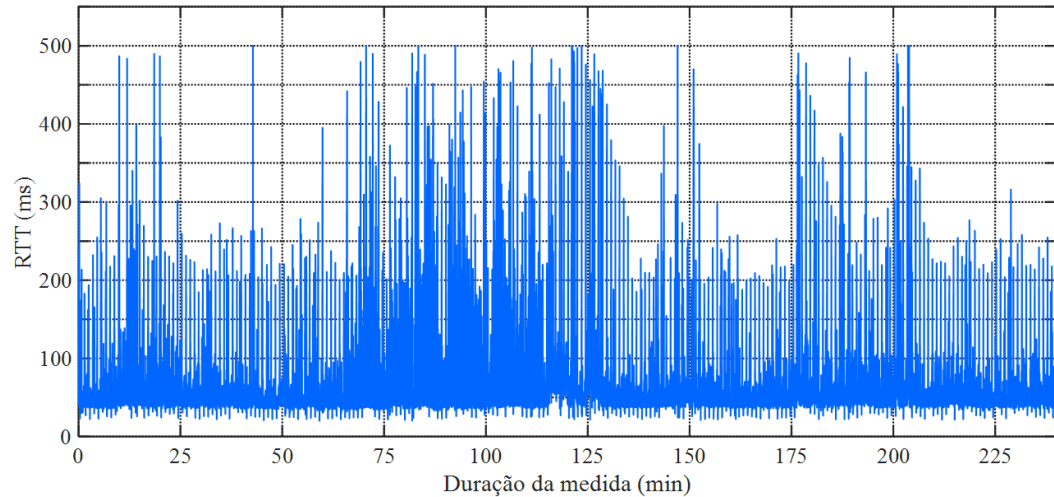


Fonte: Acervo do autor (2023)

Para os resultados apresentados na Figura 7, a mesma metodologia anterior foi empregada para uma medição de 240 minutos, onde é verificada as mesmas características do RTT. O tráfego em rajada, grandes picos em pequenos intervalos de tempo, é observado nas respostas das medições. É possível verificar que o sistema suporta as características desse tipo de tráfego. Contudo é possível limitar o tamanho da rajada que uma aplicação como essa pode gerar. No caso as rajadas foram geradas de forma proposital com objetivo de testar a resposta da plataforma a uma sobrecarga de 240 minutos ininterruptas de funcionamento com o objetivo de verificar o desempenho.

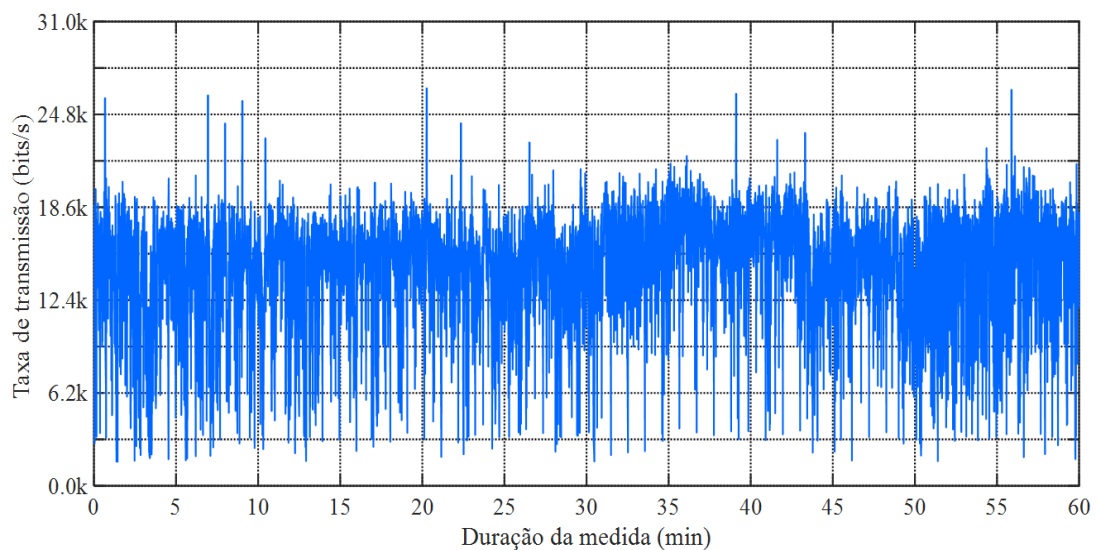
Na Figura 8, é mostrada a taxa de transmissão para o envio e recebimento da resposta das mensagens de 101 bytes, que são encapsuladas em quadros de 1518 bytes, enviando uma solicitação a cada 500 ms durante um intervalo de 60 minutos.

Figura 7 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ via CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 240 minutos de medição.



Fonte: Acervo do autor (2023)

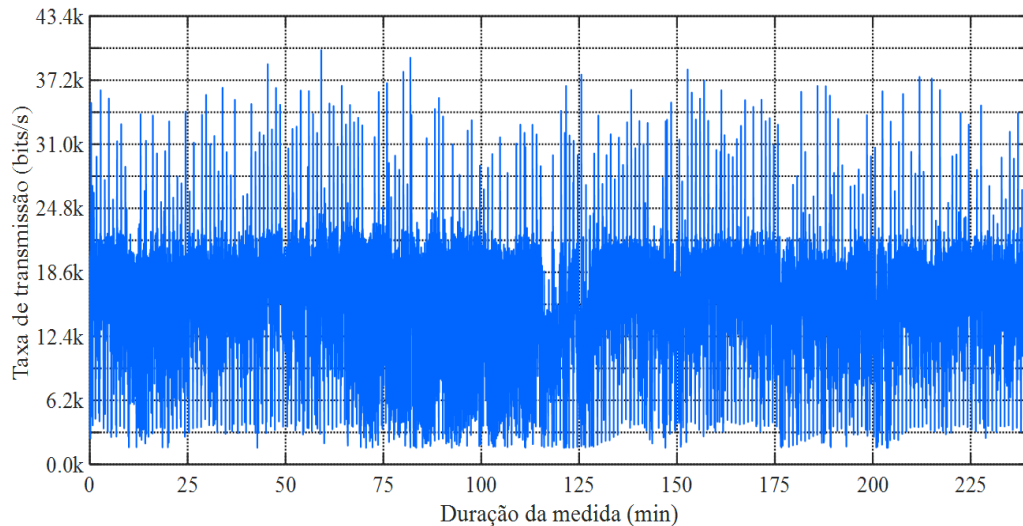
Figura 8 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição



Fonte: Acervo do autor (2023)

Com a finalidade de observar se o sistema tem o mesmo comportamento durante o período de 240 minutos foi realizado de forma similar o mesmo experimento descrito para 60 minutos. Na Figura 9 é apresentado o resultado a taxa de transmissão para este intervalo de tempo.

Figura 9 - Taxa de transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 240 minutos de medição

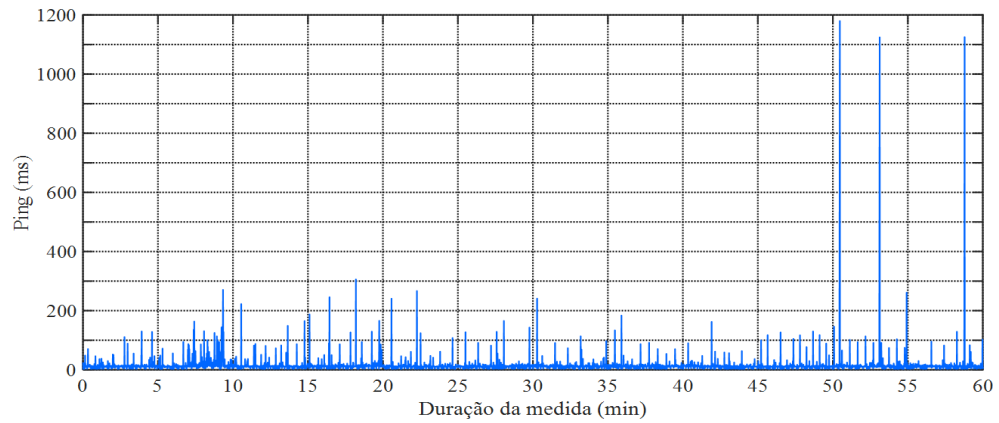


Fonte: Acervo do autor (2023)

Da mesma forma que foram realizados os testes de envio de quadros DNP3 encapsulados em pacotes IP e medido os tempos do RTT para envio e recebimento de resposta desses quadros, também foi medido o tempo de resposta da aplicação *ping* que utiliza o protocolo *Internet Control Message Protocol* (ICMP). Na Figura 10, são apresentadas as respostas do *ping* em 60 minutos. Foi medida a taxa de transmissão para o envio dos pacotes e está apresentada na Figura 11.

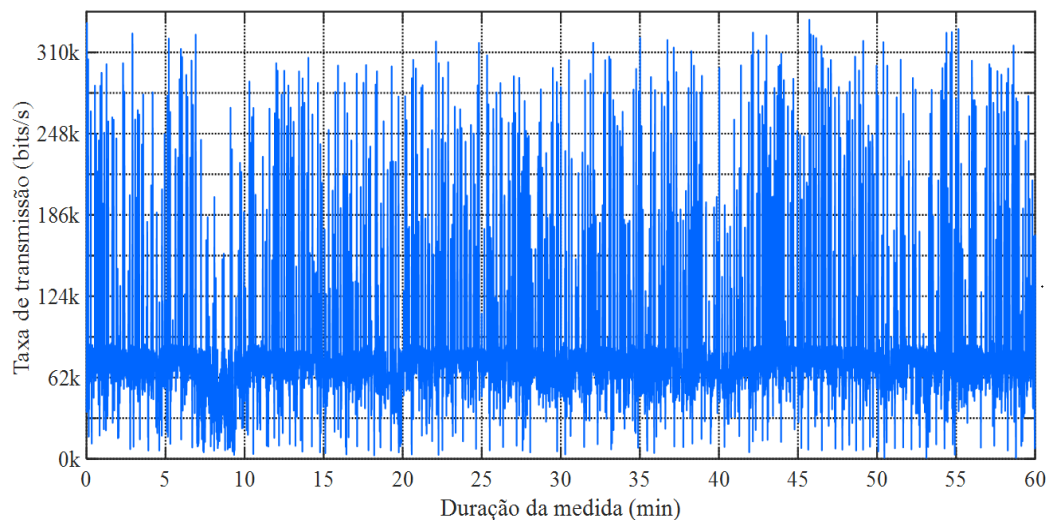
Foi realizado um novo teste, desta vez de forma ponto a ponto, ou seja, *Master* (COI) $\Leftrightarrow$ *Outstation* e fizemos a medição do RTT durante 60 minutos, como pode ser observado na Figura 12, o resultado da medição. Também foi medida a taxa de transmissão e pode ser vista na Figura 13.

Figura 10 - Teste de conectividade com ping do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição



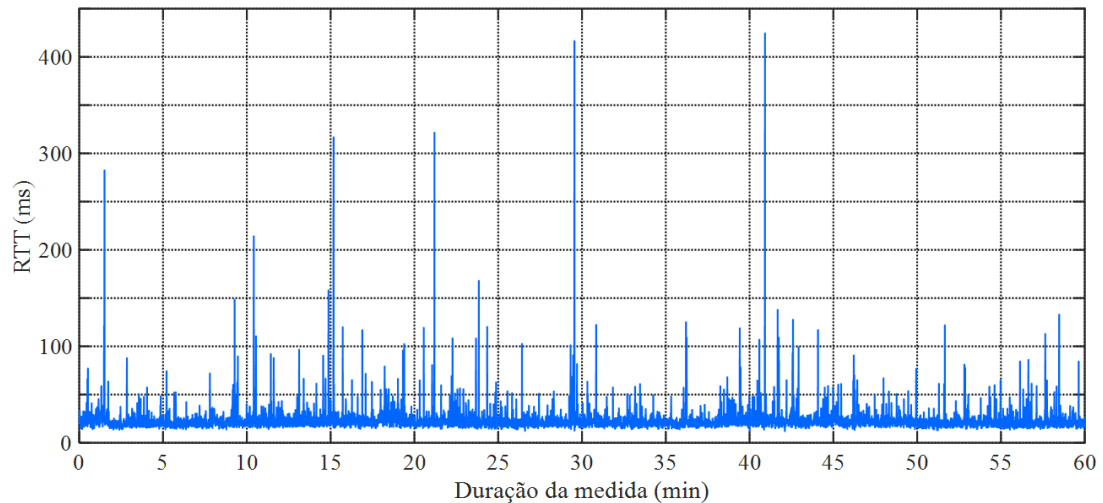
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 11 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation durante 60 minutos de medição de envio de pacotes ICMP



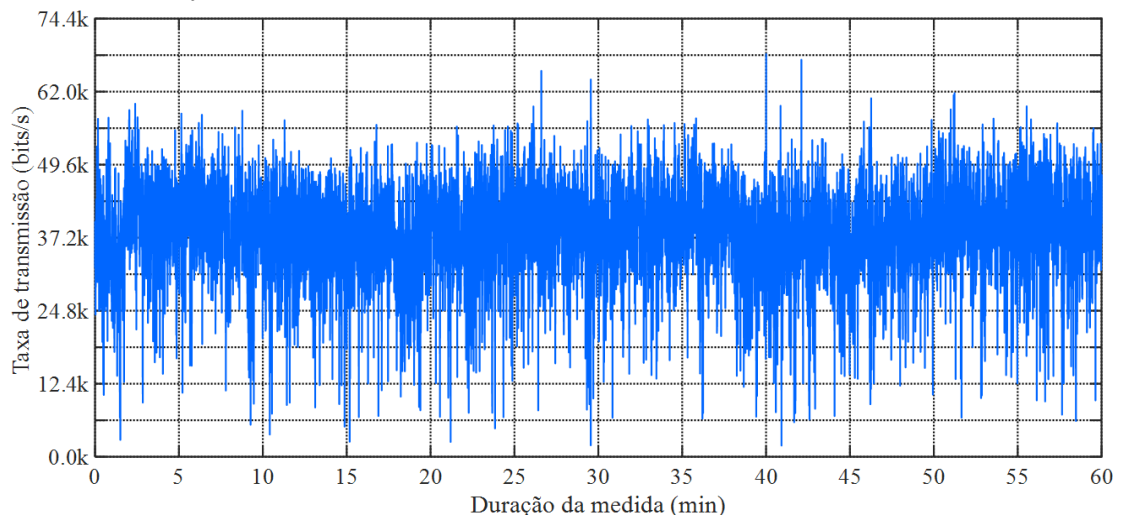
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 12 - RTT da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation com duração de 60 minutos de medição



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 13 - Taxa de Transmissão da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation com duração de 60 minutos de medição



Fonte: Acervo do autor (2023)

Utilizando o *software StatDisk* para analisar os resultados e fazer uma inferência estatística paramétrica clássica a partir das amostras do RTT medidos em 60 minutos, foram calculados os parâmetros estatísticos que estão apresentados na Tabela 1.

Realizando teste de aderência, é uma técnica estatística usada para determinar se uma amostra de dados segue ou "aderiu" a uma distribuição teórica específica, como uma distribuição normal, exponencial etc. Na amostra coletada foi obtido que para um erro marginal de $E = 0,00152$ com 99% de confiança, isso implica que está sendo usado um

intervalo de confiança para estimar um parâmetro populacional e que está confiante de que a verdadeira média populacional está dentro desse intervalo com uma probabilidade de 99%. A média da amostra está entre $0,06506 < \text{média} < 0,06809$. De forma resumida, o teste de aderência permite fazer inferências sobre a população com base nos dados amostrais e na distribuição teórica escolhida

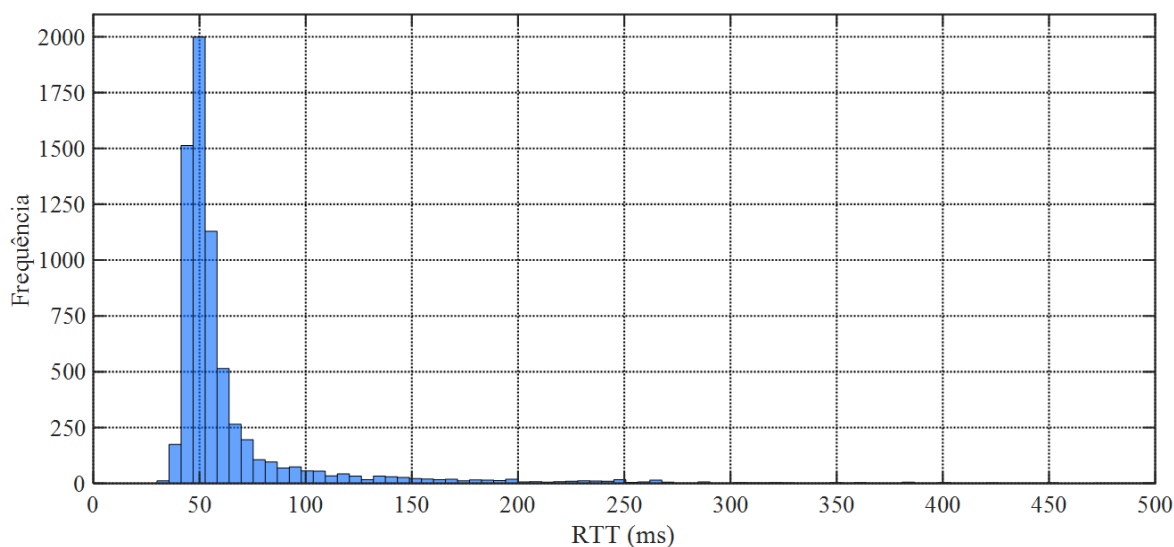
Tabela 1: Parâmetros da Amostra do RTT para 60 minutos.

Tamanho da Amostra	6835
Média	0,06657
Mediana	0,05166
Mediatriz	0,26498
Valor Médio Quadrático	0,08247
Variância	0,00237
Desvio Padrão	0,04867
Desvio Médio Absoluto	0,02577
Coefficiente de Variância	73,11447%

Fonte: Acervo do autor (2023)

Com os dados obtidos foi traçado o histograma que é utilizado para analisar as amostras, ele divide o intervalo dos dados em classes de amplitude iguais. Na Figura 14, é apresentado como as amostras de tempos do RTT estão distribuídas. Essas amostras foram medidas durante os testes de envio de pacotes do *Master* (COI), com os pacotes atravessando o CAT, chegando até a *Outstation* e retornando com a resposta (*Master* (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ *Outstation*) para a medição de 60 minutos. Neste é possível visualizar a maior frequência da distribuição de tempo em torno de 50 ms.

Figura 14 - Histograma das medições de tempo do RTT do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para 60 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

A distribuição normal, também conhecida como distribuição gaussiana, é uma das distribuições mais comuns na estatística. Ela é caracterizada pela sua forma de sino, simétrica em relação à média, com a maioria dos dados concentrados em torno da média e uma dispersão que é determinada pelo desvio padrão. A densidade de probabilidade da distribuição normal é dada pela função de densidade de probabilidade.

A distribuição *Rayleigh* é uma distribuição de probabilidade contínua que modela a amplitude de uma variável aleatória bidimensional cujas partes reais e imaginárias são independentes e distribuídas normalmente com média zero e mesma variância. É comumente usada para modelar variáveis aleatórias que representam magnitudes de vetores, como, por exemplo, a intensidade de ondas em rádio-propagação.

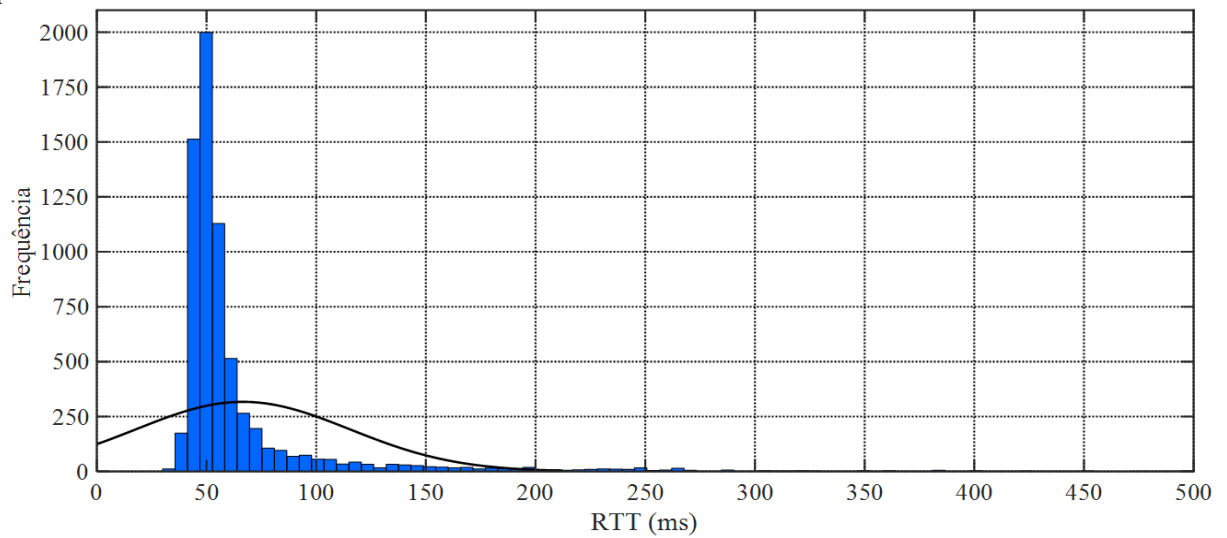
A distribuição *lognormal* é uma distribuição de probabilidade contínua de uma variável aleatória cujo logaritmo é distribuído normalmente. Ela é frequentemente usada para modelar fenômenos cujas quantidades são sempre positivas e têm uma assimetria positiva.

A partir dessas amostras foi traçada a curva da distribuição normal que está apresentada na Figura 15. Foi plotada também a curva da distribuição *Rayleigh* para as amostras coletadas e está pode ser vista na Figura 16, a diferença entre a distribuição *Rayleigh* e a distribuição normal está na forma como essas distribuições modelam os dados. Na Figura

17, temos a curva da distribuição *Lognormal* para as amostras do experimento. As curvas foram traçadas com objetivo de verificar sobre qual distribuição as amostras aderem.

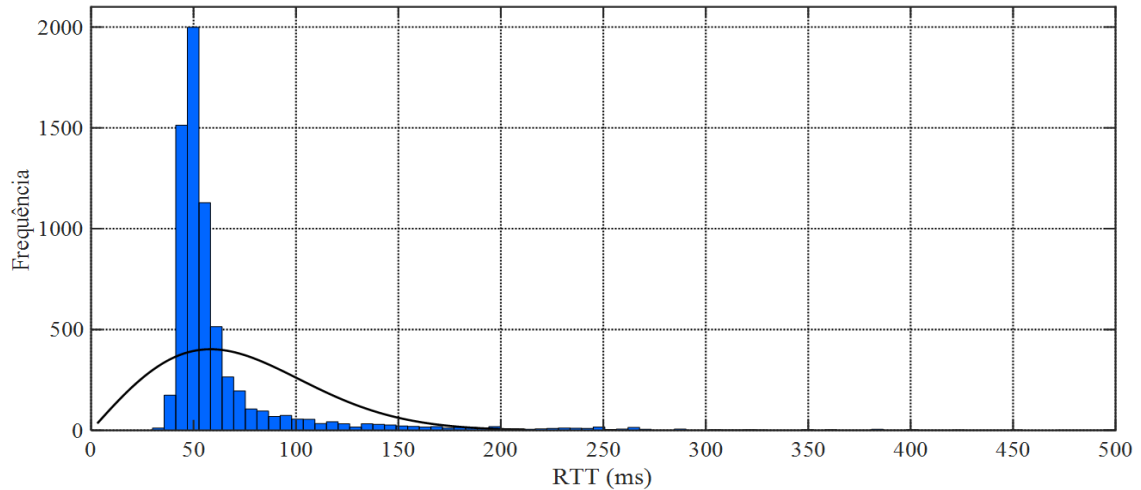
Com os dados obtidos do RTT durante o teste ponto a ponto. A partir do *Master* enviando pacotes diretamente para a *OutStation* sem passar pelo CAT, ou seja (*Master* (COI) $\Leftrightarrow$ *OutStation*) com duração de 60 minutos. Foi observado a maior concentração das respostas em torno de 25 ms, isso pode ser visto no histograma que é apresentado na Figura 18.

Figura 15 - Distribuição normal do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos



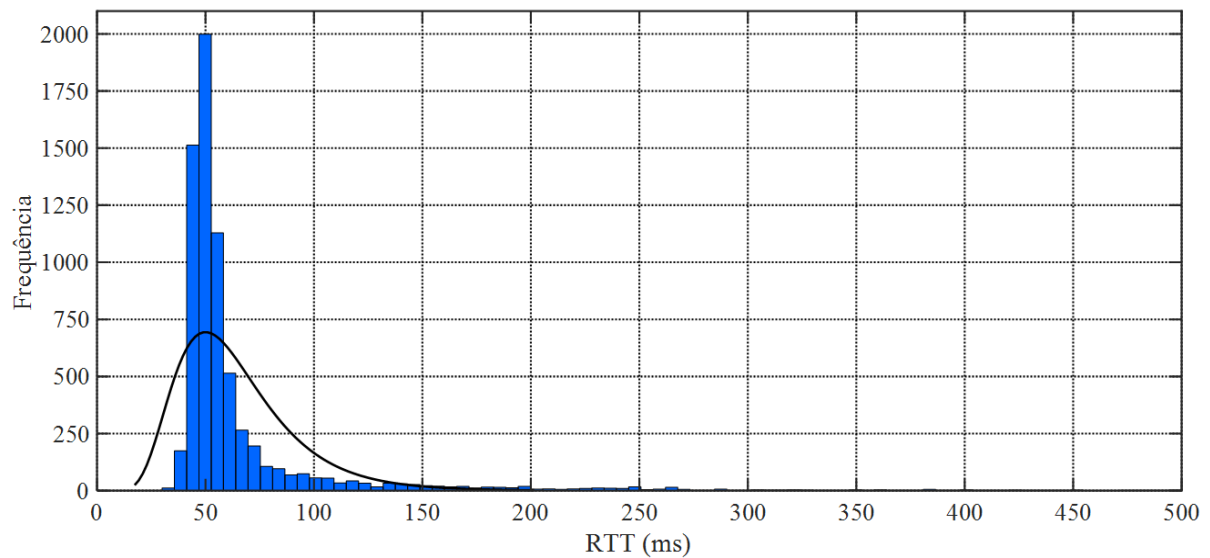
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 16 - Distribuição Rayleigh do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos.



Fonte: Acervo do autor (2023)

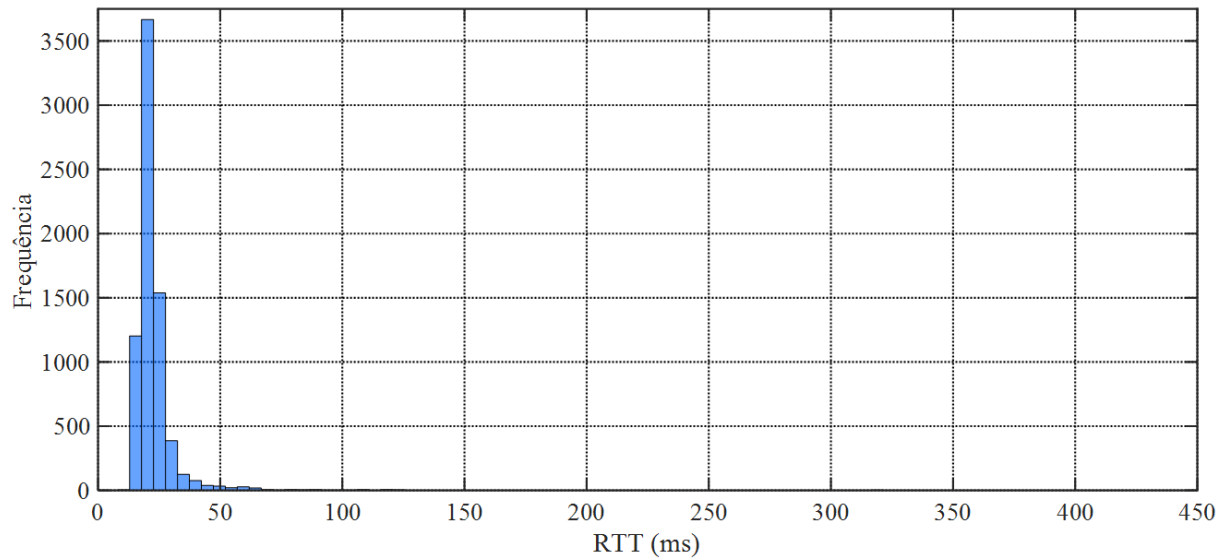
Figura 17 - Distribuição Lognormal do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições de tempo do RTT para 60 minutos.



Fonte: Acervo do autor (2023)

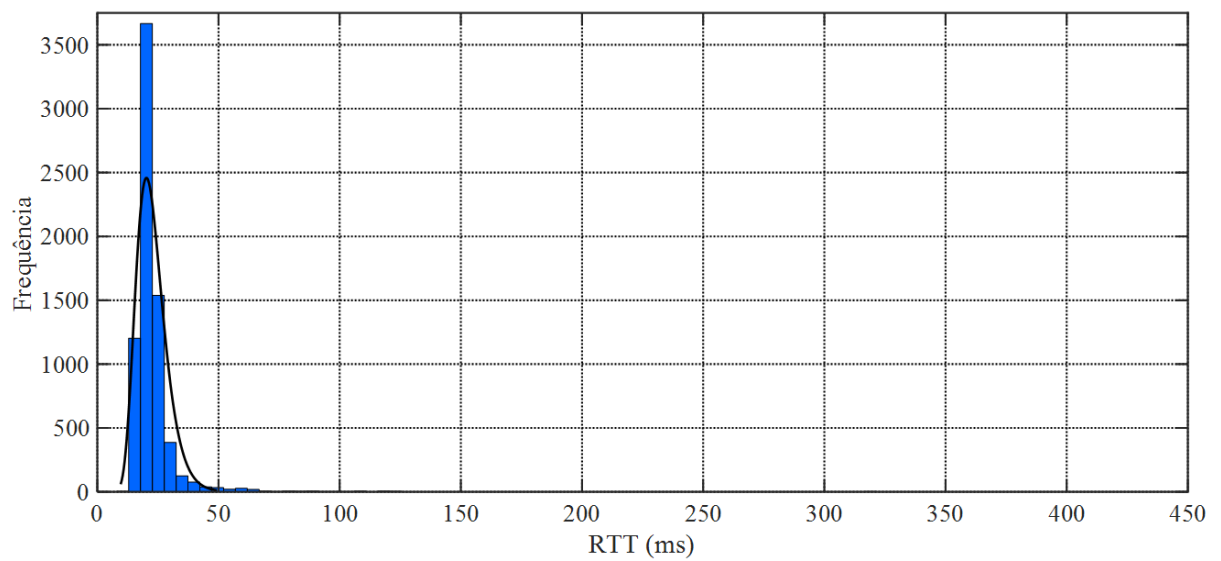
Também na Figura 19, é possível visualizar o teste da distribuição *lognormal* para as amostras coletadas. Na Figura 20 é apresentado o resultado do histograma dos testes de conectividade com a aplicação *ping* durante um período de 60 minutos o *fitting* da distribuição *Lognormal* é mostrado na Figura 21.

Figura 18 - Histograma do teste ponto a ponto do Master (COI) $\Leftrightarrow$ OutStation com duração de 60 minutos



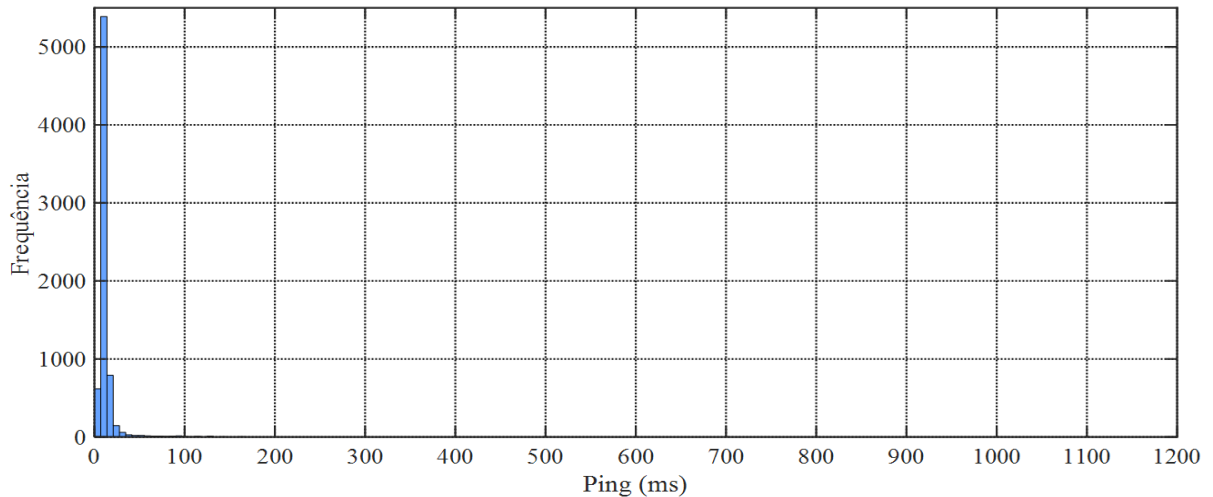
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 19 - Distribuição Lognormal do teste ponto a ponto do Master (COI) $\Leftrightarrow$ OutStation com duração de 60 minutos



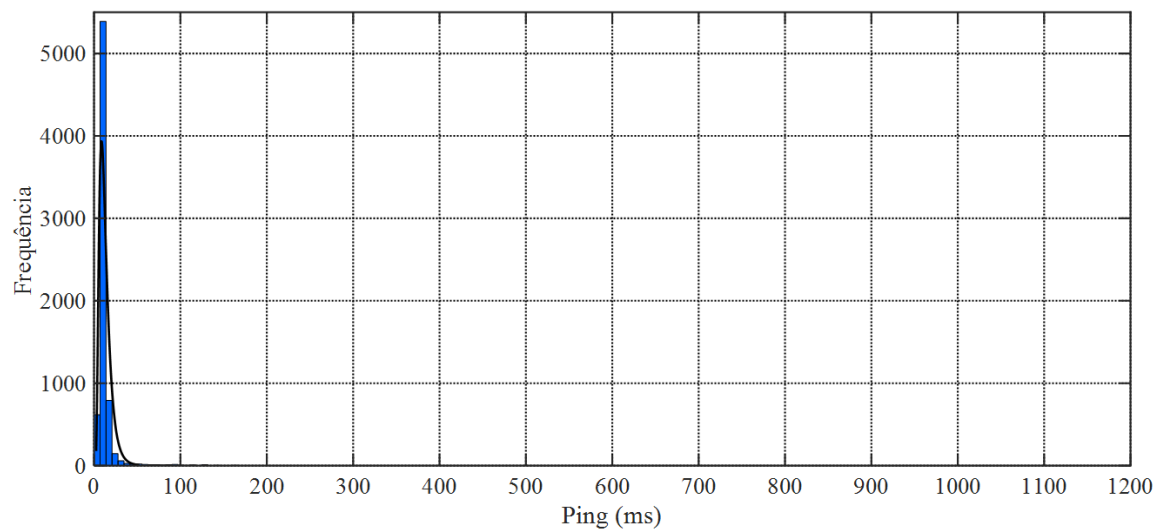
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 20 - Histograma das amostras do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation do teste do ping para 60 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 21 - Distribuição Lognormal das amostras do Master (COI) $\Leftrightarrow$ Outstation do teste do ping para 60 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

Com o mesmo *software StatDisk* e a partir das medições realizadas com a duração de 240 minutos também foram calculados os parâmetros estatísticos que estão apresentado na Tabela 2. Com essas amostras, da mesma forma como explicado anteriormente foi traçado o histograma das medições de 4 horas dos tempos de RTT, onde o resultado é apresentado na Figura 22. Analisando o histograma é possível constatar que o maior pico do RTT é em 50 ms. Realizando o mesmo teste de aderência no conjunto amostral para um nível de confiança

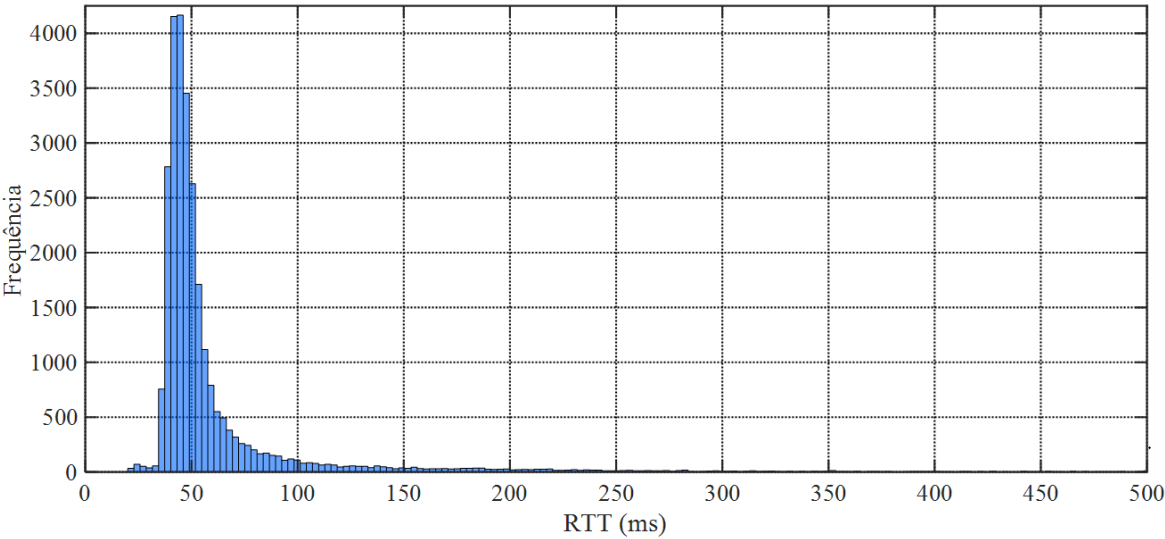
de 99%, encontramos um erro marginal de $E = 0,00079$ com a média variando $0,06148 < \text{média} < 0,06306$, ou seja, a amostra é aceita para um nível de confiança de 99%.

Tabela 2 : Dados dos parâmetros da Amostra do RTT coletados durante 240 minutos.

Tamanho da Amostra	27546
Média	0,06227
Mediana	0,04743
Mediatriz	0,26014
Valor Médio Quadrático	0,08038
Variância	0,00258
Desvio Padrão	0,05083
Desvio Médio Absoluto	0,02607
Coeficiente de Variância	81,63189%

Fonte: Acervo do autor (2023)

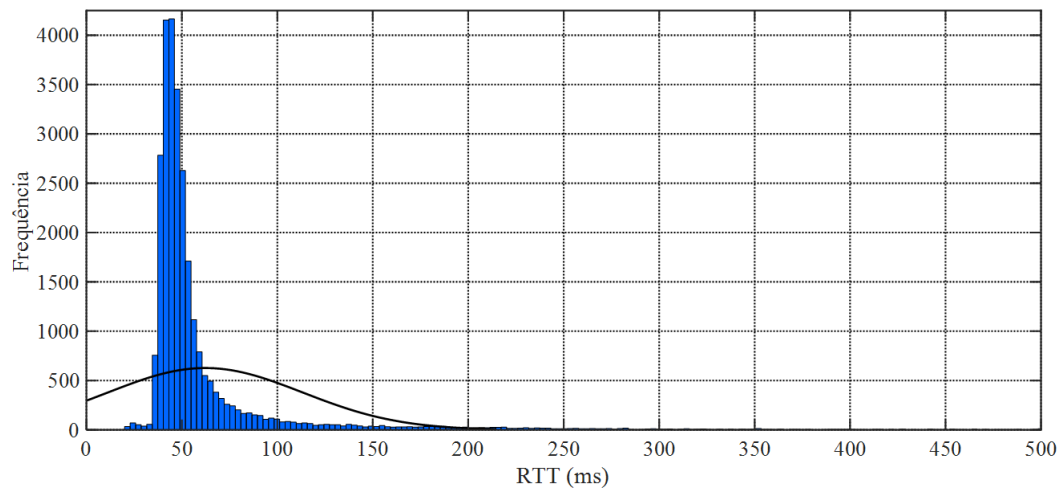
Figura 22 - Histograma da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation com as medições de tempo do RTT para 240 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

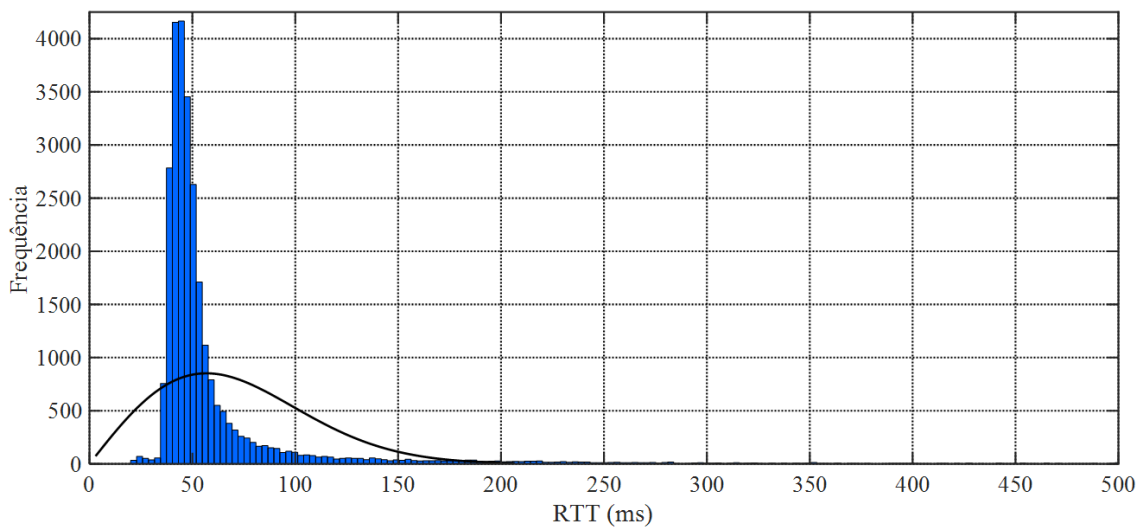
Utilizando a mesma metodologia aplicada nas amostras de 60 minutos foi realizada a plotagem da distribuição normal das amostras do RTT durante a medição os 240 minutos consecutivas, onde é possível visualizar na Figura 23. De forma similar foi traçado o gráfico que representa a distribuição *Rayleigh* na Figura 24. Na Figura 25, temos o resultado do *fitting* para a distribuição *Lognormal*.

Figura 23 - Distribuição normal da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos



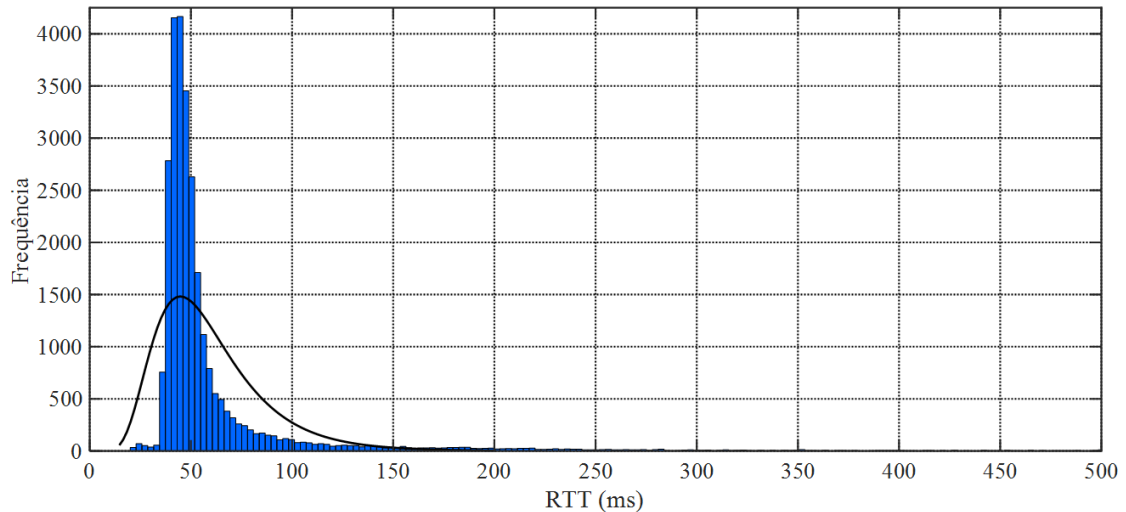
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 24 - Distribuição Rayleigh da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 25 - Distribuição Lognormal da comunicação do Master (COI) $\Leftrightarrow$ CAT $\Leftrightarrow$ Outstation para as medições dos tempos do RTT para 240 minutos



Fonte: Acervo do autor (2023)

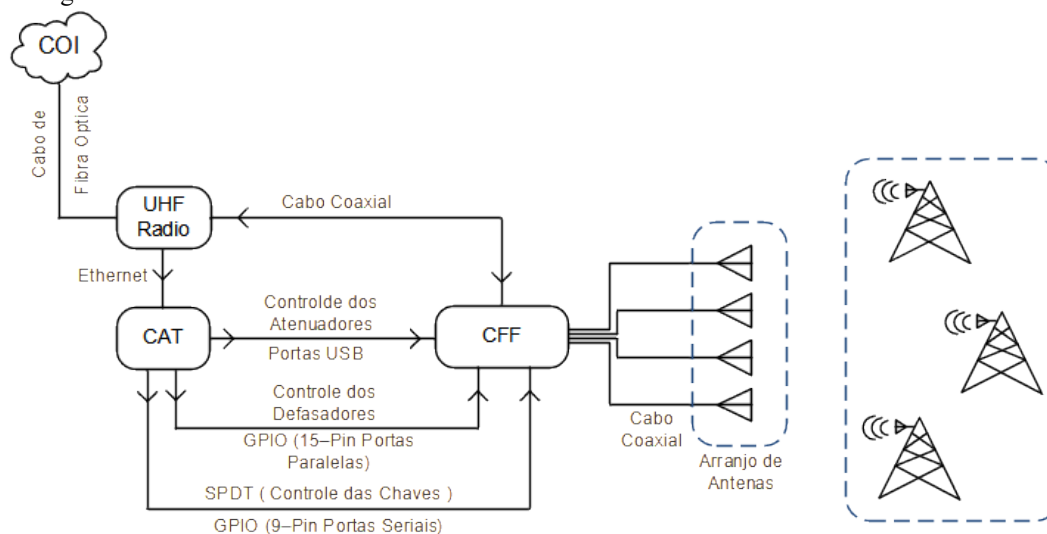
A análise dos testes de desempenho representados nos histogramas das Figuras 19 e 25 revela diferença entre as maiores frequências das amostras. Na Figura 19, observamos que a maior frequência das amostras ocorre em torno de 25 ms, neste caso não foi utilizado o CAT. Por outro lado, na Figura 25, a maior concentração de amostras é observada em torno de 50 ms, neste caso foi utilizado o CAT. Fazendo uma comparação foi possível verificar que o CAT acrescenta um tempo de 25 ms ao sistema. No diagrama exibido na Figura 26 é possível verificar que o CAT está inserido entre o rádio UHF e circuito formador de feixe. O rádio UHF do diagrama é o mesmo utilizado na ERB. Ele funciona como *gateway*, ou seja, como uma porta de entrada para interligar a rede COI às estações remotas. No sistema proposto, o CAT captura os pacotes do rádio através da interface *Ethernet* e os usa como parâmetro para automatizar o circuito formador de feixe, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 26³.

No diagrama apresentado na Figura 26 é possível verificar a conexão do rádio com o circuito formador de feixe via cabo coaxial, onde são enviados os quadros que são delimitados em *bits* e transmitidos em sinais de RF para porta de entrada do divisor de potência de 1:4.

Também é possível visualizar a interligação do rádio via porta Ethernet com o controlador de arranjo de antenas (CAT). O envio dos comandos será a partir do CAT para o circuito formador de feixe que é composto de divisor de potência, atenuadores, defasadores, amplificadores e chaves SPDTs.

O CAT também é um tipo de *gateway* que realiza a interconexão da rede de dados do COI da concessionária de energia elétrica via padrão *Ethernet* com os dispositivos do sistema de radiofrequência que compõe o circuito formador de feixe, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Diagrama em Bloco do Sistema de Controle de Antenas com o Arranjo de Antenas Inteligentes Comutado



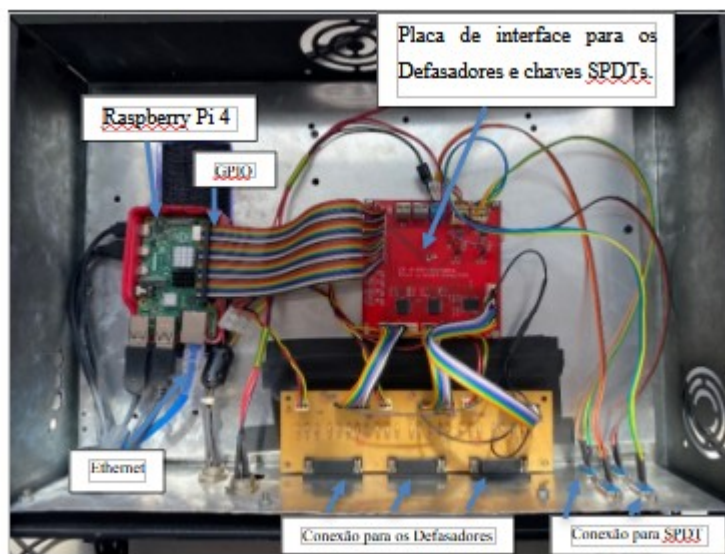
Fonte: Acervo do autor (2023)

O CAT é composto por um *software* que é executado por um *raspberry* Pi 4, onde são utilizadas as portas USBs para enviar os comandos aos atenuadores digitais³⁰. Ele possui também sua interface de GPIO (*General Purpose Input Output*) conectado a uma placa para comandar os defasadores digitais de forma paralela e as chaves SPDTs via interface RS232 como pode ser observado na Figura 27, as placas conectadas ao GPIO. Ele funciona como um dispositivo master DNP3 do sistema SCADA. Do COI, permaneceram sendo enviados todos os comandos para as chaves religadoras via a interface *Ethernet* do rádio localizado na ERB. O CAT irá capturar as solicitações direcionadas as chaves religadoras. A comunicação entre o CAT e as chaves religadoras é realizada em uma arquitetura de mestre-escravo com requisição solicitada, de modo que cada chave religadora deve aguardar sua vez para se reportar a sua estação rádio base mestre.

Para todas as solicitações que são capturadas pelo CAT são verificadas o endereço IP de destino. O CAT desencapsula os pacotes IPs com destino a caixa remota e lê o quadro que contém o endereço de DNP3 com a informação de geolocalização da chave religadora remota. Além disso, ele realiza o encaminhamento dos quadros DNP3 encapsulados em pacotes IPs

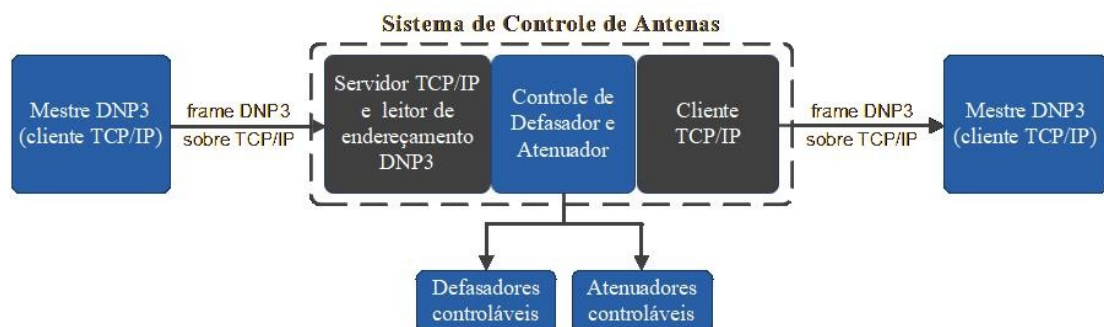
até as estações remotas, que em um sistema SCADA tem a função de RTU (*Remote Terminal Unit*)³⁰. Na Figura 28, é apresentado o encaminhamento de quadros DNP3 encapsulados na pilha de protocolos TCP/IP. O CAT faz os ajustes das magnitudes impostas aos quatro atenuadores digitais e das fases dos defasadores digitais do circuito formador de feixe que está conectado ao arranjo de antenas, diferenciando o feixe de radiação para atender cada solicitação.

Figura 27 - Placas internas do CAT



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 28 - Encapsulamento de DNP3 sobre TCP/IP



Fonte: Acervo do autor (2023)

3. 1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADO NA TESE

Os métodos de otimização dos algoritmos genéticos (GA) e otimização por enxame de partículas (PSO) se enquadram no título de métodos evolucionários. Em vez de usar um único

ponto no espaço de busca, ambas as técnicas GA e PSO usam população de pontos no espaço de busca e, portanto, têm uma melhor chance de localizar o ótimo global³¹.

No PSO, uma série de pontos são explorados simultaneamente na iteração, semelhante a uma busca realizada pelo GA³¹.

O método de otimização por enxame de partículas (PSO) foi desenvolvido em 1995 por Eberhart e Kennedy¹⁵ e está enraizado em duas metodologias complementares principais: vida artificial (*A-life*) e computação evolutiva. A primeira aplica uma abordagem baseada em simulação populacional na segunda metodologia, de modo que os agentes independentes busquem soluções de modo compartilhado (durante o processo de otimização no espaço amostral), imitando um enxame de abelhas ou um bando de pássaros. Para emular esses movimentos unitários no bando, o método usa apenas operadores matemáticos primitivos que podem ser implementados em poucas linhas de código de computador conforme descrito em ^{15, 32}.

Em suas aplicações iniciais, o PSO foi utilizado para otimização de funções não-lineares, bem como para o treinamento de pesos de redes neurais artificiais¹⁵. Porém, mais tarde, se revelaria um método de otimização poderoso com alta aplicabilidade em várias áreas da engenharia, como por exemplo, o eletromagnetismo conforme descrito em^{33, 34}, que é a base para o desenvolvimento e projeto de antenas.

Vários algoritmos de diferentes métodos de computação evolucionária já foram analisados quanto à sua aplicabilidade e desempenho em problemas de otimização eletromagnética. Revisões de tais métodos podem ser encontradas em ^{22, 23, 35 e 36} e um extenso estudo comparativo é apresentado em³⁷. Contudo, nenhum dos métodos provou ser consideravelmente melhor do que qualquer de seus concorrentes. Nestes estudos alguns dos métodos apresentaram desempenho pouco melhor para algumas aplicações em específico, mas os resultados de todos eles foram muito próximos. Portanto, apesar dessa variedade de métodos de otimização existentes, observar-se que o desempenho individual de cada algoritmo é mais fortemente influenciado pela natureza específica do problema, pelos dados disponíveis e pela parametrização do algoritmo do que pelo próprio método em si³⁷. Neste cenário aberto, o PSO tornou-se um poderoso método de otimização com alta aplicabilidade em diversas áreas da engenharia e eletromagnetismo^{33, 34}.

Por ter uma implementação em linha de comando relativamente simples, se utilizando apenas de operações matemáticas básicas, o PSO é computacionalmente leve em termos de

requisitos de memória e de velocidade. Por isso necessita de um baixo tempo de processamento computacional. Devido às suas características, o PSO tem sido utilizado em inúmeros trabalhos que tratam da síntese de arranjos de antenas^{38, 39, 40, 41}.

O algoritmo PSO geralmente é inicializado com uma população de possíveis resultados dispostos aleatoriamente. Cada uma dessas n soluções candidatas é chamada de partícula, e sua posição no espaço de busca representa um parâmetro de entrada definido para o sistema que se deseja otimizar. Dependendo da resposta do sistema a esta entrada de partícula, ela é pontuada como um bom ou mau candidato para a solução final. Este método de pontuação pode ser uma função que descreve o sistema, ou ainda uma função objetivo que força o sistema a apresentar um comportamento desejável e específico. À medida que as iterações do algoritmo progridem, os candidatos se movem em direções que melhoram suas próprias pontuações em busca da posição ótima global do sistema.

Nesta tese, cada posição onde as partículas estão localizadas representa um conjunto diferente de excitações para o arranjo de antenas na forma de amplitudes e fases que são representadas por: $[A1, A2, A3, A4, \beta1, \beta2, \beta3, \beta4]$, com os A_i sendo as amplitudes e os β_i sendo as excitações de fase nos alimentadores das antenas. Os subscritos desses componentes $i = 1, 2, 3, 4$ representam qual das quatro antenas deve ser alimentada no arranjo de antenas. As componentes da posição da partícula são matematicamente equivalentes aos parâmetros que se deseja otimizar no sistema. Assim, a busca espacial do PSO é escolhida por convenção para ser um subespaço $\Omega \subset \mathbb{R}^8$ com seus primeiros quatro componentes no intervalo $[-50, 5]$ dBm e seus quatro últimos componentes no intervalo $[0, 2\pi]$ rad⁴².

A seguir é apresentado o pseudocódigo simplificado do PSO utilizado nos testes nesta tese de doutorado.

```

begin
  # Inicializa a população
  for ( $i = 1$ ;  $i \leq N\_max$ ;  $i++$ )
  {
     $[A1, A2, A3, A4] = [random(-50, 5), random(-50, 5), random(-50, 5), random(-50,$ 
5)]];
     $[\beta1, \beta2, \beta3, \beta4] = [random(0, 2\pi), random(0, 2\pi), random(0, 2\pi), random(0, 2\pi)]$ ;
     $x(i, 1) = [A1, A2, A3, A4, \beta1, \beta2, \beta3, \beta4]$ ;
     $x\_score(i, 1) = objective\_function(x(i, 0))$ ;
  }
  for ( $j = 1$ ;  $j \leq K\_max$ ;  $j++$ )
  {
    # Obtenção do Gbest e Pbest
     $auxiliar1 = x\_score(1, j)$ ;
     $best\_position(j) = 1$ ;
    for ( $u = 2$ ;  $u \leq N\_max$ ;  $u++$ )
    {
      if ( $x\_score(u, j) < auxiliar1$ )

```

```

    {
        auxiliar1 = x_score(u, j);
        best_position(j) = u;
    }
}
Gbest_stack(j) = [x(best_position(j), j)];

if (j = 1)
{
    position_Pbest = 1;
}
else
{
    position_Pbest = j;
    for (s = 1; s < j; s++)
    {
        if (x_score(u, s) < x_score(u, position_Pbest))
        {
            position_Pbest = s;
        }
    }
}
Pbest_stack(u, j) = x(u, position_Pbest);

# Atualização das posições
for (i = 1; i <= N_max; i++)
{
    if (j = 1)
    {
        v(i, j) = 0;
    }
    v(i, j+1) = c2 * random(0, 1) * (Gbest_stack(j) - x(i, j)) +
                c1 * random(0, 1) * (Pbest_stack(u, j) - x(i, j)) +
                w * v(i, j);
    x(i, j+1) = x(i, j) + v(i, j+1);
}
}
end

```

A fim de obter o respectivo diagrama de radiação do arranjo de antenas para a posição de cada partícula, foi escrito um código em *python* para acessar remotamente o arranjo de antenas projetado no *software Ansys HFSS*. Este código excita remotamente o modelo do arranjo de antenas com o conjunto de excitações necessário e captura seu diagrama de radiação de resposta. Assim, uma função objetivo codificada em *python* extrai algumas informações relevantes dos padrões de radiação para pontuar cada partícula.

A função objetivo foi projetada visando dois objetivos principais - ou seja, maximizar o lóbulo na direção do alvo e minimizar os lóbulos existentes em quaisquer outras direções. Então, ele tem dois componentes de erro. O primeiro guarda o valor de ganho do diagrama de radiação na direção-alvo, de forma que quanto maior for esse valor, menor será o erro do componente. O segundo usa um código detector de máximo ponto de ganho de lóbulos para detectar os lóbulos no diagrama de radiação. Este código retorna um vetor contendo as

posições angulares de valor máximo de cada lóbulo maior que 0 dBi. Em seguida, o algoritmo extrai os respectivos valores de ganho dessas posições e os soma, obtendo assim o erro do segundo componente. Os lóbulos com posições muito próximas da direção do alvo (uma região de 4° por orientação) não são contabilizados neste somatório do segundo componente de erro. O pseudocódigo para esta função objetivo é o descrito a seguir:

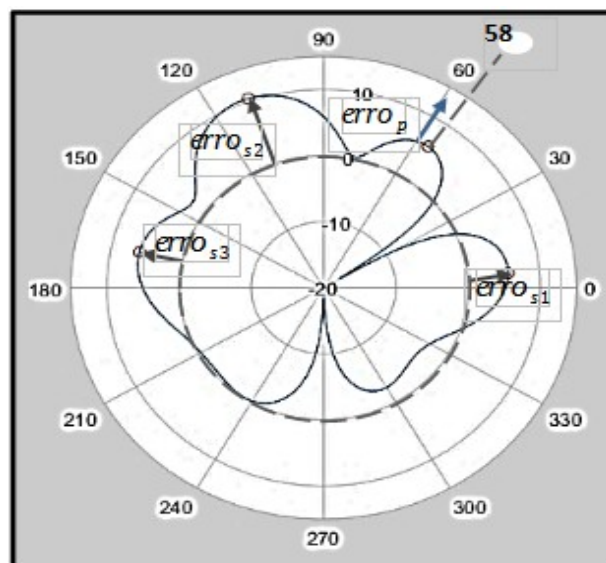
```

begin
  max_value = maximum desired gain
  first_component_error = | radiation_pattern[target_dir] - max_value |
  lobes_pattern = []
  for (i=1 to 360)
    if radiation_pattern[i] > 0
      if radiation_pattern[i] < radiation_pattern[i+1]
        if radiation_pattern[i+1] > radiation_pattern[i+2]
          append (i+1) to lobes_pattern
        end if
      end if
    end if
  end if
  second_component_error = 0
  for (i=1 to length of lobes_pattern)
    if (lobes_pattern[i]>target_dir + 4) or (lobes_pattern[i]<target_dir - 4)
      second_component_error += | radiation_pattern[lobes_pattern[i]] |
    end if
  end if
  pattern_total_error = (4*first_component_error + second_component_error)/4
end

```

A Figura 29, mostra um exemplo da detecção de lóbulos e os erros de dois componentes contabilizando um diagrama de radiação hipotético, com a direção-alvo sendo $\varphi = 60^\circ$.

Figura 29 - Aplicação da função objetivo, incluindo o detector de Lóbulos, a um digrama de radiação hipotético e seus dois componentes de erros resultantes para calcular uma pontuação de partícula para o PSO. O subscrito P indica o componente primário, enquanto o subscrito Si, i = 1,2,3.., indica os elementos no somatório do componente secundário



Fonte: Acervo do autor (2023)

Em cada iteração, o algoritmo PSO armazena a melhor posição obtida por todas as n partículas e as melhores posições alcançadas até agora por cada partícula, quando comparada com seu próprio histórico de percurso. A melhor posição do conjunto é chamada de *Gbest* (melhor global), enquanto as melhores posições individuais são chamadas de *Pbest*. O *Gbest* representa o efeito colaborativo das partículas: um conjunto de memória compartilhada que influencia cada partícula a se mover em direção à melhor posição global encontrada até então. O *Pbest*, em contraste, representa o elemento cognitivo que encoraja cada partícula a voar em direção à sua melhor posição individual encontrada até então.

Cada partícula tem seu movimento influenciado, à medida que iterações ocorrem, pelo componente social e cognitivo descritos acima. Além disso, há um terceiro componente que emula o fator inercial no movimento da partícula, conhecido como componente de momento.

No pseudocódigo simplificado do PSO anteriormente apresentado, a atualização da posição de cada partícula é matematicamente expressa por^{15, 32, 41}:

$$v_i(k+1) = c_2 \cdot rand_2 \cdot (g_{best}(k) - x_i(k)) + c_1 \cdot rand_1 \cdot (p_{ibest}(k) - x_i(k)) + w \cdot v_i(k) \quad \text{Eq. (1)}$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad \text{Eq. (2)}$$

com w sendo o momento de inércia e c_1 e c_2 sendo os pesos das acelerações dinâmicas cognitiva e social, respectivamente. E $x_i(k)$ é a posição da i -ésima partícula na k -ésima iteração, enquanto $v_i(k)$ é sua velocidade atual nessa mesma iteração.

Ao introduzir o conceito de momento de inércia no PSO (na Equação 1), Y. Shi³² comenta que ele pode ser uma função linear positiva ou mesmo uma função não-linear do tempo, ao invés de uma constante positiva. A existência de $w \neq 0$ na Equação 1 possibilita às partículas uma tendência maior de explorar novos espaços e, quanto maior for w , maior será a velocidade de voo da partícula. Porém, quanto menor for w , menor será a velocidade de voo da partícula, e então o método tende a se dedicar à exploração local. Ao diminuir linearmente w ao longo das gerações, Y. Shi condiciona o algoritmo de otimização para inicialmente encontrar e comparar os ótimos locais e então, após algumas iterações, focar no melhor deles, para refiná-lo por uma pesquisa local.

Nos ensaios iniciais de otimização deste projeto, foi observado que um decréscimo linear em w ao longo do tempo estava fazendo com que as partículas escolhessem uma solução prematuramente e, assim, convergissem para uma posição ótima não tão boa

suficiente. Para corrigir esse problema, o decréscimo linear foi substituído pela curva decrescente de segundo grau da Equação 3, apresentada na Figura 30a. Essa mudança permite que a otimização invista mais tempo na busca pelos melhores ótimos^{15, 32, 41, 42}.

$$w = (w_{min} - w_{max}) \left(\frac{k}{K_{max}} \right)^2 - w_{max} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde w_{max} e w_{min} são o maior e o menor peso inercial respectivamente, k é o número da iteração atual e K_{max} é o número máximo de iterações.

Os parâmetros c_1 e c_2 representam os pesos de aceleração para a melhor posição individual alcançada até agora pela i -ésima partícula (p_{ibest}) e a melhor posição global alcançada pelo conjunto de partículas (g_{best}), respectivamente. Apresentando as acelerações cognitiva e social como constantes, Eberhart¹⁵ descreve que um valor relativamente alto do componente cognitivo, em comparação com o componente social, resultará na partícula vagar excessivamente pelo espaço de busca. Em contraste, um valor relativamente alto do componente social pode levar as partículas a se precipitarem prematuramente em direção a um dos ótimos locais.

Ratnaweera⁴³ avalia que é preferível desenvolver uma abordagem que estimule as partículas a vagar pelo espaço de busca sem se agrupar em torno de ótimos locais durante os estágios iniciais da otimização. No entanto, em estágios posteriores, ele considera que é importante aumentar a convergência em direção ao ótimo global, a fim de encontrar a solução ótima de forma eficiente. Considerando essas preocupações, ele desenvolve o uso de coeficientes de aceleração variáveis no tempo para o PSO (referido como método PSO-TVAC), apresentado nas equações 4 e 5, onde $c_{1max} > c_{2max}$ e $c_{2min} > c_{1min}$, como mostrado na Figura 30b.

$$c_2 = c_{2max} - (c_{2max} - c_{2min}) \cdot \frac{k}{K_{max}} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$c_1 = c_{1max} - (c_{1max} - c_{1min}) \cdot \frac{k}{K_{max}}; \quad \text{Eq. (5)}$$

A velocidade v das partículas no PSO é geralmente limitada a um valor constante máximo V_{max} , a fim de evitar que as partículas se afastem muito das regiões de interesse durante o processo evolutivo de busca. Com o objetivo de melhorar a velocidade de

convergência e a precisão da otimização, P. Hongxia⁴⁴ desenvolve o conceito de velocidade adaptativa para o PSO (referido como método VPSO), dado pela Equação 6. O VPSO atua como um mecanismo de ajuste de configuração que regula suavemente a velocidade máxima das partículas ao longo do andamento da busca, levando em consideração as etapas de errância e intensificação da convergência das partículas, conforme discutido anteriormente. A Figura 30c mostra o padrão resultante da saturação da velocidade sobre o progresso das iterações, normalizado pelo comprimento do intervalo de busca.

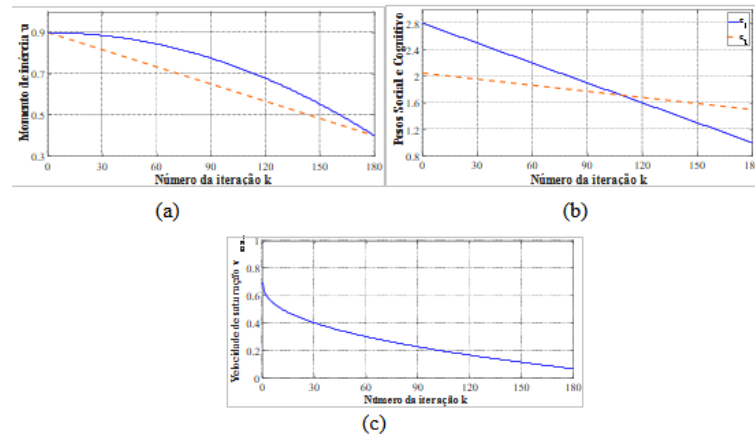
$$v_{max} = \left(K_v - \left(\frac{k}{K_{max}} \right)^p \right) V_{max} \quad \text{Eq. (6)}$$

Na Figura 30 é apresentada a parametrização aplicada ao PSO sendo esta detalhada nas partes; (a) O momento de inércia utilizado neste trabalho (linha contínua) e o momento de inércia utilizado nas tentativas iniciais (linha tracejada); (b) Os pesos de aceleração dinâmica cognitiva e social, em linha contínua e tracejada respectivamente; (c) O declínio da saturação da velocidade, normalizado para cada dimensão do comprimento do intervalo de pesquisa.

Para ilustrar o desempenho do algoritmo, a Figura 30, exibe curvas normalizadas do erro mínimo da função objetivo em relação às iterações do PSO, direcionando o feixe nas direções desejadas de 30°, 60° e 135° (φ_{des}). Essas curvas foram normalizadas em relação aos seus próprios erros de função objetivo mais elevados. Notavelmente, à medida que as iterações progridem, observa-se uma redução consistente no valor mínimo do erro, validando que a solução obtida pelo método é sempre superior à solução inicial.

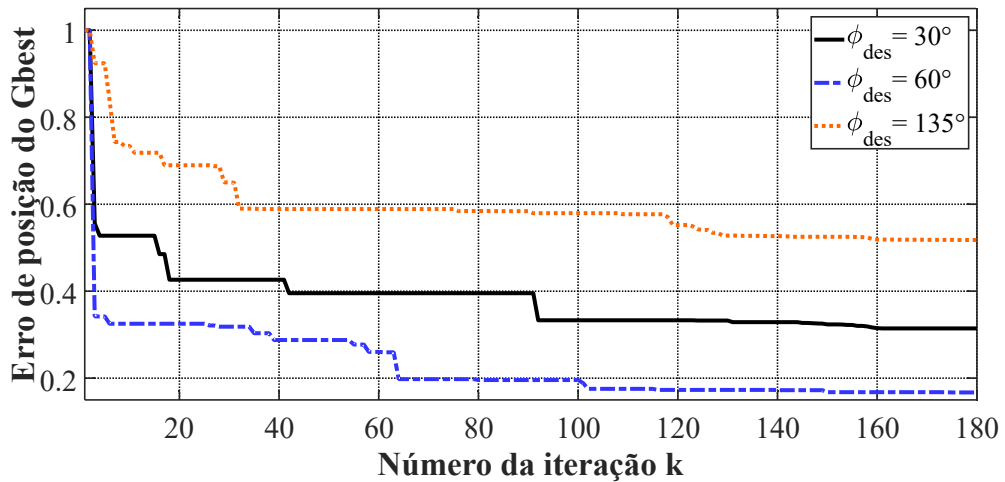
A condição de reflexão foi usada como a condição de contorno para a otimização proposta. As técnicas de contorno reflexiva, invisível e amortecida são três métodos promissores quando usados no PSO para lidar com problemas de calibração de antenas^{33, 45}. A Figura 31, mostra as curvas normalizadas dos avanços do erro do Gbest durante as otimizações do PSO para as direções desejadas φ_{des} de 30°, 60° e 135°. Os diagramas de radiação otimizados resultantes para essas direções são apresentados na seção de resultados e discussões desta tese.

Figura 30 - (a) Comparação entre o momento de inércia atual (linha contínua) e o momento de inércia nas tentativas iniciais (linha tracejada); (b) Representação dos pesos de aceleração dinâmica cognitiva e social, indicados por linhas contínuas e tracejadas, respectivamente; (c) Declínio normalizado da saturação de velocidade para cada dimensão do intervalo de pesquisa.



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 31 - Curvas normalizadas dos avanços do erro do Gbest durante as otimizações do PSO para as direções desejadas de 30° , 60° e 135°



Fonte: Acervo do autor (2023)

3.2 ARRANJO DE ANTENAS

Um parâmetro importante que caracteriza uma antena é a diretividade. Sabe-se que antenas direcionais, como a Yagi-Uda, possuem alta diretividade e, portanto, são capazes de concentrar a maior parte da energia em um feixe de radiação.

Uma outra questão importante é suprimir os lóbulos secundários de forma a eliminar os sinais não desejáveis controlando assim o diagrama de radiação⁴¹. Com apenas uma antena

não é possível realizar essa função. Para isso é necessário associar outras antenas formando assim um arranjo de antenas. Em um sistema de comunicação com antenas Yagi-Uda, utilizar o artifício de arranjo de antenas possibilita aumentar ainda mais essa diretividade. E com a automação dos atenuadores, defasadores, amplificadores e as chaves SPDTs, que são os dispositivos RF do circuito formador de feixe, é possível o controle do diagrama de radiação que nesta tese é realizado pelo controlador de arranjo de antenas (CAT), dessa forma denominamos esse de Arranjo de Antenas Inteligentes^{9,3}.

Nesta tese foram utilizados dois arranjos de antenas, cada um com quatro antenas Yagi-Uda comerciais e homologadas pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) com a referência Y4460111-07SG(A-02) do fabricante TSM. Cada antena Yagi-Uda possui 7 elementos, dos quais um elemento refletor em grade (Figura 32), com ganho nominal de 11,8 dBi, faixa de operação de 440 MHz a 470 MHz e relação frente-costa de 24 dB. A Figura 32, apresenta a antena que foi construída no *software* da *Ansys HFSS* com base nos parâmetros definidos pelo fabricante da antena.

O *software Ansys HFSS* pode resolver problemas eletromagnéticos usando tanto o Método dos Elementos Finitos (FEM)⁴⁶ quanto o Método dos Momentos (MOM)⁴⁷. Durante as simulações foi verificado via simulador HFSS a interferência eletromagnética entre os arranjos de antenas. O HFSS também leva em consideração a interferência eletromagnética mútua entre as antenas do arranjo^{21,3}. O HFSS foi usado para projetar e simular o arranjo de antenas proposto e apresentado nas Figuras 33 e 35.

Durante o projeto de P&D foi desenvolvido um código em *Python* para estabelecer acesso remoto ao *software Ansys HFSS*. Este código nos permitiu inserir sistematicamente várias combinações de excitações no arranjo de antenas projetado pelo HFSS e capturar os diagramas de saída correspondentes. Esta abordagem permite aplicar diretamente o método do PSO dentro da plataforma de simulação eletromagnética. Este código excita remotamente o modelo, do arranjo de antenas com um conjunto de alimentações e captura sua resposta do padrão de radiação. Uma função objetivo no código extrai algumas informações relevantes dos padrões de radiação para pontuar cada partícula.

Posteriormente, utilizando o desenho da antena do *software*, onde foi montado uma configuração composta por quatro antenas com polarização vertical. Essas antenas foram dispostas em alinhamento paralelo, mantendo uma distância de $d_g = 2$ cm entre si, levando em consideração a presença da grade refletora. Isso resultou em uma distância equivalente de $d =$

53 cm entre a haste horizontal de uma antena e a antena vizinha, conforme ilustrado na Figura 33. Para acomodar esta disposição foi necessário um comprimento útil de suporte horizontal de $d_s = 165$ cm.

Para otimizar a geometria do sistema foram realizadas simulações computacionais com os arranjos de antenas utilizando o HFSS com o método de otimização PSO. Inicialmente, utilizou-se um arranjo de antenas numa configuração linear e com as antenas paralelas entre si, ou seja, na configuração de $\xi = 0^\circ$ como apresentado na Figura 33.

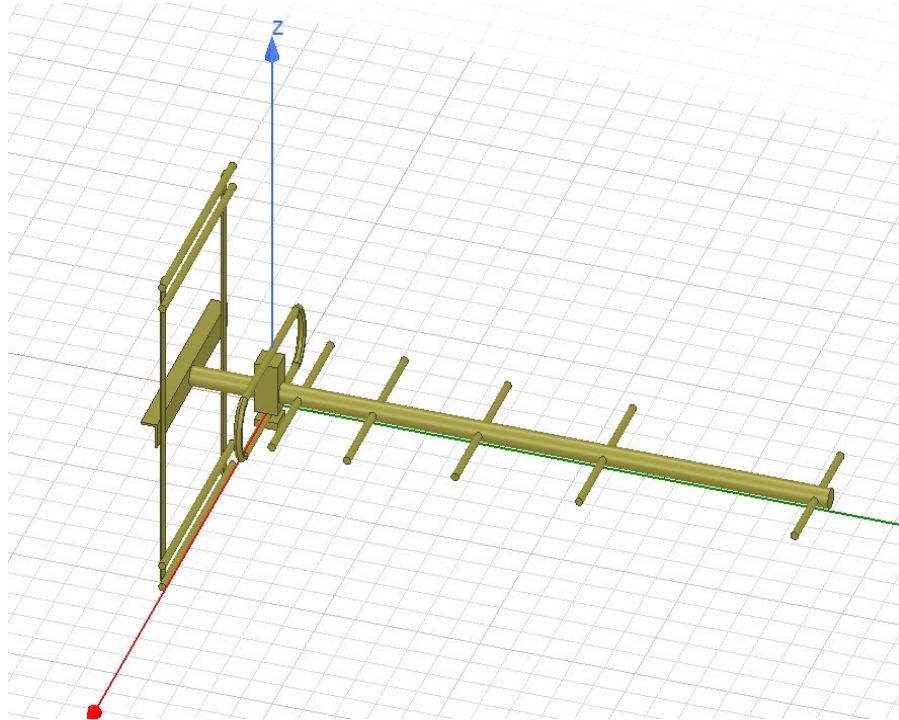
Ao se aplicar o método PSO a esse arranjo na tentativa de se obter uma configuração de excitações (amplitude e fase) ótima, não se alcançaram ganhos esperados para ângulos objetivos nas regiões $[0^\circ, 30^\circ]$ e $[150^\circ, 180^\circ]$.

A Figura 34, apresenta o resultado obtido quando a otimização tenta direcionar o feixe para 30° (em linha sólida cinza). Por se estar usando uma antena comercial com uma grade refletora retangular de largura $\frac{2}{3}\lambda$, a distância mínima entre as hastes das antenas é limitada consideravelmente. Por conta disso, torna-se necessária a aplicação de um procedimento alternativo à topologia do arranjo.

Na tentativa de vencer essa dificuldade, é aplicada uma abertura angular ξ às antenas extremas do arranjo (Figura 33), e aplica-se o PSO com direção-objetivo de ganho máximo em 30° para alguns valores pré-selecionados e fixados de ξ .

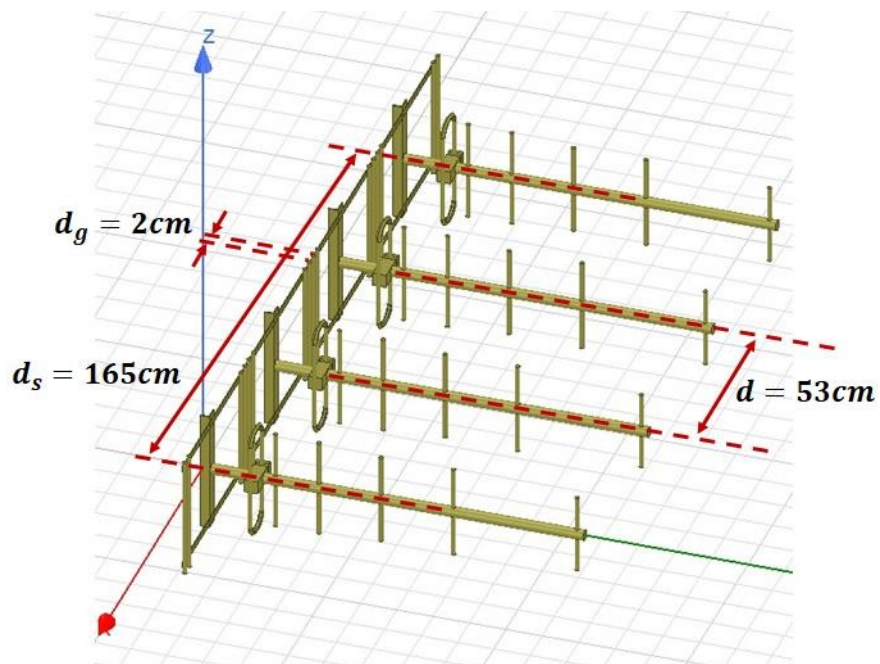
Os resultados são apresentados nos diagramas de radiação da Figura 34 para diversas aberturas. Tendo observado que $\xi = 70^\circ$ apresentou uma resposta promissora à otimização, aplicou-se $\xi = 70^\circ$ para a topologia final do experimento. Na Figura 35 é apresentada a topologia do arranjo das quatro antenas construído no *software* da *Ansys HFSS* com as antenas extremas com abertura de 70 graus. Posteriormente, foram realizadas otimizações com direções-objetivo maiores e menores que 30° , a fim de constatar que essa configuração mecânica é eficaz para o direcionamento do feixe entre 0° e 180° os resultados estão na seção de Resultados e discussões e foram publicados no artigo³.

Figura 32 - Desenho de uma antena Yagi-Uda – com 7 elementos para faixa de 440-470 MHz



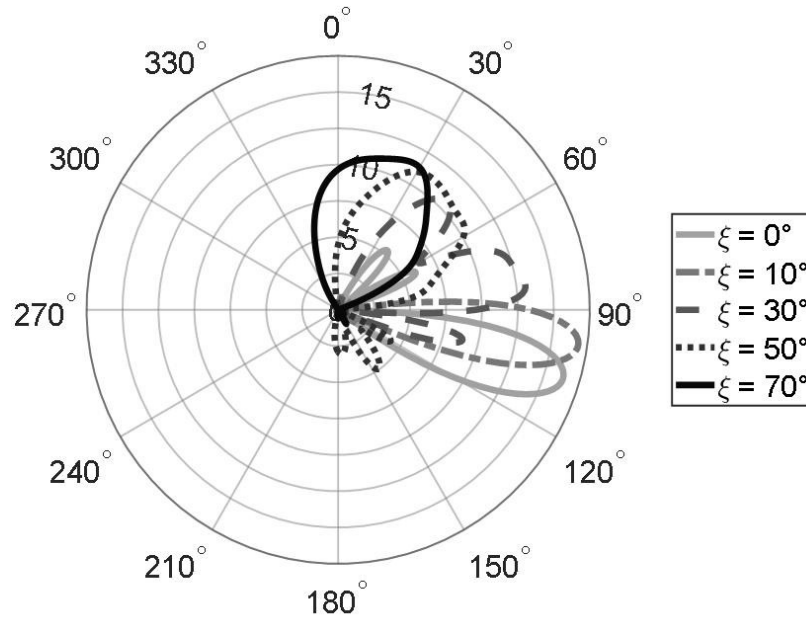
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 33 - Desenho do arranjo de 4 antenas Yagi-Uda em polarização vertical e com as antenas paralela entre si



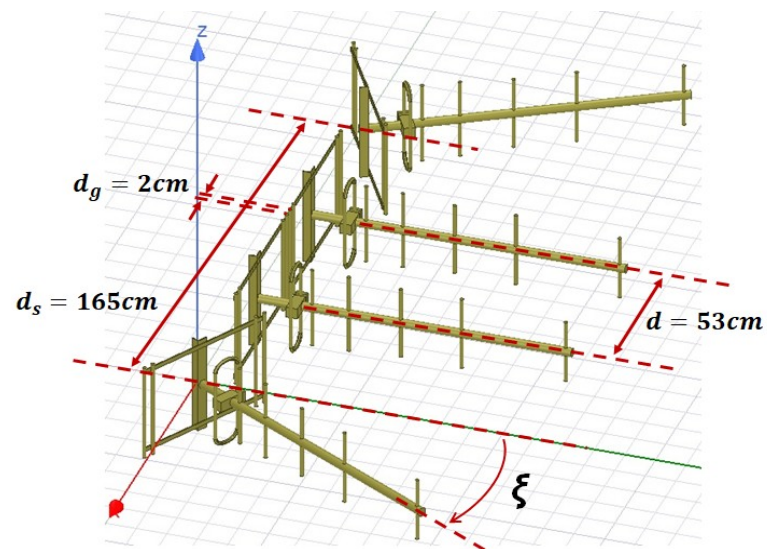
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 34 - Otimização resultante na tentativa de direcionar o diagrama de radiação para alguns ângulos de inclinação ξ aplicados nas antenas extremas do arranjo



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 35 - Desenho do arranjo de 4 antenas Yagi-Uda em polarização vertical: com as antenas extremas do arranjo numa abertura angular simétrica de ξ



Fonte: Acervo do autor (2023)

3.3 SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES APLICADO NA TESE DE DOUTORADO

O Sistema de Antenas Inteligentes é composto pelo circuito formador de feixe (CFF) e pelo circuito de controle do arranjo de antenas (CAT)³. Como já explicado na revisão bibliográfica, o Sistemas de Antenas Inteligentes pode ser de dois tipos: feixe comutado e arranjo adaptativo⁹.

Um sistema de arranjo de antenas de feixe comutado é um sistema normalmente destinado a uma estação rádio base ou também conhecida no sistema móvel celular como BTS (*Base Transceiver Station*), que tem vários diagramas de radiação predefinidos que foram projetados para aumentar a potência do sinal recebido em uma estação remota. Os arranjos de antenas em uma BTS são projetados para ter uma estrutura triangular. Cada lado do triângulo cobre um setor de 120° com múltiplos feixes por cada setor. Dependendo da localização exata da estação remota, o lóbulo é ativado de forma predefinida^{7,8}.

Nesta tese foi utilizado o sistema de feixe comutado que é automatizado pelo CAT, que comanda os dispositivos de RF do circuito formador de feixe de modo a possibilitar o direcionamento do lóbulo principal do arranjo de antenas para alcançar as chaves religadoras de interesse de maneira chaveada.

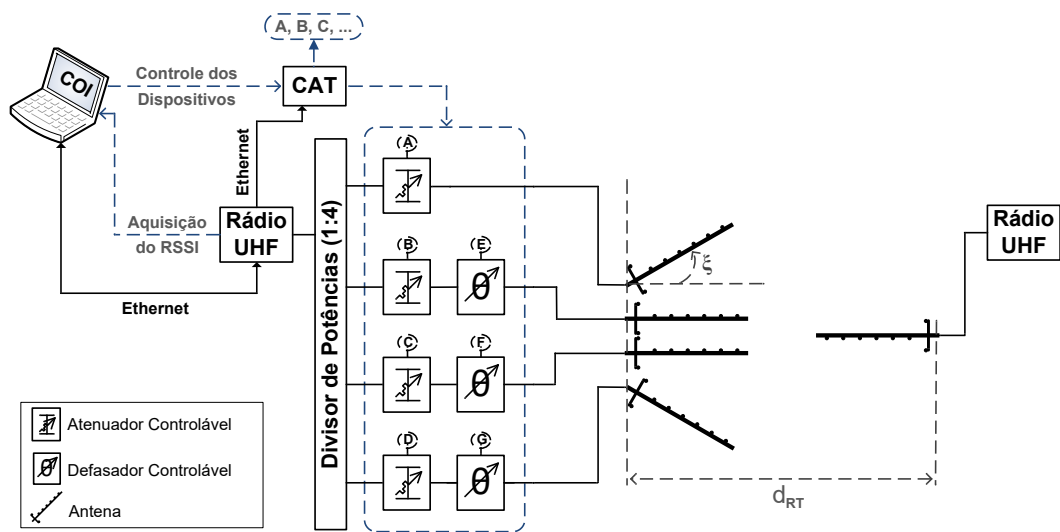
Para realizar os testes de funcionamento em campo foi projetado e construído o circuito formador de feixe (CFF) provisório, composto de divisor de potência 1:4, quatro atenuadores e três defasadores digitais, que estão conectados via cabos coaxiais RG 213 a um arranjo de antenas com cobertura de 180°, os dispositivos são automatizados pelo CAT.

A Figura 36, apresenta o diagrama com os dispositivos do circuito formador de feixe, que foi utilizado para os testes em campo, a serem controlados (circulados em linha pontilhada).

As antenas ilustradas na Figura 36 do arranjo são conectadas via cabo coaxial RGC 213 e são utilizadas junções (N-SMA) nas extremidades próximas ao CFF para cabos coaxiais RG58, pois as saídas dos atenuadores são conectores SMAs. Para estabelecer a conexão do rádio UHF ao circuito formador de feixe é necessário a utilização de um cabo coaxial RG58 conectado ao divisor de potência 1:4. O CFF é composto de quatro ramos, onde cada um deles é conectado a uma antena do arranjo. O primeiro ramo utiliza apenas o atenuador digital, já os ramos 1,2 e 3 são formados pelos atenuadores e defasadores digitais.

Ainda neste diagrama é mostrada a antena da estação remota que está separada por uma distância d_{RT} de 40 metros da ERB. Na estação remota temos um rádio UHF conectado a uma antena Yagi-Uda. Esse teste foi realizado para validar as simulações realizadas no HFSS com o arranjo de antenas, já que não possuímos uma câmara anecoica com as dimensões para suportar o giro completo de 360 graus do sistema. A explicação de como foram executados os testes está na seção de metodologia.

Figura 36 - Diagrama de blocos do circuito de formação de feixes



Fonte: Acervo do autor (2023)

Para implementação desse sistema na concessionária de distribuição de energia do grupo NEOENERGIA, recomenda-se a adição de amplificadores de rádio frequência no circuito formador de feixe devido às grandes distâncias existentes entre ERB e as caixas remotas onde estão conectadas as chaves religadoras. A finalidade é oferecer um ganho ao sinal e dessa forma vencer as perdas por percurso, além de possíveis desvanecimentos no sinal propagado.

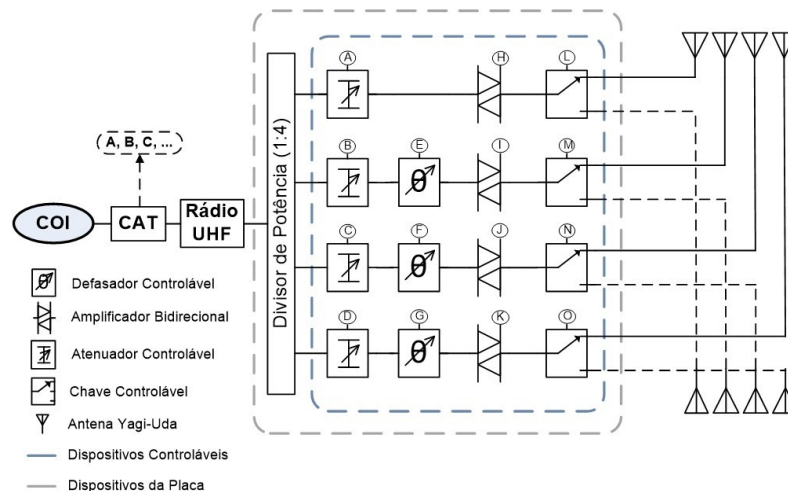
Na Figura 37, é mostrada a adição dos amplificadores em cada um dos ramos do circuito formador de feixe, que é utilizado na versão final do projeto e implantado na rede do grupo NEOENERGIA.

O arranjo de antenas proposto comuta o lóbulo principal do diagrama numa região angular de 180° . Para se alcançar chaves religadoras localizadas em uma cobertura angular de 360° , dois arranjos de antenas devem ser colocados em configuração *back-to-back*, onde cada arranjo tem um alcance de 180° e podem ser selecionados por chaves identificadas como

chaves controláveis, do inglês *Single-Pole-Double-Throw* (SPDT), como é ilustrado na Figura 37.

Dessa forma o CFF final é composto por um divisor de potência (1:4), quatro atenuadores controlados digitalmente, três defasadores controlados digitalmente, quatro amplificadores bidirecionais de ganho fixo, e quatro chaves SPDT (1:2) de um polo controlados digitalmente, conforme mostrados nos blocos do diagrama da Figura 37. Estes são agrupados em quatro ramos, cada um responsável por alimentar uma antena de cada arranjo conforme estiver selecionado. Cada arranjo de antenas do sistema completo possui quatro antenas Yagi-Uda e seus dois arranjos de antenas são fisicamente apontados em direções opostas, em uma configuração de *back-to-back*. Assim, os comutadores SPDT colocados em cada terminal de ramificação são os meios para alternar as alimentações do arranjo, que depende da direção da estação remota. Os amplificadores bidirecionais de ganho fixo, apresentados nos quatro ramos da Figura 37, são utilizados para proporcionar um aumento da potência que alimenta as antenas do arranjo (na transmissão), e para aumentar o nível de sinal das respostas das estações remotas que chegam à estação rádio base (na recepção).

Figura 37 - Diagrama de blocos do sistema de antenas inteligentes com estágio de amplificação e chave SPDT para cobrir uma região angular de 360°

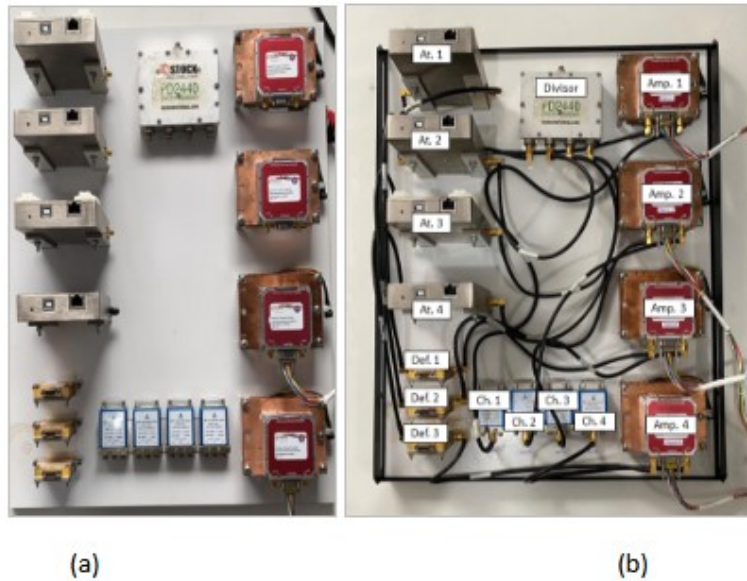


Fonte: Acervo do autor (2023)

Para o projeto de pesquisa entre a UFPE e a NEOENERGIA inicialmente foi montado o circuito formador de feixe apresentado no diagrama da Figura 37, que está fisicamente montado e instalado na placa de PVC conforme pode ser visto na Figura 38, com os dispositivos, divisor de potência (PD2440), atenuadores digitais (At.1,2,3 e 4), defasadores

digitais (Def.1,2 e 3), amplificadores bidirecionais digitais (Amp.1,2,3 e 4) e as chaves SPDT (Ch.1,2,3 e 4). Todos esses dispositivos foram adquiridos em compra internacional realizada pelo projeto de pesquisa da UFPE com o grupo NEOENERGIA.

Figura 38 - Placa para acomodação do CFF. (a) Placa em PVC com os dispositivos do CFF. (b) Vista superior da placa acomodada em uma bandeja do rack com os cabos de RF conectados. Abreviaturas - At.:



atenuador, Ch.: Chave SPDT, Amp.; amplificador, Def.: Defasador
 Fonte: Acervo do autor (2023)

4 METODOLOGIA

Com a finalidade de validar os resultados dos diagramas de radiação do sistema, obtidos na simulação realizada com HFSS, considerando as dimensões do arranjo de antenas, é necessário saber que para melhores resultados, é preferível obter o padrão de radiação de uma antena dentro de uma câmara anecoica, que apresenta paredes cobertas com materiais absorventes de RF. Neste ambiente controlado, a antena a qual se quer testar é montada em um mastro vertical e conectada a um rotor, facilitando sua rotação em incrementos angulares pré-definidos. Posicionada a uma distância igual ou superior ao critério de campo distante que é calculada por⁹:

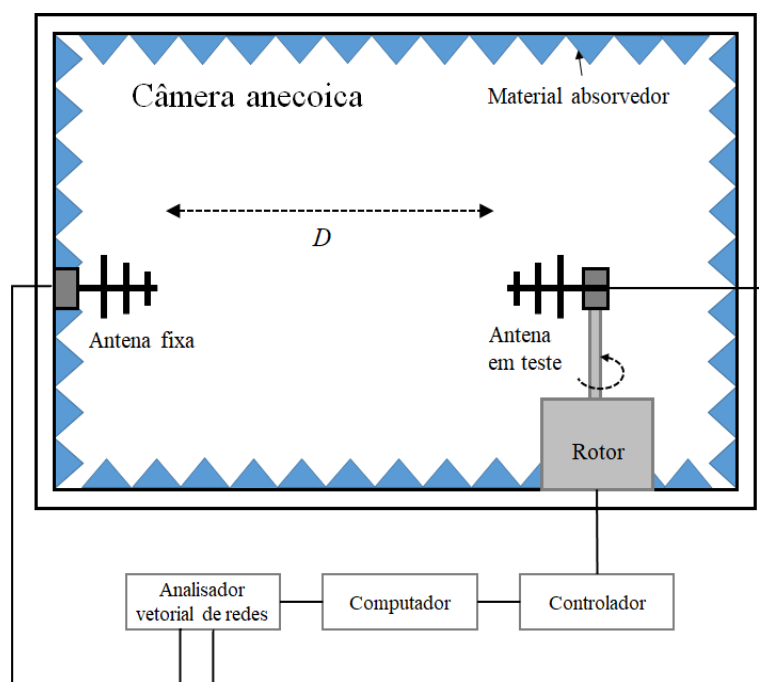
$$D = 2 \left(\frac{\lambda^2}{L} \right) \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde ' λ ' representa o comprimento de onda do sinal de RF e 'L' significa a maior dimensão do elemento radiante. Outra antena estacionária dentro da câmara anecoica captura o sinal de RF emitido pela antena em teste para cada ângulo de rotação do mastro. O analisador vetorial de redes recebe e registra a potência recebida⁹.

Conforme representado na Figura 39, a câmara anecoica apresenta a antena de teste e a antena estacionária situada na região do campo distante, garantindo medições precisas. No entanto, para laboratórios de pequeno e médio porte, o uso de câmaras anecoicas expansivas pode ter um custo muito alto. No caso devido ao arranjo de antenas descrito nesta tese de doutorado possuir grandes dimensões e também a UFPE não possuir câmara anecoica foi necessário recorrer a uma outra alternativa. Nesses casos, optar por ambientes maiores, desobstruídos e sem superfícies refletivas torna-se uma alternativa prática. No contexto do diagrama da Figura 39, aqui apresentado, o campo de futebol do IFPE Campus Recife foi selecionado para manter as proporções corretas.

Outra consideração relevante para a obtenção de diagramas de radiação precisos envolve garantir que ambas as antenas, a que está sendo testada e a antena de referência, compartilhem a mesma polarização e estejam posicionadas na mesma altura acima do solo. Neste contexto, a polarização vertical foi escolhida devido ao seu alinhamento com o sistema de telecomunicações utilizado para monitorar as chaves de distribuição do Grupo Neoenergia. O objetivo desse teste foi testar o sistema na mesma polarização que a antena será utilizada.

Figura 39 - Diagrama de uma câmara anecoica

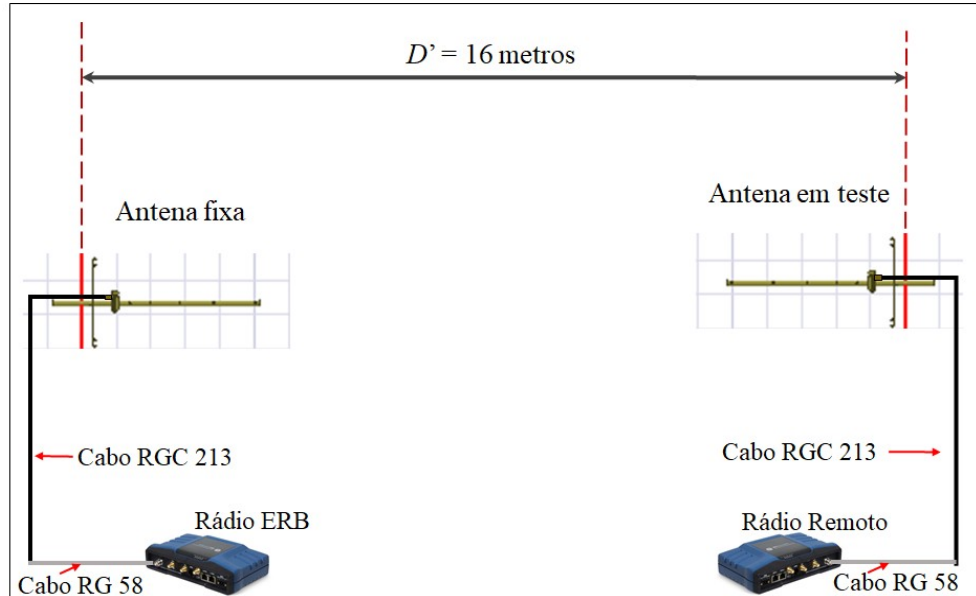


Fonte: Acervo do autor (2023)

Para realizar as medições foram utilizados rádios GE e a intensidade do sinal na antena em teste foi capturada por meio de um computador, registrando o parâmetro Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI). Foi obtido o RSSI fornecidos pelos rádios e esse parâmetro indica o nível do sinal recebido no rádio da ERB e da remota. A distância de campo distante para antenas individuais na frequência de 469,3875 MHz foi determinada como $D = 4,50$ m (com $L = 1,2$ m), enquanto para o arranjo de antenas foi estabelecida como $D = 35,96$ m (com $L = 3,39$ m).

A Figura 40, ilustra a vista superior da configuração empregada para medir os padrões de radiação de antenas individuais. Nessas medições, as antenas foram conectadas aos rádios por meio de um cabo RGC 213 de 60 m, apresentando perda que foi medida com o analisador de rede vetorial (VNA) em laboratório de 5,86 dB. Este cabo foi ainda ligado a outro cabo RG 58 de 1 m com perda de 0,36 dB que foi verificado com o mesmo instrumento, utilizando uma junção N fêmea-fêmea. A Tabela 3, fornece um resumo da potência do rádio e perdas nos cabos, destacando suas principais características.

Figura 40 - Esquema da vista superior da configuração para as medições do diagrama de uma antena isolada



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 3: Características dos cabos e dos rádios utilizados na obtenção dos diagramas de radiação

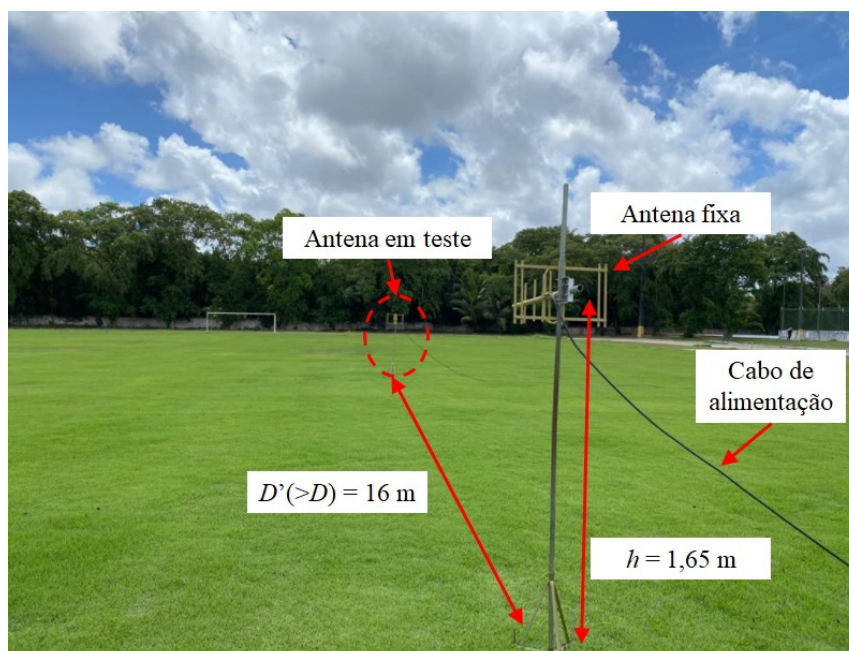
Potência do Rádio GE	20 dBm (saída)
Frequência de transmissão do rádio ERB	469,3875 MHz
Frequência de recepção do rádio remoto	469,3875 MHz
Cabo de 1 m (RG 58)	-0,36 (S21 dB)
Cabo de 60 m (RGC 213)	-5,86 (S21 dB)

Fonte: Acervo do autor (2023)

A área aberta escolhida para medição tanto das antenas isoladas quanto do arranjo de antenas foi o campo de futebol do IFPE. Na Figura 41, podem ser observadas as configurações do experimento para medições em campo. As antenas são fixadas nos mastros a uma altura (h) de 1,65 metros para a antena que não está participando do arranjo de antenas. O mastro que sustenta a antena em teste é capaz de girar livremente em torno de seu eixo. A

antena fixa de referência foi posicionada a uma distância (D') maior que o requisito mínimo para medição de campo distante

Figura 41 - Montagem da antena para medição do diagrama de radiação em espaço aberto



Fonte: Acervo do autor (2023)

Da mesma forma que foram realizados os testes com as antenas individuais para obter o diagrama de radiação foi montado o mesmo experimento para o arranjo de antenas. A Figura 42 mostra a vista superior da configuração utilizada para medir o padrão de radiação do arranjo de antenas. Para alimentar as antenas do arranjo simultaneamente, foi empregada a mesma combinação de cabos mencionada anteriormente. Porém, foi introduzido um divisor de potência 1:4 para conectar as antenas, exigindo o uso de quatro cabos RG 58 de comprimentos variados (com objetivo de gerar diferentes defasagens). Cada porta de saída do divisor introduziu uma perda de inserção de 7 dB. Esses cabos, denominados C1, C2, C3 e C4, são identificados na Figura 42. Na Tabela 4, onde são apresentadas as características dos quatro cabos utilizados para alimentar as antenas do arranjo.

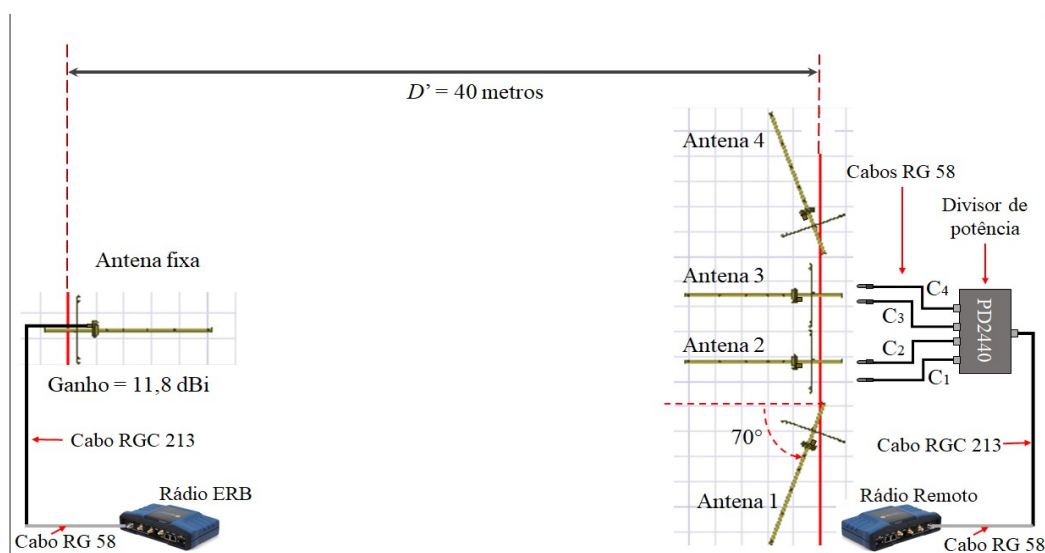
O objetivo destes testes é avaliar o grau de correspondência entre os diagramas obtidos através da montagem experimental e aqueles simulados através do *software* HFSS quando configurados com os mesmos parâmetros de potência.

Consequentemente, quatro padrões distintos de radiação foram simulados com o *software* HFSS e comparados com as medidas obtidas em campo. A Tabela 5 descreve essas

quatro configurações diferentes. Em determinados cenários, para gerar diversos padrões de radiação, duas das antenas foram temporariamente desconectadas, resultando em duas combinações separadas, onde o sinal que chegava a essas antenas era efetivamente reduzido a zero. Os resultados dessas medições de padrão de radiação serão discutidos mais adiante na seção Resultados e discussões.

O experimento prático inicialmente montado para antenas individuais foi replicado para o arranjo de antenas, sendo ele realizado no mesmo campo de futebol do IFPE. Porém, para a configuração do arranjo de antenas, as antenas passaram a ser montadas no mesmo mastro, posicionado a uma altura (h) de 2 metros. Semelhante às antenas individuais, o mastro que suporta o conjunto de antenas em teste é capaz de girar livremente em torno de seu eixo. Além disso, a antena de referência foi colocada a uma distância D' de 40 metros, ultrapassando a distância mínima exigida para medições de campo distante. Para uma perspectiva mais clara, consulte as Figuras 43 e 44, que oferecem uma representação detalhada do conjunto no mastro, incluindo o divisor e os cabos que fornecem potência às quatro antenas.

Figura 42 - Esquema da vista superior da configuração para as medições do diagrama do arranjo



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 4: Características dos cabos utilizados para conectar o divisor e as antenas do arranjo a fim de se oferecer diferentes defasagens

Cabo	S21 (dB)		∠ S21 (°)	
	459 MHz	469 MHz	459 MHz	469 MHz
1	-0,3227	-0,3130	-35,962	-44,159
2	-0,3069	-0,3360	-0,077	-7,752
3	-0,8576	-0,8762	-85,084	-118,07
4	-0,5132	-0,5257	-135,95	-154,57

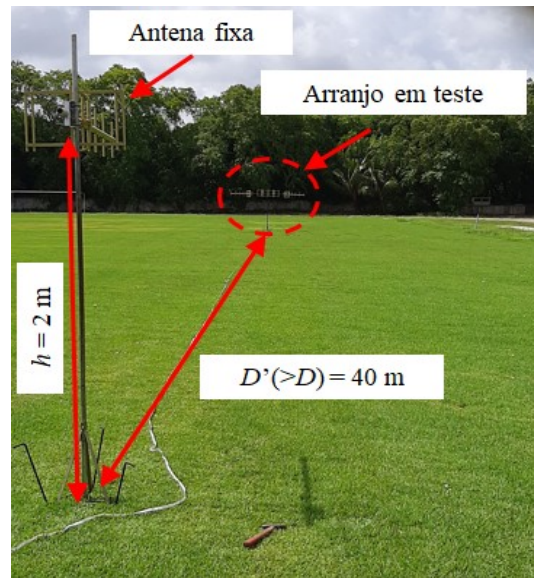
Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 5: Quatro diferentes configurações de cabos para se obter quatro diferentes diagramas de radiação

Antena	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4
1	C4	C4	Antena desconectada	C1
2	C2	C3	C4	C4
3	C1	C1	C3	C3
4	C3	C2	C1	Antena desconectada

Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 43- Montagem da Antena fixa utilizada como estação transmissora para medição do diagrama de radiação em espaço aberto



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 44- Montagem do arranjo de antenas para medição do diagrama de radiação em espaço



aberto

Fonte: Acervo do autor (2023)

Para garantir o funcionamento do sistema inteligentes de antenas, foi montada a topologia apresentada na Figura 36 do CFF provisório para realizar os testes de campo. A montagem do CFF da topologia pode ser visualizada na Figura 45c. A finalidade foi realizar a validação das simulações no HFSS com a otimização do PSO. Dessa forma foi realizado o experimento prático no campo de futebol do IFPE Campus Recife. Com os resultados obtidos nos experimentos, e aqui descritos nesta Tese de Doutorado, os mesmos foram submetido o artigo “Control and Optimization of a Smart Antenna Array by PSO” ao *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* que foi aprovado e publicado no site da revista³.

Nesta seção são apresentados a metodologia e os resultados dos testes utilizados para a publicação do artigo. Foram realizados testes com o CFF e o CAT com objetivo de comprovar o controle na comutação dos lóbulos. Foi criado o cenário de testes conforme a topologia da Figura 45 onde foi instalado o rádio UHF, o divisor de potência, atenuadores e defasadores digitais automatizados pelo CAT (Figura 45c). Os dispositivos de RF utilizados como os atenuadores e defasadores são comerciais e são controlados e automatizados pelo *software* implementado no CAT. Para isso foi desenvolvido um código em *Python* que faz acesso aos defasadores e aos atenuadores para que seja possível aplicar os parâmetros de equalização dos ramos descritos na tabela 6. O procedimento do código é apresentado a seguir:

- 1- Acesso via *ssh* ao CAT com emulador de terminal *Putty*;
- 2- Acesso aos atenuadores via emulador de terminal *Putty* e enviar os comandos via SSA ATT
- 3- Logado nos atenuadores, entrar com os valores de atenuação definidas pelo PSO;
- 4- Logado no CAT com usuário root, rodar o código (`sudo ./defasador int Def1 Def2 Def3`) de acesso aos defasadores e entrar com as defasagens definidas pelo PSO;
- 5- Logado ao CAT com usuários root, rodar os *scripts* do RSSI da estação remota e da ERB;
- 6- Tabelar o valor do RSSI para cada ângulo após cada giro manual de 10 graus do arranjo de antenas;

Tabela 6: Amplitude e fase dos ramos do circuito de formação de feixe com os atenuadores e defasadores configurados de forma que o lóbulo atinja os ângulos objetivos de 20°, 60°, 80°, 100° e 135°

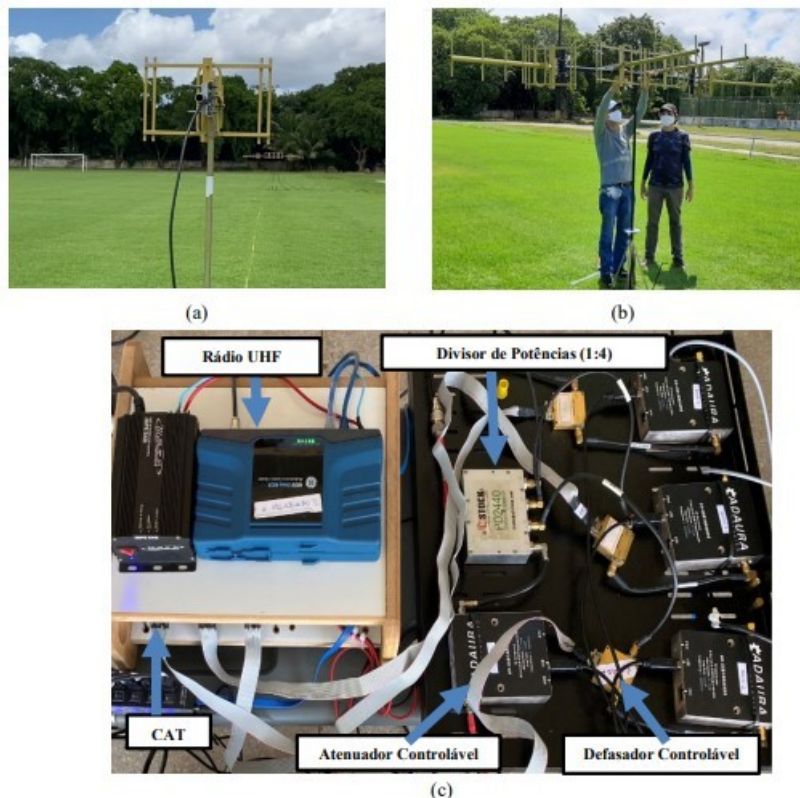
Ângulo objetivo	S21 (dB)	S31 (dB)	S41 (dB)	S51 (dB)	<S21(°)	<S31(°)	<S41(°)	<S51(°)	Ganho da Simulação (dBi)
20°	-22	-45.35	-42.9	-42.98	55.57	-106.1	62.16	-106.7	12.18
60°	-32.38	-21.89	-24.4	-45.49	57.17	-178.7	-50	17.04	12.92
80°	-50.18	-24.72	-22.08	-90	59.13	163.3	-154.1	NA	14.17
100°	-90	-22.09	-24.6	-90	NA	-175.8	146.5	NA	14.08
135°	-34.2	-24.34	-23.44	-21.99	57.58	-145.2	-72.59	52.23	10.49

Fonte: Acervo do autor (2023)

Um comando de controle é enviado para o atenuador pelo CAT via interface USB de forma serial. A atenuação requerida é enviada como argumento desse comando. Na prática a atenuação mínima que o dispositivo utilizado é capaz de oferecer é de aproximadamente -3,5 dB.

O CAT também envia comandos pela interface do GPIO de forma paralela para os defasadores. Esses comandos variam em formato decimal entre 0 e 255, onde cada número decimal acrescenta uma fase de $1,4^\circ$ em relação a fase do seu antecessor. Dessa forma, enviando comandos do CAT, é possível controlar esses dispositivos simultaneamente.

Figura 45- (a) Antena utilizada na estação transmissora para realização do experimento. (b) Montagem da topologia final do arranjo de antenas em campo aberto realizada por min e pelo pesquisador Daniel Lins. (c) Circuito formador de feixe para realização de testes em campo conectado ao arranjo de antenas



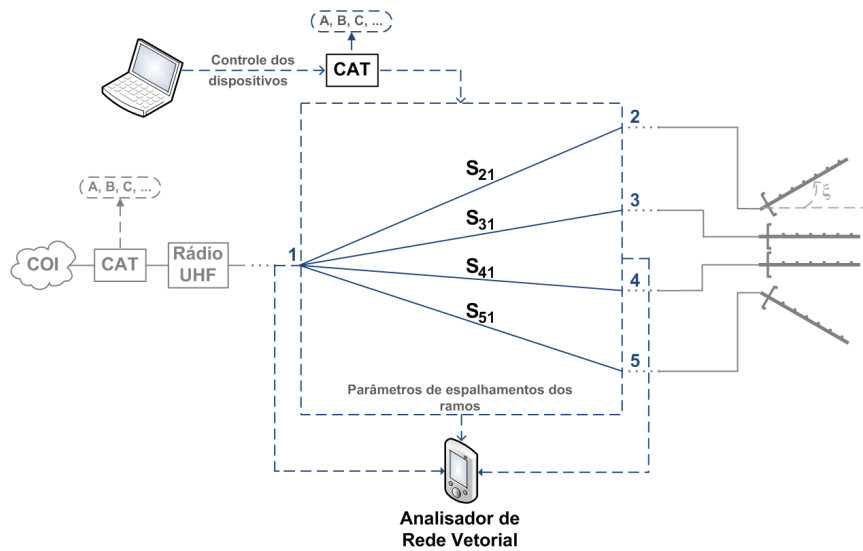
Fonte: Acervo do autor (2023)

Para realizar os experimentos é necessário antes executar a equalização dos parâmetros de espalhamento a serem inseridos nos alimentadores das antenas do arranjo. Para esse fim, em laboratório foi utilizado o analisador de redes vetorial conectado aos terminais do circuito formador de feixe. Os atenuadores e defasadores são ajustados para que os ramos tenham os mesmos parâmetros S daqueles apresentados pelo PSO. A Figura 46 ilustra os ramos sendo

representados pelos seus parâmetros de espalhamento S . O S_{31} , por exemplo, é o parâmetro de espalhamento do Ramo 2. Aqui, foi considerado que o Ramo 2 começa na entrada do divisor e inclui o atenuador e o defasador.

Os parâmetros S são números complexos e suas fases e amplitudes devem ser equalizadas de forma a se obter uma configuração equivalente ao do vetor-solução da otimização pelo PSO, ou seja, $[|S_{21}|, |S_{31}|, |S_{41}|, |S_{51}|, \angle S_{21}, \angle S_{31}, \angle S_{41}, \angle S_{51}] \equiv [A1, A2, A3, A4, \beta1, \beta2, \beta3, \beta4]$.

Figura 46- Diagrama de equalização do circuito de formação de feixes



Fonte: Acervo do autor (2023)

Não foi necessário o uso dos amplificadores, pois os testes foram realizados em um campo de aberto de futebol com a distância de 40 metros entre a estação de transmissão (Figura 45a), composta por uma antena fixa e um rádio, e a de recepção (Figura 45b), pelo arranjo, o circuito formador de feixe e um rádio. A distância entre as estações é de $d_{RT} = 40$ metros (Figura 45), maior que a distância mínima de campo distante do arranjo (36 metros na frequência de 459,3875 MHz)⁹. Para construir o diagrama de radiação, a estação transmissora foi rotacionada em torno do seu eixo em passos de 10 em 10 graus.

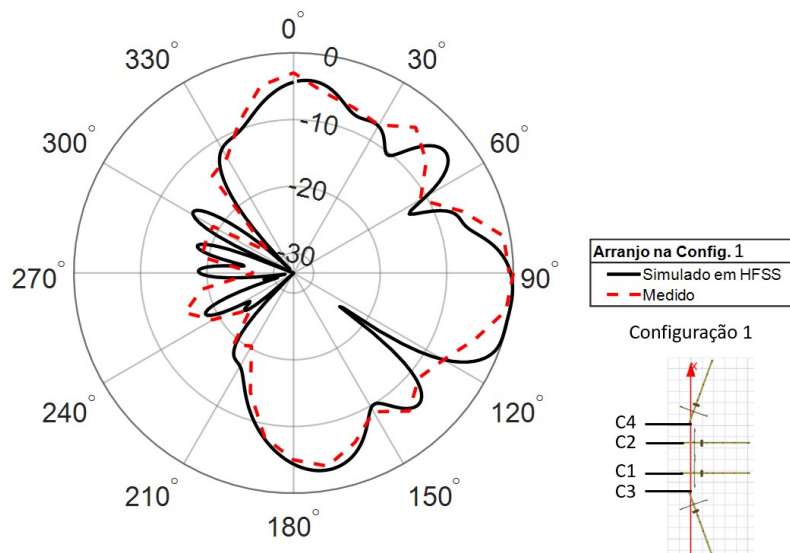
Foi utilizado um laptop para realizar o acesso ao rádio UHF, obter os valores de RSSI e plotar os diagramas de radiação. O notebook ainda faz a função do COI, pois envia os comandos ao CAT para definir os valores de atenuação e defasagem para atingir os ângulos objetivos de 20°, 60°, 80°, 100° e 135°.

5 RESULTADOS E DISCURSÕES

Esta seção inicia apresentando os resultados de simulação e medição do arranjo, incluindo as configurações dos cabos detalhadas na Tabela 5. As simulações levam em consideração as perdas dos cabos, garantindo que as potências que chegam às antenas sejam representadas com precisão. As Figuras 47 a 50 representam gráficos dos padrões de radiação medidos, demonstrando um forte alinhamento com os dados de simulação. É importante ressaltar que o ambiente computacional é ideal, desprovido de reflexões, enquanto o ambiente de campo aberto ainda enfrenta reflexões externas, inclusive aquelas originadas do solo.

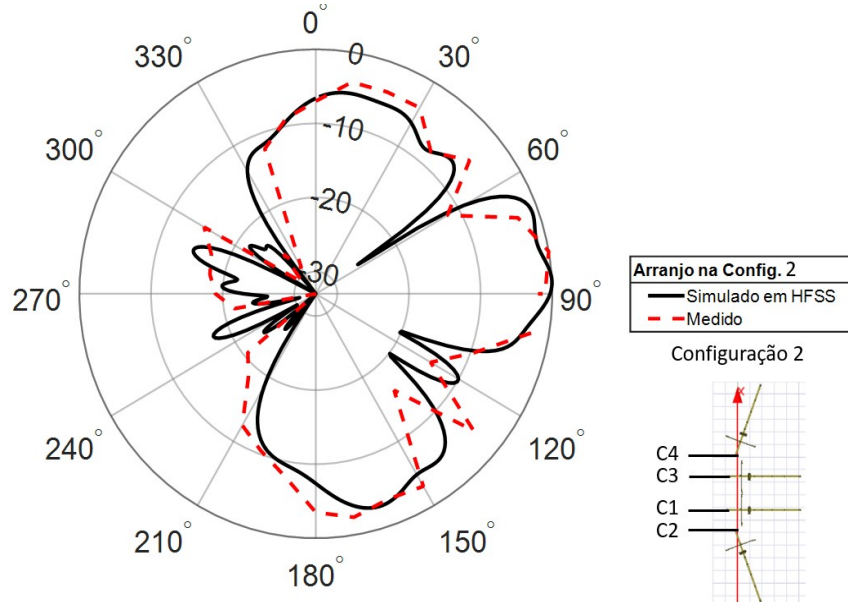
Esses resultados ressaltam a eficácia da metodologia empregada para capturar padrões de radiação em campo aberto. Além de serem necessário para que obter parâmetros de comparação na realização da medição com o sistema completo. Esta abordagem é estendida para caracterizar o sistema de antenas inteligentes, que é automatizado pelo CAT com a finalidade de realizar uma varredura em todos os ângulos alvo necessários para comunicação com as caixas remotas onde estão conectadas as chaves religadoras.

Figura 47- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 1 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz



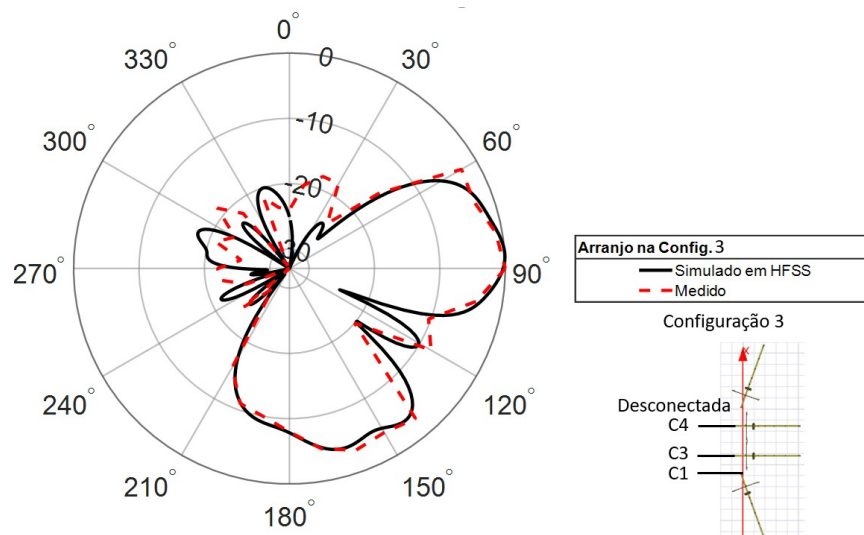
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 48- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 2 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz



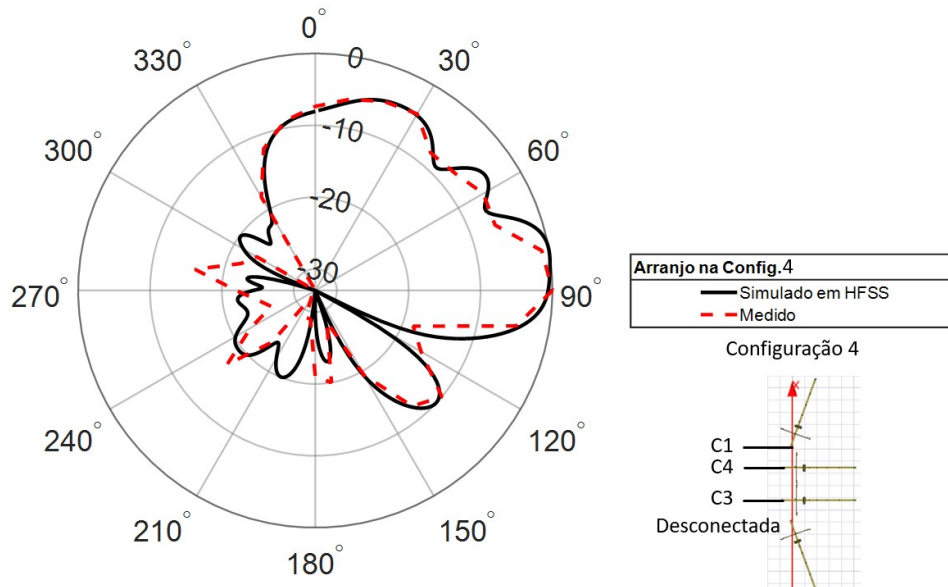
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 49- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 3 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 50- Comparação dos resultados de simulação e experimentais do arranjo com a configuração 4 de cabos. Diagramas de radiação normalizados no plano H em 469,3875 MHz



Fonte: Acervo do autor (2023)

Na seção de Sistemas de Antenas Inteligentes Aplicado a Tese de Doutorado na Figura 36 é possível visualizar o diagrama com os dispositivos de RF, onde foram montados para os testes em campo e podem ser visualizados na Figura 45. Os resultados dos testes realizados com esta topologia são descritos aqui.

Os diagramas de radiação normalizados obtidos nas medições em campo para os ângulos objetivos de 20°, 60°, 80°, 100° e 135° foram comparados com as simulações *do software Ansys HFSS* e são apresentados na Figura 51. Devido à distância entre as estações de transmissão e recepção, e a consequente dificuldade de alinhamento entre elas, é possível visualizar um *offset* de 4° do diagrama medido para o diagrama simulado. A Figura 51 também mostra essa correção de alinhamento aplicada na plotagem dos diagramas das medições. Contudo, é possível observar que os resultados simulados e medidos estão em boas concordâncias, embora algumas pequenas diferenças sejam observadas nos lóbulos secundários. O lóbulo principal, no entanto, indica o ângulo desejado com larguras de banda de meia potência semelhantes. A última coluna da Tabela 6 demonstra o ganho simulado para cada ângulo objetivo. Os ganhos variam de 10,49 a 14,17 dBi, bem acima de 6 dBi que foi apresentado em¹ para o arranjo de antenas colineares utilizado na concessionária de energia.

Isso demonstra a capacidade do PSO em encontrar o melhor conjunto de parâmetros para excitar o arranjo mesmo com a limitação imposta pelas dimensões das antenas comerciais e obter altos ganhos.

O arranjo de antenas inteligentes usado nos experimentos é apresentado na Figura 45 muda o lóbulo principal do padrão de radiação que cobre a região angular de 0° a 180° . Para cobrir as estações remotas localizadas em uma região angular de 360° , dois arranjos de antenas podem ser colocados em uma configuração *back-to-back*, cada arranjo operando em um alcance de 180° e selecionado pelas chaves SPDT, conforme apresentado na Figura 37.

A otimização foi realizada dentro de um ambiente simulado, com a função objetivo formulada utilizando o diagrama de radiação gerado pelo HFSS. Esta função visa maximizar a potência na direção de transmissão desejada enquanto minimizava a potência máxima dos lóbulos secundários no diagrama.

Durante os testes de campo, o objetivo foi validar se o diagrama do arranjo de antenas apresenta os resultados alinhados com a simulação.

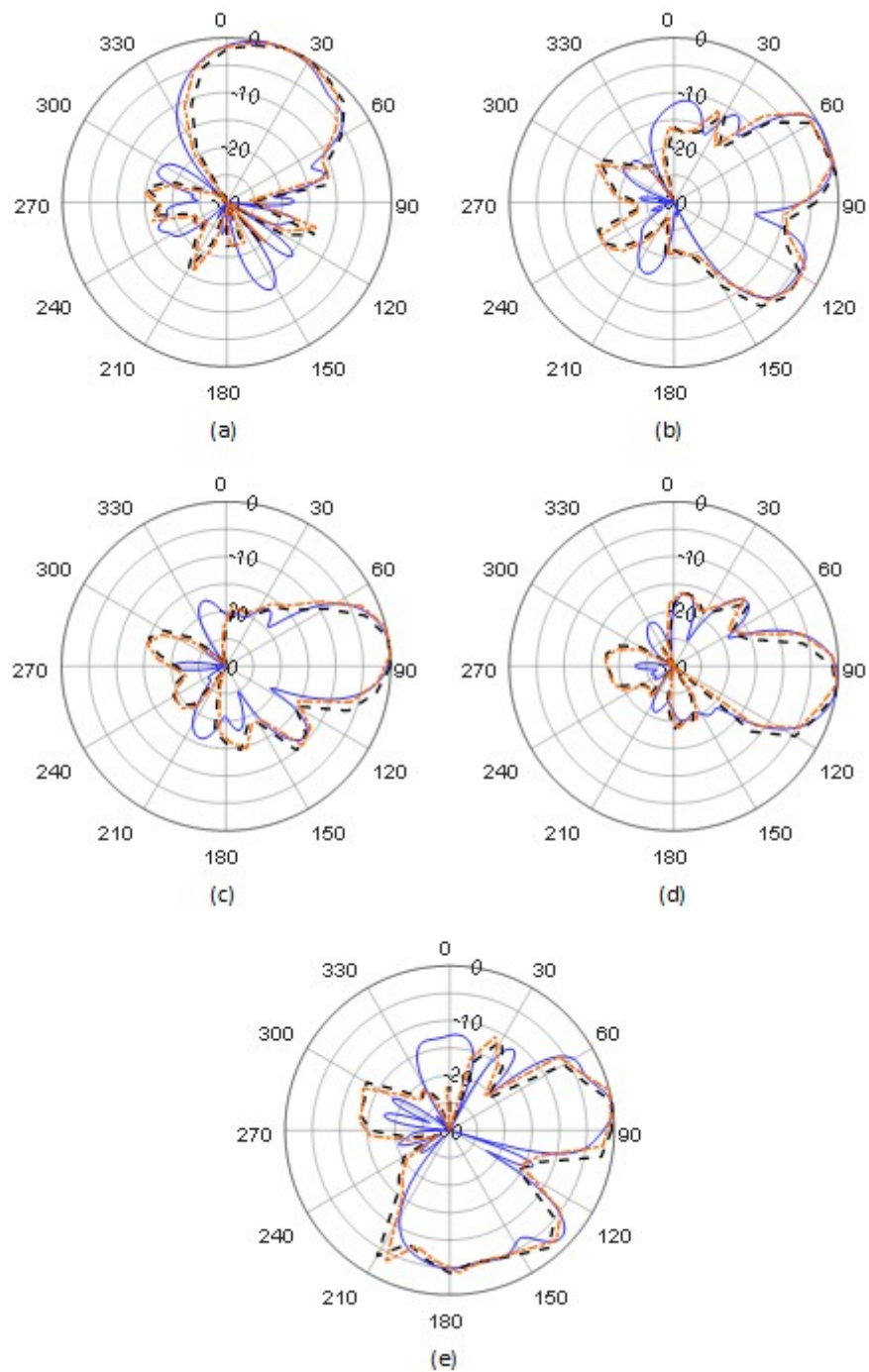
Os resultados comprovam que o sistema atende aos requisitos de controle do feixe de radiação das antenas e pode ser aplicado em um sistema comercial de uma concessionária de energia elétrica, trazendo um ganho de cobertura de 360° para monitorar as chaves religadoras.

O capítulo 5 apresenta a medição na UFPE com objetivo de validar o sistema completo antes da instalação na rede do grupo NEONERGIA.

Na Figura 51, são comparados os resultados normalizados de otimização simulados no HFSS (linha sólida azul) com os resultados medidos normalizados (linha tracejada preta) dos padrões de radiação maximizados em diferentes ângulos (ϕ): (a) 20° , (b) 60° , (c) 80° , (d) 100° , (e) 135° . As linhas pontilhada e tracejada em laranja nos gráficos representam os resultados medidos ajustados angularmente em 4° , indicando possivelmente um erro de alinhamento de deslocamento durante as medições.

O experimento descreve um sistema de antena inteligente comutada, composto por uma série de quatro antenas Yagi-Uda, um circuito de formação de feixes e um sistema de controle de antena. O principal destaque do sistema é a maximização do lóbulo principal usando o método de otimização de enxame de partículas (PSO), enquanto os lóbulos laterais são minimizados. O PSO integrado ao software de simulação eletromagnética *Ansys HFSS* alcançou os resultados, validados por experimentos práticos.

Figura 51- Resultados normalizados de otimização simulados no HFSS (em linha sólida azul) e os resultados medidos normalizados (em linha tracejada preta) dos padrões de radiação maximizados em: (a) $\varphi = 20^\circ$, (b) $\varphi = 60^\circ$, (c) $\varphi = 80^\circ$, (d) $\varphi = 100^\circ$, (e) $\varphi = 135^\circ$



Fonte: Acervo do autor (2023)

6 TESTES DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES COMPLETO NA UFPE

O sistema completo foi montado no campus da UFPE, em uma parceria com o grupo NEOENERGIA. Foram instaladas nos postes do campus três caixas metálicas cada uma com um rádio GE UHF, um *Raspberry Pi4* e uma antena Yagi-Uda conforme pode ser visualizado na Figura 52. O objetivo foi simular emulando uma estação remota, onde é conectada a uma chave religadora. Os locais escolhidos foram os seguintes: o poste próximo a ponte da Biblioteca (BIB); o poste de entrada do Centro de Artes e comunicação (CAC); e no poste próximo ao Centro de Ciência Exatas e da Natureza (CCEN). Esses locais correspondem a orientações de 60, 19 e 135 graus, respectivamente, em relação ao Centro de Tecnologia de Geociências (CTG), conforme ilustrado na Figura 53.

No quarto andar do prédio do CTG, especificamente dentro do laboratório de micro-ondas do DES, foi instalada a ERB com todos os dispositivos necessários para o funcionamento do Sistema de Arranjo de Antenas Inteligentes. Para isso foram instalados o CAT, rádio GE UHF e o circuito formador de feixe (CFF) completo, conforme já apresentado na Figura 38. O sistema foi montado em uma bandeja e instalado dentro do rack conforme pode ser visto na Figura 54. Além disso, dois arranjos de antenas foram montados no topo do prédio do CTG, conforme mostrado na Figura 55. Eles foram montados lado a lado devido ao ambiente de teste ser apenas o campus da UFPE.

Figura 52- Foto das Caixas metálica instalada nos postes do Campus da UFPE



Fonte: Acervo do autor (2023)

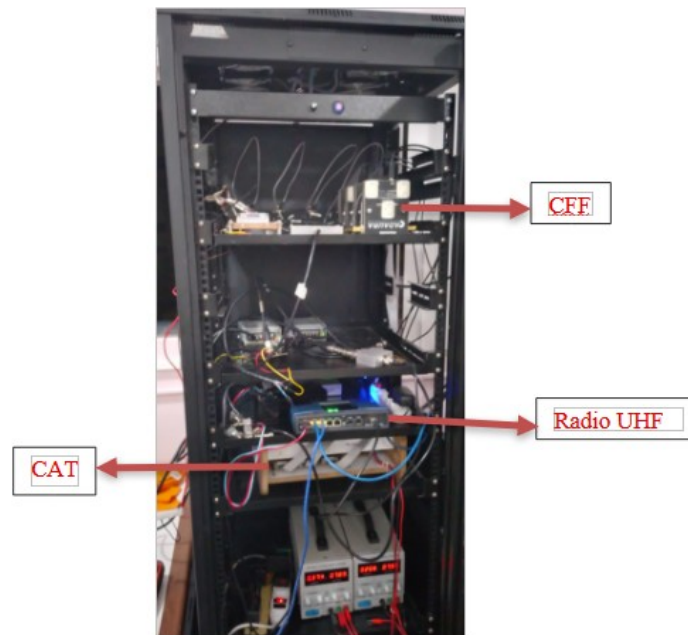
Figura 53- Localização das Caixas remotas no Campus da UFPE



Fonte: Acervo do autor (2023)

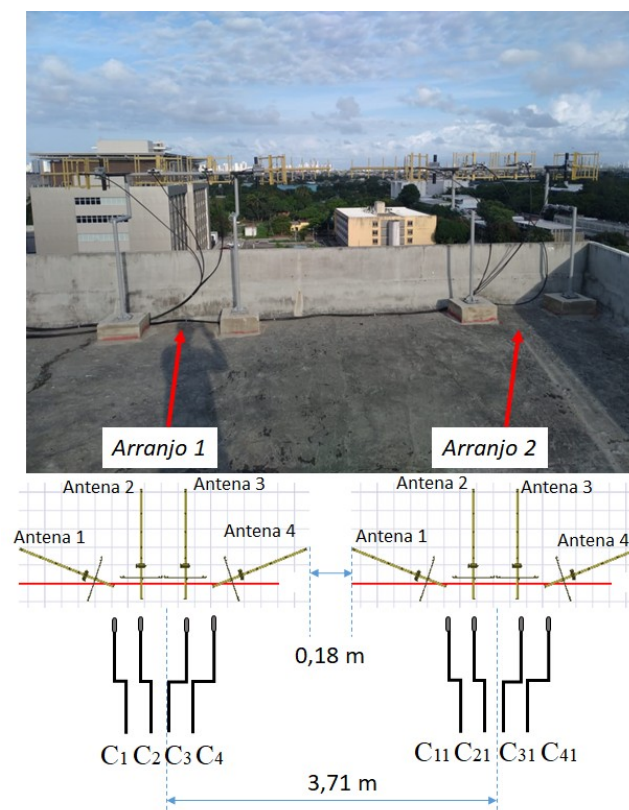
Com essa montagem e instalação do sistema foi possível realizar os testes de comunicação do sistema com distâncias superiores às dos testes realizados no IFPE que foram publicados no do artigo³. Um dos objetivos é comprovar o controle do feixe do diagrama de radiação e a comutação entre os dois arranjos de antenas apresentados na Figura 37, para isso são utilizadas chaves SPDTs para realizar a comutação entre os arranjos. Também é importante testar a funcionalidade dos amplificadores de potência no modo de transmissão e recepção conectados ao circuito formador de feixe.

Figura 54- Rack com o rádio UHF, CAT e CFF instalados nas bandejas



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 55- Arranjos de Antenas 1 e 2 instalados lado a lado



Fonte: Acervo do autor (2023)

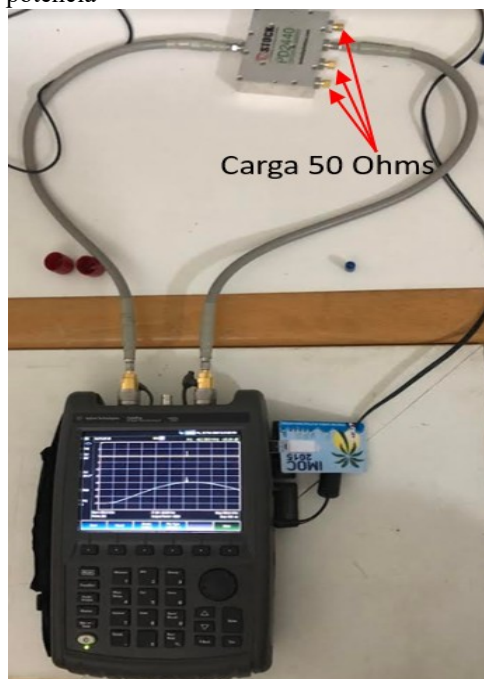
Os próximos passos são levar o sistema de antenas inteligentes e realizar a instalação na região de SUAPE com objetivo de realizar medição na *smart grid* do grupo NEOENERGIA utilizando o circuito formador de feixe completo, conforme apresentado na Figura 37.

6.1 TESTES DOS DISPOSITIVOS DO CIRCUITO FORMADOR DE FEIXE

Os dispositivos de RF como o divisor de potência, atenuador digital, defasador digital, amplificador digital e chave SPDT que são utilizados no circuito formador de feixe foram todos testados observando as recomendações dos manuais de funcionamento.

O primeiro dispositivo a ser testado foi o divisor de potência, onde pode ser visualizado na Figura 56 que apresenta a configuração para o *setup* de teste do divisor de potência. Utilizando o analisador de rede vetorial (VNA), que foi calibrado antes de iniciar a medição. Foi conectado na porta 1 do VNA à porta de entrada (1) do divisor de potência e a porta 2 do VNA em uma das quatro saídas, e as outras portas permanecem com a uma carga de 50 Ohms para realizar o casamento de impedância. A perda por inserção em todas as portas de saída é de 7 dB como esperado para um divisor de potência de 1:4. No Quadro 1, é possível visualizar as características do divisor de potência.

Figura 56- Configuração de teste do divisor de potência



Fonte: Acervo do autor (2023)

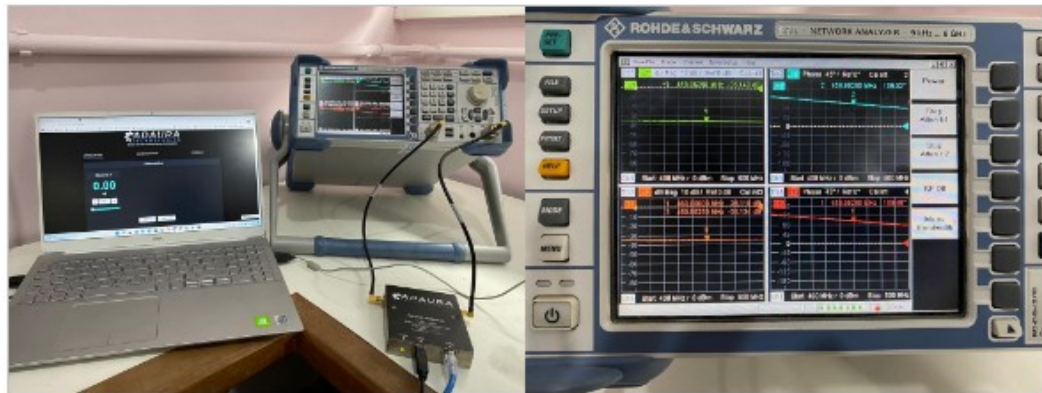
Quadro 1- Característica técnicas do divisor de potência.

Característica	Mín.	Típ.	Máx.	Unidade
Faixa de Operação	350		1000	MHz
Impedância característica de entrada (SMA)		50		Ω
Fator de divisão		1:4 (6dB)		-
VSWR	1,5:1			-
Perda por inserção			7	dB
Isolamento entre portas de saída	15			dB
Potência máxima de operação			30	W

Fonte: Acervo do autor (2023)

O segundo dispositivo de RF pela ordem de entrada do sinal de RF no CFF a ser testado foi o atenuador digital, dessa forma foi realizado os testes com objetivo de validar seu funcionamento verificando os parâmetros de fábrica. Antes de iniciar a medição sempre é necessário realizar a calibração do instrumento. O atenuador foi conectado ao VNA na porta 1 e porta 2 conforme apresentado na Figura 57, foi variado a atenuação via software e comprovada a sua variação no VNA.

Figura 57- Teste do atenuador digital



Fonte: Acervo do autor (2023)

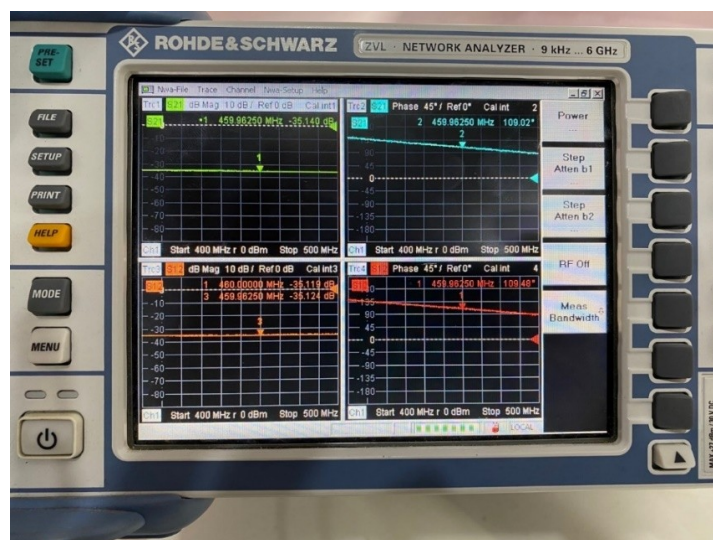
O terceiro dispositivo a ser testado foi o defasador digital. Ele foi conectado ao VNA na porta 1. O analisador de rede vetorial foi configurado para gerar uma potência de 0 dBm, frequência de start de 400 MHz, frequência de stop de 500 MHz e spam de 100 MHz. A porta 2 do VNA foi conectada ao defasador dessa forma medimos os parâmetros S21 e S12. O *setup* de teste pode ser visualizado na Figura 58. Durante o processo de teste, um código de 8 bits foi inserido no terminal do CAT, e a mudança de fase correspondente foi monitorada no VNA, conforme ilustrado nas Figuras 59, 60 e 61. Os valores medidos do VNA são apresentados nestas figuras. A medição de fase completa para o defasador foi realizada, e as medições resultantes são visualizadas no gráfico apresentado na Figura 62.

Figura 58- Teste do atenuador digital conectado ao VNA controlado pelo CAT



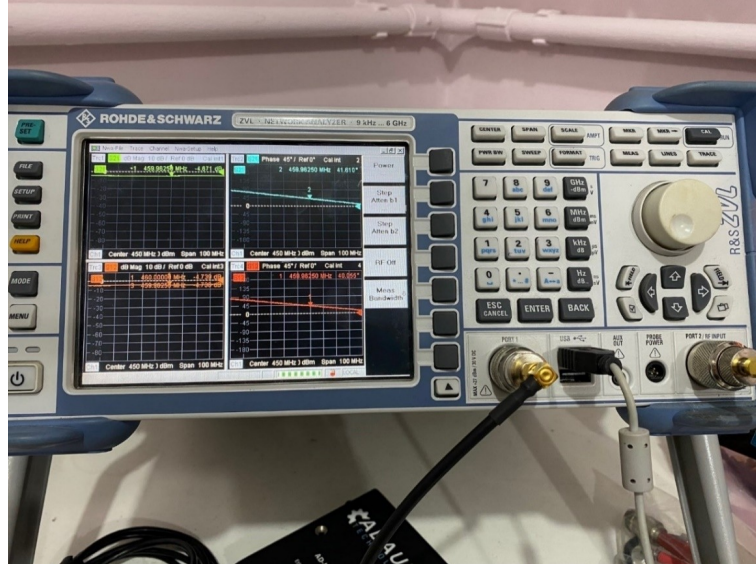
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 59- Foto da tela do VNA medido a fase imposta ao atenuador digital pelo CAT



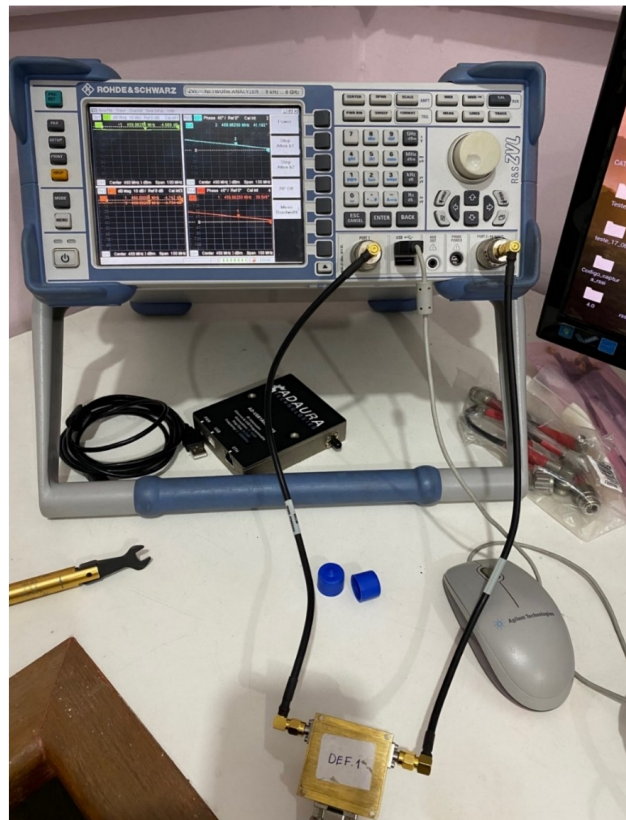
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 60- Foto da tela do VNA realizando medida do atenuador digital com fase imposta pelo CAT



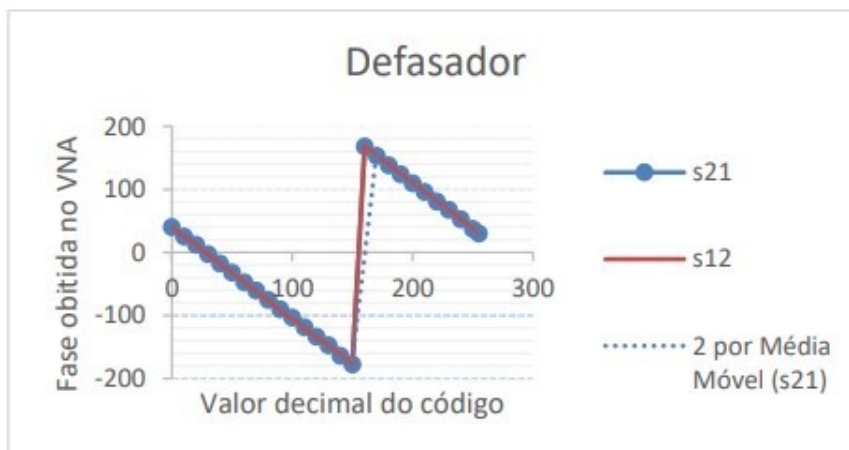
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 61- Foto da tela do VNA realizando medida no atenuador digital imposta pelo CAT



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 62- Resultado da medição do Defasador dos parâmetros S21 e S12



Fonte: Acervo do autor (2023)

Experimentalmente, os padrões de potência medidos por uma combinação de gerador de sinal e analisador de espectro fornecem resultados de frequência de ponto único mais precisos do que os padrões medidos por um analisador de rede vetorial com transmissão de potência em banda conforme descrito no artigo²⁵.

Para comprovar que o CFF está realizando a função de controle de fase foi montado um novo cenário de teste com um gerador de frequência configurado com a potência de 10 dBm e conectado na porta de entrada do CFF, porta destinada a conexão do rádio.

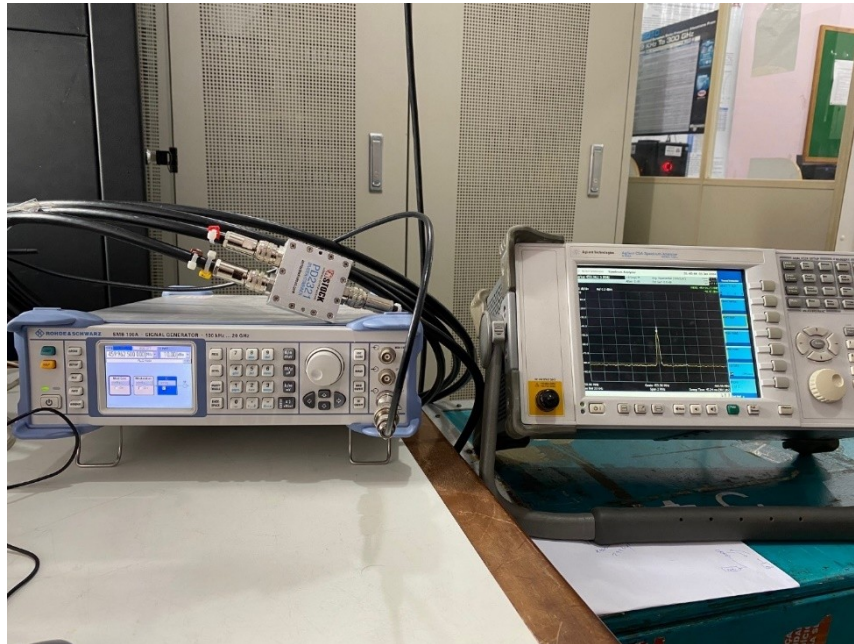
Nas saídas (portas que devem ser conectadas as antenas do arranjo) do CFF referente aos ramos 1 e 2 foi conectado um divisor de potência com a função de combinar os dois sinais de saída dos ramos 1 e 2 e obter o resultado das somas construtivas e destrutivas do sinal.

Utilizamos o CAT para controlar o defasador para isso foi necessário comandar a entrada digital do dispositivo sob teste gerando uma variação de 0 a 255 em números decimais que correspondem a uma sequência binária de 8 bits que gera uma defasagem no sinal de saída do ramo 2.

O cenário de teste foi montado com a saída de dois ramos da seguinte forma: o ramo 1 do CFF sempre como referência, pois não temos defasador conectado a esse ramo, essa saída deve ser conectada ao divisor de potência na porta 2; e a porta 3 do divisor também a saída de um outro ramo do CFF que possui um defasador na sua composição. A porta 1 do divisor de potência foi conectada no analisador de *spectrum* conforme a Figura 63 com objetivo de obter o somatório da magnitude dos sinais. Um dos resultados pode ser observado no analisador de espectro como apresentado na Figura 64.

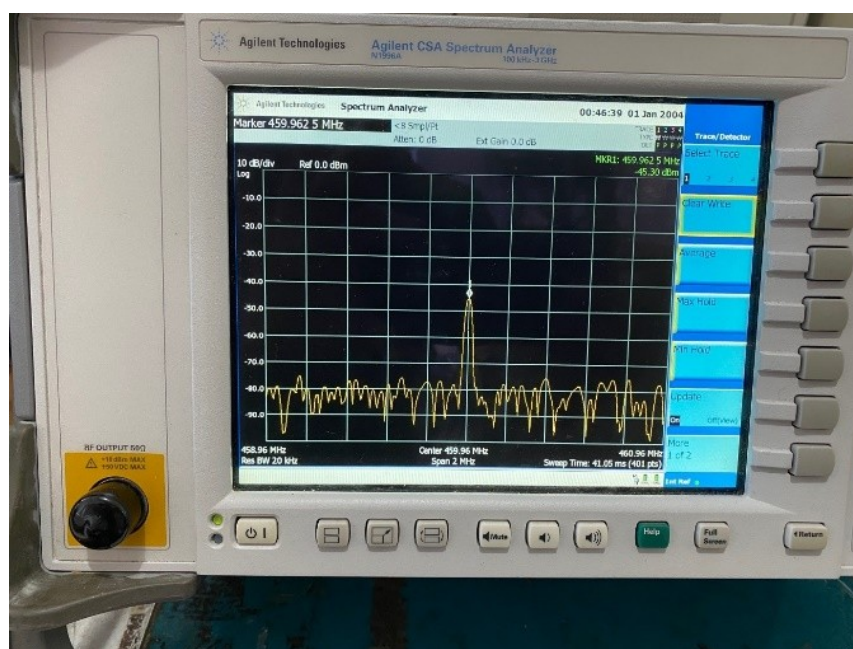
Foi registrada a medição completa de todos os valores e pode ser verificada no gráfico da Figura 65. Nesse contexto, observa-se que a variação da fase resulta em diferentes magnitudes do sinal devido a somatórios construtivos e destrutivos, conforme configurado no teste representado na Figura 63.

Figura 63- Teste da implementação das fases utilizando o analisador de Spectrum



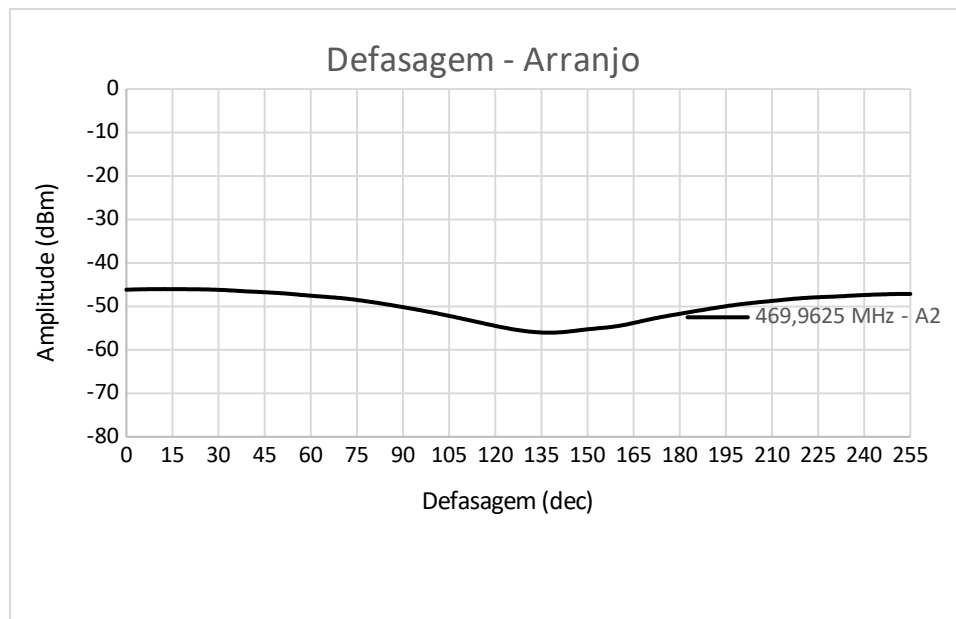
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 64- Resultado do teste obtido no analisador de Spectrum



Fonte: Acervo do autor (2023)

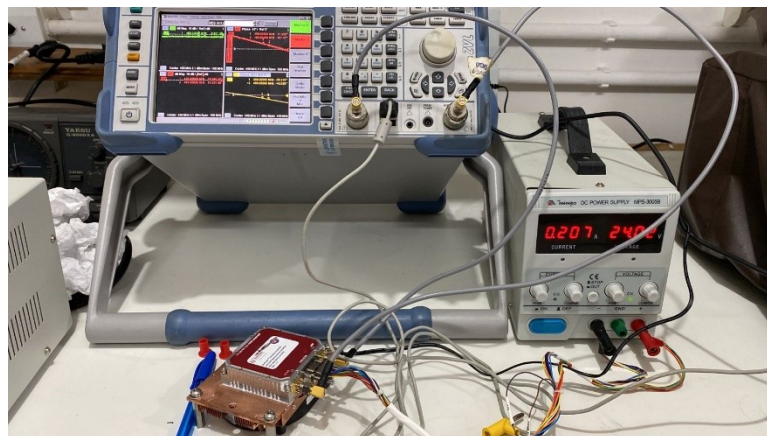
Figura 65- Gráfico com os resultados da medição com o analisador de Spectrum



Fonte: Acervo do autor (2023)

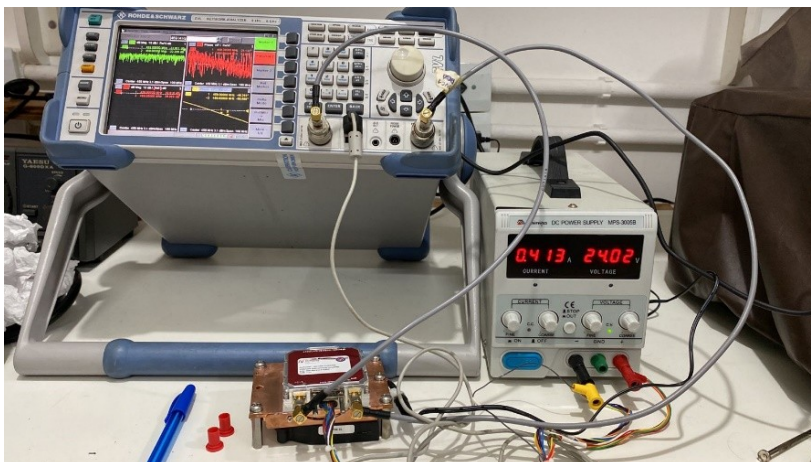
Foram realizados testes com os amplificadores digitais para verificar seu funcionamento para isso foi utilizado o analisador de rede vetorial conectado à porta 1 do analisador na porta XVR do amplificador e a porta 2 do analisador conectado na porta ANT do amplificador. Foi configurada a potência de -36 dBm na entrada do analisador de rede. As Figuras 66 e 67 apresentam as respostas quando o amplificar é comandado via entrada de comando de transmissão e recepção.

Figura 66- Teste de medição do Amplificador Digital do CFF configurado para transmissão



Fonte: Acervo do autor (2023)

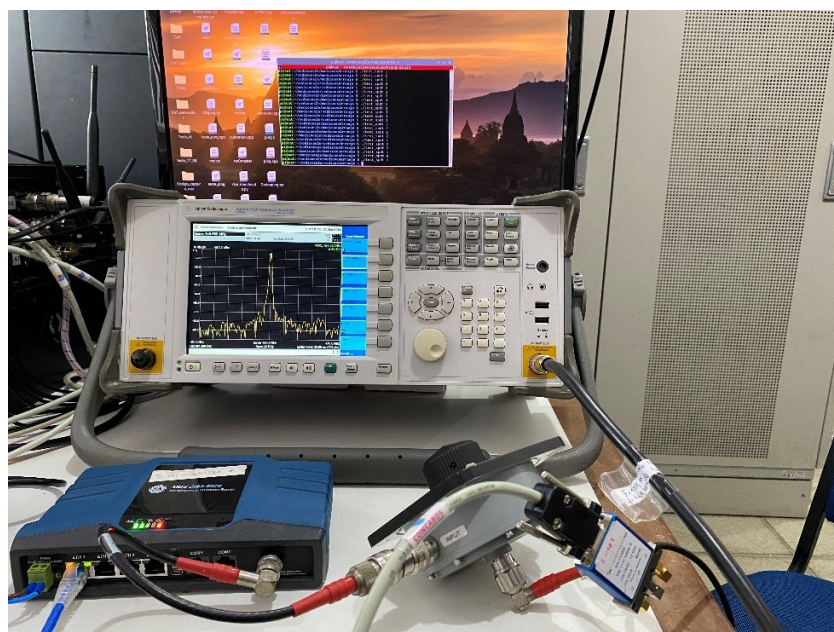
Figura 67- Teste de medição do Amplificador Digital do CFF configurado para Recepção



Fonte: Acervo do autor (2023)

As chaves SPDTs foram testadas de forma individual com o rádio configurado em 25dBm e conectado a um atenuador variável setado em 25 dB e sua saída conectada na porta de entrada da chave SPDT (JC) e comutando a saída para as portas J1 e J2. A saída J1 foi conectada ao analisador de *spectrum* e a saída J2 foi conectada a carga de 50 Ohms. O controle da chave foi realizado com *raspberry* conectado na interface RS232 via conector DB9. Nas Figuras 68 e 69 é possível visualizar o teste de comutação da chave com a analisador de *spectrum* conectado na porta de saída.

Figura 68- Teste da chave SPDT com o rádio conectado na entrada JC e o analisador de spectrum na saída J1. A chave SPDT está configurada para a saída J1



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 69- Teste da chave SPDT com o rádio conectado na entrada JC e o analisador de spectrum na saída J1. A chave SPDT está configurada para a saída J2



Fonte: Acervo do autor (2023)

Além dos testes operacionais, foi realizada verificações baseadas no *datasheets* dos dispositivos de validação em condições de alta temperatura, conforme ilustrado na Figura 70. Para executar esta avaliação, foi empregada um gerador de sinal de 10 dBm conectado a um amplificador unidirecional de 16 dB, que foi posteriormente ligado ao divisor de potência entrada como pode ser visto na Figura 71.

A Tabela 7 fornece uma visão geral das temperaturas de operação dos dispositivos de RF do CFF, conforme suas respectivas fichas técnicas.

Tabela 7: Temperatura de funcionamento dos componentes do CFF

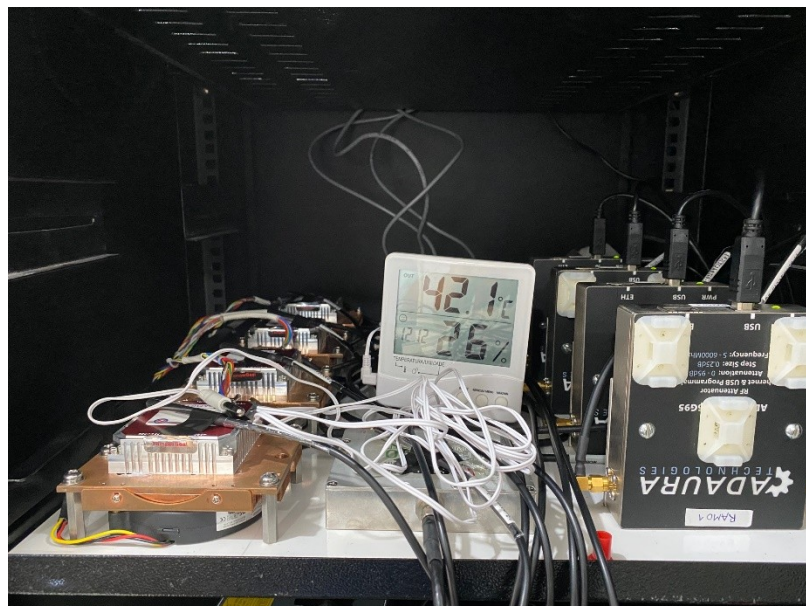
Componente	Temperatura de funcionamento
Atenuador AD-USB1AR36G95 da Adaura	0 a 60°C
Chave SPDT CCR-33S8E-S da Teledyne	-25 a 65°C
Defasador RFPSHT450M1D8 da RF-Lambda	-40 a 85°C
Amplificador Bidirecional NW-BA-VU-4-GX02 da Nuwaves	máx 85°C
Divisor de Potências PD2440 da INSTOCK	-65 a 85°C

Fonte: Acervo do autor (2023)

O experimento foi conduzido sob a premissa de que o CFF fornecia 5 W de potência às antenas em modo de transmissão, o que normalmente exige mais potência. A configuração utilizou um sinal de RF de onda contínua, com todos os dispositivos dentro de um rack fechado. Como pode ser visto, nenhuma ventilação interna foi empregada dentro do rack, e a sala do laboratório de micro-ondas, onde foi instalado o rack, estava sem aparelho de ar-condicionado de modo que não existia refrigeração forçada. A temperatura ambiente média ficou em 28°C. Sob estas condições de teste, nenhum dos dispositivos exibiu uma temperatura operacional superior a 50°C durante as 4 horas de duração da medição.

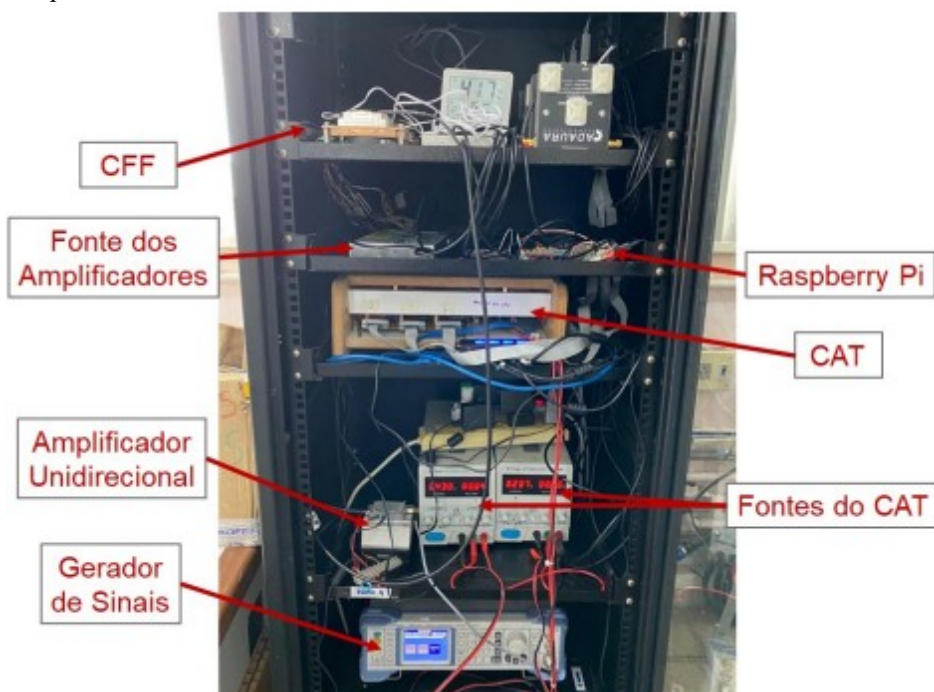
Portanto, pode-se razoavelmente prever que em um ambiente climatizado, com o rack equipado com um sistema de ventilação eficaz, os dispositivos CFF manteriam temperaturas mais baixas do que as retratadas neste estudo.

Figura 70- Medição de temperatura de funcionamento com todos os componentes do CFF



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 71- Foto do rack com todos os dispositivos necessários para a medição de temperatura do CFF



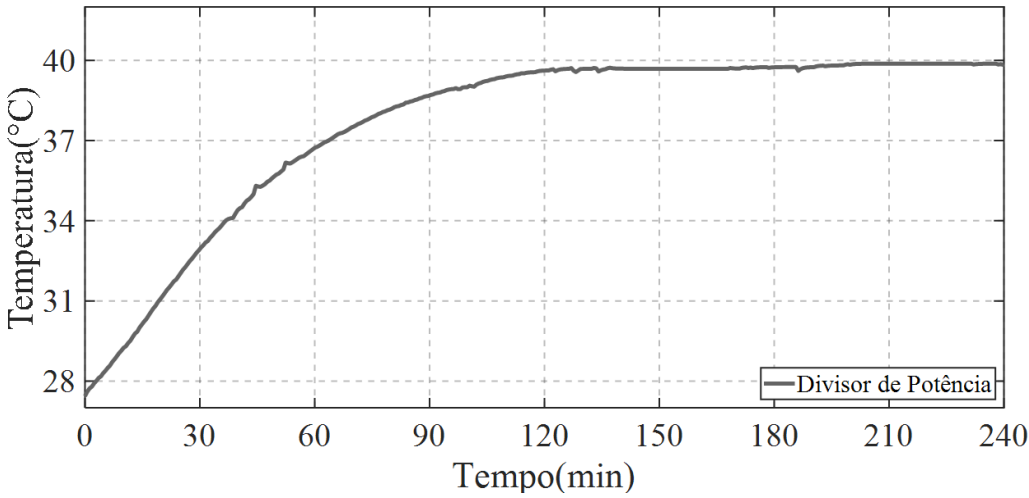
Fonte: Acervo do autor (2023)

As Figuras 72 a 77 mostram as curvas de temperatura registradas para os dispositivos CFF e as fontes de alimentação dos amplificadores bidirecionais. Dentre esses dispositivos, o atenuador apresenta a menor temperatura máxima de operação, que é de 60°C.

Consequentemente, estabelece o limite superior para a temperatura operacional de todo o CFF.

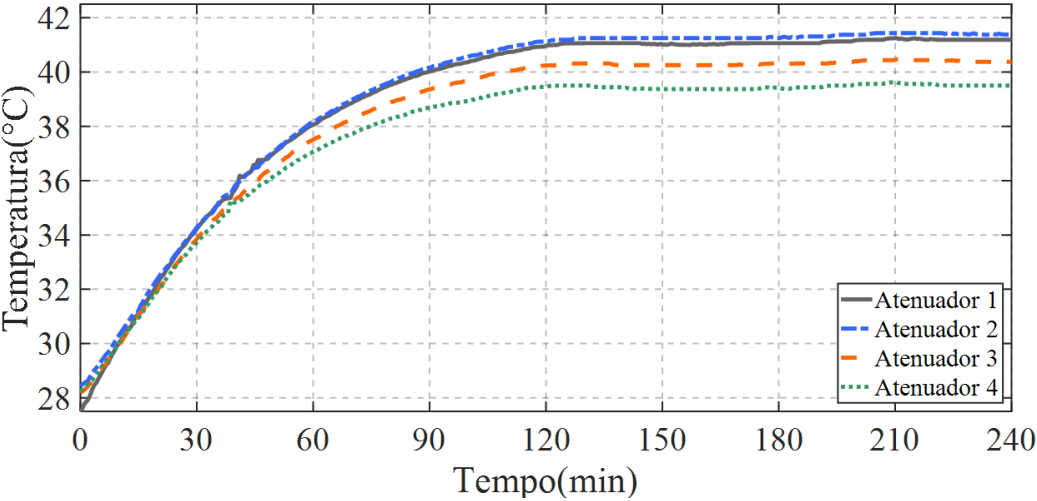
Durante todo o experimento, a temperatura ambiente dentro do laboratório manteve uma média de 28°C.

Figura 72-Resultado da medição de temperatura no divisor de potência



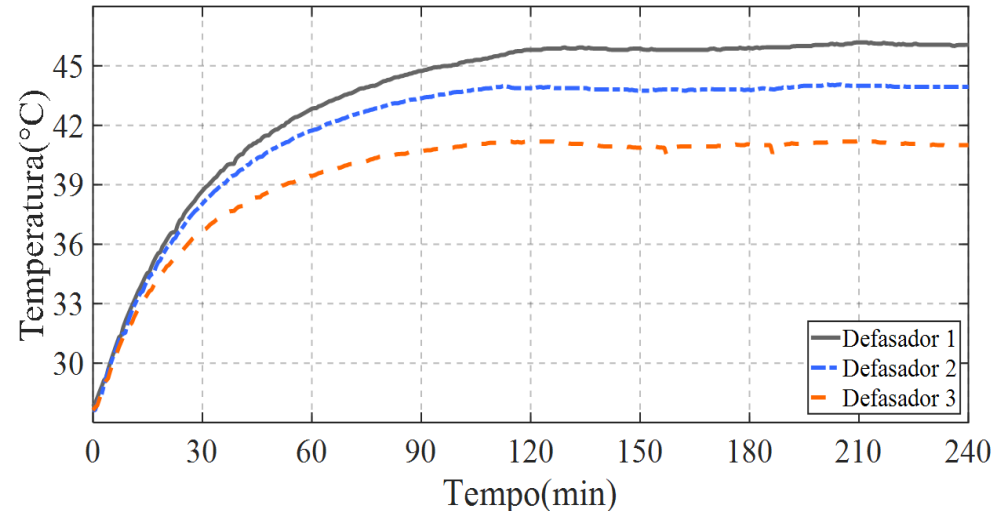
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 73-Resultado da medição de temperatura nos atenuadores



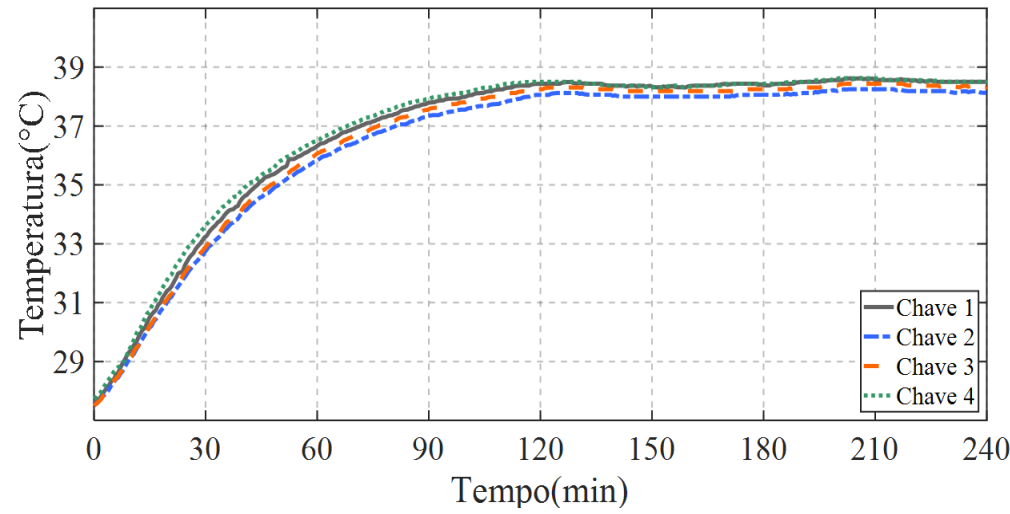
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 74-Resultado da medição de temperatura nos defasadores



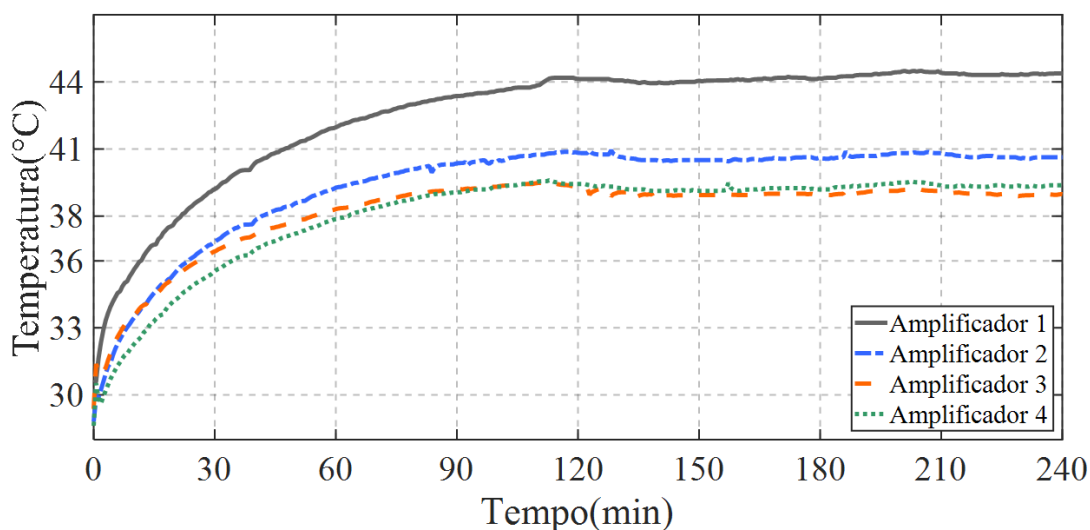
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 75-Resultado da medição de temperatura nas chaves SPDT



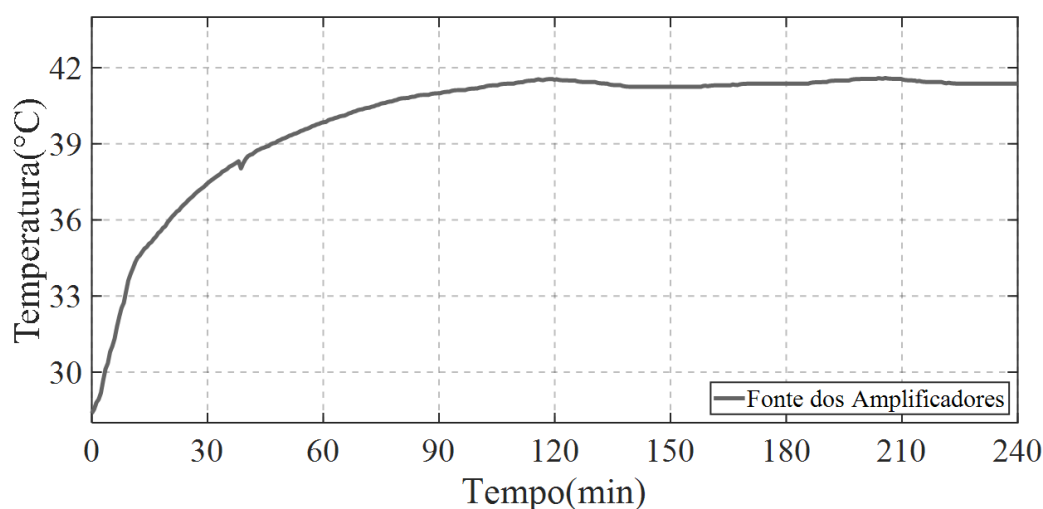
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 76-Resultado da medição de temperatura nos amplificadores



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 77-Resultado da medição de temperatura na fonte dos amplificadores



Fonte: Acervo do autor (2023)

6.2 TESTES DE DESEMPENHO DE SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES

MEDIÇÃO DE PERDA DE PACOTES

Uma medida de desempenho de um sistema de comunicação é a perda de pacotes. A perda de pacotes pode ser definida como um pacote que foi transmitido da estação de origem para a estação de destino, mas nunca foi recebido no seu destino. Os pacotes perdidos aumentam com o crescimento do tráfego, devido ao aumento da fila nos equipamentos de transmissão e recepção. Dessa forma, é possível medir o desempenho não só verificando o atraso, mas o percentual de pacotes perdidos. Deve também ser observado o tempo limite de

vida (TTL) do pacote IP. O TTL é um campo presente no protocolo IP com objetivo de enviar *loop* de roteamento dentro da rede⁴⁸.

Foram realizados os testes de perdas de pacotes no Sistema de Antenas Inteligentes. Os testes foram realizados enviando arquivos de 292 *bytes*, foi utilizado este tamanho devido ao tamanho do cabeçalho do protocolo DNP3, com intervalo de 5 segundos entre os arquivos, com objetivo de não sobrecarregar a fila dos enlaces estabelecidos pelos rádios, durante 24 horas consecutivas. O objetivo dos testes aqui descritos é validar o funcionamento do Sistema de Antenas Inteligentes e obter a métrica de bom funcionamento, ou seja dentro dos padrões definidos pela concessionária de energia do sistema atual.

Para realizar os testes de envio de dados, os rádios foram parametrizados com as seguintes configurações:

- Frequências TX 469.9500 MHz e RX 459.9500 MHz no rádio da ERB;
- Frequências TX 459.9500 MHz e RX 469.9500 MHz nos rádios das caixas remotas;
- As potências dos rádios das caixas remotas foram configuradas em 35 dBm;
- Potência do rádio da ERB configurada em 25 dBm;
- Potência de saída nas antenas do arranjo de antenas 5 dBm;
- Taxa de Modulação: 9,600 ksps (9600 bauds);
- Modulação 64 QAM;
- Taxa de Transmissão 57,6 Kbps;
- MTU (*Maximum Transmission Unit*) padrão de 1500 *bytes*;
- Modo de Transmissão: Half-duplex;
- Tempo de vida (TTL) 5000 ms;
- Tentativas de reenvio de dados 7.

Nesta sessão foi utilizada uma metodologia diferente do capítulo 3 para envio dos arquivos, pois foram enviados via *Secure Copy Protocol* (SCP)⁴⁸, partindo do CAT (servidor), e foram recebidos nas estações remotas (clientes), simuladas pelos *Raspberry Pi* instalados nas caixas do CAC, CCEN e Biblioteca. Na Figura 78 o rádio do CAC utiliza o IP 192.168.26.133, o do CCEN é identificado pelo IP 192.168.26.132 e o da Biblioteca por 192.168.26.134.

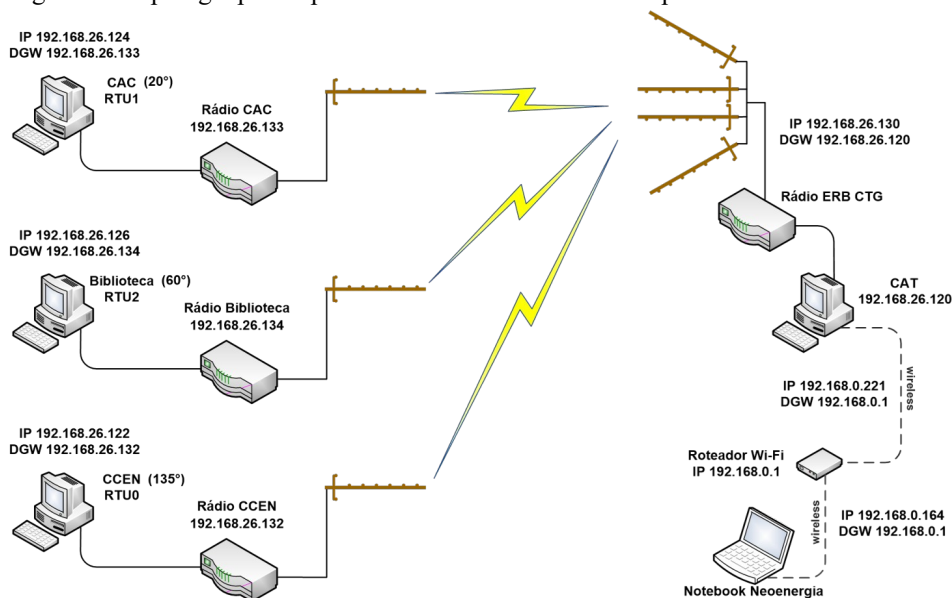
O SCP possui um verificador de integridade dos arquivos recebidos. Caso ocorra algum erro, ele solicita retransmissão do segmento perdido e registra a perda. A topologia da

rede de teste instalada no campus da UFPE é apresentada na Figura 78, abaixo, onde podemos visualizar o plano de endereçamento utilizado.

Para realizar o teste foi direcionada a posição do lóbulo para a caixa remota para a qual seriam transmitidos os arquivos. Durante o envio dos arquivos foi realizado o monitoramento dos enlaces estabelecidos pelos rádios com objetivo de verificar se estava ocorrendo perda de pacotes.

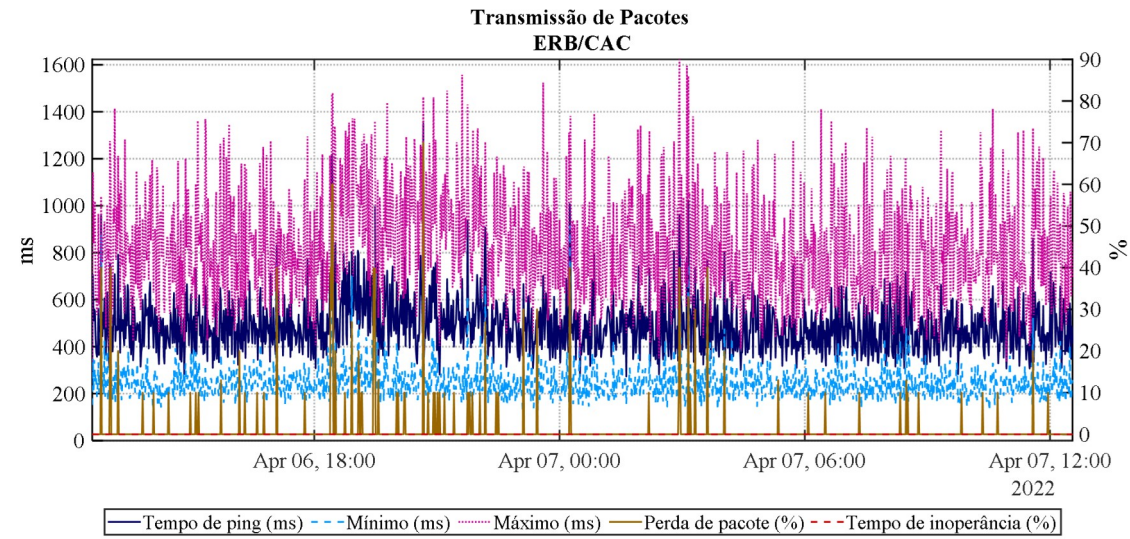
Para gerar gráficos de monitoramento do sistema, foi utilizado o *software Paessler Router Traffic Grapher* (PRTG) de gerenciamento de redes⁴⁹, foi necessário habilitar o protocolo *Simple Network Management Protocol*(SNMP) nos rádios. Esse protocolo é muito utilizado pelas operadoras de telecomunicações para realizar o gerenciamento dos equipamentos ativos da rede. Utilizamos a ferramenta *ping* do protocolo *Internet Control Message Protocols* (ICMP)⁴⁸ para obter os tempos máximo e mínimo de conectividade até os rádios remotos durante os testes. Os gráficos podem ser visualizados nas Figuras 79, 80 e 81, onde é possível observar os tempos máximo, mínimo e o percentual de perda de pacotes monitorado nos rádios das caixas remotas do CAC, CCEN e Biblioteca.

Figura 78-Topologia para representar a rede de testes no campus da UFPE



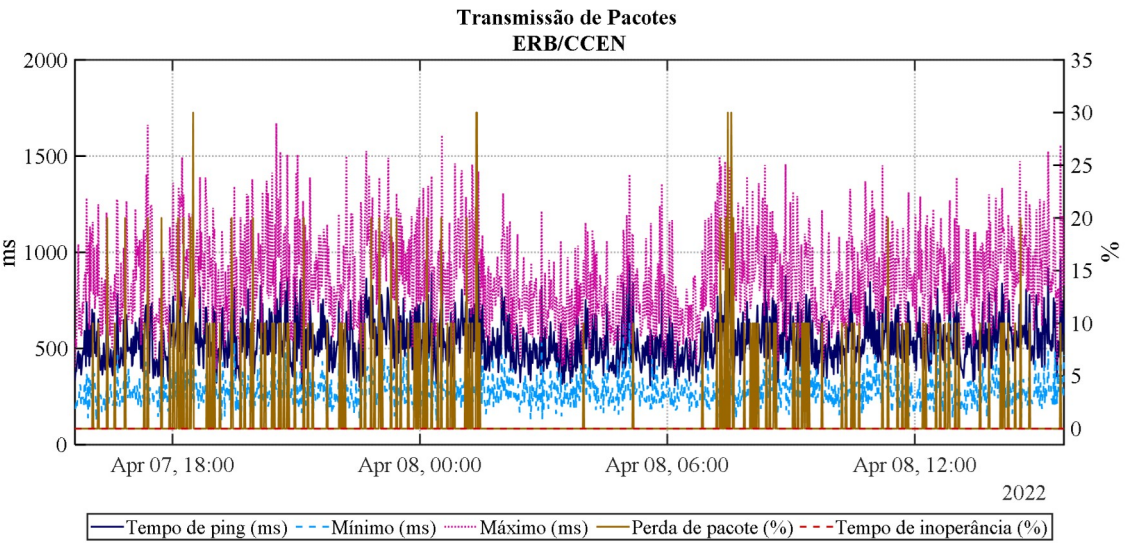
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 79-Gráfico de monitoramento da caixa do CAC durante 24 horas



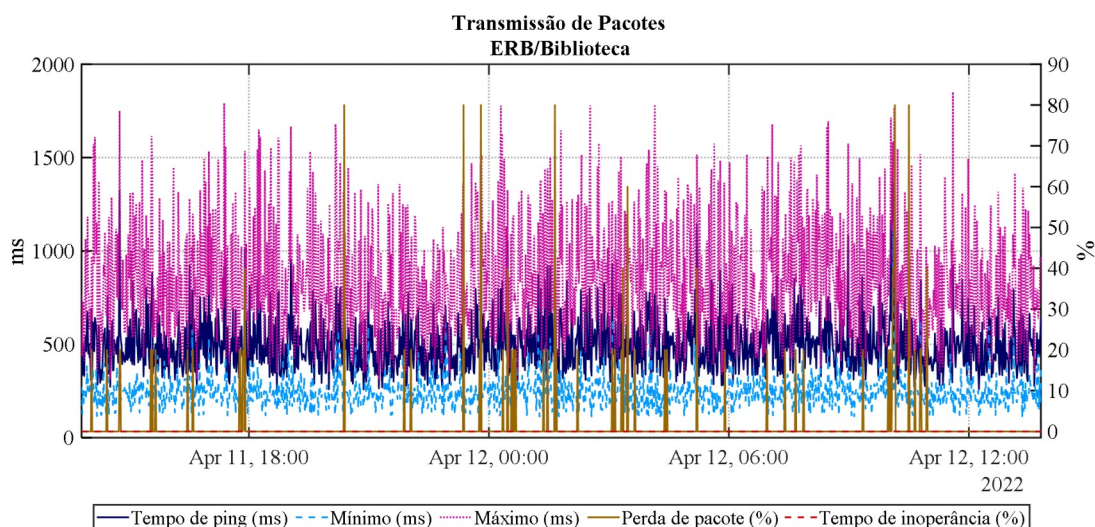
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 80-Gráfico de monitoramento da caixa do CCEN durante 24 horas



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 81-Gráfico de monitoramento da caixa da Biblioteca durante 24 horas



Fonte: Acervo do autor (2023)

Os resultados dos testes de envio de arquivos estão resumidos nas Tabelas 8, 9 e 10, onde são apresentados o tamanho dos arquivos, a perda de pacotes monitorada pelo PRTG, o desvio padrão, os valores de RSSI obtidos nos rádios, o intervalo de tempo entre os envios dos arquivos, o horário que foi realizado o teste e a quantidade de arquivos enviados.

A Tabela 8, apresenta o resumo da medição de 24 horas de envio de arquivos do CAT em direção a caixa do CAC como pode ser visualizado a seguir; e as Tabelas 9 e 10 apresentam os resumos das medições para o CCEN e para a Biblioteca, respectivamente.

Observa-se que durante as medições a porcentagem do tempo de inoperância do sistema para os três cenários foi de 0%, ou seja, o sistema não perdeu conectividade em nenhum momento. A perda média de pacotes não ultrapassou 1% o que é aceitável em comparação com o sistema atual da concessionária de energia.

Tabela 8: Resultados do envio de arquivos para caixa do CAC

CAC - arranjo inteligente Horário: 12h34-6/4/2022 a 12h34-7/4/2022 Potências dos rádios: ERB 25 dBm e remota 35 dBm									
Tamanho de arquivos (bytes)	Perda de pacotes - média/desvio padrão	Tempo de ping (ms)	Mín. (ms)	Máx. (ms)	RSSI ERB (dBm)	RSSI Remota (dBm)	Intervalo de tempo (s)	Tempo de inoperância (%)	Quantidade de arquivos
292	1 % / 5,27 %	489	249	827	-74	- 62	5	0	12438*

*Valor aproximado.

Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 9: Resultados do envio de arquivos para a caixa do CCEN

CCEN - arranjo inteligente Horário: 15h38-7/4/2022 a 15h38-8/4/2022 Potências dos rádios: ERB 25 dBm e remota 35 dBm									
Tamanho de arquivos (bytes)	Perda de pacotes - média/desvio padrão	Tempo de ping (ms)	Mín. (ms)	Máx. (ms)	RSSI ERB (dBm)	RSSI Remota (dBm)	Intervalo de tempo (s)	Tempo de inoperância (%)	Quantidade de arquivos
292	1% / 4,06%	540	283	872	-65	-51	5	0	12332

Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 10: Resultados do envio de arquivos para a caixa da Biblioteca

Biblioteca - arranjo inteligente Horário: 13h38-11/4/2022 a 13h38-12/4/2022 Potências dos rádios: ERB 25 dBm e remota 35 dBm									
Tamanh o de arquivos (bytes)	Perda de pacotes - média/desvio padrão	Tempo de ping (ms)	Mín. (ms)	Máx. (ms)	RSSI ERB (dBm)	RSSI Remota (dBm)	Intervalo de tempo (s)	Tempo de inoperância (%)	Quantidade de arquivos
292	1% / 6,94 %	498	247	852	-76	-65	5	0	12544

Fonte: Acervo do autor (2023)

6.3 TESTES DE ROBUSTEZ DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES E PREDIÇÃO DE PERDAS DE PACOTES

Um sistema robusto é aquele que não apresenta altos níveis de perdas de pacotes e também tem o seu funcionamento ininterrupto por falhas inerentes aos meios de transmissão. Para verificar se o sistema proposto é robusto suficiente ao uso pela concessionária de energia foi necessário verificar seu funcionamento sendo este submetido a condições reais de transmissão.

Os testes de robustez se estenderam por 14 horas no campus da UFPE, durante as quais todo o sistema de antenas inteligentes foi rigorosamente avaliado. Esta avaliação abrangente teve como objetivo aferir o desempenho do sistema na transmissão contínua de pacotes, mesmo quando submetido a diversas atenuações forçadas.

Para isso a caixa remota instalada no CCEN foi escolhida como fonte de teste. A cada 5 segundos foram transmitidas rajadas de pacotes de 292 *bytes*, com o tamanho padrão do cabeçalho do protocolo DNP3. Os arquivos foram enviados com o protocolo SCP (*Secure Copy Protocol*) e realizada a coleta dos resultados obtidos no log do próprio SCP.

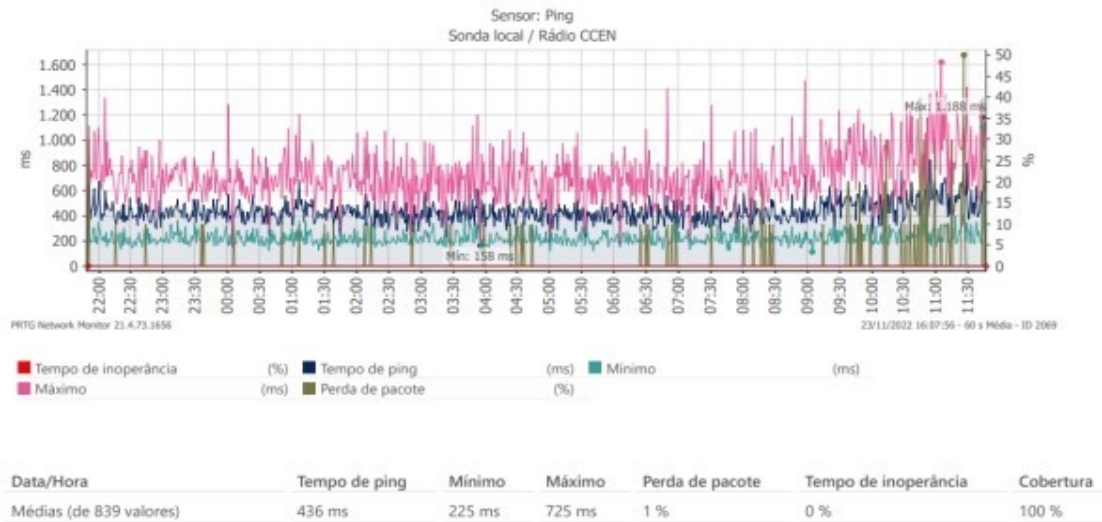
Ao mesmo tempo que foram realizados os envios dos arquivos via SCP, foi estabelecido o monitoramento do enlace do prédio do CTG, onde está instalada a ERB para o CCEN. E o enlace ERB ↔ CCEN (para a caixa remota) foi monitorada com o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) utilizando *software* de gerenciamento PRTG e obtido o gráfico da Figura 82, que apresenta os valores de perda de pacotes e tempo de ping simultâneos. Os valores do gráfico são plotados a cada 60 segundos e ele mostra que a perda de pacotes média foi de 1%.

O *software* de gerenciamento PRTG desempenhou um papel fundamental na captura e monitoramento de métricas críticas, como valores de perda de pacotes, tempo de *ping*, e tempo de inoperância do enlace, que são apresentados na Figura 82 para referência.

Para avaliar a robustez do sistema, foram feitas variações forçadas, aumento nos valores das atenuações, nos níveis de atenuação dos quatro atenuadores que compõem o circuito de formação de feixe. Esses ajustes foram aplicados de forma incremental, conforme ilustrado na Figura 83, abrangendo uma faixa de valores de -20 dB a -32 dB. Isso foi feito além dos valores de atenuação pré-configurados (att1 = -61.5 dB, att2 = -53.25 dB, att3 = -56.25 dB e att4 = -33.5 dB), que foram previamente definidos para direcionar o lóbulo

primário em direção ao CCEN, localizado na direção de 135 graus em relação ao prédio do CTG, conforme ilustrado anteriormente na Figura 53.

Figura 82- Medição da perda de pacotes do Sistema de Antenas Inteligentes



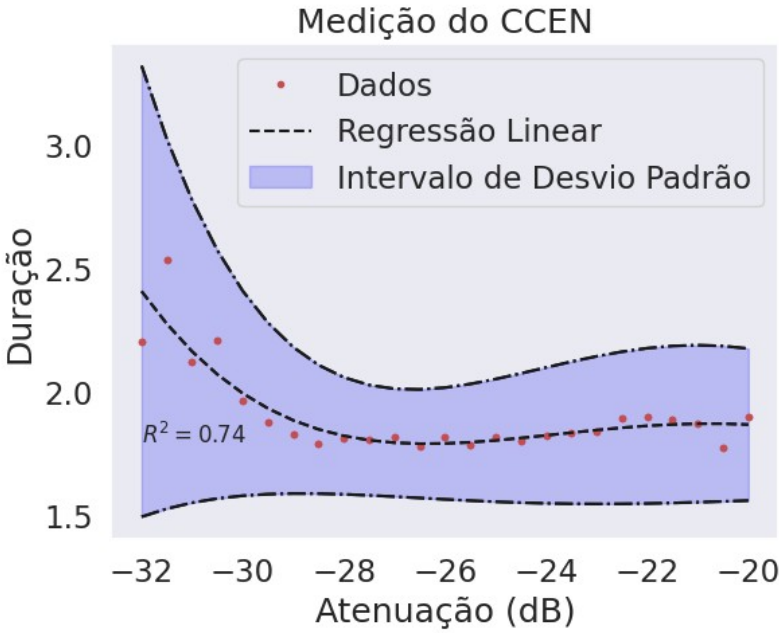
Consequentemente, o teste foi iniciado a partir das atenuações de -61.5 dB, -53.25 dB, -56.25dB e - 33.5dB já aplicadas aos atenuadores att1, att2, att3 e att4 no circuito formador de feixe. Esta configuração garantiu que os dispositivos do sistema de antenas inteligentes direcionassem seu lóbulo de maior potência para a caixa do CCEN sob exame. Posteriormente, os níveis de atenuação em todos os quatro atenuadores foram aumentados uniformemente de modo que o enlace fosse submetido a condições adversas.

Na Figura 83, foi traçado o gráfico da variação da duração do tempo de envio dos pacotes versus a variação de atenuação imposta ao enlace de comunicação.

O valor do R^2 presente no gráfico da Figura 83 é uma medida estatística. Ou ainda pode ser conhecido como coeficiente de determinação ou coeficiente de determinação múltipla para regressão⁵⁰. O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida estatística que indica o quão bem os pontos de dados se ajustam à linha de regressão em um modelo de regressão. Um valor mais alto de R^2 indica que o modelo de regressão explica uma maior proporção da variabilidade dos dados observados. Na Figura 83, são apresentadas as curvas de mínimo e máximo da duração versus a atenuação marcados por “-.-” e também a curva da regressão linear e o intervalo do desvio padrão.

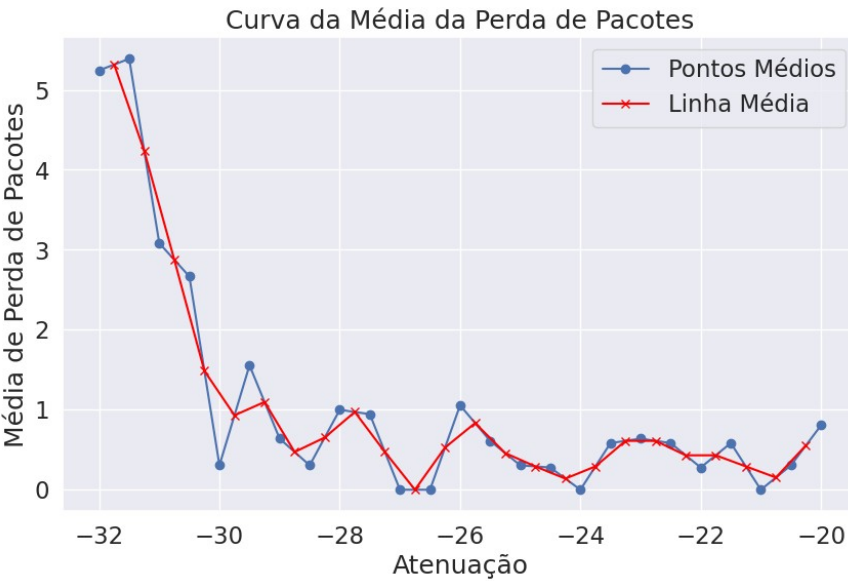
Na Figura 84, é apresentada a média da perda de pacotes versus a variação da atenuação aplicada nos atenuadores digitais durante o teste. Foi traçada a curva dos pontos médios da perda de pacotes.

Figura 83- Variação da atenuação versus duração para envio dos pacotes
curvas da regressão para os valores de mínimo, máximo e desvio padrão



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 84- Perda de pacotes versus a variação de atenuação aplicada nos atenuadores



Fonte: Acervo do autor (2023)

A partir dos resultados coletados durante os testes foi realizado um estudo de correlação entre os parâmetros. Foi criado um código em *Python* que inicia carregando dados base de dados coletada durante as medições e os organiza em uma estrutura de dados apropriada. Em seguida, ele manipula os dados, realizando operações específicas em algumas colunas. Após isso, calcula a matriz de dispersão e covariância dos dados, sendo a covariância normalizada para obter a matriz de correlação. Essa matriz de correlação expressa as relações lineares entre as variáveis dos dados. Em seguida, os autovalores e autovetores da matriz de correlação são calculados para analisar a estrutura dos dados. Finalmente, a matriz de correlação é visualizada como um mapa de calor que pode ser visto na Tabela 11, fornecendo uma representação visual das relações entre as variáveis. Este processo permite uma análise detalhada das interações entre as diferentes características dos dados. Com objetivo de utilizamos a matriz de correlação para fazer uma previsão de perdas de pacotes e tendo os valores de atenuação (att1, att2, att3 e att4), taxa de transmissão (txb), tempo de *ping* (ping) e a duração entre o envio e os recepção da resposta do pacote enviado(d) foram utilizados esses valores que estão na matriz de correlação que é apresentada na Tabela 11, onde é apresentada a correlação entre eles.

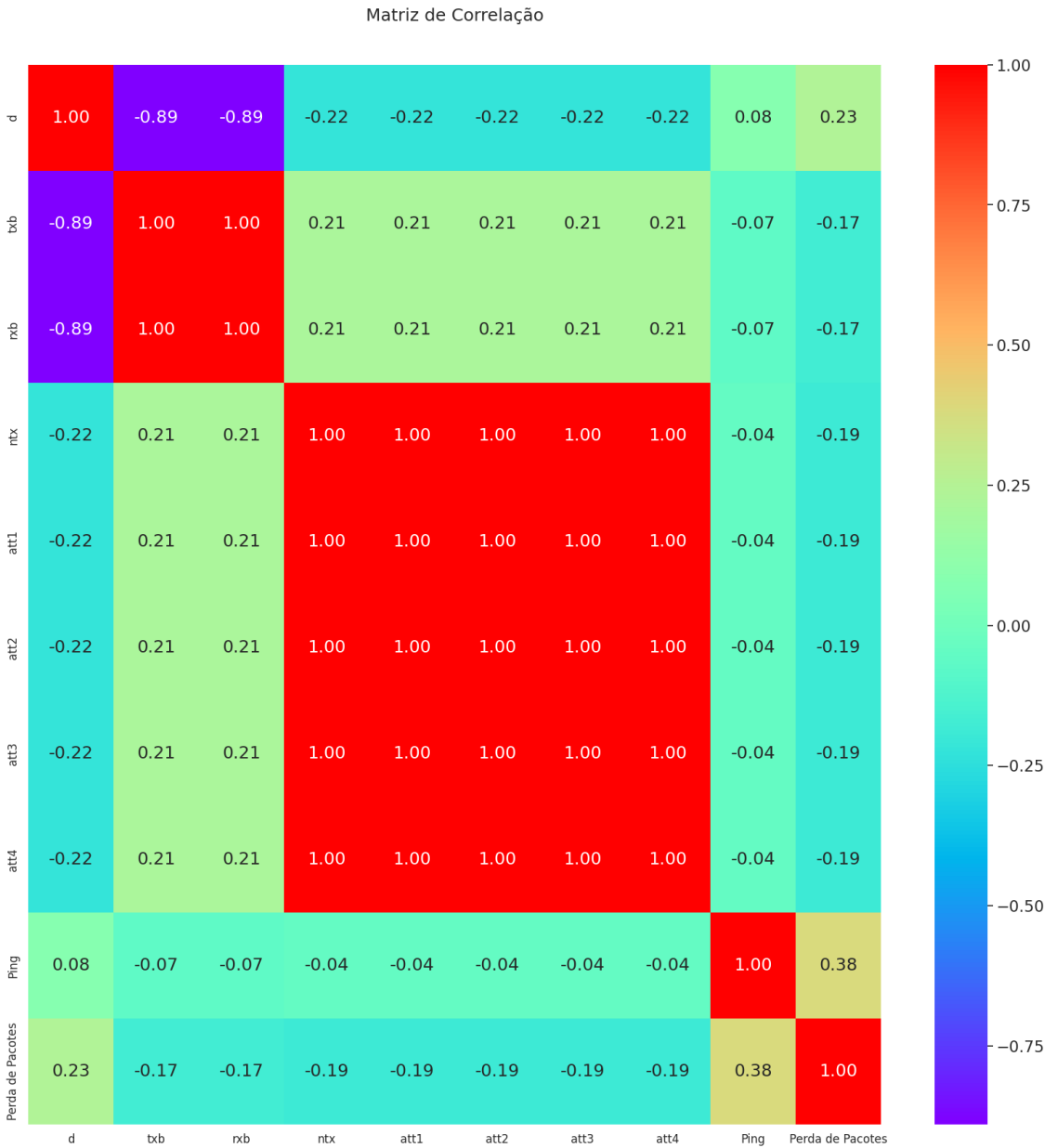
Analizando esses valores presentes na Tabela 11, foi necessário utilizar as ferramentas de regressão para estimar a perda de pacotes. A regressão, um procedimento para prever valores ou características contínuas, tem ganhado crescente relevância no campo da pesquisa. A vantagem de usar técnicas de regressão inclui a alta precisão, minimização de erros e economia de tempo^{51, 52}.

Verificando os resultados da matriz de correlação e aplicando as técnicas de regressão *Decision Tree* e *Random Forest* com objetivo de testar a acurácia do sistema de arranjo de antenas inteligentes e de posse dos valores da atenuação, taxa de transmissão, tempo de *ping* e a duração foram aplicadas essas técnicas de regressão com a finalidade de prever a perda de pacotes.

A primeira técnica utilizada foi a *Decision Tree* que tem seu resultado apresentado na Figura 85 com as 2500 amostras, onde é possível verificar a perda de pacotes real marcadas em vermelho e a perda de pacotes prevista (*Predict* Perda de pacotes) pela regressão marcadas em azul. Na Figura 86, é apresentado a diferença entre o valor medido e valor estimado pela regressão *Decision Tree* (DT) que é apresentado como o Erro entre os valores. Na Figura 87 é

apresentado o Histograma do Erro entre a medição realizada e a prevista e possível verificar que a maior frequência está em torno do zero.

Figura 85- Correlação entre os valores medidos durante o teste

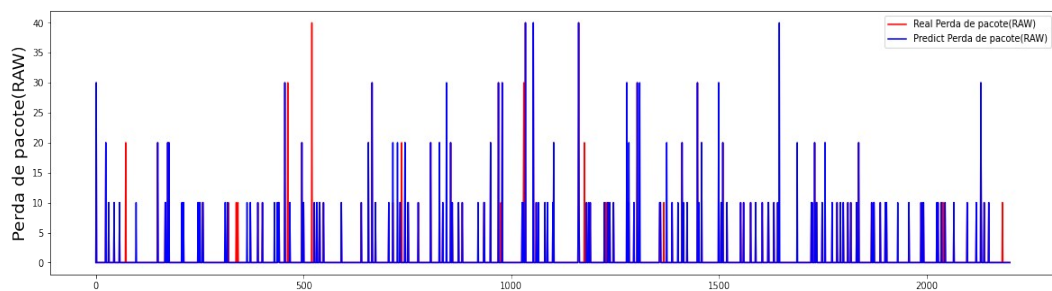


Fonte: Acervo do autor (2023)

Na Figura 88, analisamos para 100 amostras e foi visto a concordância entre o real marcado em vermelho e previsto marcado em azul. Isso fica mais claro quando verificamos na Figura 89 onde é apresentado para 100 amostras o Erro entre o valor medido e o estimado pela DT. Na Tabela 11 é apresentado os valores de acurácia do *Decision Tree*, Erro Quadrado

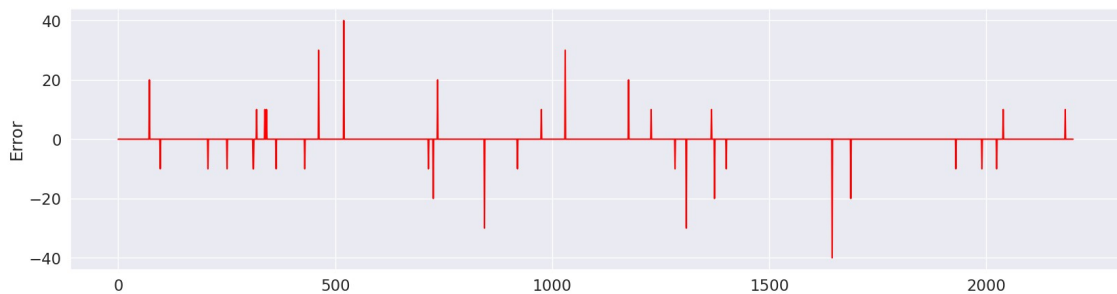
Médio (MSE). Esta é uma métrica de comparação de modelos e, como o nome sugere, calcula a média dos quadrados do erro entre os valores verdadeiros e estimados, e Erro Absoluto Médio (MAE), que mede a média do erro absoluto entre os valores verdadeiros e estimados da mesma variável.

Figura 86- Técnica de regressão Decision Tree aplicada nas 2500 amostras da medição



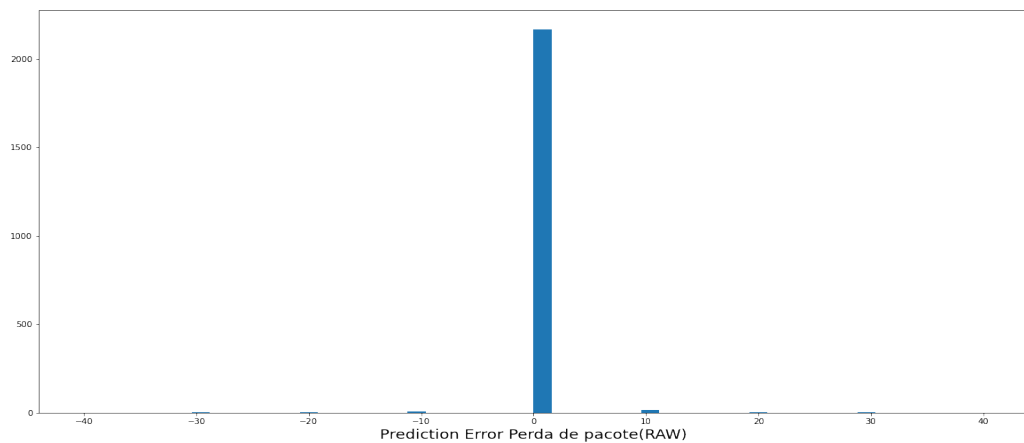
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 87- Erro entre o valor medido e o valor previsto pela regressão Decision Tree aplicada nas 2500 amostras da medição



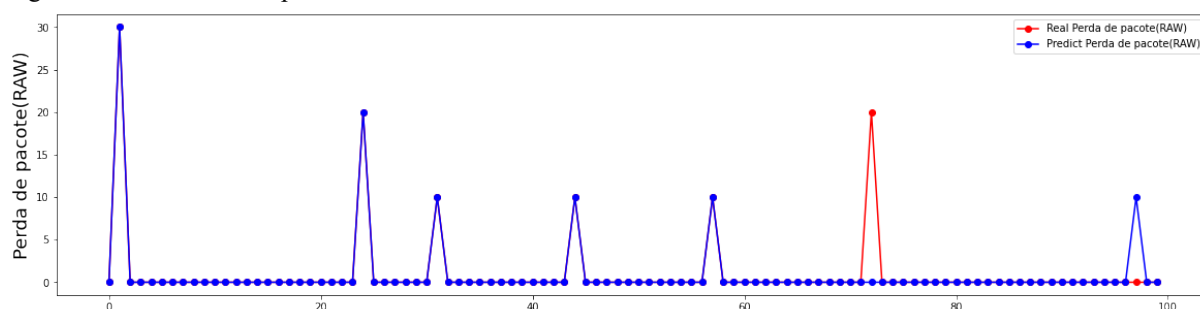
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 88- Histograma do Erro entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista



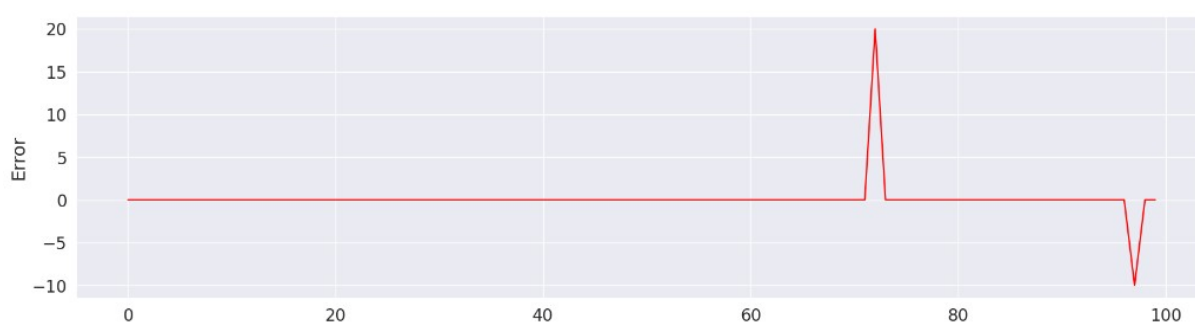
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 89- Decision Tree para Perda de Pacotes com 100 amostras



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 90- Erro entre o valor medido e a regressão do Decision Tree para Perda de Pacotes com 100 amostras



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 11: Resultado do *Decision Tree*

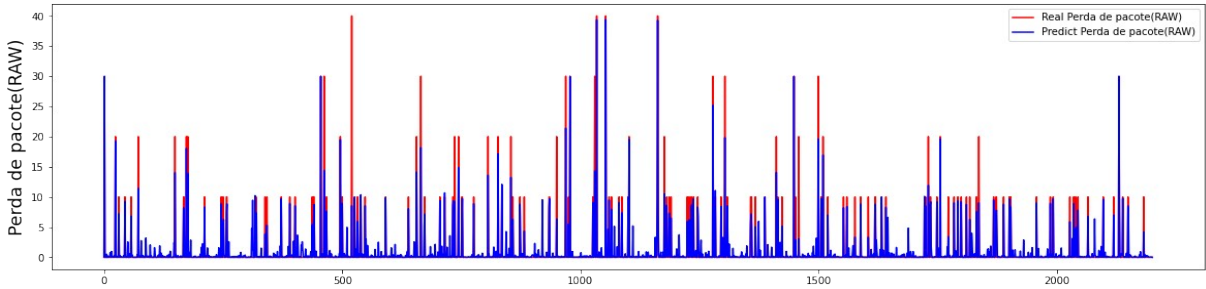
Acurácia <i>Decision Tree</i>	0.6775837477352453
R^2	0.6775837477352453
MAE (Erro Absoluto Médio)	0.2453430258973194
MSE (Erro Quadrado Médio)	5.179463880054521

Fonte: Acervo do autor (2023)

Além da técnica de *Decision Tree*, foi aplicada a *Randon Forest* com objetivo de verificar se é possível realizar a previsão da perda de pacotes utilizando essa regressão. Na Figura 90 é apresentado o resultado da perda de pacotes medida e a prevista a partir dos valores de atenuação (Att1, Att2, Att3 e Att4), taxa de transmissão (txb), tempo de ping e a duração entre o envio e os recepção da resposta do pacote enviado(d). Valores marcados em vermelho são os reais e os marcados em azul são os previstos a partir das entradas já descritas. Na Figura 91 é possível visualizar o Histograma para distribuição do erro previsto e que a

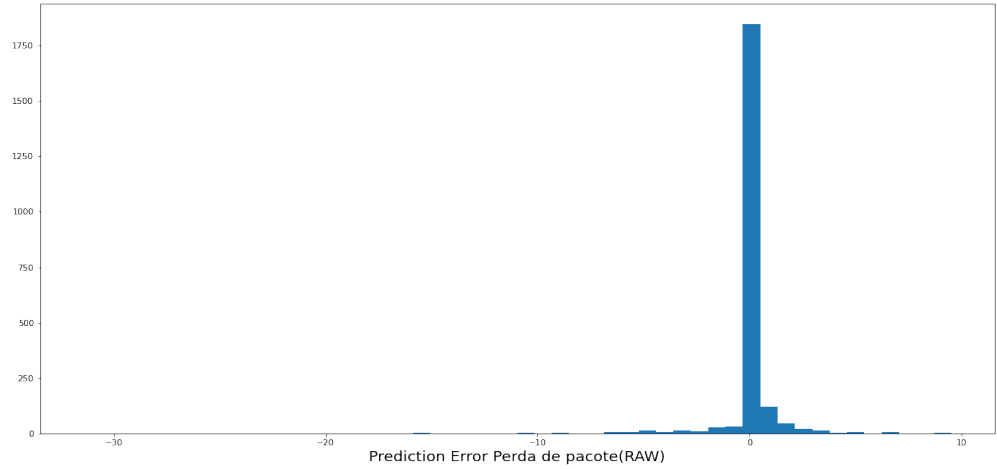
maior frequência está em torno do zero. Para ficar mais simples a análise é apresentada também na Figura 92, onde se vê o gráfico com apenas 100 amostras da comparação do real (marcado em vermelho) e com previsto (marcado em azul). Na Tabela 12, é apresentada a acurácia da técnica *Randon Forest*.

Figura 91- Técnica Random Forest Regression aplicada nas 2500 amostras da medição



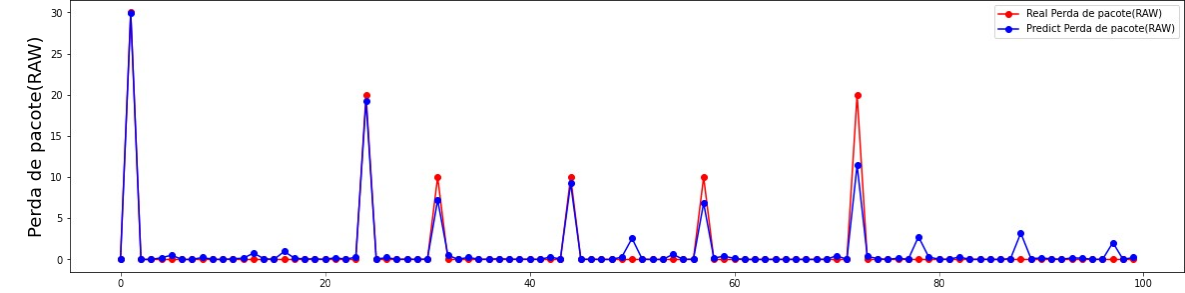
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 92- Histograma do Erro da Técnica Random Forest entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 93- Randon Forest para 100 amostras da perda de pacotes



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 12: Resultado do Random Forest Regression

Acurácia <i>Random Forest</i>	0.8461424393144271
R^2	0.8461424393144271
MAE (Erro Absoluto Médio)	0.46519612297440555
MSE (Erro Quadrado Médio)	2.4716485991216115

Fonte: Acervo do autor (2023)

As duas técnicas de regressão aplicadas nas amostras apresentam resultado coerentes com os valores medidos pelo *software* PRTG. Essas técnicas foram aplicadas e tiveram seus resultados publicados no artigo “*Precoded Supervising System Based on Smart Antenna Array for Electric Power Distribution Grid: Optimization Aspects*”, na conferência *International Microwave Symposium*, em San Diego, CA que foi aceito e publicado nos anais dessa conferência⁵³.

Para verificar os experimentos, ainda dispomos de outras técnicas como por exemplo as redes neurais. Uma das redes neurais que é possível utilizar é MLP (*Multilayer Perceptron*).

Os *perceptrons*, são um tipo de neurônio artificial, inspirados na estrutura dos neurônios biológicos, de múltiplas camadas têm sido aplicados com sucesso para resolver diversos problemas difíceis, através do seu treinamento de forma supervisionada com um algoritmo muito popular conhecido como algoritmo de retropropagação de erro (do inglês *error back-propagation*)²⁷.

Dessa forma, ainda com os resultados obtidos durante os testes, foi implementada em *Python* uma rede neural MLP (*Multilayer Perceptron*) com quatro camadas distribuída da seguinte forma: na camada 1 sete neurônios, na camada 2 doze neurônios, na camada 3 cinco neurônios e na camada 4 dois neurônios. Com essa rede neural foi possível estimar as perdas de pacotes no enlace sob teste com base nos valores da atenuação, taxa de transmissão, tempo de ping e duração de envio dos pacotes. Na Tabela 15, é apresentado a precisão dos resultados da rede neural MLP aplicada.

Analisar os valores de uma rede neural *Multilayer Perceptron* (MLP) envolve compreender o desempenho da rede, a qualidade de suas previsões e seu processo de aprendizagem. O valor de perda apresentado na Tabela 13 indica o erro ou custo associado às

previsões da rede em um conjunto de dados específico. É uma medida do desempenho da rede na tarefa para a qual foi treinada. Valores de perda mais baixos normalmente indicam melhor desempenho, mas é essencial considerar a escala e o contexto da função de perda. Diferentes tarefas e conjuntos de dados podem ter diferentes intervalos de valores de perda.

O valor "Média real" apresentado na Tabela 13, representa a média dos valores reais em seu conjunto de dados. Este valor fornece uma visão sobre a tendência central da verdade básica ou dos dados reais. Em muitos casos, desejara-se que as previsões da sua rede estivessem o mais próximas possível dessa média.

O valor "Média de prevista" visto na Tabela 13, representa a média das previsões feitas pela rede MLP em análise. Este valor indica quão bem sua rede está capturando a tendência central dos dados. Uma média de previsão próxima da média real sugere que o modelo está fazendo um bom trabalho ao produzir previsões que estão, em média, próximas dos valores reais.

No gráfico da Figura 93, mostra a tendência de perda, analisando o resultado foi verificado que elas decrescem ao longo das épocas (em inglês *epoch*), uma *epoch* em um contexto de treinamento de rede neural refere-se a uma única passagem completa de todo o conjunto de dados de treinamento pela rede. Durante cada *epoch*, a rede neural ajusta seus pesos e bias com base nos erros de predição em relação aos rótulos verdadeiros dos dados de treinamento. Uma perda decrescente ao longo das épocas é um bom sinal.

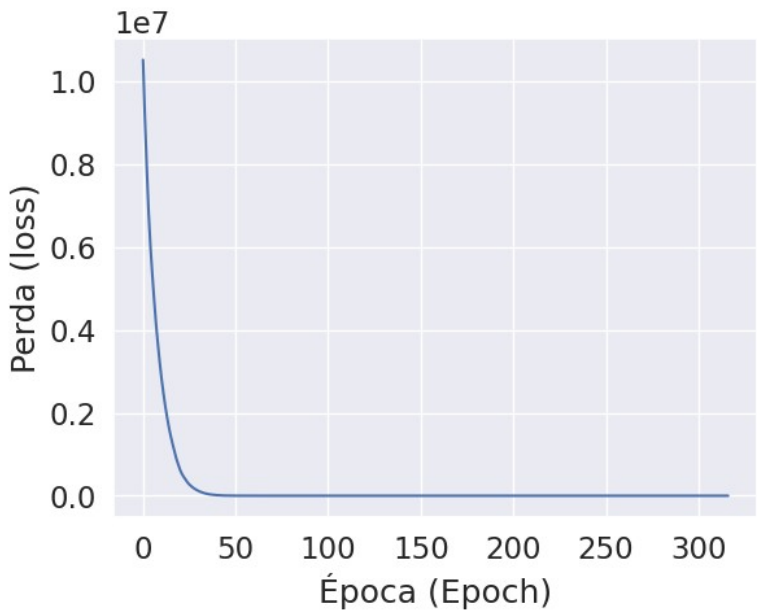
Na Figura 94 é ilustrado o resultado da MLP aplicada as 2500 amostras neste gráfico a perda de pacotes real está marcada em vermelho e em azul a perda de pacotes prevista a partir do conjunto de treinamento. Na Figura 95 é possível visualizar o Histograma entre a perda de pacotes real e a perda prevista, neste observamos que a maior frequência está entorno de zero. A Figura 96 mostra, para 100 amostras, a previsão da perda de pacotes e perda de pacotes no conjunto de treinamento da rede neural MLP aplicada. Essa diferença fica mais clara visualizando o gráfico da Figura 97, que apresenta a subtração entre os valores reais menos o valor previsto.

Tabela 13: Resultado da Multilayer Perceptron

Perdas (<i>Loss</i>)	7.136619007953564
Média Real (<i>real mean</i>)	0.9631985461154021
Média Prevista (<i>Prediction mean</i>)	0.9230882398046932

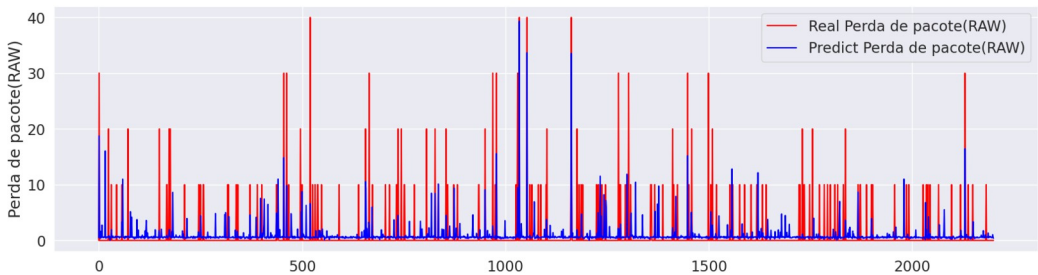
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 94- Resultado das perdas da rede Multi-Layer Perceptron para o conjunto de treinamento



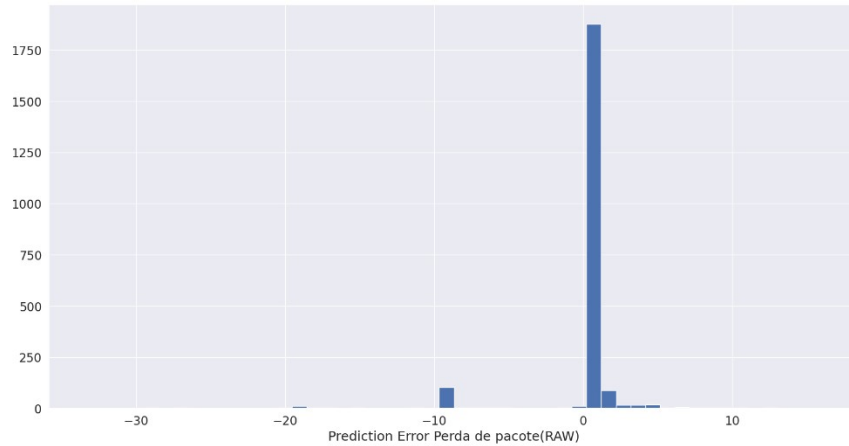
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 95- Resultado da rede Multi-Layer Perceptron para 2500 amostras da perda de pacotes



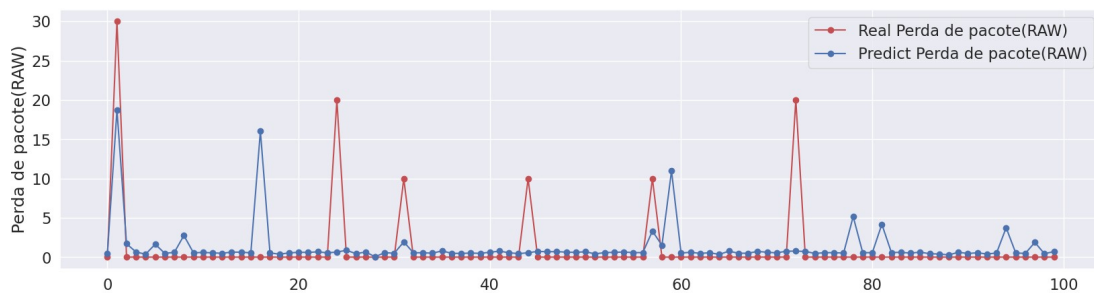
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 96- Histograma do Erro da MLP entre a Perda de Pacotes Real e Perda de Pacotes Prevista



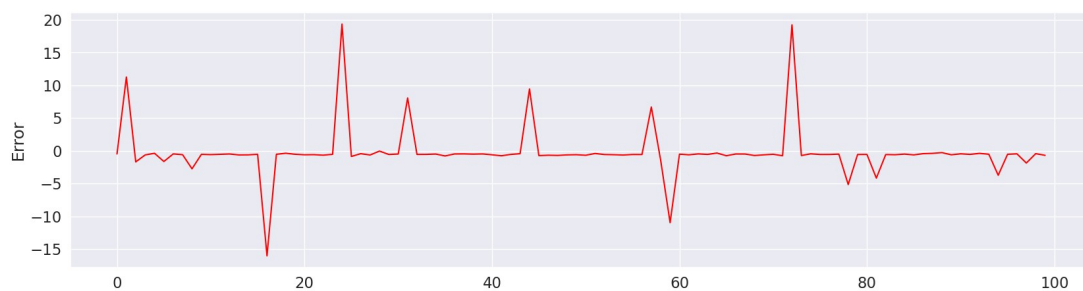
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 97- Resultado da rede Multi-Layer Perceptron para Perda de Pacotes com 100 amostras



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 98- Erro entre o valor medido e a rede neural MLP para Perda de Pacotes com 100 amostras



Fonte: Acervo do autor (2023)

A vantagem significativa de integrar um estimador de perda de pacotes baseado em *software* num sistema de antena inteligente reside na sua capacidade de eliminar a necessidade de um instrumento de medição adicional, tal como uma *probe* que é um

instrumento físico utilizado para medição de parâmetros do sistema um exemplo é um analisador de redes, uma decisão que muitas vezes implica custos financeiros substanciais.

Como evidenciado nos resultados apresentados, o sistema pode aproveitar os parâmetros inerentes do sistema de antena inteligente – como por exemplo, atenuação, taxa de transmissão de rádio e tempo de envio de pacotes – para prever com precisão os valores de perda de pacotes. Nossa investigação incluiu a avaliação de várias técnicas de regressão, incluindo *Decision Tree*, *Random Forest* e redes neurais MLP.

Em testes de robustez realizados durante um período contínuo de 14 horas, durante os quais o sistema foi sujeito a variações substanciais de atenuação (-20 dB a -32 dB) nos seus atenuadores digitais, o sistema demonstrou um desempenho muito promissor, alcançando uma perda de pacotes notavelmente baixa de 1% esse valor atende a métrica determinada pela NEOENERGIA.

Utilizando os valores de duração de envio de pacotes, atenuação aplicada aos atenuadores e taxa de transmissão (parâmetros nativos dos rádios digitais), aplicamos duas técnicas de regressão *Decision Tree* e a *Random Forest*. Os resultados foram bons na previsão de perda de pacotes, exibindo métricas superiores de Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Quadrático Médio (MSE), especialmente quando comparados à *Random Forest*. Dessa forma o sistema possui resultado promissor e com as coletas dos dados é possível trazer uma contribuição muito significativa para a área do eletromagnetismo no diz respeito ao desempenho do sistema de antenas inteligentes.

6.4 INSTALAÇÃO FINAL DO SISTEMA DE ANTENAS INTELIGENTES

Visando tornar a aparência o sistema de antenas inteligentes mais comercial para uma instalação mais eficiente em um dos *racks* da casa de controle, onde está instalada a ERB de Suape.

O sistema foi encapsulado pela empresa Sem Fio que foi contratada para o fazer essa parte do sistema como requisito do P&D entre a UFPE e o grupo NEOENERGIA. Após uma análise minuciosa do sistema, a Sem Fio o reestruturou em três gabinetes modulares metálicos distintos: um abrigando o circuito formador de feixe (CFF), outro dedicado ao controlador de arranjo de antenas (CAT) e um terceiro gabinete contendo todas as fontes de alimentação e tensão necessárias com os requisitos para energizar as duas primeiras caixas.

A Figura 98 apresenta uma perspectiva frontal das três caixas interligadas encapsuladas em gabinetes de serviço. O Módulo CAT mede 425.00 mm de largura, 100.00 mm de altura e 300.00 mm de profundidade, enquanto os módulos CFF e fonte compartilham dimensões idênticas de 425.00 mm de largura, 140.00 mm de altura e 300.00 mm de profundidade (Largura x Altura x Profundidade). A Figura 99 oferece uma visão traseira dos módulos dispostos na mesma configuração ilustrada na Figura 98. No total, esses módulos consomem um espaço equivalente a 8 unidades de rack (Us).

O módulo CFF abrange todos os componentes representados na Figura 100. Voltando à atenção para a Figura 101, a vista frontal fornece informações sobre a configuração deste módulo, mostrando as entradas de energia para amplificadores, ventiladores, detector de portadora e um hub USB (utilizado para comandar os atenuadores via CAT).

Figura 99- Perspectiva frontal dos módulos do sistema de antenas inteligentes sobrepostos encapsulados em gabinetes de serviço



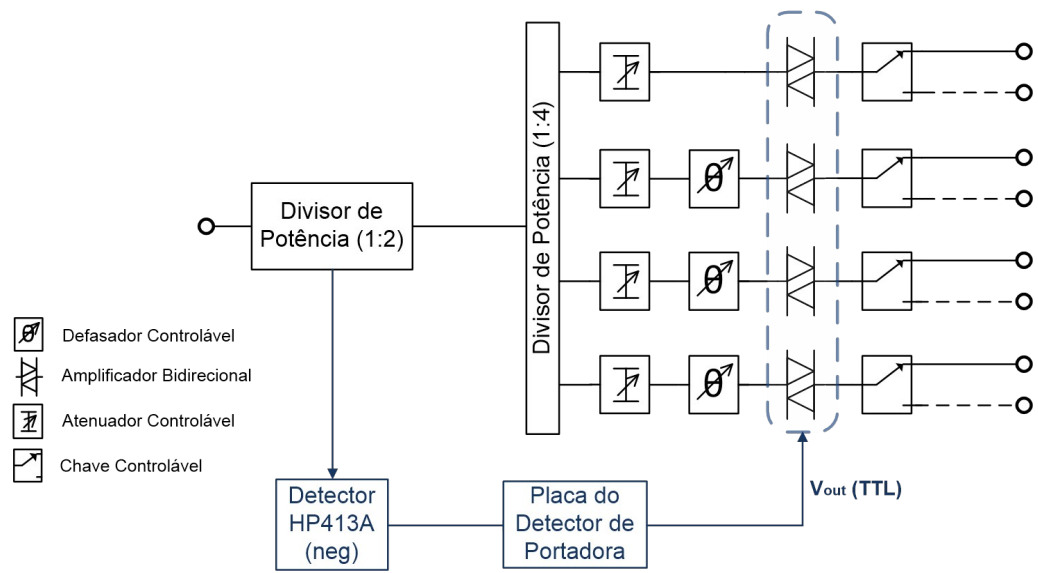
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 100- Perspectiva traseira dos módulos do sistema de antenas inteligentes sobrepostos



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 101- Diagrama em blocos de conexões dos dispositivos presentes no Módulo do CFF



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 102- Visão frontal do módulo do CFF

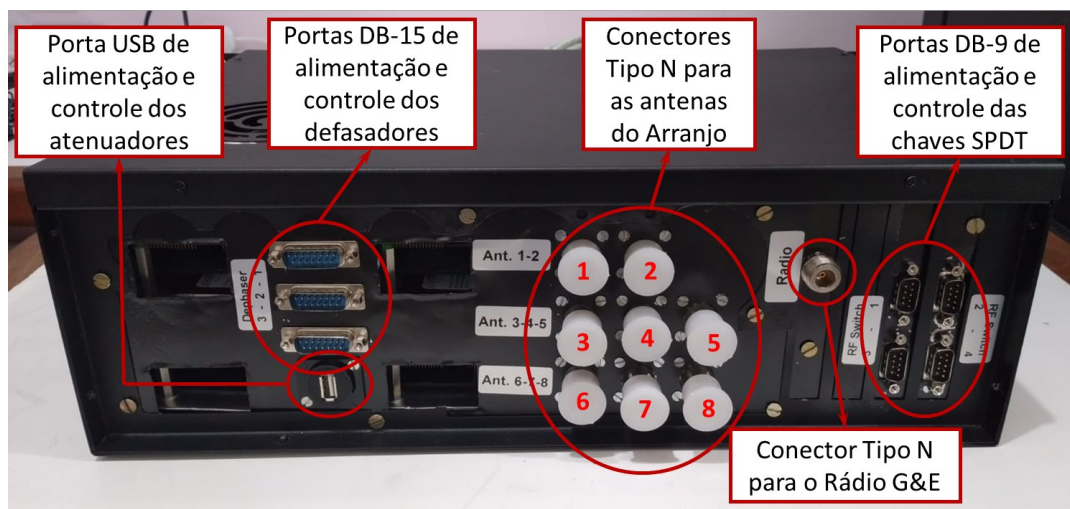


Fonte: Acervo do autor (2023)

A Figura 102, apresenta a perspectiva traseira do módulo CFF. Nela estão os recursos essenciais, incluindo a porta de entrada de dados do Hub USB, que faz interface direta com os quatro atenuadores digitais. Esta porta é a interface de conexão com os atenuadores para o envio de comandos do CAT. Além disso, ele apresenta três conectores de entrada DB-15, conectados aos defasadores digitais que são utilizadas para comandos do CAT e fonte de alimentação, juntamente com 8 conectores de entrada/saída tipo N dedicados às antenas dos arranjos. Notavelmente, há um conector de entrada/saída para o divisor de potência (1:2) conforme mostrado na Figura 100, servindo como ponto de conexão para o rádio UHF do fabricante GE. Além disso, é possível visualizar quatro conectores DB-9, que foram projetados como entradas para SPDTs (chaves de RF), para integração do CAT no envio de comandos e também sendo utilizados para alimentação de energia.

Para esclarecer ainda mais as conexões, cada conector N é rotulado para corresponder à ordem das antenas do arranjo. Os conectores de 1 a 4 conectam às antenas do primeiro arranjo, enquanto os conectores 5 a 8 se conectam ao segundo arranjo. Os conectores DB-15 possuem etiquetas que indicam a ordem de integração dos defasadores digitais com o CAT, facilitando o processo de conexão dos cabos entre os módulos. Por fim, as portas DB-9 são marcadas com etiquetas, denotando a ordem das chaves SPDTs (RF *Switch*), de modo a facilitar a integração com o CAT. Como fica evidente na Figura 102, o módulo incorpora quatro aberturas estrategicamente posicionadas para facilitar a dissipação do ar quente gerado pelos amplificadores.

Figura 103- Visão traseira do módulo do CFF



Fonte: Acervo do autor (2023)

A Figura 103, é apresentada a vista frontal do módulo CAT, enquanto a Figura 104 apresenta a vista traseira desse mesmo módulo. A perspectiva traseira oferece uma visão das interfaces para interconexão com os dispositivos de RF do CFF e as portas de entrada e saída do CAT. Interface Ethernet do CAT é utilizada para interconectar com a interface Ethernet do rádio UHF GE. As portas de entrada e saída USB do *Raspberry Pi4* dentro do módulo, servem para conectar o teclado e também para interconectar o CAT aos atenuadores digitais do CFF. Conectores de saída DB-15: existem três conectores de saída DB-15, integrantes da plataforma de controle do circuito de condicionamento CAT. Esses conectores são projetados para serem conectados às entradas DB-15 do módulo CFF, garantindo comunicação com os defasadores digitais. Os quatro conectores DB-9 servem como saídas, facilitando a conectividade com as portas DB-9 do módulo CFF para comandar as chaves SPDTs.

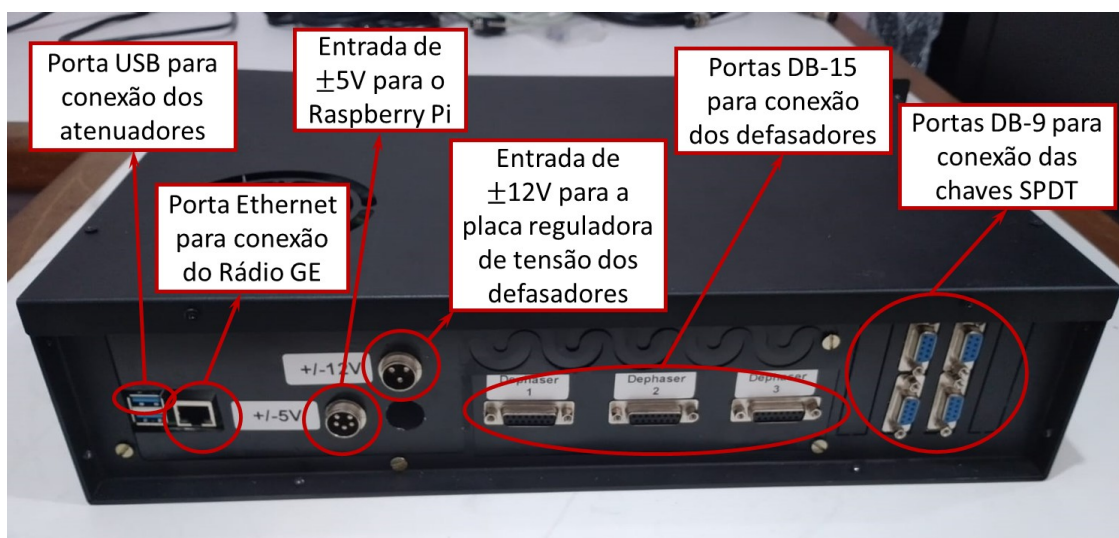
A entrada de alimentação de 5V que é utilizada especificamente para energizar o *Raspberry Pi 4* dentro do módulo CAT.

Figura 104- Visão Frontal do módulo do CAT



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 105- Visão traseira do módulo do CAT



Fonte: Acervo do autor (2023)

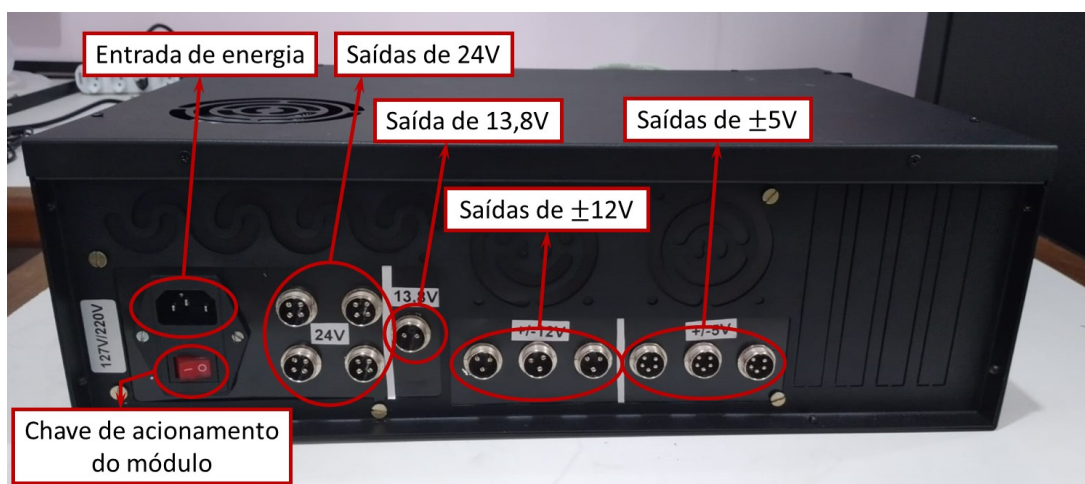
As Figuras 105 e 106, mostram as vistas frontal e traseira do módulo de fonte de alimentação, responsável por fornecer as tensões essenciais ao CFF, CAT e Rádio UHF GE, que necessita de uma fonte de alimentação de 13,8 Vcc. No painel frontal encontram-se LEDs distintos, cada um servindo como um indicador do status operacional das fontes de alimentação internas contidas no módulo.

Figura 106- Visão frontal do módulo das fontes



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 107- Visão frontal do módulo das fontes



Fonte: Acervo do autor (2023)

A implantação dos três módulos, juntamente com o rádio UHF e os arranjos de antenas, foi executada na subestação de Suape, conforme ilustrado nas Figuras 107 e 108. A Figura 108, mostra a perspectiva detalhada da montagem no solo dos arranjos de antenas e a nesta também a posterior instalação desses dois arranjos na estrutura da torre da subestação.

Figura 108- Foto dos três módulos instalados no rack na subestação de Suape



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 109- Foto dos arranjos de antenas instalados na subestação de Suape



Fonte: Acervo do autor (2023)

Após a instalação completa do sistema de antenas inteligentes, uma série de testes de conectividade individuais, testes com cada antena do arranjo, foram realizados utilizando uma caixa de teste móvel. O objetivo principal desses testes foi avaliar a intensidade do sinal em

distâncias curtas. A foto da configuração para medição da intensidade do sinal e avaliação são mostradas nas Figuras 109 e 110. As pessoas que aparecem nas Figuras 109 e 110, são pesquisadores do projeto e participaram dos testes em campo e foram supervisionadas pelos professores da UFPE. Esses testes se tornaram necessários, pois em decorrência do remanejamento de oito cabos RGC 213 do prédio do CTG para Suape. Devido aos ajustes feitos nas dimensões dos cabos para se adequar ao tamanho da torre. Esses cabos tiveram que ser cortados e posteriormente re-conectorizados. Para garantir a robustez das conexões, foram realizados testes de atenuação e fase nos cabos de ambos os arranjos, conforme descrito nas Tabelas 14 e 15.

O procedimento para os testes de curta distância envolveu a redução das potências dos rádios e a realização de testes de conectividade antena a antena. Esses testes foram executados sequencialmente, com apenas uma antena conectada por vez. Além disso, foi realizado um levantamento do RSSI na estação remota móvel, e os resultados são apresentados nas Tabelas 16 e 17. Este rigoroso regime de testes foi vital para garantir a integridade e confiabilidade do sistema de antenas inteligentes em seu ambiente operacional.

Figura 110- Teste de curta distância da caixa instalada em frente ao Arranjo 1



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 111- Teste de curta distância da caixa instalada em frente ao Arranjo 2



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 14: Medidas de atenuação e fase dos cabos
RGC213 do Arranjo 1

CABOS	S21 dB	<S21°
1-C1	-4,128	63,145
1-C2	-4,781	-172,010
1-C3	-4,967	-95,519
1-C4	-4,173	107,250

Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 15: Medidas de atenuação e fase dos cabos RCG213 do Arranjo 2

CABOS	S21 dB	<S21°
2-C1	-4,251	-19,871
2-C2	-4,685	-19,871
2-C3	-4,638	-64,448
2-C4	-4,593	-134,250

Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 16: Medições de curta distância em frente ao Arranjo 2

CABOS	Potência no Rádio Remoto (25 dBm)
	RSSI (dBm)
1-C1	-66
1-C2	-58
1-C3	-60
1-C4	-71
2-C1	-54
2-C2	-61
2-C3	-61
2-C4	-56

Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 17: Medições de curta distância em frente ao Arranjo 1

CABOS	Potência no Rádio Remoto (25 dBm)
	RSSI (dBm)
1-C1	-61
1-C2	-41
1-C3	-43
1-C4	-49
2-C1	-51
2-C2	-65
2-C3	-54
2-C4	-60

Fonte: Acervo do autor (2023)

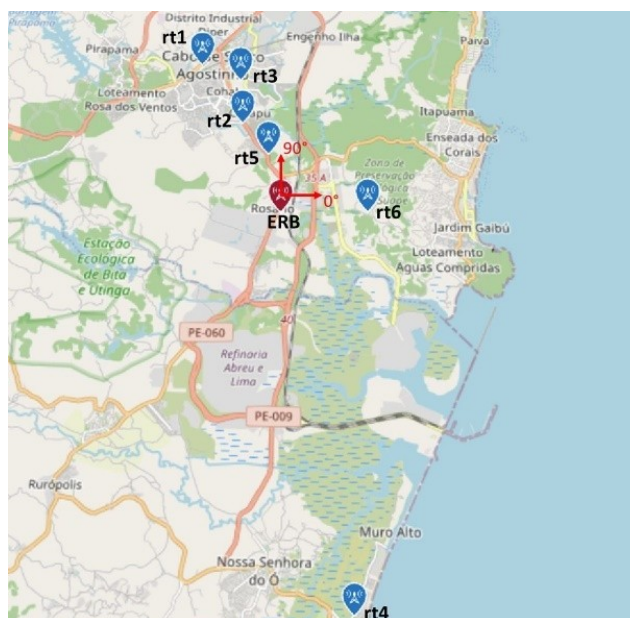
Após a conclusão com sucesso dos testes de curta distância, pois todos tiveram conectividade com o rádio da ERB e os níveis RSSI foram bons. Foi iniciada a instalação de caixas remotas, destinadas a testes do sistema de antenas inteligentes na rede da concessionária de distribuição de energia. Essas instalações estão localizadas conforme ilustrado na Figura 111. Especificamente, as estações de rádio remotas (RTs) 1, 2, 3 e 5 são atendidos pelo arranjo 2, enquanto os RTs 4 e 6 são atendidos pelo arranjo 1. Na Figura 112 mostra o diagrama de como estão distribuídos os cabos nos arranjos para cobertura das remotas. A Tabela 18, apresenta os endereços IPs dos rádios das RTs.

Para facilitar os testes de conectividade, a potência do rádio foi elevada para 40 dBm tanto para a ERB quanto para os rádios dentro das caixas remotas. Durante os testes, o circuito de formação de feixe permaneceu inativo e foram utilizados cabos individuais, diretamente ligados ao rádio da ERB.

A Figura 113, mostra a instalação da estação de rádio remota (caixa metálica e antena Yagi-Uda) utilizada para os testes, enquanto as Figuras 114 e 115, oferecem informações detalhadas sobre os valores RSSI e testes de conectividade direcionados à ERB. Esses testes envolveram o uso de uma única antena do arranjo de antenas 2 e do cabo 2 (2-C2). A caixa remota do RT1 está situada a pouco mais de 5 km do ERB.

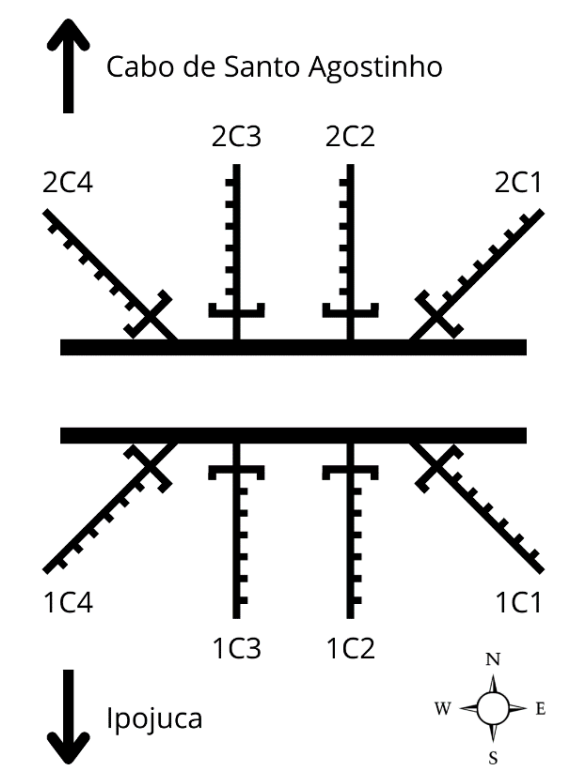
A Figura 116, apresenta a instalação da caixa RT4 em Muro Alto e a Figura 117 fornece os valores de RSSI pertinentes ao RT4. Neste cenário de teste específico, apenas o cabo 1 do arranjo 1 (1-C1) foi conectado ao rádio ERB. A distância da ERB até esta caixa é de aproximadamente 13 km. Foi realizada uma nova tentativa de acesso a RT4 trocando o cabo na ERB para o cabo 3 do arranjo 1 (1-C3), foi obtido sucesso conforme apresentado nas Figuras 118 e 119 de acesso aos rádios da ERB e RT4 respectivamente. No acesso a caixa remota foi alterado o nome do rádio RRTU5 para RT4.

Figura 112- Localização das caixas remotas que devem ser utilizadas para os testes



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 113- Diagrama de distribuição das antenas dos arranjos para cobertura das remotas



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 18: Endereços IPs dos rádios da RTs

RTs	Endereço IP
RT1	192.168.26.134
RT2	192.168.26.136
RT3	192.168.26.132
RT4	192.168.26.137
RT5	192.168.26.133
RT6	192.168.26.135

Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 114- Caixa instalada na RT3



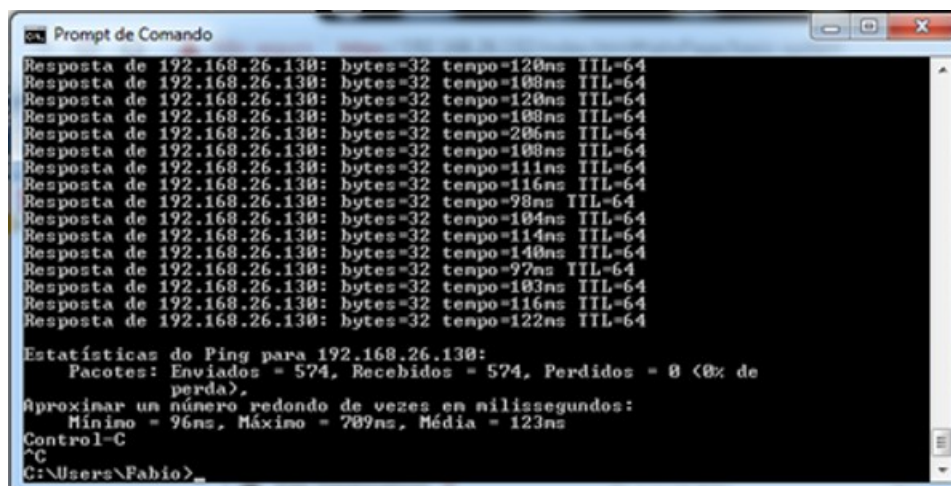
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 115- RSSI obtido na remota da RT3



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 116- Teste de conectividade com aplicação ping da RT3 para o rádio da ERB



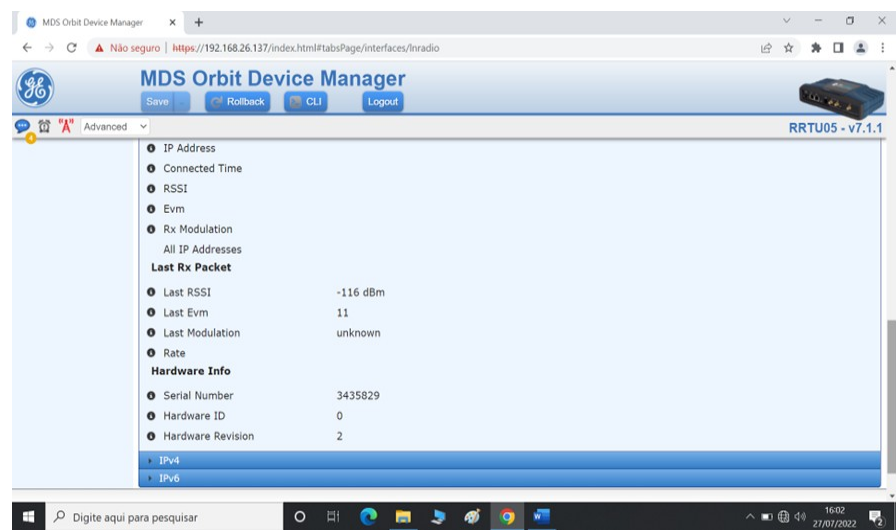
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 117- Caixa remota instalada na RT4



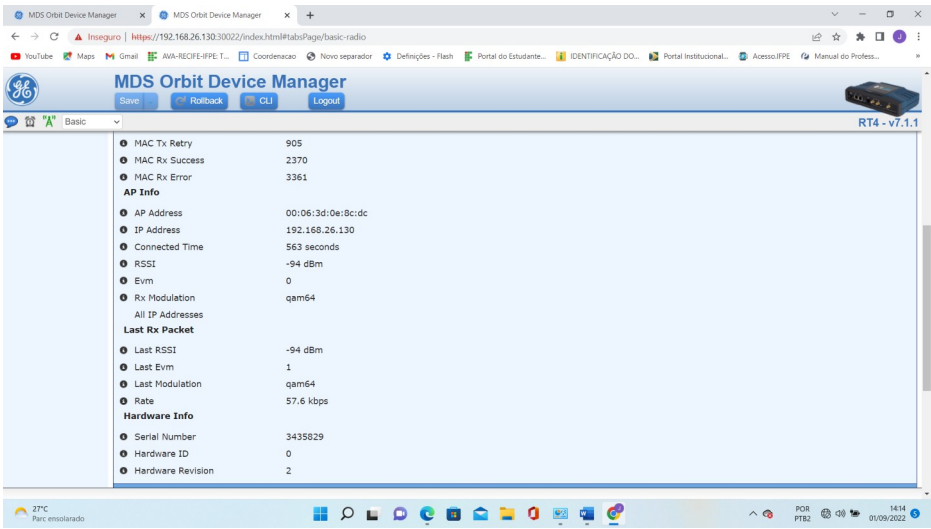
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 118- RSSI obtido na remota da RT4



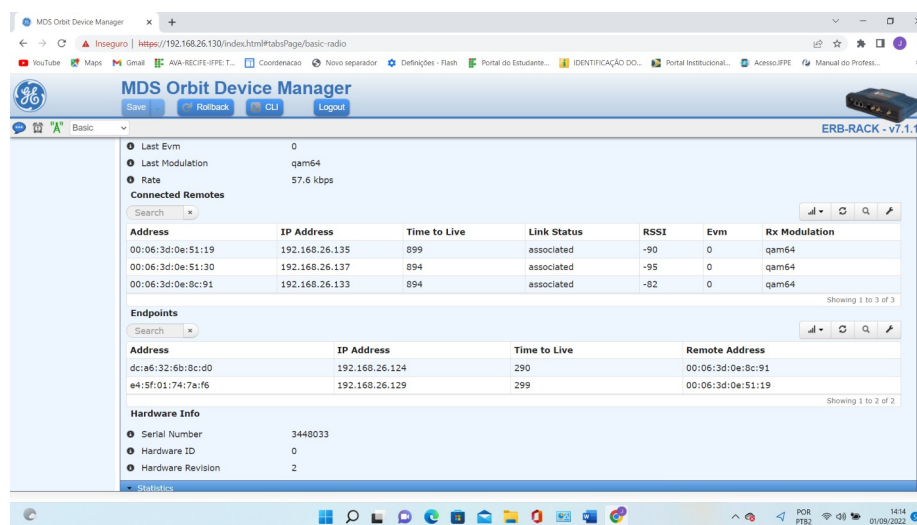
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 119- RSSI obtido na remota da RT4 nova tentativa



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 120- RSSI obtido na ERB para acesso a RT4 nova tentativa

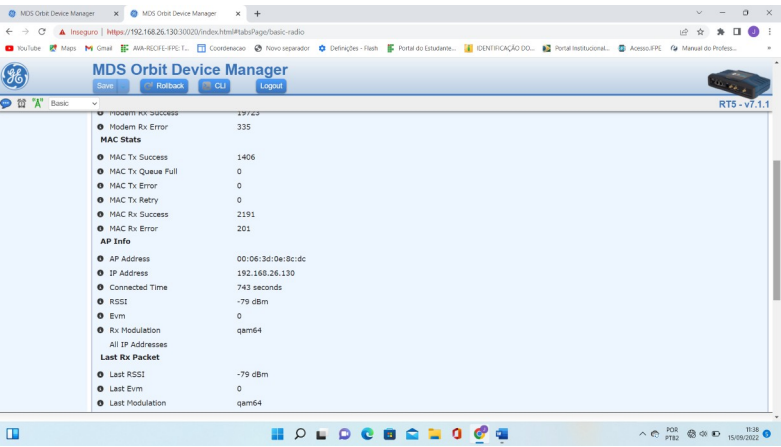


Fonte: Acervo do autor (2023)

Após a conclusão das instalações das caixas remotas e os testes de curta distância próximo a casa que abriga a ERB, foram iniciados os testes de acesso às caixas remotas utilizando o arranjo de antenas, com experimentos de comutação dos lóbulos controlados por CAT. Na captura de tela do rádio, apresentada na Figura 120, é possível observar o valor de RSSI da RT5.

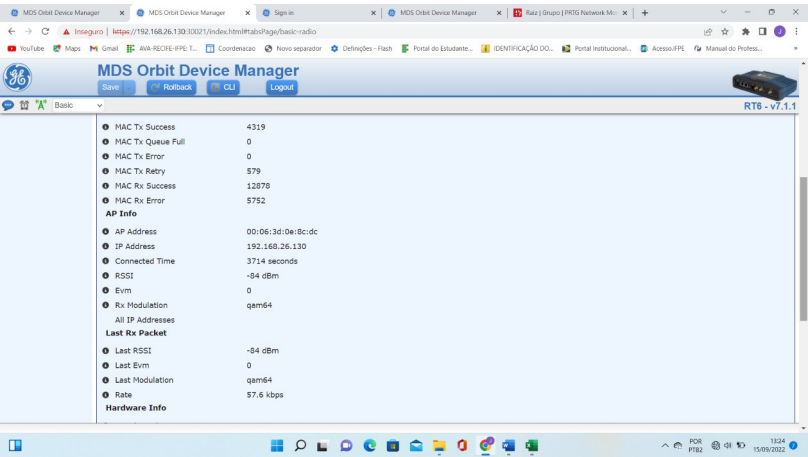
Quando é realizado o direcionamento do lóbulo para 120 graus é possível ter o acesso a RT6 conforme a captura do *print* do rádio apresentado na Figura 121, onde podemos visualizar o valor de RSSI. É possível visualizar no rádio da ERB que o valor de RSSI para RT5 está praticamente desconectado conforme a Figura 122. Na Figura 123 é apresentado o relatório dos testes de conectividade e a perda de pacotes para RT6. Percebe-se que é possível verificar que todos tiveram sucesso e a perda de pacotes foi inferior 1% para duas horas de medição. Ainda é possível observar que, quando foi realizada a comutação do lóbulo, o relatório do PRTG apresentou perda de acesso a RT5 conforme mostrado na Figura 124.

Figura 121- RSSI da RT5 utilizando o arranjo 1



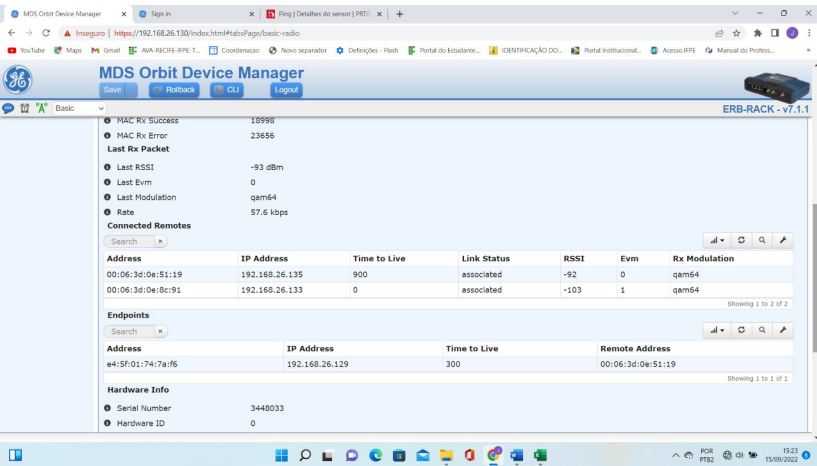
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 122- RSSI da RT6 utilizando o arranjo 1



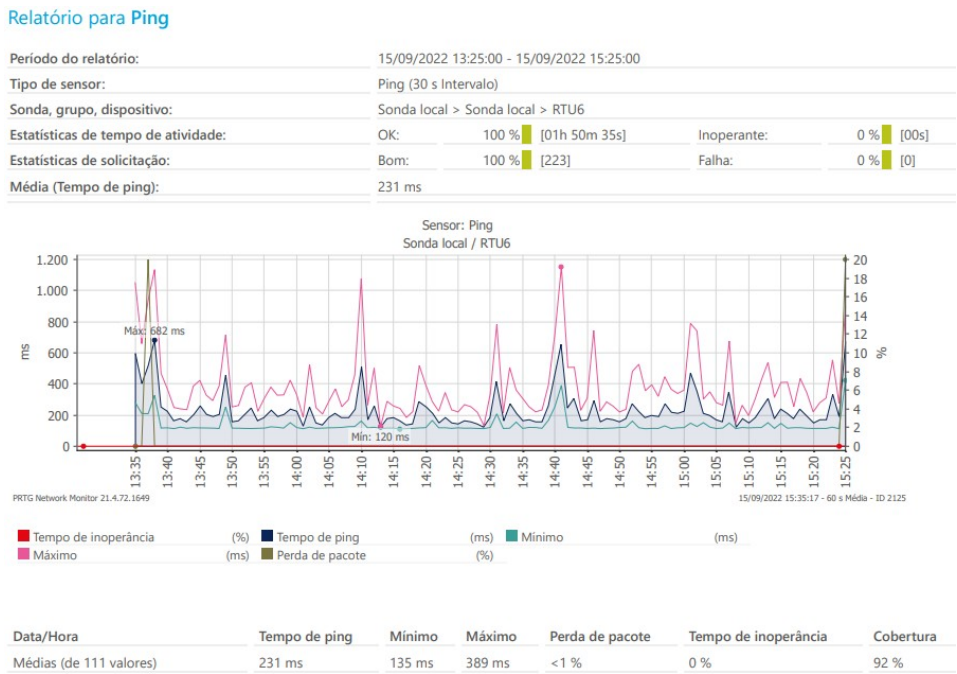
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 123- RSSI na ERB para as RT5 e RT6 utilizando o arranjo 1



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 124- Relatório do PRTG para o acesso a RT6



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 125- Relatório do PRTG para o acesso a RT5



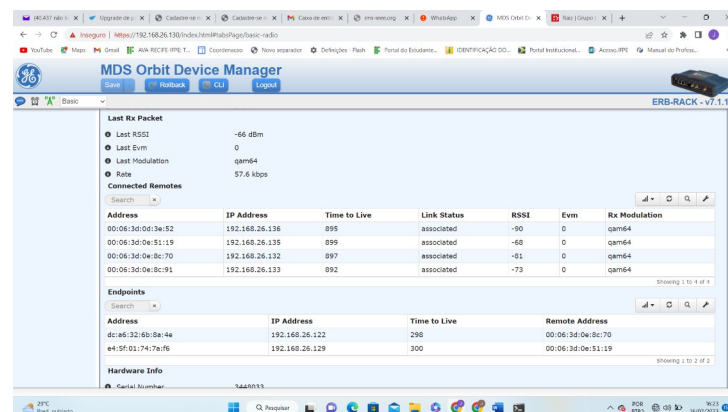
Fonte: Acervo do autor (2023)

Foi realizada uma avaliação empregando o arranjo 2, configurando o rádio em 28 dBm e direcionando para 60 graus, possibilitando a associação de quatro RTs, conforme ilustrado na Figura 125. Durante este teste, registramos o *print* com os dados do Rádio ERB.

Posteriormente, foi ajustado o ângulo do rádio para 70 graus, mantendo a configuração para uma medição. Conforme ilustrado na Figura 126, foi observado um aumento nos valores de RSSI para RT2 e RT6, acompanhado por um declínio nos valores de RSSI para RT3 e RT5.

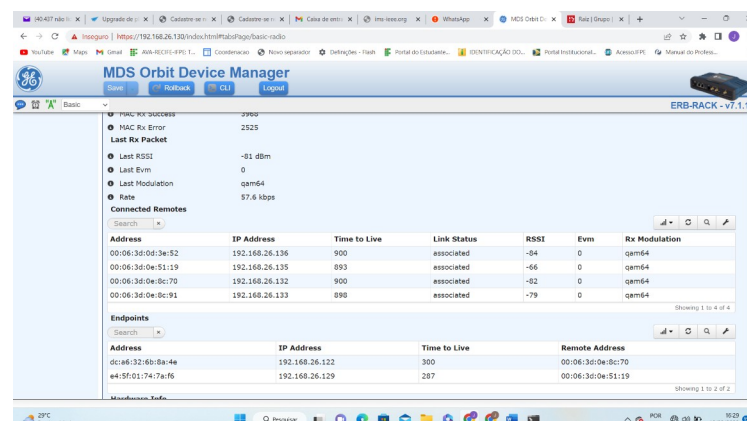
A Figura 127, fornece uma *print* do rádio da ERB, demonstrando os valores RSSI quando o foi comutado para 80 graus. Além disso, a Figura 128 documenta outro conjunto de dados, mantendo condições de configuração idênticas já utilizada nos testes descritos nessa sessão, mas apontando para o ângulo para 90 graus. Um resumo dos resultados está tabelado na Tabela 19.

Figura 126- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 60 graus



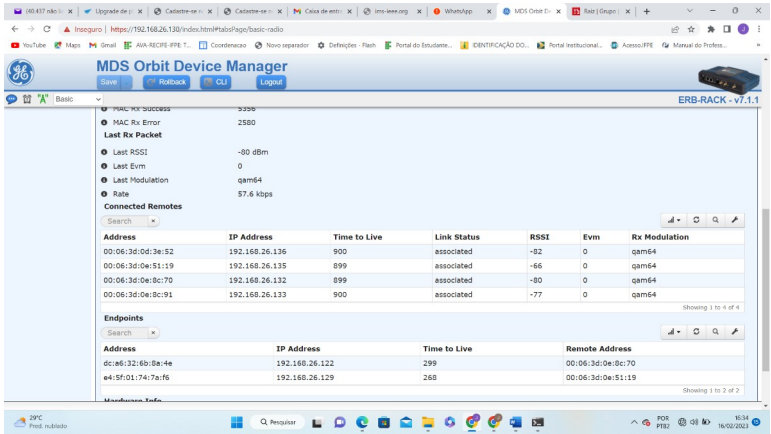
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 127- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 70 graus



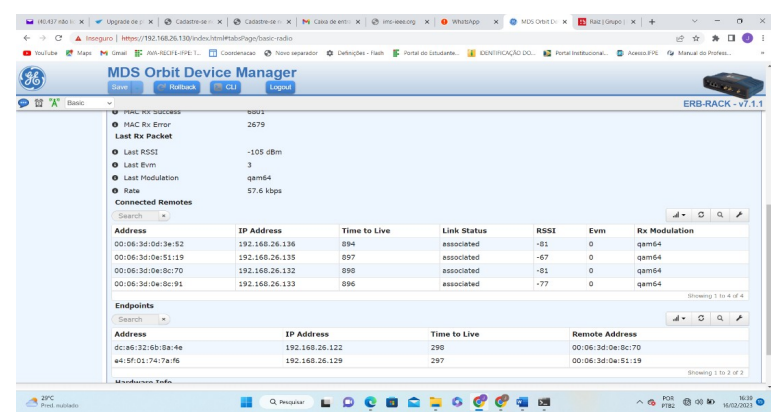
Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 128- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 80 graus



Fonte: Acervo do autor (2023)

Figura 129- Print do rádio da ERB para o arranjo 2 em 90 graus



Fonte: Acervo do autor (2023)

Tabela 19: Endereços IPs dos rádios da RTs

RTs	Endereço IP	RSSI 60 ⁰	RSSI 70 ⁰	RSSI 80 ⁰	RSSI 90 ⁰
RT2	192.168.26.136	- 90 dBm	- 84 dBm	- 82 dBm	- 81 dBm
RT3	192.168.26.132	- 81 dBm	- 82 dBm	- 80 dBm	- 82 dBm
RT5	192.168.26.133	- 73 dBm	- 79 dBm	- 77 dBm	- 76 dBm
RT6	192.168.26.135	- 68 dBm	- 66 dBm	- 66 dBm	- 67 dBm

Fonte: Acervo do autor (2023)

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese de doutorado é apresentado um sistema de antenas inteligente comutada automatizada pelo controlador de arranjo de antenas (CAT) projetado para melhorar a comunicação entre o Centro Integrado de Operações (COI) de uma concessionária de distribuição de energia elétrica e suas estações remotas, especificamente para dispositivos IEDs, como medidores de energia, concentradores de medidores de energia, reguladores de tensão e chaves religadoras. O sistema compreende um circuito formador de feixe (CFF), um controlador de arranjo de antenas (CAT), sendo este responsável pelo controle e automação dos parâmetros do CFF, e dois arranjos de antenas, cada uma com quatro antenas comerciais Yagi-Uda capazes de cobrir uma faixa angular de 180° . Os dois arranjos de antenas juntos podem oferecer uma cobertura completa de 360° .

A implementação do sistema envolveu testes em fases, destacando a evolução ao longo do desenvolvimento desta tese de doutorado. Para validar as métricas de desempenho do CAT, foram realizadas medições iniciais de envio e confirmação de recebimento de pacotes, apresentando resultados estatísticos do desempenho do *software* executado no CAT.

Para otimizar as excitações da antena, foi empregado o método *Particle Swarm Optimization* (PSO). Foi selecionados os ângulos objetivos arbitrários de 20° , 60° , 80° , 100° e 135° para validar o sistema proposto. No entanto, o PSO enfrentou limitações ao apontar para uma direção de feixe de 30° , devido aos elementos refletoras da grade das antenas Yagi-Uda que restringem a distância entre os elementos do arranjo. Para superar isso, foi introduzido um novo designer ao de arranjo de antenas, inclinando as antenas mais extremas em 70° lateralmente.

A validação do sistema incluiu medições de padrão de radiação em ambiente de campo aberto para isso foi utilizado o campo de futebol do IFPE, onde foi utilizada uma configuração de medição composta por um CFF provisório, um CAT, arranjo de antenas e cabos coaxiais. O CFF apresentou um divisor de potência, atenuadores e defasadores controlados digitalmente, todos automatizado pelo CAT, que forneciam parâmetros garantindo que a estrutura mantivesse a amplitude e fase dos parâmetros PSO normalizados.

Os resultados dos padrões de radiação simulados e medidos demonstraram excelente concordância, indicando a eficácia do PSO na otimização do lóbulo principal do padrão de radiação na direção desejada, minimizando os lóbulos laterais. Os ganhos simulados variaram

de 10,49 dBi a 14,17 dBi, superando significativamente o ganho de 6 dBi proporcionado pelo atual arranjo de antenas empregado pela concessionária de energia.

Com base nesses resultados promissores obtidos nos experimentos descritos nesta tese de doutorado, foi submetido o artigo “Control and Optimization of a Smart Antenna Array by PSO” ao International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, que foi aprovado e publicado no site da revista.

Ao permitir o direcionamento preciso do lóbulo principal do conjunto em estações remotas e ao mesmo tempo reduzir a rejeição de interferências, este sistema aumentou a densidade de potência dos sinais transmitidos. Esta melhoria na densidade de potência contribuiu diretamente para uma melhor relação sinal-ruído sem a necessidade de aumentar a potência de entrada.

O sistema foi completamente montado e instalado na UFPE e foram realizados testes de funcionamento contínuo. No contexto do teste de temperatura, os componentes tiveram um desempenho muito bom, permanecendo bem abaixo dos limites superiores de temperatura especificados na *datasheet*.

Da mesma forma, os testes de transmissão de dados e medição de perda de pacotes não apenas atenderam, mas superaram as expectativas de desempenho, sustentando com sucesso dos testes ininterruptos ao longo de 24 horas.

Ainda a respeito dos testes de robustez que duraram 14 horas consecutivas, o arranjo de antena inteligente suportou variações substanciais de atenuação (-20dB a -32dB) em seus atenuadores digitais, produzindo um resultado de desempenho muito promissor de apenas 1% de taxa média de perda de pacotes. Para analisar melhor o desempenho, foram aproveitados os dados sobre tempos de transmissão de pacotes, configurações de atenuadores e taxas de transmissão. Foram aplicadas duas técnicas de regressão, *Decision Tree* e *Random Forest*, revelando que ambas as técnicas apresentam uma previsão de perda de pacotes coerente com as medições realizadas, melhorando nossa compreensão do comportamento do sistema. Com os resultados obtidos foi submetido o artigo *Precoded Supervising System Based on Smart Antenna Array for Electric Power Distribution Grid: Optimization Aspects*”, na conferência International Microwave Symposium, em San Diego, CA que foi aceito e publicado nos anais dessa conferência.

Além dessas técnicas, foi utilizada uma rede neural MLP para também prever a perda de pacotes baseados nos parâmetros e índices do sistema.

Além da verificação do desempenho e perfeito funcionamento do sistema de arranjo de antenas inteligentes, ele foi submetido a grandes variações forçadas de atenuação que se estenderam por 14 horas no campus da UFPE, durante as quais todo o sistema de antenas inteligentes foi rigorosamente avaliado. Esta avaliação abrangente teve como objetivo aferir o desempenho do sistema na transmissão contínua de pacotes, mesmo quando sujeito deliberadamente a diversas atenuações.

A grande contribuição desta tese reside na inovação proporcionada pela detecção de perda de pacotes em um sistema de arranjo de antenas inteligentes. Até o momento da escrita desta tese, não dispomos de uma *probe* única capaz de efetuar a medição e previsão de perda de pacotes na interface aérea de um sistema de arranjo de antenas inteligentes, conforme proposto neste estudo. A impossibilidade de montar o sistema completo em uma sala de laboratório devido ao seu tamanho impede a realização completa de todos os testes, os quais só podem ser conduzidos em condições reais de operação em uma rede inteligente de uma concessionária de distribuição de energia. Isso se deve à diversidade das variáveis ambientais presentes na instalação do sistema, como as características específicas das zonas urbanas e o relevo das áreas rurais.

O sistema foi encapsulado em módulos em gabinetes de serviço e foi instalado e testado na subestação de Suape sobre condições reais, onde obteve um bom funcionamento e um desempenho na transmissão de pacotes para as caixas remotas. Foram realizados os testes de comutação dos de ângulos onde, foi possível verificar o funcionamento esperado.

Dados os resultados promissores e as vantagens inerentes de um sistema de antenas inteligentes, esta proposta oferece uma abordagem viável para gerenciamento de estações remotas de empresas de energia sem a necessidade de instalações adicionais de repetidores.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como pesquisas futuras com o sistema de antenas inteligentes é possível propor a utilização de outros algoritmos evolucionários para buscar a otimização do diagrama de radiação. Essa proposta já vem sendo trabalhada no artigo "Yagi-Uda Antenna Array Gain Optimization by the PSO and ES Algorithms", submetido e aceito para publicação no IEEE explorer do IEEE MTT-SE SBMO 20th International Microwave and Optoelectronics Conference.

Também é viável sugerir um estudo de compatibilidade eletromagnética no circuito de formação de feixe.

Propor um sistema de *feedback* a respeito do desempenho do sistema, onde este seria baseado nos parâmetros e índices do sistema de antenas inteligentes utilizando redes neurais. Utilizar algoritmos de aprendizado de máquina para prever perda de pacotes.

Estamos trabalhando no desenvolvimento de um artigo intitulado “*Optimizing Reflectometry Analysis using a Linear Attenuator*”.

7.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO

Durante o doutorado, tivemos a oportunidade de participar como pesquisador do projeto de pesquisa firmado entre a UFPE e o grupo NEOENERGIA, para isso pude utilizar as instalações do laboratório de micro-ondas da UFPE. Durante a pesquisa, publiquei no Simpósio de Brasileiro de Micro-ondas o artigo *Chave SPDT por ressoadores acoplados de malha aberta para a banda de UHF*. Também colaborei com a pesquisa de outros alunos que tiveram artigos publicados. Submeti o artigo *Control and Optimization of a Smart Antenna Array by PSO* ao *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* que já se encontra publicado. Além disso exerço a função de professor de ensino básico técnico e tecnológico no IFPE na área de telecomunicações, ministrando as disciplinas fundamentos de redes, protocolos de comunicações e roteamentos, componentes ativos de rede e telefonia VoIP.

7.3 ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

J. M. A de Oliveira, D. L. de Melo, C. P. do N. Silva, A. J. Belfort de Oliveira, A. F. L. Alves da Silva, A. Gomes Barboza, D. de Filgueiras Gomes, M. T. de Melo, B. A. Kleinau, R. J. F. P. V. de Almeida. Control and Optimization of a Smart Antenna Array by PSO.

B. A. Kleinau, D. L. de Melo, M. T. de Melo, D. C. P. Barbosa, A. J. B. Oliveira, C. P. N. Silva, **J. M. A. M. de Oliveira**, "Application of the Base Transceiver Station with Smart Antennas in the Power Distribution Sector. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6621116>.

7.4 ARTIGOS EM CONFERÊNCIA

J. M. A. M. Oliveira, C. P. do N. Silva, D. L. de Melo, J. P. R. Carvalho, D. L. S. do Nascimento, J. P. B da Silva, D. de F. Gomes, A. J. B de Oliveira e M. T. de Melo, B. A. Kleinau e R. J. F. P. V. de Almeida. Chave SPDT por ressoadores acoplados de malha aberta para a banda de UHF Em: MOMAG 2020 Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica / Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Rio de Janeiro, 2020. Anais do MOMAG 2020.

D. L. de Melo, C. P. do N. Silva, **J. M. A de Oliveira**, D. L. S. do Nascimento, A. F. L. Alves da Silva, A. Gomes Barboza, M. T. de Melo, D. de Filgueiras Gomes, A. J. Belfort de Oliveira, B. A. Kleinau, R. J. F. P. V. de Almeida. Optimization of an array of smart antennas using PSO for the monitoring of electrical power switches In: 2021 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC), 2021, Cali, Colombia.

C. do Nascimento Silva, D. L. de Melo, **J. M. A de Oliveira**, A. Lins Alves da Silva, A. J. Belfort de Oliveira, A. Gomes Barboza, D. L. S. do Nascimento, D. de Filgueiras Gomes e M. T. de Melo., "Analysis of a Linear Modified Yagi-Uda array using Particle Swarm Optimization for the Radiation Pattern Synthesis," 2021 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS), Tel Aviv, Israel, 2021, pp. 395-400, doi: 10.1109/COMCAS52219.2021.9629056.

D. F. Gomes, A. G. Barboza, C. P. N. Silva, **J. M. A. de Oliveira**, A. J. B. Oliveira, M. T. de Melo, B. A. Kleinau e R. J. F. P. V. Padilha. Phased Array Control System for TCP/IP Communication Em: 2022 SBMO 20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2021, Natal 2022. Anais do SBMO 2022.

D. L. de Melo, C. P. do N. Silva, **J. M. A de Oliveira**, A. Gomes Barboza, J. H. de A. Dias Silva, M. F. Bitencourt Pedrosa, M. T. de Melo, D. de Filgueiras Gomes, A. J. Belfort de Oliveira, B. A. Kleinau and R.J.F.P. V. de Almeida. Intelligent beamforming and control circuits research applied to the electric power distribution for the last 10 years in Brazil Em: 2022 SBMO 20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2021, Natal 2022. Anais do SBMO 2022.

J. M. A. de Oliveira, A. Gomes Barboza, R. G. M. dos Santos, M. de Oliveira Alencar, J. H. de A. Dias Silva, M. F. Bitencourt Pedrosa, D. F. Gomes, J. B. Oliveira, M. T. de Melo. "Precoded Supervising System Based on Smart Antenna Array for Electric Power Distribution Grid: Optimization Aspects", International Microwave Symposium, San Diego, CA IMS 2023.

R. G. M. dos Santos, D. F. Gomes, **J. M. A. de Oliveira**, L. R. G. S. Lourenço Novo, M. T. de Melo, J. B. Oliveira, B. A. Kleinau, V. L. Tarrago. "Yagi-Uda Antenna Array Gain Optimization by the PSO and ES Algorithms", International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2023), Castelldefels, Barcelona.

H. V. H. Silva Filho, **José Mario A. M. Oliveira**, A. G. Barboza, L. M. da Silva, M. T. de Melo, D. C. P. Barbosa, L. R. G. S. Lourenço Novo, R. G. M. dos Santos, V. L. Tarrago. "Bandpass filter using open loop microstrip resonators for a power substation eyebolt fault detection system", International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2023), Castelldefels, Barcelona.

Jorge Antonio de Isasa Araujo, Douglas C. P. Barbosa, Amanda Gomes Barboza, Ignacio Llamas-Garro, Pedro Henrique B. Cavalcanti Filho, Camila da S. Cavalcanti, M. T. de Melo, **J. M. A. de Oliveira**. “Analysis of a Microwave Filter Parameters for Design Optimization Via Machine Learning”, International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2023), Castelldefels, Barcelona

7.5 PATENTE DEPOSITADA

Belfort, A.; Gomes, D. F.; C.P. do N. Silva; **Oliveira, J. M. A.**; Barbosa, A. G.; Almeida, R. J. F. P. V.; Kleinau, B. A.; De Melo, M. T. SISTEMA INTELIGENTE FORMADOR DE FEIXE, APLICADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2022, Brasil.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR13202201227, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 20/06/2022. Instituição(ões) financiadora(s): Aneel e Neoenergia.

REFERÊNCIAS

- ¹SANTOS, M. R. et al. A Smart Antenna System for Remote Supervision. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, [S.l.], v. 45, n. 1-4, p. 293-299, 2014. DOI: 10.3233/jae-141843.0
- ²OLIVEIRA, B. G. M. *et al.* Switched Smart Antenna System for SCADA Telesupervision and Telecontrol Systems. In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE & OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC), 2013, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013, p. 1-4. DOI: 10.1109/imoc.2013.6646466.
- ³OLIVEIRA, J. M. A. M. *et al.* Control and Optimization of a Smart Antenna Array by PSO. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, [S.l.], v. 70, n. 2, p. 109-127, 2022. DOI: 10.3233/JAE-210116.
- ⁴VASAVADA, Y. ; REED, J. H. Amplitude and Phase Calibration of Antenna Arrays. In: IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND RF CONFERENCE (IMARC), 2017, Ahmedabad, India, **Anais eletrônicos...** Ahmedabad, India, 2017, p. 1-5, DOI: 10.1109/IMaRC.2017.8449721.
- ⁵PENG W *et al.* An Improved Gain-phase Error Self-Calibration Method for Robust DOA Estimation. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 105-113, 2019. doi:10.1017/S1759078718001575.
- ⁶KATIRCIOĞLU, O. *et al.* Comparing Ray Tracing, Free Space Path Loss and Logarithmic Distance Path Loss Models in Success of Indoor Localization with RSSI. In: TELECOMMUNICATIONS FORUM (TELFOR) PROCEEDINGS OF PAPERS, 19., 2011, **Anais eletrônicos...** Belgrade, Serbia, 2011, p. 313-316. DOI: 10.1109/TELFOR.2011.6143552.
- ⁷HAYKIN, S. O; MOHER, M. **Modern Wireless Communications**. 1. ed. [S.l.] Pearson India, 2011. ISBN-10: 0-13-022472-3.
- ⁸JUNIOR LIBERTI, C. RAPPAPORT, T. S. **Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications**. 1.ed. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- ⁹BALANIS, C. A. **Antenna Theory – Analysis and Design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- ¹⁰RAO, T. N.; RAO, V. S. Evaluation of MUSIC Algorithm for a Smart Antenna System for Mobile Communications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVICES, CIRCUITS AND SYSTEMS (ICDCS), 2012, Coimbatore, India. **Anais eletrônicos...** Coimbatore, India: IEE, 2012, p. 67-71. DOI: 10.1109/ICDCSyst.2012.6188676.
- ¹¹CHANG, D.; HU, C. Smart Antennas for Advanced Communication Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 7, p. 2233–2249, 2012. DOI: 10.1109/jproc.2012.2187409.
- ¹²LIU, H., GAO, S.; LOH, T. Small Director Array for Low-Profile Smart Antennas Achieving Higher Gain. **IEEE transactions on antennas and propagation**, [S.l.], v. 61, n. 1, p. 162-168, 2013. DOI: 10.1109/TAP.2012.2219841.

- ¹³HANSEN, N.; ARNOLD, D.V.; AUGER, A. **Evolution Strategies**. In: KACPRZYK, J., PEDRYCZ, W. (eds) Springer Handbook of Computational Intelligence. Springer Handbooks. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_44.
- ¹⁴LAMBORA, A.; GUPTA, K.; CHOPRA, K. Genetic Algorithm- A Literature Review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, BIG DATA, CLOUD AND PARALLEL COMPUTING (COMITCON), 2019, Faridabad, India. **Anais eletrônicos...** Faridabad, India: IEEE, 2019, p. 380-384. DOI: 10.1109/COMITCon.2019.8862255.
- ¹⁵KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. In: ICNN'95 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1995, Perth, WA, Australia. **Anais eletrônicos...** Perth, WA, Australia: IEEE, [2002], p. 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- ¹⁶FREITAS D.; LOPES L. G; MORGADO-DIAS F. Particle swarm optimisation: a historical review up to the current developments. **Entropy**, v. 22, n. 3, p. 362, 2020. DOI:10.3390/e22030362.
- ¹⁷JAIN, N. K.; NANGIA, U.; JAIN, J. A Review of particle swarm optimization. **Journal of The Institution of Engineers**, India, Series B, v. 99, n.4, p. 407–411, 2018. DOI: 10.1007/s40031-018-0323-y.
- ¹⁸GREDA, L. A. *et al.* Beamsteering and beamshaping using a linear antenna array based on particle swarm optimization. **IEEE Access**, [S.l.], v. 7, p. 141562-141573, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944471.
- ¹⁹KHODIER, M.; AL-AQIL, M. Design and optimisation of yagi-uda antenna arrays. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 4, n. 4, p. 426, 2010. DOI:10.1049/iet-map.2009.0054.
- ²⁰MELO, D. L. *et al.* Optimization of an array of smart antennas using pso for the monitoring of electrical power switches. In: IEEE MTT-S LATIN AMERICA MICROWAVE CONFERENCE, 2021, Cali, Colombia. **Anais eletrônicos...** Cali, Colombia: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/LAMC50424.2021.9602041.
- ²¹KLEINAU, B. A. *et al.* Application of the Base Transceiver Station with Smart Antennas in the Power Distribution Sector. **International Journal of Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 2021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6621116>.
- ²²HASSAN, R. *et al.* A Comparison of Particle Swarm Optimization and the Genetic Algorithm. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 46., 2005, Austin. **Anais eletrônicos...** Austin, Texas: AIAA, 2005, p.18-25. doi.org/10.2514/6.2005-1897.
- ²³KACHITVICHYANUKUL, V. Comparison of Three Evolutionary Algorithms: GA, PSO, and DE. **Industrial Engineering and Management Systems**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 215–223, 2012. DOI:10.7232/iems.2012.11.3.215.
- ²⁴XU, Q. *et al.* On formulating and designing antenna arrays by evolutionary algorithms. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 69, n. 2, p. 1118-1129, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2020.3016181.

- ²⁵ YE, T. *et al.* Neural Network-Based Phase Estimation for Antenna Array Using Radiation Power Pattern. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, [S.l.], v. 21, n. 7, p. 1348-1352, 2022. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3167697.
- ²⁶ ARBOSA, D. C. P. **Diagnóstico de falhas estruturais em hastes de âncora por meio da análise de sinais eletromagnéticos por ferramentas de inteligência artificial**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38903>.
- ²⁷ HAYKIN, S. *Redes Neurais: princípios e práticas*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- ²⁸ Gao, J. *et al.* SCADA Communication and Security Issues. *Security and Communication Networks*, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 175-194, 2013. DOI: doi.org/10.1002/sec.698.
- ²⁹ OLIVEIRA, E. M. P. **Desenvolvimento de sistema inteligente de controle de arranjo de antenas para aplicação no sistema celpe**. 2016. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/1827>.
- ³⁰ GOMES, D. F. *et al.* Phased Array Control System for TCP/IP Communication. In: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica Program SBMO, 20., 2022, Natal. **Anais eletrônicos...** Natal, RN: UFRN, 2022.
- ³¹ ARORA. R. K. **Optimization: Algorithms and Applications**, 1.ed.CRC Press, New York: Chapman e Hall/CRC, 2015. DOI: doi.org/10.1201/b18469.
- ³² SHI, Y.; EBERHART, R. A modified Particle Swarm Optimizer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION PROCEEDINGS. IEEE WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (Cat. No.98TH8360), Anchorage, 1998. **Anais eletrônicos...** Anchorage, AK, USA: IEEE, [2002]. p. 69-73, DOI: 10.1109/ICEC.1998.699146.
- ³³ ROBINSON, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Particle Swarm Optimization in Electromagnetics. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 52, n. 2, p. 397-407, 2004. DOI:10.1109/tap.2004.823969.
- ³⁴ JIN, N.; RAHMAT-SAMII, Y. Particle Swarm Optimization for Antenna Designs in Engineering Electromagnetics. **Journal of Artificial Evolution and Applications**, [S.l.], p. 1–10, 2008. DOI:10.1155/2008/728929.
- ³⁵ J. W. BANDLER. Optimization Methods for Computer-Aided Design. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, [S.l.], v. 17, n. 8, p. 533-552, 1969. DOI: 10.1109/TMTT.1969.1127005.
- ³⁶ YEUNG, S. H. *et al.* Computational Optimization Algorithms for Antennas and RF/Microwave Circuit Designs: An Overview. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 216-227, 2012. DOI: 10.1109/TII.2012.2186821.
- ³⁷ DEB, A.; ROY, J. S.; GUPTA, B. Performance Comparison of Differential Evolution, Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm in the Design of Circularly Polarized Microstrip Antennas. **Transactions on Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 62, n. 8, p. 3920-3928, 2014. DOI:10.1109/TAP.2014.2322880.

- ³⁸ MOHAB, M.; HASSAN, E. Antenna Array Pattern Synthesis and Wide Null Control Using Enhanced Particle Swarm Optimization. **Progress In Electromagnetics Research B.**, [S.l.], v. 17, p. 1-14, 2009. DOI:10.2528/PIERB09070205
- ³⁹ JIAN-FENG, L.; BAO-HUA, S.; QI-ZHONG, L. PSO - based optimization of broadband antenna array for space-division communication system. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS, PROPAGATION AND EM THEORY, 8., 2008, China. **Anais [...]**. China: IEEE, 2008. DOI:10.1109/isape.2008.4735206.
- ⁴⁰ AHMED, M.; MAHMOUD, K. R.; SAYED, S. Cooperative Communications Based on Smart Antenna Systems Using PSO Algorithm. *In*: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM PROCEEDINGS, 34., 2013, Taiwan. **Anais [...]**. Taiwan: Piers Proceedings, 2013.
- ⁴¹ SOUTO, V. D. P.; CAMPOS, A.; GOMES, N. Otimização dos Lóbulos Secundários de um Arranjo Linear de Antenas Utilizando a Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. **Revista Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 20, n. 36, jun. 2017. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialoptimiz/default.asp>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ⁴² SILVA, C. N. *et al.* Analysis of a Linear Modified Yagi-Uda array using Particle Swarm Optimization for the Radiation Pattern Synthesis. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVES, ANTENNAS, COMMUNICATIONS AND ELECTRONIC SYSTEMS, 2021, Tel Aviv. **Anais [...]**. Tel Aviv: IEEE, 2021. DOI:10.1109/COMCAS52219.2021.9629056.
- ⁴³ RATNAWEERA, A.; HALGAMUGE, S. K.; WATSON, H. C. Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer with Time-Varying Acceleration Coefficients. **Transactions on Evolutionary Computation**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 240-255, jun. 2004. DOI:10.1109/TEVC.2004.826071.
- ⁴⁴ HONGXIA, P.; WEI X. Particle Swarm Optimization Algorithm with Adaptive Velocity and its Application to Fault Diagnosis. *In*: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2009. **Anais [...]**. Trondheim: IEEE, 2009. DOI:10.1109/CEC.2009.4983332.
- ⁴⁵ SHENHENG, X.; RAHMAT-SAMII, Y. Boundary Conditions in Particle Swarm Optimization Revisited. **Transactions on Antennas and Propagation**, [S.l.], v. 55, n. 3, p. 760-765, mar. 2007. DOI:10.1109/TAP.2007.891562.
- ⁴⁶ LEE, J. F.; SUN, D. K.; CENDES, Z. J. Tangential Vector Finite Elements for Electromagnetic Field Computation. **Transactions on Magnetics**, [S.l.], v. 27, n. 5, p. 4032-4035, set. 1991. DOI:10.1109/20.104986.
- ⁴⁷ HARRINGTON, R. F. The Method of Moments in Electromagnetics. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 181-200, 1987. DOI:10.1163/156939387x00018.

⁴⁸KUROSE, J.; ROSS, K. **Redes de Computadores e a Internet: uma abordagem top-down**. 5. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2010.

⁴⁹PAESSLER. **Welcome to Paessler Your IT & IoT monitoring experts since 1997**. Alemanha: Paessler, [202-?]. Disponível: <https://www.paessler.com/>. Acesso em: 14 out. 2023.

⁵⁰MINITAB. **We are Minitab**. [S.l.]: Minitab, [202-?]. Disponível em: <https://www.minitab.com/en-us/>. Acesso em: 14 out. 2023.

⁵¹ALI, J.; KHAN, R.; AHMAD, N.; MAQSOOD, I. Random forests and decision trees. **International Journal of Computer Science Issues**, [S.l.], v. 9, n. 5, p. 272, 2012.

⁵²PAVITHRAN, S.; VISWASOM, S.; KUMAR, S. K. S. Designing of a 5G Multiband Antenna Using Decision Tree and Random Forest Regression Models. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND INTEGRATED NETWORKS, 8., 2021, Noida. **Anais [...]** Noida: SPIN, 2021. p. 626-631. DOI:10.1109/SPIN52536.2021.9566117.

⁵³OLIVEIRA, J. M. A. M. *et al.* Precoded Supervising System Based on Smart Antenna Array for Electric Power Distribution Grid: Optimization Aspects. *In*: INTERNATIONAL MICROWAVE SYMPOSIUM, 20., 2023, San Diego. **Anais [...]**. San Diego: IMS, 2023.