

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO DO
CONHECIMENTO

LUIS PRACHEDIO DE ALENCAR JUNIOR

OTIMIZAÇÃO DOS CANAIS LICENCIADOS PARA O SISTEMA DE
RADIOCOMUNICAÇÃO DAS FORÇAS DE POLICIAMENTO MILITAR NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO

São Paulo

2026

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO DO
CONHECIMENTO

LUIS PRACHEDIO DE ALENCAR JUNIOR

OTIMIZAÇÃO DOS CANAIS LICENCIADOS PARA O SISTEMA DE
RADIOCOMUNICAÇÃO DAS FORÇAS DE POLICIAMENTO MILITAR NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Informática e Gestão do Conhecimento - PPGI.

Orientador: Prof. Dr. Peterson Adriano Belan

São Paulo
2026

Alencar Junior, Luis Prachedio de.

Otimização dos canais licenciados para o sistema de radiocomunicação das forças de policiamento militar na região metropolitana de São Paulo. / Luis Prachedio de Alencar Junior. 2026. 91 f.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2026.

Orientador (a): Prof. Dr. Peterson Adriano Belan.

1. Otimização multiobjetivo. 2. Comunicação de missão crítica. 3. Segurança pública. 4. Gestão de espectro.
- I. Belan, Peterson Adriano. II. Título.

CDU 004

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ao décimo terceiro dia do mês de agosto de dois mil e vinte e seis, às 10H00, do programa de Pós-Graduação, desta Universidade, reuniu-se em sessão pública a Comissão Julgadora da Dissertação de Mestrado de Luis Prachedio de Alencar Junior sob o título OTIMIZAÇÃO DOS CANAIS LICENCIADOS PARA O SISTEMA DE RÁDIOCOMUNICAÇÃO DAS FORÇAS DE POLICIAMENTO MILITAR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Integraram a comissão os professores: Prof. Dr. Peterson Adriano Belan (UNINOVE), o Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho - PPGCIS - UNINOVE, Prof. Dr. Sidnei Alves de Araújo - PPGI - UNINOVE, Prof. Dr. - sob a presidência do primeiro, orientador da dissertação. A banca examinadora, tendo decidido aceitar a dissertação, passou à arguição pública do candidato. Encerrados os trabalhos, os examinadores deram parecer final sobre a dissertação.

Parecer

Prof. Dr. Peterson Adriano Belan

Aprovado

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho

Aprovado

Prof. Dr. Sidnei Alves de Araújo

Aprovado

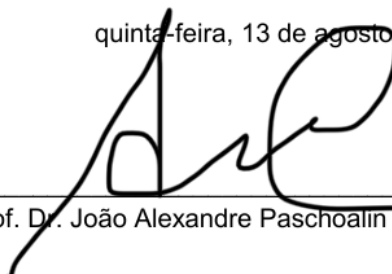
Parecer:

Em conclusão, o candidato foi considerado aprovado, no grau de Mestre em Informática e Gestão do Conhecimento. E, para constar, eu, Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz, diretor do Programa de Mestrado e Doutorado em Informática e Gestão do Conhecimento, lavrei a presente ata que assino juntamente com os membros da banca examinadora.

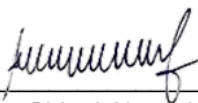
quinta-feira, 13 de agosto de 2026



Prof. Dr. Peterson Adriano Belan



Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho



Prof. Dr. Sidnei Alves de Araújo



Prof. Dr. André Felipe Henriques Librantz

Dedico este trabalho ao Dr. Carlos Sanches, chefe e grande incentivador, pela paixão e dedicação ao longo desta pesquisa e jornada acadêmica. À minha família, por vibrar comigo a cada etapa conquistada. E aos meus filhos, para que este empenho pelo conhecimento inspire o caminho de vocês.

AGRADECIMENTOS

À minha família: à minha querida esposa, Juliana, pelo incondicional incentivo, confiança, paciência e compreensão; e aos meus queridos filhos, Catarina e Vicente, que sempre estiveram ao meu lado. A força e o apoio de vocês foram a alavanca propulsora de todas as minhas conquistas.

Aos meus pais, Luis Prachedio e Fatima, pela base sólida, familiar e cristã desempenhada na nossa formação, e à minha irmã Paula, por construírem do nosso lar um refúgio acolhedor e seguro.

Ao meu círculo de convívio profissional na Emitter Tecnologias, especialmente aos chefes Carlos Sanches e André Salvagnini e ao gerente Agnaldo dos Santos, pelo constante incentivo e pela flexibilização dos horários de trabalho. Agradeço também aos amigos da empresa, que sempre estiveram ao meu lado oferecendo todo o suporte possível.

Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Peterson Adriano Belan, minha sincera gratidão pela paciência e dedicação incondicionais. Desempenhou o papel de orientador com maestria em cada etapa desta jornada, proporcionando cirurgicamente todo o conhecimento necessário para a realização desta pesquisa e a consolidação desta conquista.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento (PPGI), por todo o conhecimento transmitido, pela paciência e pelo suporte contínuo, fundamentais para a minha formação e para a condução deste trabalho.

Aos colegas de curso, expresso minha gratidão pela convivência, pelo aprendizado mútuo e pelo apoio constante em cada etapa dessa caminhada.

Por fim, expresso minha profunda gratidão a Deus pela presença constante em minha vida e pelo forte amparo dos mentores espirituais por Ele designados, sempre alinhados à árdua missão de ajudar. Agradeço também pela bondade divina em colocar companhias encarnadas fundamentais nos momentos certos ao longo desta jornada.

RESUMO

A crescente pressão sobre o espectro radioelétrico em grandes centros urbanos impõe desafios significativos às redes de comunicação de missão crítica, especialmente aquelas destinadas à segurança pública. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a elevada densidade populacional e o alto volume de operações policiais intensificam a ocupação das faixas utilizadas pela Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP), limitando a disponibilidade de canais e dificultando a expansão convencional da capacidade da rede. Diante desse cenário, este projeto de pesquisa propõe e avalia um modelo de otimização para redistribuição interna da carga entre os canais licenciados, com base em dados reais de ocupação espectral extraídos do sistema troncalizado. O problema é formulado como um modelo de otimização multiobjetivo e resolvido por meio do algoritmo NSGA-II, buscando reduzir picos de ocupação, melhorar o balanceamento entre canais e mitigar a probabilidade de espera (P_w), preservando os requisitos de qualidade de serviço (GoS) característicos de comunicações de missão crítica. Os resultados demonstram que a aplicação do modelo permite ganhos quantitativos no balanceamento da carga e na redução de situações críticas de ocupação, evidenciados pela redução da média de ocupação máxima de 87,4% para 47,3% (uma redução expressiva de 40,1 p.p.), evidenciando que parte das limitações observadas decorre de ineficiências operacionais e não exclusivamente de restrições estruturais do espectro. A pesquisa contribui ao propor uma abordagem de otimização interna aplicável a redes licenciadas de segurança pública sob alta ocupação, sem necessidade de ampliação da faixa ou migração tecnológica.

Palavras-chave: Otimização Multiobjetivo; Comunicação de Missão Crítica; Segurança Pública; Gestão de Espectro.

ABSTRACT

The increasing pressure on the radiofrequency spectrum in large urban centers poses significant challenges to mission-critical communication networks, particularly those dedicated to public safety. In the São Paulo Metropolitan Region (RMSP), high population density and the substantial volume of police operations intensify the occupation of lanes used by the Military Police of the State of São Paulo (PMESP), limiting channel availability and hindering conventional network capacity expansion. In this context, this dissertation proposes and evaluates an optimization model for internal load redistribution among licensed channels, based on real spectral occupancy data extracted from the trunked radio system. The problem is formulated as a multi-objective optimization model and solved using the NSGA-II algorithm, aiming to reduce peak channel occupancy, improve load balancing, and mitigate the probability of waiting (P_w), while preserving the quality of service (GoS) requirements characteristic of mission-critical communications. The results demonstrate that the application of the proposed model provides quantitative improvements in load balancing and reduces critical occupancy conditions, evidenced by the reduction of average maximum occupancy from 87.4% to 47.3% (a 40.1 percentage point reduction), indicating that part of the observed limitations arises from operational inefficiencies rather than exclusively from structural spectrum constraints. This research contributes by proposing an internal optimization approach applicable to licensed public safety networks operating under high occupancy, without requiring spectrum expansion or technological migration.

Key words: Multi-objective Optimization; Mission-Critical Communications; Public Safety, Spectrum Management.

Lista de Siglas

AG – Algoritmo Genético (Genetic Algorithm)

AI – *Artificial Intelligence* (Inteligência Artificial)

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

B5G – *Beyond 5G*

BAEP – Batalhão de Ações Especiais de Polícia

CA – *Carrier Aggregation* (Agregação de Portadoras)

COI – Centro de Operações Integradas

COPOM – Centro de Operações da Polícia Militar

CPA – Comando de Policiamento de Área

CR – *Cognitive Radio* (Rádio Cognitivo)

CRN – *Cognitive Radio Network* (Rede de Rádio Cognitivo)

CSV – *Comma-Separated Values*

CX – *Cycle Crossover*

DCI – Departamento de Comunicações e Informática

DE – *Differential Evolution*

DSS – *Dynamic Spectrum Sharing* (Compartilhamento Dinâmico de Espectro)

ERB – Estação Rádio Base

FCC – *Federal Communications Commission* (Comissão Federal de Comunicações – EUA)

GATE – Grupo de Ações Táticas Especiais

GaWC – *Globalization and World Cities Research Network* (Rede de Pesquisa Globalização e Cidades Mundiais)

GCD – *Group Call Duration*

GoS – *Grade of Service*

GTR800 – Modelo de repetidora da Motorola

HetNets – *Heterogeneous Networks* (Redes Heterogêneas)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IL – *Interval Length*

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

iTLBO – *Improved Teaching–Learning-Based Optimization*

ITU – *International Telecommunication Union* (União Internacional de Telecomunicações)

ITU-R – *ITU Radiocommunication Sector* (Setor de Radiocomunicações da ITU)

LAA – *Licensed Assisted Access* (Acesso Assistido Licenciado)

LCC – *Lost Call Cleared*

LCD – *Lost Call Delayed*

LMR – *Land Mobile Radio* (Rádio Móvel Terrestre)

LSA – *Licensed Shared Access* (Acesso Licenciado Compartilhado)

LTE – *Long Term Evolution*

LTE-U – *Long Term Evolution – Unlicensed* (Evolução de Longo Prazo – Não Licenciado)

MCPTT – *Mission Critical Push-to-Talk* (Push-to-Talk de Missão Crítica)

MIMO – *Multiple Input Multiple Output* (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)

ML – *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina)

NFV – *Network Function Virtualization* (Virtualização de Funções de Rede)

NR-U – *New Radio – Unlicensed* (Nova Rádio – Não Licenciado)

NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*)

Ofcom – *Office of Communications* (Escritório de Comunicações – Reino Unido)

O-RAN – *Open Radio Access Network* (Rede de Acesso por Rádio Aberta)

ORER – Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão (ANATEL)

OX – *Order Crossover*

P95 – Percentil 95

P99 – Percentil 99

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PDFF – Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências

PMX – *Partially Matched Crossover*

PPA – Plano Plurianual da União

PPO – *Proximal Policy Optimization*

PTT – *Push-to-Talk*

PU – *Primary Users* (Usuários Primários)

Pw – Probabilidade de Espera

QoS – *Quality of Service* (Qualidade de Serviço)

ROTA – Rondas Ostensivas Tobias de Aguiar

SAS – *Spectrum Access System* (Sistema de Acesso ao Espectro)

SBX – *Simulated Binary Crossover*

SDN – *Software Defined Networking* (Redes Definidas por Software)

SSP – Secretaria de Segurança Pública

SUs – *Secondary Users* (Usuários Secundários)

TLBO – *Teaching–Learning-Based Optimization*

TVWS – *TV White Spaces* (Espaços Brancos de TV)

UHF – *Ultra High Frequency* (Frequência Ultra Alta)

URLLC – *Ultra-Reliable Low Latency Communication* (Comunicação Ultra-Confíavel e de Baixa Latência)

VHF – *Very High Frequency* (Frequência Muito Alta)

ZDT – Conjunto de funções de benchmark multiobjetivo

3GPP – *3rd Generation Partnership Project* (Projeto de Parceria da Terceira Geração)

4G – *Fourth Generation Mobile Network* (Quarta Geração de Redes Móveis)

5G – *Fifth Generation Mobile Network* (Quinta Geração de Redes Móveis)

6G – *Sixth Generation Mobile Network* (Sexta Geração de Redes Móveis)

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Espectro eletromagnético.	25
Figura 2 – Regiões de Radiocomunicação da UIT.	27
Figura 3 – Atribuição de faixa de frequência no brasil em 2023.....	29
Figura 4 – Visualização da atribuição das faixas de VHF e UHF no Brasil.	30
Figura 5 – Visualização da estação/site em um sistema de radiocomunicação de segurança pública.	32
Figura 6 – Início da rádio patrulha em 1940.	33
Figura 7 – Representação de uma rede de radiocomunicação das forças de Policiamento.	34
Figura 8 – Sistema Digital Convencional.....	35
Figura 9 – Sistema Digital Troncalizado.	35
Figura 10 – Fronteira de Pareto.	42
Figura 11 – Comportamento do NSGA-II.	43
Figura 12 – População inicial.....	45
Figura 13 – População na geração 10.....	45
Figura 14 – População na geração 30.....	45
Figura 15 – População na geração 100.....	45
Figura 16 – Fluxograma do processo de coleta de dados do sistema.	52
Figura 17 – Anonimização dos pontos de repetição e espectro licenciado.	53
Figura 18 – Ciclo da comunicação chamadas de emergências policiais.	54
Figura 19 – Fluxograma do processo de consiladação dos dados para calculo Erlang C.....	58
Figura 20 – Representação cromossomica da população.	62
Figura 21 – Fluxo do processo de otimização multiobjetivo utilizando o NSGA-II.....	66
Figura 22 – Mediana dos picos de uso registrados nos canais dos sites.	69
Figura 23 – Mediana dos picos de duração de chamadas ocupadas/espera do site.	70
Figura 24 – Distribuição de probabilidade de espera por site.	71
Figura 25 – Dispersão da taxa de ocupação atual dos canais em cada site.....	73
Figura 26 – Dispersão da taxa de ocupação após a otimização dos canais em cada site.	75
Figura 27 - Uso máximo antes versus depois.	76
Figura 28 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização dos canais no site S31.	77
Figura 29 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização do canal 1 no site S31 no mês de maio.....	78
Figura 30 – Comparação do valor máximo antes de depois da otimização dos canais no site S38.	79
Figura 31 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização do canal 6 no site S38 no mês de abril.	79

Lista de Tabela

Tabela 2 – Classificação do espectro eletromagnético.....	25
Tabela 3 – Faixas de Frequência Definidas pela ITU-R para Radiofrequência e suas Aplicações.	26
Tabela 1 – Trabalhos Correlatos.	50
Tabela 4 – Base de dados “Canais”, contendo dados mínimos necessários.....	55
Tabela 5 – Base de dados “Sites”, contendo dados mínimos necessários	55
Tabela 6 – Dados tratados e padronizados para a otimização.....	70
Tabela 7 – Resultado obtidos após a otimização dos casos S31 e S38.....	81

Lista de Quadros

Quadro 1 – Descrição dos itens da base de dados “faixa de espectro”	55
Quadro 2 – Descrição dos itens da base de dados “Ocupado”	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. IDENTIFICAÇÃO DE LACUNAS E QUESTÃO DE PESQUISA.....	19
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA	20
1.3. PROBLEMA DE PESQUISA.....	21
1.4. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	21
1.5. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. RADIOFREQUÊNCIA.....	24
2.1.1. Espectro eletromagnético e radioelétrico.....	24
2.1.2. Radiocomunicação para o sistema de segurança pública.....	33
2.1.3. O princípio do sistema troncalizado	36
2.1.4. Organização das forças de segurança pública.	38
2.1.4.1. Estrutura Hierárquica e Administrativa	38
2.1.4.2. Articulação Territorial e Unidades Especializadas.....	39
2.1.4.3. Planejamento Estratégico e Gestão de Eventos.....	39
2.2. OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL	40
2.2.1. Otimização Multiobjetivo	41
2.2.2. NSGA-II: <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>	43
2.3. TRABALHOS CORRELATOS	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1. ESCOLHA E JUSTIFICATIVA DA TIPOLOGIA DA PESQUISA.....	51
3.2. COLETA E SELEÇÃO DOS DADOS.....	51
3.2.1. TRATAMENTO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS	58
3.2.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE CARGA. .	59
3.2.3. ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO (NSGA-II).....	61
3.2.4. PROCEDIMENTO GLOBAL DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS SITES	
64	
• IDENTIFICAÇÃO DAS INSTÂNCIAS	64
• CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA POR INSTÂNCIA	64
• EXECUÇÃO DO NSGA-II POR INSTÂNCIA	65
• SELEÇÃO DA SOLUÇÃO RECOMENDADA.....	65
3.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA	66
4. RESULTADOS	68

4.1. ANÁLISE DO PADRÃO DE USO DO ESPECTRO.....	68
4.2. DISTRIBUIÇÃO DA PROBABILIDADE DE ESPERA (P_w).....	71
4.3. IDENTIFICAÇÃO DE INEFICIÊNCIAS NO BALENCIAMENTO DOS CANAIS	72
4.4. POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO NO GERENCIAMENTO DO ESPECTRO	74
4.4.1. REDUÇÃO DO USO MÁXIMO DE CANAL.....	74
4.4.2. MELHORIA NA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA ENTRE CANAIS	80
5. CONCLUSÕES	83
6. REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

A competição pelo uso do espectro radioelétrico é um desafio global que afeta diversos setores, desde serviços de telecomunicações móveis até serviços de emergência (Lundborg, 2012; Parvini et al., 2022). O espectro é um recurso finito e essencial para a operação de inúmeros serviços de comunicação (Islam, Md Habibul et al. 2008; Ikami, Hayashi et al., 2020). No entanto, de acordo com a União Internacional de Telecomunicações (ITU), com a crescente demanda por largura de banda devido à expansão das redes móveis e telecomunicações privadas, os serviços de segurança pública (*first responders*) enfrentam dificuldades de disponibilidade e alocação de espectro (ITU-R, 2022; Patil et al., 2024).

A alocação ineficiente ou inadequadamente dimensionada dessas faixas pode comprometer a resposta a desastres naturais, atentados e operações policiais, uma vez que serviços de comunicação congestionados podem impedir a coordenação eficaz entre equipes de resgate, bombeiros e policiais. Isso representa um grande desafio, como destacado no Relatório ITU-R M.2291-2, que sublinha a necessidade de garantir o espectro necessário para as comunicações críticas (ITU-R, 2021).

No Brasil, determinadas subfaixas do espectro possuem destinação prioritária para aplicações de Proteção Pública e Defesa Civil (PPDR), enquanto outras operam sob regime de compartilhamento, conforme regras de coordenação estabelecidas pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). As subfaixas de 380–400 MHz e porções das faixas de 700/800 MHz figuram entre aquelas com regime de prioridade regulatória para comunicações críticas. Entretanto, outras faixas historicamente utilizadas por forças policiais não dispõem de exclusividade plena (ANATEL, 2023).

Entre essas, destaca-se a faixa de VHF alto (148–174 MHz), amplamente empregada por redes estaduais de radiocomunicação. Nessa banda, existem canais destinados administrativamente à segurança pública e a determinados órgãos federais, porém grande parte da faixa permanece compartilhada com serviços comerciais e institucionais como empresas de energia, transporte metroferroviário, óleo e gás e serviços de atendimento móvel de urgência conforme regulamentação vigente da Anatel. Essa configuração impõe limitações regulatórias e operacionais à

expansão do uso do espectro, especialmente em regiões metropolitanas densamente povoadas.

No Estado de São Paulo, a rede estadual da Polícia Militar opera historicamente em duas faixas principais: VHF alto e UHF. A adoção do VHF para cobertura de grandes áreas fundamentou-se em critérios técnicos consolidados. Frequências próximas a 170 MHz apresentam melhor propagação em ambiente aberto, maior alcance por estação, melhor desempenho para terminais portáteis de potência limitada e menor necessidade de densificação de sites, características particularmente vantajosas em um estado de grande extensão territorial.

Contudo, as mesmas propriedades físicas que favorecem a cobertura ampla também impõem restrições estruturais em ambientes urbanos densos. O maior alcance das estações em VHF reduz a possibilidade de reutilização espacial intensiva de frequências dentro da própria região metropolitana. Diferentemente de faixas mais altas, onde a maior atenuação permite reutilização mais agressiva em distâncias menores, no VHF alto a coordenação de canais exige maiores separações geográficas para evitar interferência co-canal e adjacente.

Além das restrições físicas de reutilização, há limitações regulatórias objetivas quanto à disponibilidade de novos canais. Estudos técnicos realizados na Região Metropolitana de São Paulo indicaram que, embora existam frequências formalmente licenciadas, parcela significativa da faixa encontra-se atribuída a outras entidades ou sujeita a restrições administrativas específicas, reduzindo a margem efetiva para ampliação convencional da rede. Levantamentos de ocupação espectral e análises de canalização evidenciaram que mesmo canais aparentemente livres encontram-se previamente consignados no sistema regulatório, exigindo coordenação adicional ou replanejamento institucional para eventual utilização.

A evolução histórica da rede reforça esse cenário. Em 2013, diante da indisponibilidade de canais adicionais em VHF e de alterações regulatórias promovidas pela Anatel, parte da rede da Capital migrou para a faixa de 800 MHz. Posteriormente, em 2019, com a necessidade de modernização do sistema e reorganização da infraestrutura metropolitana, a rede do Comando de Policiamento Metropolitano (CPM) foi reimplantada em VHF, mediante reorganização interna de frequências e cessão institucional de canais anteriormente cadastrados. Ainda assim, a configuração resultante opera com número finito de canais por site, tipicamente

composto por um canal de controle e cinco canais físicos de voz, o que limita a capacidade sob cenários de alta demanda simultânea.

Na Região Metropolitana de São Paulo, que concentra população superior a 20 milhões de habitantes (IBGE, 2025), a elevada densidade populacional e o intenso tráfego de voz operacional tornam o VHF alto particularmente concorrido. A coexistência com múltiplos serviços autorizados na mesma faixa, aliada ao crescimento contínuo da demanda operacional, restringe a disponibilidade efetiva de canais. Assim, observa-se a limitação prática na disponibilidade e redistribuição de canais em VHF, configurando fator restritivo à expansão convencional da rede nos moldes atuais.

Dessa forma, a problemática central envolve compreender em que medida os gargalos observados decorrem de restrições estruturais da infraestrutura existente ou se podem ser mitigados por meio de uma gestão mais eficiente dos recursos espectrais já licenciados em ambientes de alta demanda. Neste contexto, este trabalho investiga a dinâmica de uso da infraestrutura de comunicação troncalizada da Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP) na Região Metropolitana de São Paulo. Busca-se, assim, fundamentar análises e estratégias voltadas à elevação da eficiência operacional da rede frente às severas limitações de expansão do espectro.

1.1. IDENTIFICAÇÃO DE LACUNAS E QUESTÃO DE PESQUISA

No contexto da Região Metropolitana de São Paulo, onde a elevada densidade populacional e o volume de operações policiais intensificam a demanda por comunicações críticas, a limitação prática de canais nas faixas utilizadas pela Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP) evidencia a necessidade de análises específicas da ocupação espectral em regime de alta carga. A ausência de estudos quantitativos baseados em dados reais de uso desses canais licenciados dificulta o planejamento técnico da rede e fragiliza a tomada de decisão quanto à sua expansão ou reorganização (Scudeler & Guimarães 2012).

Neste cenário, a presente pesquisa identifica as seguintes lacunas:

Insuficiência de estudos voltados à otimização interna de canais licenciados em redes dedicadas de segurança pública: embora existam numerosos trabalhos sobre alocação dinâmica e compartilhamento de espectro para redes móveis comerciais ou

cenários de acesso oportunista, são escassas as pesquisas que tratam especificamente da reorganização e otimização de canais já licenciados, operando sob ocupação contínua e requisitos rigorosos de bloqueio em redes de missão crítica.

Ausência de modelagem aplicada à realidade operacional do uso dos canais em radiocomunicação de missão crítica: não foram identificados estudos que utilizem dados reais de ocupação dos canais licenciados utilizados na Região Metropolitana de São Paulo para propor estratégias quantitativas de redistribuição de carga e melhoria de eficiência sem ampliação da faixa ou migração tecnológica.

Diante dessas lacunas, este estudo propõe realizar uma análise detalhada da ocupação dos canais licenciados à PMESP na Região Metropolitana de São Paulo, com o objetivo de identificar padrões reais de uso, regimes de alta carga e possibilidades de reorganização interna que ampliem a eficiência operacional da rede, preservando os requisitos de disponibilidade e qualidade de serviço característicos de comunicações de missão crítica.

Questão de pesquisa: De que forma a otimização do uso do espectro em sistemas de radiocomunicação da Polícia Militar do Estado de São Paulo impacta a redução do tempo de espera no atendimento de chamadas operacionais, de modo a garantir qualidade de serviço compatível com comunicações de missão crítica, sem ampliação da faixa ou migração tecnológica?

1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

A região metropolitana de São Paulo concentra diversas forças de segurança pública que operam em diferentes faixas de espectro. Este estudo, contudo, restringe-se à análise da faixa de espectro licenciada à Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP), com foco específico na operação do tráfego de comunicação dos canais na Região Metropolitana de São Paulo.

Embora a PMESP utilize sistemas de comunicação em mais de uma faixa de frequências em diferentes áreas da capital e do estado, esta pesquisa concentra-se na ocupação dos canais licenciados nos sites de repetição que atendem a Região Metropolitana de São Paulo, onde se observa elevada ocupação espectral e limitação prática de canais disponíveis.

A delimitação da pesquisa justifica-se pela necessidade de otimizar a utilização dos canais já licenciados nessa faixa, diante do crescimento da demanda operacional e das restrições impostas pela ocupação espectral. O estudo busca analisar a ocupação real desses canais e propor estratégias de reorganização interna que ampliem a eficiência da rede sem ampliação da faixa ou migração tecnológica.

Não fazem parte do escopo desta pesquisa outros órgãos de segurança pública (como Polícia Civil, Corpo de Bombeiros ou Guarda Civil Metropolitana), tampouco as comunicações de dados em banda larga ou aplicações móveis, concentrando-se exclusivamente nas comunicações de voz crítica operadas pela PMESP.

1.3. PROBLEMA DE PESQUISA

No contexto da Região Metropolitana de São Paulo, a elevada ocupação dos canais licenciados utilizados pela PMESP evidencia a necessidade de abordagens quantitativas voltadas à reorganização e otimização interna da rede. Apesar da existência de estudos sobre compartilhamento dinâmico e alocação adaptativa de espectro, são escassas as pesquisas que tratam especificamente da otimização de canais já licenciados em regime de ocupação contínua, com requisitos rigorosos de disponibilidade e bloqueio característicos de comunicações de missão crítica.

Diante desse cenário, formula-se o seguinte problema de pesquisa:

Como otimizar a utilização dos canais licenciados na Região Metropolitana de São Paulo, com base em dados reais de ocupação espectral, de modo a reduzir bloqueios e garantir disponibilidade sob regimes de alta carga, sem ampliação da faixa ou migração tecnológica?

1.4. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Diversas pesquisas recentes abordam técnicas e algoritmos para compartilhamento e alocação dinâmica do espectro entre usuários públicos e privados, bem como entre redes licenciadas e não licenciadas, com o objetivo de mitigar a escassez espectral. Em muitos desses estudos, parte-se da premissa de que

determinadas faixas destinadas à segurança pública poderiam estar subutilizadas em certos períodos e, portanto, sujeitas a compartilhamento ou realocação.

Entretanto, tais abordagens não consideram de forma aprofundada cenários de ocupação contínua e elevada demanda em redes dedicadas de segurança pública, como ocorre nas faixas utilizada pela PMESP na RMSP. Nesses contextos, a limitação decorre não dá subutilização, mas da elevada ocupação e da restrição física de canais disponíveis, exigindo estratégias de otimização interna baseadas em dados reais de uso.

Assim, identifica-se a necessidade de estudos voltados especificamente à análise quantitativa da ocupação espectral e à reorganização de canais já licenciados, com foco na redução de bloqueios e na melhoria do balanceamento de carga sob requisitos rigorosos de disponibilidade característicos de comunicações de missão crítica.

Este trabalho busca contribuir nesse sentido ao realizar uma análise detalhada da ocupação dos canais licenciados da PMESP na Região Metropolitana de São Paulo, propondo estratégias de otimização que ampliem a eficiência operacional sem ampliação da faixa ou migração tecnológica.

Além de sua relevância imediata para o planejamento e a gestão técnica da rede da PMESP, os resultados podem servir como referência metodológica para outras organizações que operam sistemas dedicados em faixas licenciadas sob alta ocupação, contribuindo para o aprimoramento da gestão espectral em ambientes críticos.

1.5. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Propor e avaliar um modelo de otimização para redistribuição interna da carga entre canais licenciados utilizados pela Polícia Militar do Estado de São Paulo na Região Metropolitana de São Paulo, com base em dados reais de ocupação espectral, visando reduzir picos de uso e probabilidade de espera (P_w), preservando os requisitos de qualidade de serviço (GoS) característicos de comunicações de missão crítica, sem ampliação da faixa ou migração tecnológica.

Objetivos Específicos:

- Preparar e organizar os dados históricos de ocupação espectral dos canais analisados;
- Identificar instâncias de elevada ocupação e desbalanceamento entre canais com base em métricas operacionais;
- Formular o problema como um modelo de otimização multiobjetivo para redistribuição de carga;
- Implementar e aplicar o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II às instâncias selecionadas;
- Avaliar quantitativamente os resultados obtidos em termos de redução de picos de ocupação e impacto sobre a probabilidade de espera (P_w);
- Interpretar os resultados à luz das restrições estruturais do sistema, distinguindo limitações físicas de ineficiências operacionais;
- Discutir as implicações técnicas do modelo para o gerenciamento da rede analisada.

Esses objetivos orientam a estrutura metodológica da pesquisa e delimitam o escopo técnico da proposta de otimização apresentada nos capítulos seguintes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando que o problema investigado envolve a redistribuição otimizada de canais licenciados em sistemas troncalizados de segurança pública, torna-se necessário abordar três eixos conceituais principais: (i) os fundamentos físicos e regulatórios do espectro radioelétrico; (ii) os princípios operacionais dos sistemas de radiocomunicação, com ênfase em sistemas troncalizados e modelagem de tráfego; e (iii) os fundamentos da otimização computacional, especialmente no contexto multiobjetivo.

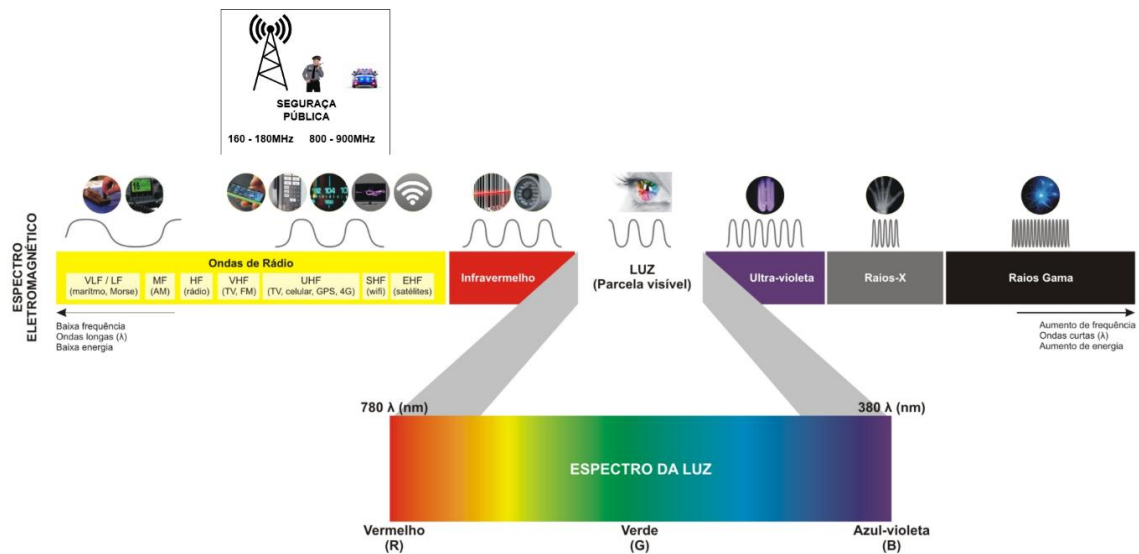
A articulação entre esses domínios permite estabelecer a ponte entre o ambiente físico-regulatório do espectro, o comportamento estatístico do tráfego em sistemas de missão crítica e a aplicação de algoritmos evolutivos para melhoria de eficiência operacional. Dessa forma, a fundamentação apresentada não se restringe à contextualização conceitual, mas fornece a base conceitual e formal que sustenta a modelagem do problema de redistribuição de carga em canais licenciados, conforme desenvolvido nesta pesquisa.

2.1. RADIOFREQUÊNCIA

2.1.1. Espectro eletromagnético e radioelétrico

O espectro eletromagnético compreende a distribuição das radiações eletromagnéticas conforme suas frequências e comprimentos de onda, abrangendo desde ondas de baixa frequência, como ondas de rádio, até radiações de alta energia, como raios gama (SILVA et al., 2021). Dentro do espectro eletromagnético, a faixa destinada às comunicações por rádio é definida como o conjunto de frequências que se estende de 3 kHz a 300 GHz, utilizada para a transmissão de sinais de comunicação (ITU, 2021).

Figura 1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Modificado de Física 3: eletromagnetismo (YOUNG, 2009).

Tabela 1 – Classificação do espectro eletromagnético.

Classificação	Faixa de frequências f (Hz)	Intervalo de comprimento de onda λ (m)	Intervalo de energia de fóton $E=hf=hc/\lambda$ (eV)
Raios γ	5×10^{19} 10^{24}	6×10^{-12} 3×10^{-16}	200×10^3 4×10^9
Raios X	3×10^{16} 5×10^{19}	10×10^{-9} 6×10^{-12}	124 200×10^3
Ultravioleta	$7,9 \times 10^{14}$ 3×10^{16}	380×10^{-9} 10×10^{-9}	3,26 124
Luz visível	$4,2 \times 10^{14}$ $7,9 \times 10^{14}$	$0,72 \times 10^{-6}$ 380×10^{-9}	1,72 3,26
Infravermelho	3×10^{12} $4,2 \times 10^{14}$	100×10^{-6} $0,72 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-2}$ 1,72
Ondas milimétricas	$0,3/3 \times 10^{12}$	$1/0,1 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-14}$ $1,24 \times 10^{-2}$
EHF	$30/300 \times 10^9$	$1/0,1 \times 10^{-2}$	
SHF	$3/30 \times 10^9$	$10/1 \times 10^{-2}$	
UHF	$0,3/3 \times 10^9$	$1/0,1$	
VHF	$30/300 \times 10^6$	$10/1$	
HF	$3/30 \times 10^6$	$100/10$	
MF	$0,3/3 \times 10^6$	$1/0,1 \times 10$	
LF	$30/300 \times 10^3$	$10/1 \times 10^3$	
VLF	$3/30 \times 10^3$	$100/10 \times 10^3$	
ULF	$0,3/3 \times 10^3$	$1/0,1 \times 10^6$	
SLF	$30/300$	$10/1 \times 10^6$	
ELF	$3/30$	$100/10 \times 10^6$	

Legenda: ELF – *Extremely Low Frequency*, SLF – *Super Low Frequency*, ULF – *Ultra Low Frequency*, VLF – *Very Low Frequency*, LF – *Low Frequency*, MF – *Medium Frequency*, HF – *High Frequency*, VHF – *Very High Frequency*, UHF – *Ultra High Frequency*, SHF – *Super High Frequency*, EHF – *Extremely High Frequency*.

Fonte: Ramos (2016).

A radiofrequência (RF) é dividida em subfaixas, sendo as mais relevantes para comunicação de voz e dados as de VHF (30-300 MHz) e UHF (300-3000 MHz). Essas bandas apresentam características distintas de propagação eletromagnética, que impactam diretamente o dimensionamento de redes de radiocomunicação. Em frequências como o VHF, observa-se menor atenuação em áreas abertas e maior alcance por estação (site), enquanto o UHF tende a apresentar melhor desempenho em ambientes urbanos densos devido à maior capacidade de penetração em obstáculos (ITU-R, 2022). Tais propriedades influenciam decisões estratégicas de planejamento de redes de segurança pública, especialmente em estados de grande extensão territorial.

Tabela 2 – Faixas de Frequência Definidas pela ITU-R para Radiofrequência e suas Aplicações.

Faixa de Frequência	Banda	Aplicações Comuns
3 kHz – 30 kHz	VLF (<i>Very Low Frequency</i>)	Comunicação submarina, radionavegação
30 kHz – 300 kHz	LF (<i>Low Frequency</i>)	Rádio AM de longa distância, sinais de navegação
300 kHz – 3 MHz	MF (<i>Medium Frequency</i>)	Rádio AM, comunicações marítimas
3 MHz – 30 MHz	HF (<i>High Frequency</i>)	Rádio de ondas curtas, radiocomunicação militar
30 MHz – 300 MHz	VHF (<i>Very High Frequency</i>)	Rádiodifusão FM, TV analógica, rádio amador, segurança pública, rádio Troncalizado
300 MHz – 3 GHz	UHF (<i>Ultra-high Frequency</i>)	Telefonia móvel, Wi-Fi, TV digital, rádio Troncalizado
3 GHz – 30 GHz	SHF (<i>Super High Frequency</i>)	Satélites, radares, redes 5G, comunicação ponto-a-ponto
30 GHz – 300 GHz	EHF (<i>Extremely High Frequency</i>)	Satélites de alta frequência, radares militares

Fonte: Adaptado ITU-R (2021).

O desenvolvimento das comunicações via espectro radioelétrico teve origem nos experimentos conduzidos por Heinrich Hertz no final do século XIX, que demonstraram empiricamente a existência das ondas eletromagnéticas previstas pelas equações de James Clerk Maxwell. Esses experimentos representaram um marco fundamental para a física moderna e abriram caminho para a criação das tecnologias de comunicação sem fio utilizadas até hoje (HUNT, 1991).

A gestão internacional do espectro radioelétrico é coordenada pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), por meio do seu Setor de Radiocomunicações (ITU-R). Essa entidade é responsável por definir normas técnicas globais, promover o uso eficiente e harmônico do espectro e garantir a compatibilidade

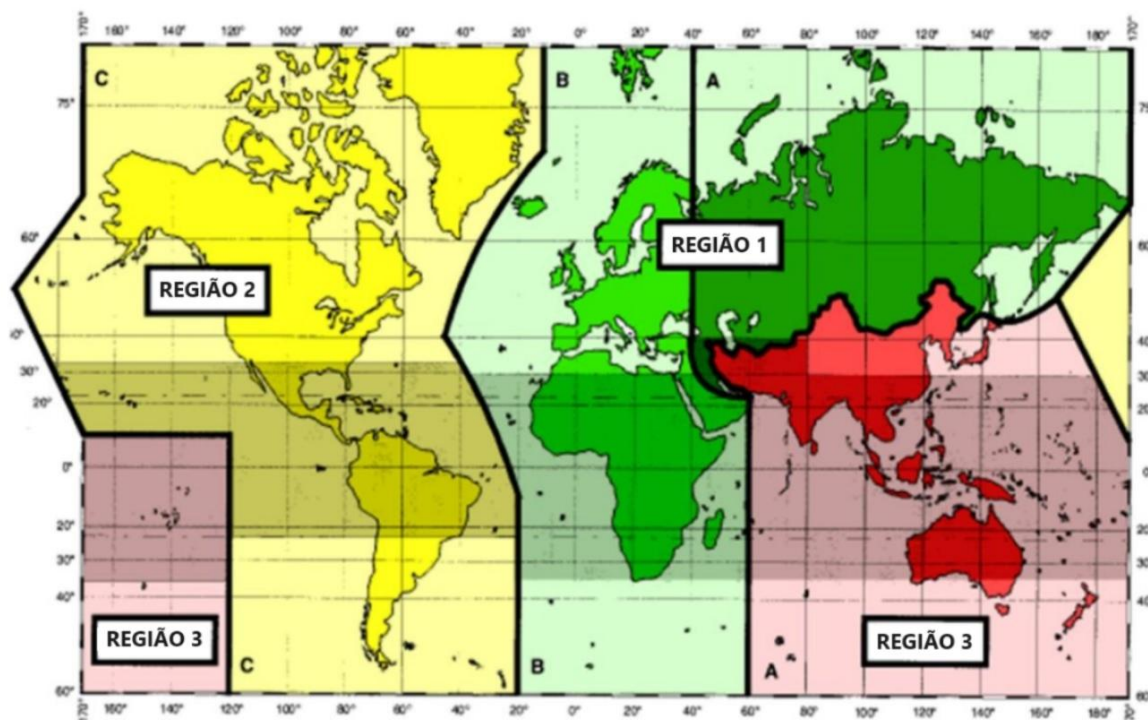
entre os diferentes serviços e sistemas de radiocomunicação. A UIT atua em estreita colaboração com as administrações nacionais e regionais, desempenhando papel central na harmonização do uso do espectro em nível global (ITU-R, 2022).

Para facilitar essa gestão e refletir as diferentes realidades técnicas e geográficas ao redor do mundo, a UIT subdividiu o globo em três regiões de radiocomunicação, conforme ilustrado na Figura 2:

- Região 1: compreende a Europa, África, parte do Oriente Médio e a maior parte da Ásia.
- Região 2: abrange as Américas do Norte, Central e do Sul, incluindo o Brasil.
- Região 3: corresponde ao restante da Ásia, Oceania e ao Pacífico Sul.

Essa divisão facilita a organização de alocações de frequências com base em características regionais, permitindo que as regulamentações técnicas e operacionais sejam adaptadas de acordo com os contextos locais. A segmentação também contribui para evitar interferências transfronteiriças e garantir a interoperabilidade entre os sistemas de comunicação (ITU-R, 2022).

Figura 2 – Regiões de Radiocomunicação da UIT.



Fonte: Adaptado de ANATEL, Resolução nº 772/2025.

Com o avanço tecnológico e o aumento do uso de sistemas de comunicação, tornou-se necessário regular o uso do espectro de radiofrequência. No Brasil, esse papel é desempenhado pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), que atua na regulamentação, fiscalização e gestão do espectro, garantindo seu uso eficiente e evitando interferências prejudiciais entre os diferentes serviços.

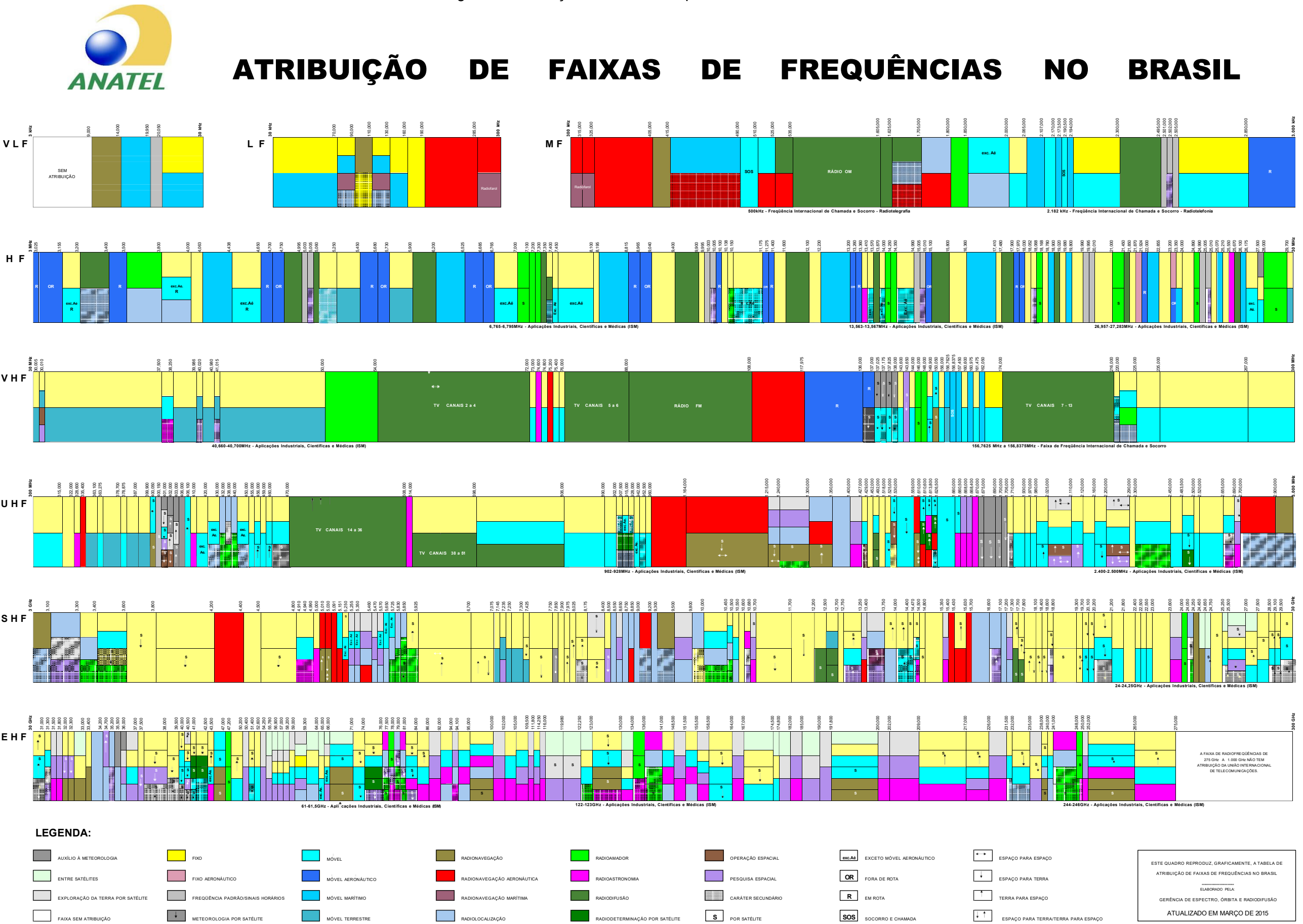
A Anatel define, por meio de seus regulamentos e planos de atribuição, quais faixas de frequência são destinadas para determinados serviços, incluindo o setor de segurança pública. Atualmente, as principais faixas regulamentadas pela Anatel para uso por sistemas de segurança pública incluem:

- Faixa de VHF (*Very High Frequency*): 138–174 MHz;
- Faixa de UHF (*Ultra-high Frequency*): 380–400 MHz;
- Faixa de UHF estendida: 806–824 MHz (*uplink*) / 851–869 MHz (*downlink*), comumente utilizada em sistemas digitais troncalizados (como APCO-25, Tetra, DMR...), especialmente em ambientes urbanos ou de grande demanda.

Além dessas faixas, a Resolução Anatel nº 772/2025 aprovou o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDFF), que estabelece condições específicas de uso de radiofrequências. A Resolução Anatel nº 747/2021 também trata da atribuição e destinação de faixas de radiofrequências em VHF e UHF para as condições de uso por dispositivos por espectro ocioso.

Embora diversas faixas sejam regulamentadas para uso por sistemas de segurança pública no Brasil, esta pesquisa restringe-se à análise da redistribuição de carga em canais licenciados utilizados pelas forças policiais na Região Metropolitana de São Paulo.

Figura 3 – Atribuição de faixa de frequência no brasil em 2023.

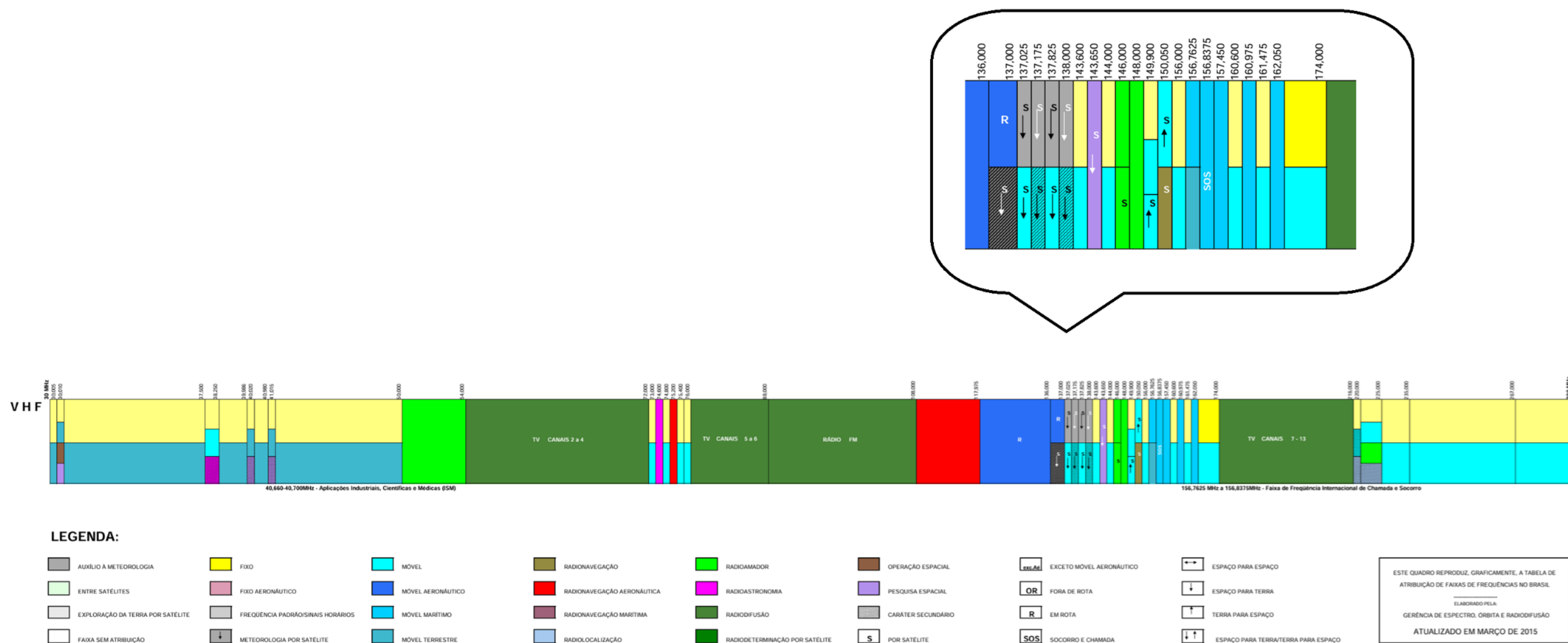


Fonte: Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão (ORER) Anatel, 2023.

Figura 4 – Visualização da atribuição das faixas de VHF e UHF no Brasil.



ATRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL



Fonte: modificado de Anatel (ORER Anatel, 2023).

A Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão (ORER) da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é a área responsável pela gestão estratégica do espectro radioelétrico no Brasil, compreendendo o planejamento, a alocação e a designação das faixas de frequência para uma vasta gama de serviços essenciais, como telefonia móvel (incluindo 5G), internet sem fio, radiodifusão e comunicações de segurança pública. Ao gerenciar a divisão desse recurso escasso e as posições orbitais para satélites, a ORER garante a coexistência harmônica entre os diversos usuários e tecnologias, impulsionando o desenvolvimento e a eficiência das telecomunicações no país.

Faixas adicionais podem ser utilizadas de forma regional ou em situações especiais, conforme previsto no PDFF e demais regulamentos da Anatel. Essas faixas de frequência são designadas aos usuários através do modelo de alocação estática (Lei nº 9.472/1997).

A alocação estática de frequências constitui o modelo tradicional de gestão de espectro. Nesse modelo, as faixas específicas de frequência são atribuídas de forma exclusiva e fixa a determinados serviços, aplicações ou entidades, mediante licenças concedidas pelos órgãos reguladores, como a Anatel no Brasil e a ITU em nível internacional (ITU, 2021).

A alocação estática ainda é amplamente adotada em sistemas de radiocomunicação crítica, como os utilizados pelas forças policiais e serviços de emergência, dada a necessidade de canais permanentemente disponíveis para situações imprevisíveis e de alto risco.

Ainda assim, mesmo sob regime de alocação estática, observa-se a adoção de estratégias voltadas ao aumento de eficiência no uso do espectro. Em sistemas convencionais, isso ocorre por meio do reuso/compartilhamento geográfico de canais em regiões distintas e suficientemente afastadas entre si; adicionalmente, em sistemas troncalizados, há uma forma de alocação dinâmica controlada, na qual uma central gerencia a distribuição dos canais entre múltiplos usuários, preservando confiabilidade e disponibilidade das comunicações.

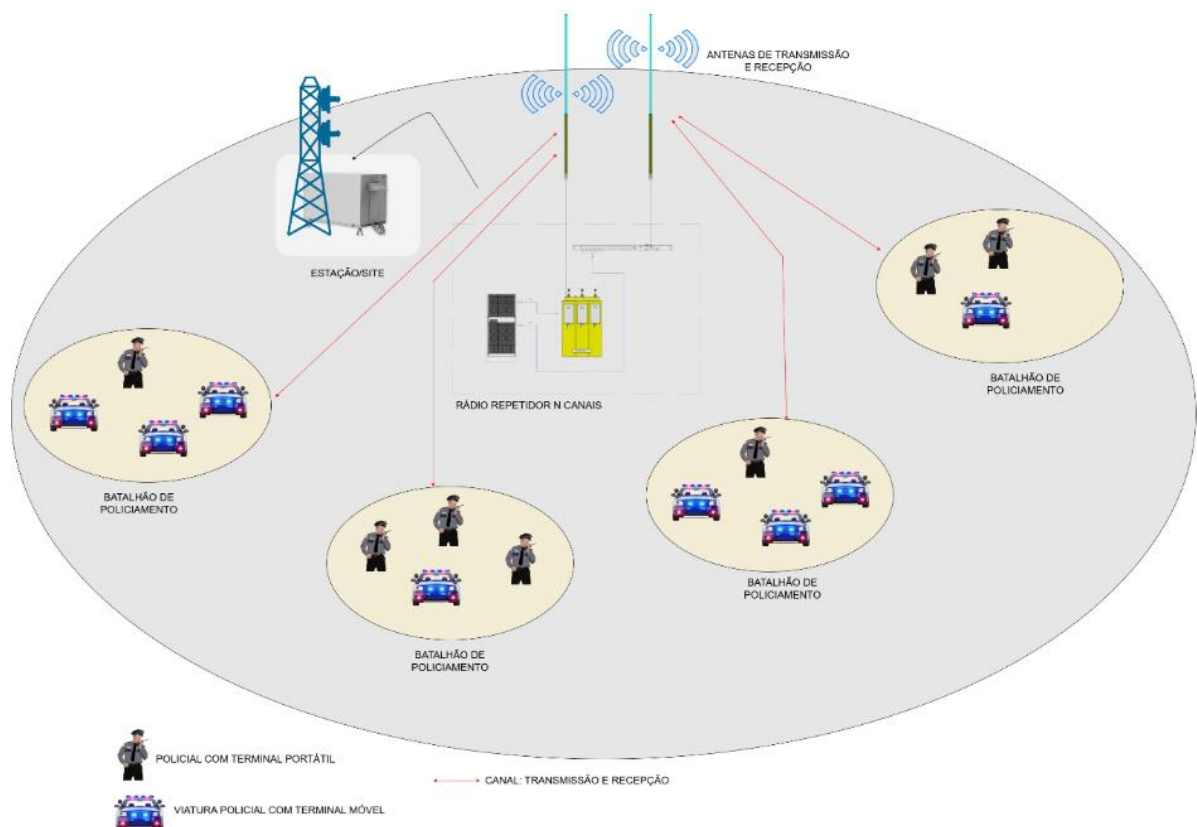
Como resultado, obtém-se melhor aproveitamento estatístico das frequências licenciadas, reduzindo o tempo ocioso e elevando a eficiência global do sistema (LÄHETKANGAS et al., 2016; ANATEL, 2023). Contudo, a troncalização não elimina

as restrições estruturais impostas pela quantidade finita de canais autorizados, sobretudo em cenários de elevada demanda simultânea.

No modelo de alocação estática, embora as faixas sejam licenciadas de forma exclusiva ou prioritária, a eficiência operacional depende da gestão interna da capacidade disponível, uma vez que a quantidade de canais autorizados é finita e estruturalmente limitada. Assim, a mera existência de faixa licenciada não elimina o problema de congestionamento, especialmente em cenários urbanos de alta demanda.

Em radiocomunicações, um canal é uma faixa de frequência autorizada pelo órgão regulador destinada ao transporte de sinais contendo informação entre um transmissor e um receptor. A comunicação ocorre por meio de estações ou sites de telecomunicações, e um único site pode operar múltiplos canais simultaneamente para atender uma área de cobertura específica, garantindo capacidade adequada para altos níveis de tráfego (Rufino, 2014).

Figura 5 – Visualização da estação/site em um sistema de radiocomunicação de segurança pública.



Fonte: Autor, 2026.

Uma estação de telecomunicações consiste no conjunto de equipamentos, antenas e estruturas físicas necessários para transmitir e receber sinais, incluindo os dispositivos e instalações que os abrigam. Segundo a regulamentação da Anatel, trata-se de uma estação fixa localizada em ponto georreferenciado, operando de forma permanente para viabilizar serviços de telecomunicações (Rufino, 2014).

2.1.2. Radiocomunicação para o sistema de segurança pública

O sistema de radiocomunicação para o setor de segurança pública em São Paulo teve início no ano de 1935 com a criação do Departamento de Comunicações e o Serviço de Rádio Patrulha com serviços de radiotelegrafista que posteriormente no ano de 1940 passou a patrulha motorizada, conforme a imagem do final dos anos 1940, mostra os primeiros momentos da rádio patrulha registrando a demonstração do equipamento utilizado para rádio patrulha pelo Capitão Romeu de Carvalho Pereira que estava embarcado na viatura para então na época o Governador Adhemar de Barros e o Coronel Ferlich, então Comandante Geral (Acervo PMESP).

Figura 6 – Início da rádio patrulha em 1940.



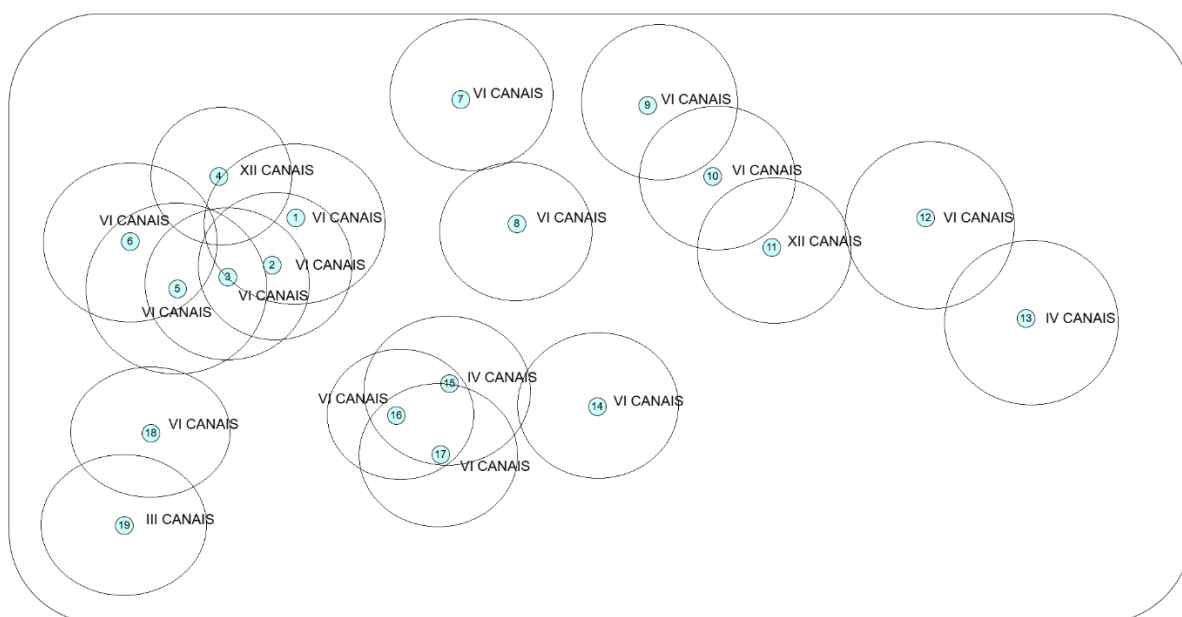
Fonte: Acervo PMESP (2025)

Atualmente, a RMSP conta com 19 sites de telecomunicações, operando um total de 113 canais na faixa de VHF, e 23 estações, com 147 canais operando na faixa de UHF. Essas estações viabilizam a comunicação do efetivo em operações de patrulha com o COPOM (Centro de Operações da Polícia Militar) (PMESP, 2025). Entretanto, para fins metodológicos, o presente estudo concentra-se exclusivamente

nos sites e canais licenciados utilizados pela PMESP na Região Metropolitana de São Paulo.

A Figura 7 mostra um gráfico representativo do modelo da rede de radiocomunicação. As estações/sites são referenciadas com números de 1 a 19. A quantidade de canais é contabilizada pelos números romanos. Os círculos delimitam as áreas de domínio e comunicação com os terminais.

Figura 7 – Representação de uma rede de radiocomunicação das forças de Policiamento.



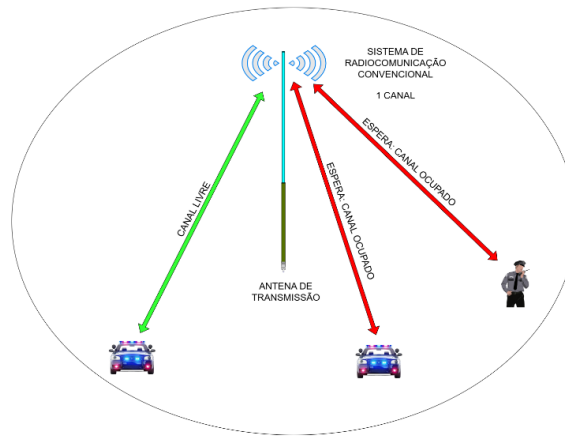
Fonte: Autor, 2025.

Os sistemas de radiocomunicação para segurança pública têm evoluído significativamente desde suas origens, passando por sistemas analógicos e digitais convencionais até os modernos sistemas troncalizados. Inicialmente, as comunicações eram estabelecidas em canais fixos com tecnologia analógica, o que limitava a qualidade, a segurança e a flexibilidade das transmissões (SILVA et al., 2021).

Com a digitalização, surgiram padrões como o APCO-25 (nos Estados Unidos), DMR e o TETRA (na Europa), que introduziram codificação digital de voz, criptografia, interoperabilidade entre sistemas e maior eficiência espectral. Adicionalmente, a digitalização possibilitou a transmissão de dados (como informações de ocorrências, imagens e localização de viaturas) e a integração com outros sistemas de informação, ampliando as capacidades operacionais. Esses sistemas são especialmente adequados para situações críticas, pois oferecem

comunicação segura, em tempo real e de alta confiabilidade, mesmo em ambientes de alto ruído e congestionamento (ITU-R, 2022).

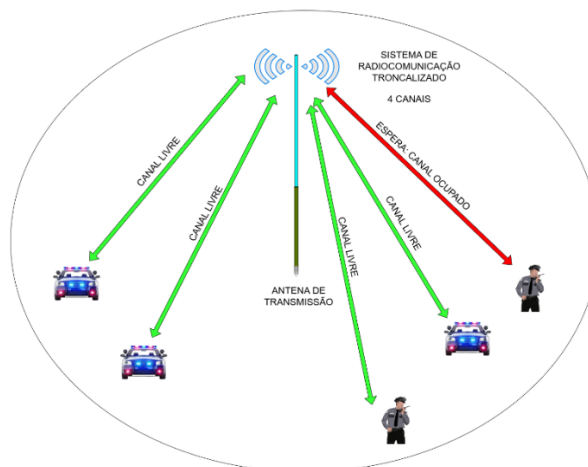
Figura 8 – Sistema Digital Convencional.



Fonte: Autor, 2025.

O sistema Troncalizado digital opera com uma central de controle que gerencia dinamicamente a alocação de canais para os usuários conforme a demanda, otimizando o uso do espectro e evitando o desperdício de recursos, ou seja, um site que possui 6 canais licenciados disponíveis trabalha com 5 canais para o tráfego de voz e um canal destinado ao controle do uso dos demais canais. Isso permite que múltiplas equipes compartilhem eficientemente uma mesma faixa de frequência sem sobreposição ou interferência, atendendo aos requisitos operacionais de grandes cidades (BROWN; GHASEMI, 2023).

Figura 9 – Sistema Digital Troncalizado.



Fonte: Autor, 2025.

Embora operem em faixas de frequência tipicamente designadas por alocação estática para serviços de segurança pública, os sistemas troncalizados implementam internamente uma forma de alocação dinâmica de canais entre seus usuários.

Esses sistemas operam tradicionalmente em faixas designadas à segurança pública, incluindo VHF e UHF. No entanto, o presente trabalho concentra-se nos canais licenciados, objeto específico da análise de redistribuição proposta.

2.1.3. O princípio do sistema troncalizado

O conceito central por trás dos sistemas troncalizados é a economia de escala na alocação de canais. Este princípio estabelece que agrupar um grande número de canais de comunicação em um "tronco" (*trunk*) compartilhado por uma grande base de usuários aumenta significativamente a eficiência de uso do espectro (Reeves, 1980).

O principal benefício da troncalização reside no chamado ganho estatístico de multiplexação, decorrente do compartilhamento dinâmico de um conjunto finito de canais por uma base ampliada de usuários. Esse mecanismo reduz a probabilidade de ocupação simultânea total dos recursos disponíveis quando comparado à alocação fixa por grupo, aumentando a eficiência global do sistema. Essa eficiência permite que um número menor de canais (N) suporte um volume maior de usuários (Reeves, 1980). O Tráfego Transportado máximo possível, no entanto, é sempre limitado pelo número total de canais no tronco, de acordo com Rappaport (2001, Apêndice A) o sistema Troncalizado possui duas classes principais: sistemas de *Lost Call Cleared* (LCC) onde as chamadas são bloqueadas na ocupação total dos canais e os sistemas de *Lost Call Delayed* (LCD) onde as chamadas entram em uma fila de espera para aguardar um canal ser liberado.

Para estes tipos de sistemas de telecomunicações o tráfego de comunicação é calculado basicamente por três fórmulas, as fórmulas de Erlang B e C e Engset, Erlang B e Engset são usadas para os sistemas de bloqueio onde é calculado a probabilidade de uma tentativa de chamada ser bloqueada e Erlang C é usada em sistemas de filas onde é calculada a probabilidade de uma tentativa de chamada ser atrasada, as fórmulas de Erlang são usadas para sistemas com tráfegos de população infinita e a fórmula de Engset para tráfego de população finita (OKAEKWU, 2009).

Um Erlang é equivalente à quantidade de chamadas transportadas em um canal continuamente ocupado em uma hora, ou 3600 segundos (NTIA, 2007). Se um sistema recebeu 300 chamadas com duração de 2 minutos cada, o sistema possui um tráfego de 600 minutos, ou 10 erlangs de tráfego no período de uma hora (Angus, 2001)

Fórmula de Erlang B (Sistemas de Bloqueio): É utilizada para calcular a Probabilidade de Bloqueio (P_b) do sistema.

$$P = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{x=0}^N \frac{A^x}{x!}}$$

Fonte: Angus, 2001

Onde A é o Tráfego Oferecido em Erlangs e N é o número de canais.

Fórmula de Erlang C (Sistemas de Fila): É usada para calcular a Probabilidade de Espera (P_w), ou seja, a probabilidade de um usuário ter que aguardar a liberação de um canal.

$$P_w(> 0) = \frac{\frac{A^N e^{-A}}{N!} \cdot \frac{N}{N-A}}{1 - P + \frac{A^N e^{-A}}{N!} \cdot \frac{N}{N-A}}$$

Fonte: Angus, 2001

O Grau de Serviço GOS (*Grade of Service*) é a probabilidade de o tráfego oferecido ser bloqueado ou atrasado atuando como limiar de qualidade do sistema. A definição de GOS depende do modelo de tráfego: para sistemas de bloqueio é expressa como a probabilidade de perda, para sistemas de atraso é expressa como a probabilidade de o atraso exceder o tempo t. O GOS é uma previsão estatística de congestionamento não um valor absoluto, por exemplo um GOS de 0,02 não significa que 2 chamadas em 100 serão bloqueadas ou atrasadas, mas sim que a probabilidade de, em momentos de tráfego elevado, ocorrer a perda ou atraso, tenderá a duas em cem chamadas (OKAEKWU, 2009).

Em sistemas de segurança pública, onde a comunicação de voz constitui requisito operacional crítico, a probabilidade de espera (Pw) e o Grau de Serviço (GoS) tornam-se métricas centrais de desempenho. Valores elevados de Pw indicam congestionamento estrutural ou desbalanceamento de carga entre canais, podendo comprometer a resposta operacional em emergências. Assim, tais métricas não apenas dimensionam capacidade, mas também subsidiam decisões de reorganização interna dos recursos espectrais.

2.1.4. Organização das forças de segurança pública.

A Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP) configura-se como uma instituição permanente, estruturada sob os pilares fundamentais da hierarquia e disciplina. Como força auxiliar e reserva do Exército Brasileiro, é subordinada ao Governador do Estado e à Secretaria de Segurança Pública (SSP), desempenhando o ciclo completo do policiamento ostensivo e a preservação da ordem pública em todo o território paulista (Lei Complementar 893/2021) (PMESP, 2025).

2.1.4.1. Estrutura Hierárquica e Administrativa

A organização interna é composta pelo Comando Geral e pelo efetivo dividido em duas categorias:

Oficiais (Postos): responsáveis pelo comando, planejamento e gestão, desde 2º Tenente até Coronel PM. Alunos Oficiais (Academia do Barro Branco) integram as praças especiais.

Praças (Graduações): responsáveis pela execução das atividades operacionais, incluindo Soldados (2ª e 1ª Classe), Cabos, Sargentos e Subtenentes (Lei Complementar 893/2021).

Administrativamente, as unidades são estruturadas em seções padronizadas: P1 (Recursos Humanos), P2 (Inteligência), P3 (Planejamento e Operações), P4 (Logística) e P5 (Comunicação Social) (PMESP, 2025).

2.1.4.2. Articulação Territorial e Unidades Especializadas

A capilaridade da instituição é garantida pela divisão em Comandos de Policiamento (CPA), que coordenam batalhões, companhias e pelotões de forma regionalizada (Capital, Grande São Paulo e Interior).

Para além do policiamento territorial convencional (Radiopatrulha - 190), a PMESP organiza-se em unidades de resposta especializada (PMESP, 2025):

- Patrulhamento Tático: Força Tática (nível local) e BAEP (Batalhão de Ações Especiais, nível regional).
- Operações Especiais e Choque: ROTA (Rondas Ostensivas Tobias de Aguiar), GATE (Ações Táticas), Canil e Cavalaria.
- Modalidades Específicas: Comando de Aviação (Águia), Policiamento Ambiental, Rodoviário, Escolar e de Trânsito.

2.1.4.3. Planejamento Estratégico e Gestão de Eventos

A eficiência operacional em eventos de grande porte depende da Ação Integrada, envolvendo monitoramento tecnológico (drones, COI), varreduras preventivas (GATE/Canil) e coordenação com órgãos externos. O emprego do efetivo é ajustado conforme a mancha criminal e o fluxo de público, unindo prevenção e resposta rápida (PMESP, 2025).

Diante da complexidade do planejamento operacional e da diversidade de unidades envolvidas no patrulhamento, muitas delas atuando em duplas para garantir maior segurança, o rádio constitui o principal elemento de integração, assegurando comando, controle e resposta imediata.

Essa estrutura operacional evidencia a demanda elevada por terminais de rádio e a necessidade de sistemas capazes de suportar grande volume de comunicações simultâneas, reforçando a importância do correto dimensionamento e da análise do uso do espectro (PMESP, 2025).

Em grandes eventos, como o ocorrido na Avenida Paulista em 7 de setembro de 2021, os canais de jornalismo CNN Brasil (Meirelles, 2021) e Poder360 (2021) divulgaram dados referentes ao efetivo empregado pela PMESP nos atos daquela

data. Segundo as reportagens, aproximadamente 3.600 policiais de diversas unidades da corporação participaram da operação, com o apoio de cerca de 1.400 viaturas, 100 cavalos e 6 drones.

Considerando a dinâmica operacional padrão da corporação na qual a cada viatura em patrulhamento corresponde um terminal móvel embarcado e as patrulhas de Cavalaria operam com o apoio de terminais portáteis, esse contingente traduz-se tecnicamente, em termos de radiocomunicação, em uma demanda estimada de aproximadamente 1.400 terminais móveis e no mínimo de 50 terminais portáteis. Essa correspondência direta entre a frota empenhada e a infraestrutura de rádio evidencia a elevada carga imposta à rede de comunicações durante grandes mobilizações.

Essa estrutura organizacional, caracterizada por múltiplas unidades operacionais e elevado número de terminais ativos simultaneamente, impõe carga significativa sobre os sistemas de radiocomunicação, reforçando a necessidade de modelos quantitativos para análise e otimização da capacidade instalada.

Diante da limitação estrutural do número de canais disponíveis e da variabilidade do tráfego operacional, a melhoria do desempenho do sistema não depende exclusivamente de expansão física de espectro, mas pode ser abordada por meio de técnicas de otimização computacional aplicadas à redistribuição interna da carga. Nesse contexto, apresenta-se a seguir a base conceitual da otimização e dos algoritmos evolutivos utilizados nesta pesquisa.

2.2. OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL

A otimização computacional, campo interdisciplinar que integra matemática, ciência da computação e pesquisa operacional, dedica-se ao desenvolvimento e à aplicação de algoritmos para encontrar a melhor solução possível em problemas complexos. Seu conceito fundamental reside na busca por valores de variáveis de decisão que maximizem ou minimizem uma determinada função-objetivo, respeitando-se um conjunto de restrições (BERTSEKAS, 1999).

Historicamente, o surgimento da otimização computacional está atrelado ao advento dos primeiros computadores eletrônicos durante a Segunda Guerra Mundial. Naquele cenário, problemas de logística militar e planejamento de operações demandavam métodos eficientes para a tomada de decisão. Um marco fundamental

nesse período foi o desenvolvimento do método *Simplex* por George Dantzig, em 1947, técnica que revolucionou a resolução de problemas de programação linear (DANTZIG, 1990).

De forma geral, um problema de otimização computacional consiste em determinar os valores das variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função objetivo, respeitando um conjunto de restrições e os respectivos domínios das variáveis. A formulação geral pode ser expressa conforme:

$$\text{Otimizar (Min ou Max)} f(x_1, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$g_j(x_1, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_j \quad (2.2)$$

com as variáveis pertencentes aos respectivos domínios:

$$x_i \in \mathcal{S}, i = 1, \dots, s \quad (2.3)$$

$$x_i \in \mathbb{R}, i = s + 1, \dots, n. \quad (2.4)$$

Fonte: GOLDBARG, 2015.

Na formulação, $f(x_1, \dots, x_n)$ representa a função objetivo, enquanto $g_j(x_1, \dots, x_n)$ representa o conjunto de funções de restrição, que podem assumir relações de menor ou igual, igualdade ou maior ou igual a um determinado limite b_j . As variáveis de decisão podem assumir valores discretos ou contínuos, conforme o domínio definido para cada variável (GOLDBARG, 2015).

2.2.1. Otimização Multiobjetivo

A otimização multiobjetivo surge em cenários onde coexistem metas conflitantes, como custo e desempenho ou latência e capacidade. Nesses casos, não se busca uma única solução ótima, pois qualquer tentativa de melhorar um objetivo tende a produzir degradação em outro.

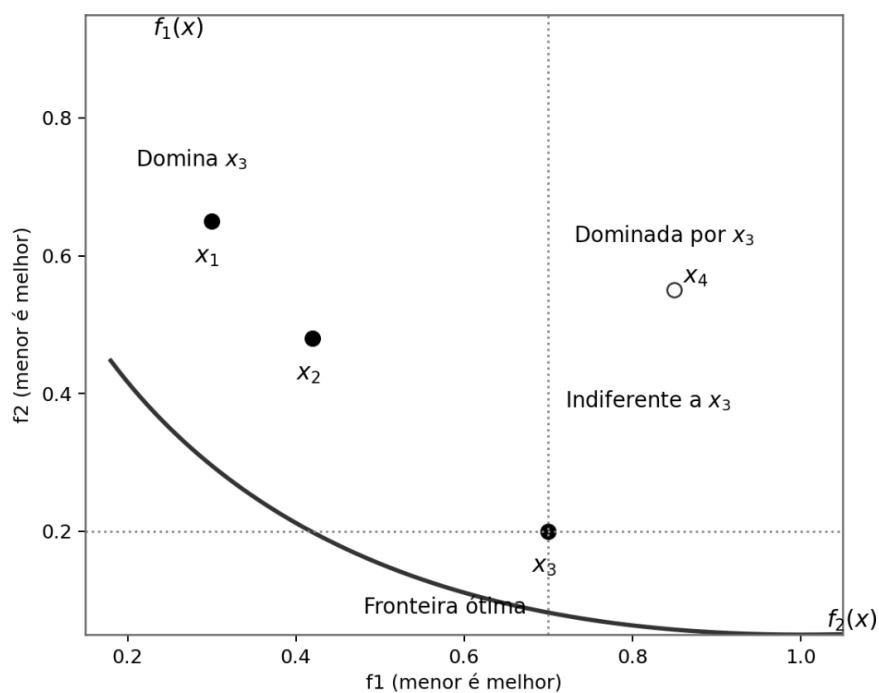
A formulação geral de problemas multiobjetivo considera a minimização ou maximização simultânea de um conjunto de M funções-objetivo $f_m(\mathbf{x})$ para $m = 1, \dots, M$. Uma solução $\mathbf{x}^{(1)}$ domina Pareto no sentido fraco uma solução $\mathbf{x}^{(2)}$ quando

não é pior que $x^{(2)}$ em nenhum dos objetivos e é estritamente melhor em pelo menos um deles (DEB, 2001).

O resultado desejado é um conjunto de soluções que represente os melhores compromissos possíveis, caracterizando a chamada Fronteira de Pareto. As soluções pertencentes a essa fronteira são não dominadas, servindo como referência para avaliar a convergência e a diversidade dos algoritmos (DEB, 2001).

A Figura 10 ilustra, no plano (f_1, f_2) , uma fronteira de Pareto contínua e côncava. Ao longo da curva, qualquer melhora em f_1 implica piora em f_2 , e vice-versa.

Figura 10 – Fronteira de Pareto.



Fonte: Adaptado (DEB; KALYANMOY, 2001).

Os Algoritmos Evolutivos (AEs) e, em particular, os Algoritmos Genéticos (AGs), mostram-se especialmente adequados a essa classe de problemas. Por operarem com populações de soluções, dispensarem o uso de derivadas e lidarem naturalmente com não convexidade e espaços de busca discretos ou contínuos, os AEs possibilitam a geração de uma aproximação completa da fronteira de Pareto em uma única execução (GOLDBERG, 1989; DEB, 2001).

A operação elementar de um Algoritmo Genético baseia-se em uma população de soluções candidatas que evolui iterativamente. Em cada iteração, as soluções são avaliadas por uma função de aptidão (fitness), a partir da qual são selecionados indivíduos para reprodução por meio de operadores de recombinação (cruzamento),

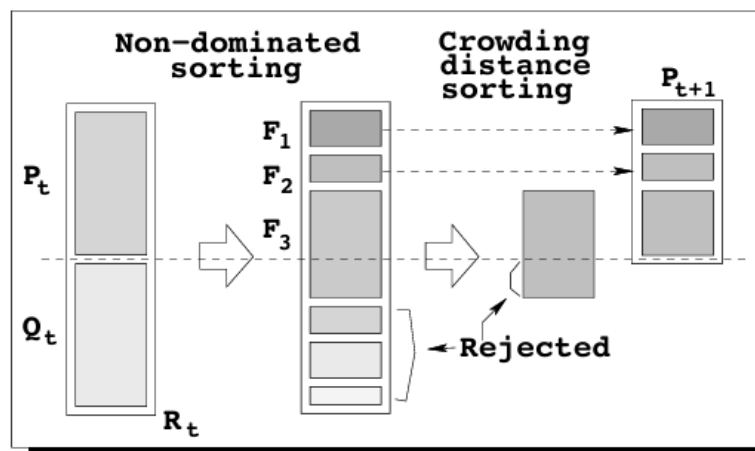
mutação e mecanismos de elitismo para preservar as melhores soluções encontradas (GOLDBERG, 1989).

2.2.2. NSGA-II: *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

Entre as variantes evolutivas multiobjetivo, o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), proposto por Deb et al. (2002), consolidou-se como a principal referência na literatura. O algoritmo destaca-se por combinar elitismo, ordenação rápida por frentes de não dominação (*Fast Non-dominated Sort*) e preservação da diversidade por meio do operador de distância de aglomeração (*Crowding Distance*), mantendo um custo computacional eficiente de $\mathcal{O}(MN^2)$ para uma população de tamanho N e M objetivos (DEB et al., 2002).

No NSGA-II, a cada geração, a população corrente de pais (P_t) é combinada com a população de descendentes (Q_t), formando um conjunto expandido de tamanho $2N$. Esse conjunto é reordenado e classificado em frentes de não dominação ($F_1, F_2, \dots$). A construção da população da próxima geração (P_{t+1}) prioriza as frentes superiores. Quando a inclusão de uma frente completa excede o limite N de indivíduos, aplica-se a distância de aglomeração para selecionar as soluções localizadas nas regiões menos densas do espaço objetivo, promovendo uma cobertura uniforme da fronteira (DEB et al., 2002).

Figura 11 – Comportamento do NSGA-II.



Fonte: Deb, 2011.

O mecanismo de seleção por torneio do NSGA-II utiliza um comparador de dominância que atribui preferência a indivíduos com menor índice de frente de não

dominação. Em caso de empate na mesma frente, o comparador favorece o indivíduo com maior distância de aglomeração.

Operadores Genéticos e Representação de Variáveis

A escolha dos operadores genéticos no NSGA-II depende diretamente da codificação adotada para o problema:

Variáveis Contínuas: Emprega-se habitualmente o cruzamento binário simulado (SBX – *Simulated Binary Crossover*) com alta probabilidade e índices de distribuição (η_c) tipicamente entre 10 e 20, combinado com a mutação polinomial, cuja taxa é inversamente proporcional ao número de variáveis ($1/n$). Esses operadores permitem modular o equilíbrio entre a exploração global do espaço e a busca local (DEB, 2001).

Variáveis Discretas e Combinatórias: Quando o problema envolve decisões discretas ou permutações, adotam-se representações inteiras/binárias ou operadores como *Partially Matched Crossover* (PMX), *Order Crossover* (OX) ou *Cycle Crossover* (CX), acompanhados de mutações por troca ou inversão e regras explícitas de viabilidade ou reparo de restrições (GOLDBARG; LUNA, 2015).

Esses mecanismos de tratamento de restrições harmonizam-se com o comparador do NSGA-II, priorizando soluções factíveis e, na presença de inconsistências, selecionando aquelas com menor violação total de restrições.

Validação e Desempenho (Problema ZDT2)

A eficiência do NSGA-II na manutenção do equilíbrio entre convergência e diversidade é frequentemente validada por meio de funções-teste padronizadas, como a família ZDT. No caso do problema ZDT2, caracterizado por uma fronteira de Pareto verdadeira não convexa e côncava, o NSGA-II operando com 100 indivíduos e 100 gerações demonstra alta capacidade de convergência.

Conforme ilustrado na Figura 12, a população inicial encontra-se dispersa no espaço objetivo. Ao longo das gerações 10, 30 e 100, observa-se a progressiva migração e o adensamento dos indivíduos sobre a fronteira de Pareto verdadeira, demonstrando a robustez do algoritmo.

Figura 12 – População inicial

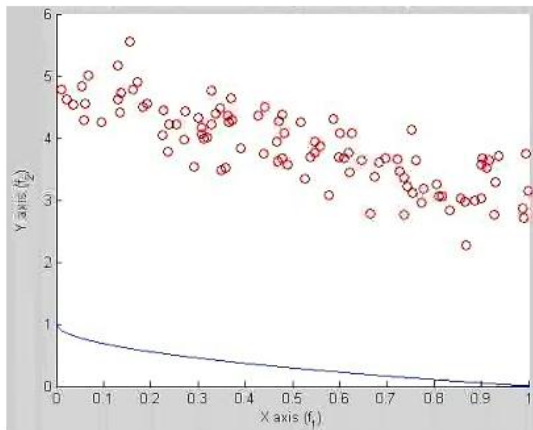


Figura 13 – População na geração 10

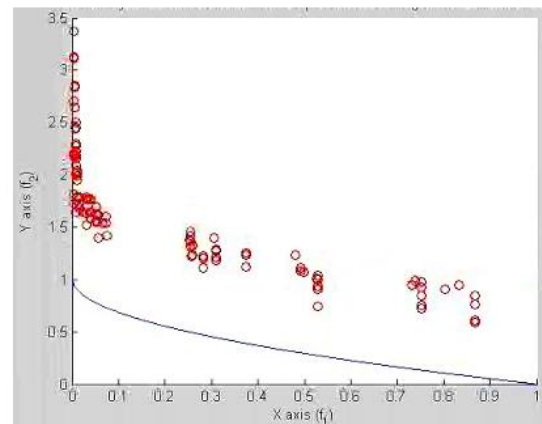


Figura 14 – População na geração 30

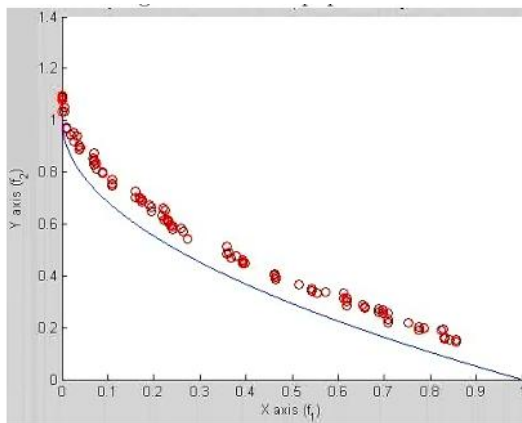
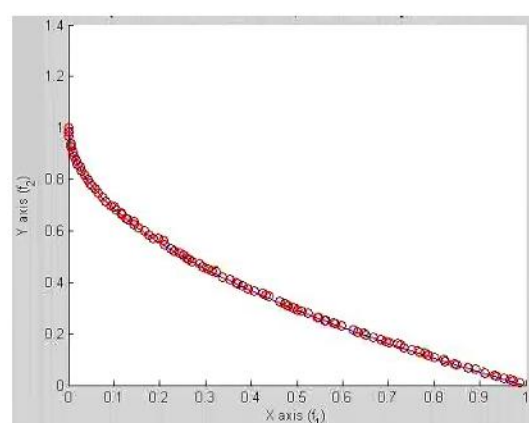


Figura 15 – População na geração 100



Fonte: DEB, 2011

A escolha do NSGA-II para esta pesquisa justifica-se por sua ampla utilização na literatura especializada e por sua comprovada capacidade de tratar simultaneamente múltiplos objetivos conflitantes, como a minimização dos picos de ocupação espectral por canal e a manutenção do equilíbrio operacional da rede. Além disso, o algoritmo permite preservar a diversidade das soluções não dominadas, sem a necessidade de estabelecer uma agregação escalar arbitrária dos diferentes objetivos.

Tal característica é ideal para o problema investigado, que envolve a otimização e a redistribuição interna de carga entre canais licenciados da Polícia Militar do Estado de São Paulo (PMESP) na Região Metropolitana de São Paulo, permitindo avaliar *trade-offs* operacionais reais sem requerer a expansão da faixa de frequência ou a migração tecnológica do sistema troncalizado existente.

2.3. TRABALHOS CORRELATOS

Diante do cenário de elevada ocupação espectral em faixa licenciada e da necessidade de manutenção de qualidade de serviço para comunicações de missão crítica, esta seção apresenta trabalhos relacionados que abordam compartilhamento dinâmico, alocação adaptativa e técnicas de otimização aplicadas ao uso eficiente do espectro.

Lähetkangas et al. (2016) são discutidos mecanismos de compartilhamento dinâmico e uma arquitetura de acesso voltados à Segurança Pública, partindo do pressuposto de subutilização do espectro e de sua viabilização por meio de regimes de acesso licenciado compartilhado. De modo convergente, Höyhty et al. (2018) adotam uma abordagem orientada a padrões e arquitetura definidos por organismos de padronização, incorporando mecanismos de qualidade de serviço, priorização de tráfego, fatiamento de rede e compartilhamento de espectro, tanto por acesso licenciado compartilhado quanto por técnicas baseadas em sensoriamento para serviços multimídia e banda larga de missão crítica. Já Niringiye et al. (2022) mostram, por simulação e uso de rádios programáveis (SDR), que os canais livres de TV com faixas destinadas a espaços em branco (TV White Spaces) podem complementar o espectro dos sistemas de rádio VHF para voz de missão crítica, usando detecção por energia de forma prática.

Tais diretrizes ampliam o quadro regulatório e sistêmico para comunicações de segurança pública, mas não abordam estratégias de otimização em cenários de alta e contínua ocupação com tráfego de voz e requisitos rígidos de bloqueio em faixas licenciadas já saturadas, como ocorre no contexto da ocupação dos canais da PMESP, foco deste trabalho. Embora partam de focos distintos, oferecem contribuições metodológicas aplicáveis ao estudo da rede sem fio das forças de policiamento na RMSP, incluindo evidências de limitações e dificuldades práticas e indicam que cenários mais complexos, com múltiplos usuários e múltiplos canais, exigem mecanismos adicionais de coordenação e planejamento para organizar o uso eficiente do espectro.

A literatura recente converge para a melhoria do uso do espectro por meio de dados e medições do ambiente, em arranjos coordenados por bancos de dados de acesso dinâmico e, em paralelo, em abordagens cognitivas que aprendem padrões de uso para acessos oportunistas. Wang et al. (2022) mapeiam o papel do

aprendizado de máquina desde a detecção do ambiente até a tomada de decisão incluindo seleção e acesso ao canal, transferência dinâmica e segurança em cenários licenciados e não licenciados consolidando a visão de decisões adaptativas em ambientes altamente dinâmicos. No mesmo sentido, Rasti et al. (2025) propõem uma estrutura dinâmica baseada em Rede de Acesso via Rádio Aberta (O-RAN) e Inteligência Artificial Generativa (IA/GenAI), incorporando previsão de tráfego e alocação de recursos em múltiplas escalas de tempo (tempo não-real, quase-real e real) e troca/mercado de espectro entre operadores sob a coordenação de um agente de políticas e um corretor de espectro. Do ponto de vista regulatório, Parvini et al. (2022) e Patil et al. (2024) consolidam os principais modelos de compartilhamento dinâmico e destacam que a convergência entre bases de dados, inteligência de rede e coordenação institucional será crucial para o compartilhamento eficiente em ambientes complexos.

Askari e Dastanian (2023) formulam o compartilhamento de espectro em rádios cognitivos como um problema de otimização e propõem o algoritmo iTLBO (Improved Teaching–Learning-Based Optimization), capaz de aumentar a utilização e a justiça na alocação de canais. As simulações mostram desempenho superior aos métodos GA (Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) e ao TLBO (Teaching–Learning-Based Optimization) tradicional, reforçando a eficácia de técnicas heurísticas para gerenciar recursos espectrais restritos.

Entretanto, tais abordagens concentram-se majoritariamente em cenários de compartilhamento dinâmico ou acesso oportunista, não abordando diretamente a otimização interna de canais em sistemas dedicados operando sob limitação física de espectro disponível.

Cullen et al. (2023) apresentam uma revisão abrangente sobre alocação dinâmica de espectro, sistematizando técnicas de sensoriamento, definição formal de métricas de ocupação espectral e métodos de previsão espaço-temporal baseados em modelos estatísticos, modelagem estocástica e aprendizado de máquina, além do uso de dados sintéticos para simulação de cenários dinâmicos. O estudo destaca a importância da incorporação de dados históricos, geolocalização, padrões de comportamento dos usuários e parâmetros contextuais para decisões adaptativas mais precisas, permitindo antecipar variações na ocupação de faixas de frequência em ambientes de alta variabilidade temporal. Os autores argumentam que tais

abordagens preditivas são fundamentais para viabilizar uma gestão mais proativa e eficiente do espectro, especialmente em aplicações sensíveis como comunicações críticas e redes de emergência.

Embora o trabalho não trate diretamente de regimes de voz crítica com requisitos rigorosos de bloqueio, disponibilidade contínua ou restrições operacionais específicas de redes dedicadas de Segurança Pública, sua contribuição reside no fornecimento de um arcabouço metodológico consistente para caracterização, modelagem e previsão da ocupação espectral. Nesse sentido, os conceitos apresentados oferecem subsídios relevantes para a modelagem e geração de cenários de alta carga em faixa licenciada, como o analisado nesta dissertação, ainda que não constituam solução direta para o problema central de otimização sob ocupação contínua e elevada demanda.

Aredo et al. (2025) avaliam o desempenho dos serviços de comunicação crítica por voz (MCPTT) em 4G, 5G e sistemas dedicados, comparando bloqueio, latência, relação sinal-ruído, capacidade e espera. Entretanto, mesmo com esses avanços, 4G e 5G exibem limitações estruturais: o 5G perde robustez com a distância e o 4G sofre aumento significativo de bloqueio sob alta carga de tráfego.

Dessa forma, o próprio estudo evidencia que redes móveis comerciais não atendem de forma consistente aos requisitos rígidos pelas redes de comunicação de missão crítica, especialmente em cenários de ocupação elevada. Isso reforça o argumento desta pesquisa de que 4G/5G não devem ser considerados substitutos adequados para suprir a falta de espectro das redes dedicadas de segurança pública, justificando a abordagem adotada aqui de otimização no domínio licenciado em vez de migração ou dependência de infraestruturas comerciais.

Tal evidência reforça a pertinência de estudos voltados à otimização de redes dedicadas já estabelecidas, como sistemas LMR (Land-Mobile-Rádio) em VHF, onde a limitação decorre da quantidade restrita de canais disponíveis e não da inexistência de tecnologia alternativa.

No contexto brasileiro, estudos evidenciam a escassez do espectro. Scudeler & Guimarães (2012) consolidam a base teórica nacional em rádios cognitivos e métodos de detecção por autovalores, reforçando a pertinência de acessos dinâmicos e não explorando sistemas com superutilização do espectro. Pesquisas recentes em

sensoriamento espectral cooperativo (Silva et al., 2023) demonstram tecnicamente a necessidade de mecanismos de detecção e uso oportunista, inclusive em faixas regulamentadas como TV White Spaces pela ANATEL.

Elhachmi e Guennoun (2016) formulam o problema de alocação oportunista de espectro entre usuários primários (PUs) e secundários (SUs) em rádios cognitivos (RC) e propõem um algoritmo genético dinâmico, com operadores de cruzamento e mutação projetados para evitar conflitos de canal. O objetivo do modelo é minimizar a interferência no processo de alocação e garantir rápida convergência do algoritmo em um ambiente de rede simulado.

Singh & Marchang (2022) utilizaram Algoritmos Genéticos aprimorados com operadores inspirados em ‘terapia gênica’ para acelerar a convergência e melhorar a qualidade da solução no problema de alocação de espectro em redes cognitivas. Os autores avaliam o método por meio dos resultados de simulação, demonstrando desempenho superior ao AG convencional em termos de velocidade de convergência e eficiência de alocação.

Chigaba et al. (2025) empregam o NSGA-II como parte de um framework híbrido com PPO (*Proximal Policy Optimization*) para otimizar, de forma multiobjetivo, o compartilhamento de espectro em redes cognitivas 6G. O NSGA-II é responsável por explorar a fronteira de Pareto entre eficiência espectral, mitigação de interferência, redução de colisões com usuários primários, economia de energia e manutenção de QoS, ao passo que o PPO aprende políticas de decisão sequencial que se adaptam dinamicamente ao estado da rede, executando ações consistentes com esses objetivos em ambientes variáveis. Em conjunto, tais estudos consolidam a meta-heurística como base promissora para alocação sob alta ocupação e múltiplas restrições, oferecendo insumos metodológicos relevantes para cenários de espectro disputado. No entanto, a maior parte dessas abordagens é desenvolvida em contextos de redes cognitivas, acesso oportunista ou ambientes simulados, não tratando explicitamente da reorganização interna de canais em faixa licenciada dedicada à segurança pública, com ocupação contínua e requisitos rigorosos de bloqueio. Essa lacuna torna pertinente a aplicação e adaptação dessas técnicas ao contexto específico dos canais licenciados na Região Metropolitana de São Paulo, foco desta dissertação.

A Tabela 1, apresenta um resumo destes trabalhos

Tabela 3 – Trabalhos Correlatos.

Autor	Método	Ambiente	Principais resultados	Pontos de observações
Lähetkangas et al. (2016)	Compartilhamento dinâmico de espectro.	Simulações de compartilhamento de rádio de segurança pública e comerciais.	Disponibilidade de canais quando há reserva antecipada.	Dependência de reserva antecipada e vulnerabilidade a falhas de conectividade, por atuar como usuário secundário sem prioridade.
Höyhty et al. (2018)	Compartilhamento dinâmico + prioridade de tráfego (QoS), segmentação lógica.	Ambientes de teste reais 4G/5G para compartilhamento da rede de segurança pública.	Prioridade efetiva para serviços críticos e troca rápida de frequência em redes.	Avaliação em cenários controlados; não cobre cargas extremas de voz nem indisponibilidades prolongadas.
Niringiye et al. (2022)	Deteção por energia para usar canais livres de faixas destinadas a espaços em branco.	Simulação e testes com rádios reais utilizando faixas livres do espaço em branco.	Viabilidade prática de TVWS para voz de missão crítica em VHF com detecção por energia.	No teste real, a detecção teve desempenho menor que na simulação devido ao ruído e limitações do hardware.
Wang et al. (2022)	Revisão de ML para compartilhamento de espectro.	Sistemas dinâmicos (CRN, LTE-U, etc.).	ML melhora decisões adaptativas e segurança.	Revisão ampla, sem arquitetura operacional.
Parvini et al. (2023)	Revisão de modelos dinâmicos (LSA, SAS, etc.).	Redes 4G/5G em contexto regulatório.	Organiza panorama normativo e desafios no compartilhamento.	Mostra lacunas entre padrões e implementações.
Patil et al. (2024)	Revisão técnica (ML e IA).	Redes 5G/B5G intensivas em IoE.	Discute desafios e oportunidades de compartilhamento do espectro.	Exigem-se novas abordagens para integrar e coordenar múltiplas faixas de espectro com características heterogêneas.
Askari & Dastanian (2023)	iTLBO vs GA/PSO/TLBO.	Rádio cognitivo estático.	iTLBO supera os demais em justiça e utilização.	O estudo assume usuários imóveis e rede sem ruído, usa modelo simplificado de interferência e cenários estáticos, sem considerar mobilidade, variação temporal ou métricas reais de QoS; resultados limitados a simulações artificiais.
Cullen et al. (2023)	Redes sem fio em geral; Dynamic Spectrum Allocation; modelagem e previsão de ocupação espectral.	Revisão abrangente sobre alocação dinâmica do espectro.	Sistematiza métodos para caracterização e previsão da ocupação do espectro em cenários dinâmicos; integra sensoriamento, métricas e modelos de ML; métodos aplicável a políticas adaptativas e estudos em ambientes congestionados.	Desafios e limitações na implantação do sistema (práticas, técnicas, econômicas e organizacionais).
Aredo et al. (2025)	Avaliação comparativa do desempenho MCPTT em redes 4G, 5G e sistemas dedicados.	Operação de MCPTT em redes móveis comerciais (4G/5G) e redes dedicadas (LMR).	Resultados mostram que 5G reduz bloqueio e espera devido à flexibilidade de alocação; 4G apresenta melhor alcance e SNR que o 5G; LMR mantém o SNR mais alto	O 5G perde robustez com a distância; o 4G sofre aumento acentuado de bloqueio sob alta carga, redes comerciais não atendem requisitos rígidos de missão crítica,
Scudeler & Guimarães (2012)	Estudo teórico sobre rádios cognitivos e métodos de detecção por autovalores.	Base conceitual nacional para acesso dinâmico e tecnologias cognitivas.	Consolida fundamentos nacionais de rádios cognitivos; reforça pertinência de métodos de detecção do espectro.	Não explora superutilização em faixas licenciadas.
Silva et al. (2023)	Sensoriamento espectral cooperativo para avaliação do uso do espectro.	Redes sem fio; faixas como TV White Spaces reguladas pela ANATEL.	Demonstra necessidade de mecanismos de detecção e uso oportunista; evidencia ociosidade em faixas licenciadas.	Não explora superutilização em faixas licenciadas, necessidades organizacionais: adequação às normas.
Elhachmi & Guennoun (2016)	AG dinâmico com operadores de cruzamento/mutação orientados a conflito.	Simulado (redes sem fio).	Redução de interferência; alocações válidas sob alta dinamicidade; boa convergência.	AG aplicado em ambiente simulado sem considerar faixas licenciadas em ambientes com ocupação contínua.
Singh & Marchang (2022)	AG/DE com “gene therapy”.	Simulado (redes sem fio).	Supera AG/DE tradicionais em velocidade de convergência e qualidade de solução nas funções de utilidade.	Aprimora a aplicação do AG convencional, mas aplicado em ambiente simulado sem considerar faixas licenciadas em ambientes com ocupação contínua.
Chigaba et al. (2025)	Híbrido NSGA-II + PPO (DRL) para otimização multiobjetivo de compartilhamento de espectro.	Simulado (dados sintéticos e ns-3 em redes 6G).	Redução de interferência; menor colisões com PUs; ganho em eficiência energética; justiça perfeita.	AG multiobjetivo como soluções em redes com objetivos conflitantes, não foi aplicada a dados reais de uma rede.

Fonte: Autor, 2026.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a tipologia e a limitação da pesquisa, assim como os materiais utilizados e a metodologia empregada no levantamento e análise dos dados para este experimento.

3.1. ESCOLHA E JUSTIFICATIVA DA TIPOLOGIA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi classificada de natureza aplicada, uma vez que seu foco reside no desenvolvimento e na aplicação de conhecimentos científicos e tecnológicos para a solução de problemas práticos e concretos, com o objetivo de produzir novos materiais, equipamentos e políticas (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Quanto à sua abordagem, a pesquisa é predominantemente quantitativa. Isso se manifesta na utilização de modelos matemáticos e algoritmos de otimização, analisar e propor soluções numéricas, bem como na avaliação de desempenho por meio de métricas quantificáveis que permitem aferir a eficácia das abordagens propostas (LAKATOS; MARCONI, 2017).

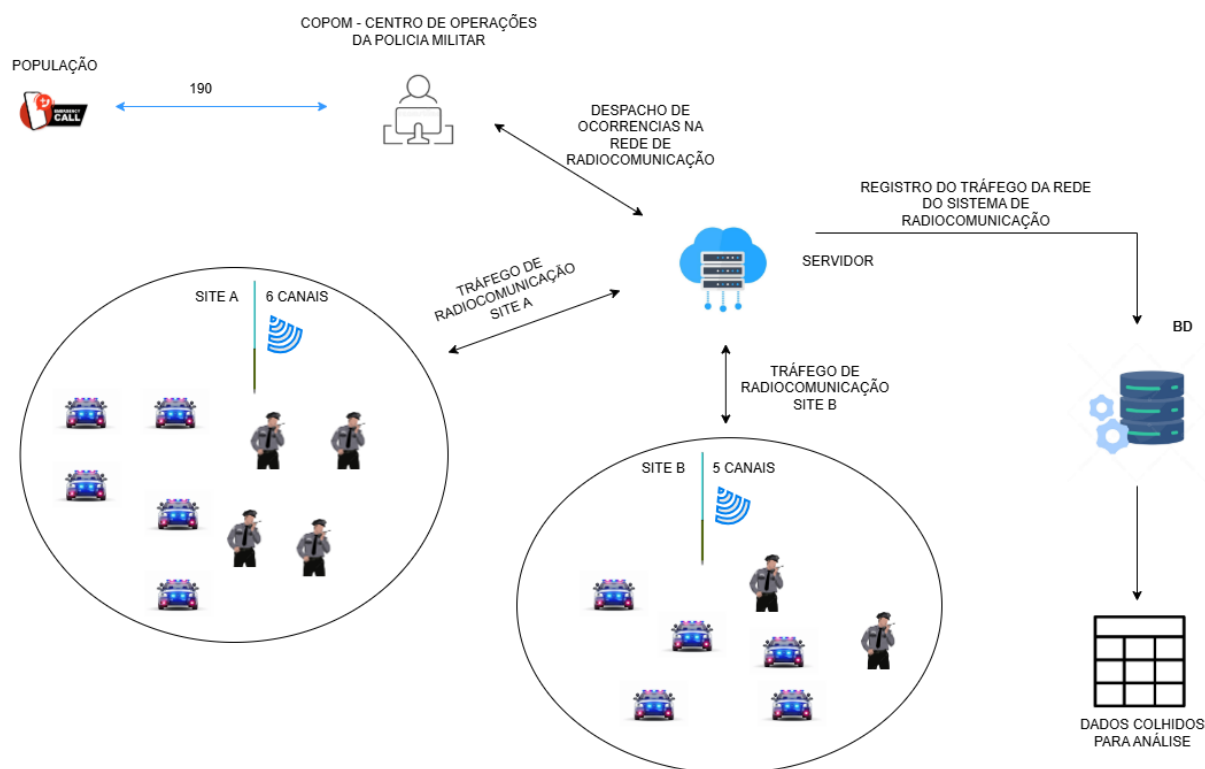
O caráter principal da investigação é propositivo (ou metodológico), pois visa desenvolver e aplicar um modelo de otimização para redistribuição interna de carga em canais licenciados, com base em dados reais de ocupação espectral em sistemas de comunicação (LAKATOS; MARCONI, 2017). Para validar e contextualizar as soluções propostas, a pesquisa integrará a análise de dados reais de uma organização, permitindo que os cenários de simulação reflitam condições práticas. Adicionalmente, a pesquisa pode apresentar um caráter descritivo, ao caracterizar os desafios inerentes ao gerenciamento dinâmico do espectro e as propriedades dos dados reais, e explicativo, ao elucidar as relações de causa e efeito entre as estratégias de alocação e o desempenho dos sistemas de comunicação, com base nos resultados obtidos da simulação e da análise de dados.

3.2. COLETA E SELEÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por registros colhidos no banco de dados do servidor central do sistema de gerenciamento da rede de radiocomunicação digital Troncalizado, conectados aos sites de repetição que

possuem equipamentos de transmissão no modelo GTR800 *Expandable*. Este sistema realiza a coleta automatizada e contínua do tráfego de chamadas realizadas nos canais nos respectivos sites de repetição em estudo nesta pesquisa, gerando relatórios detalhados sobre o uso do espectro e o desempenho do sistema.

Figura 16 – Fluxograma do processo de coleta de dados do sistema.

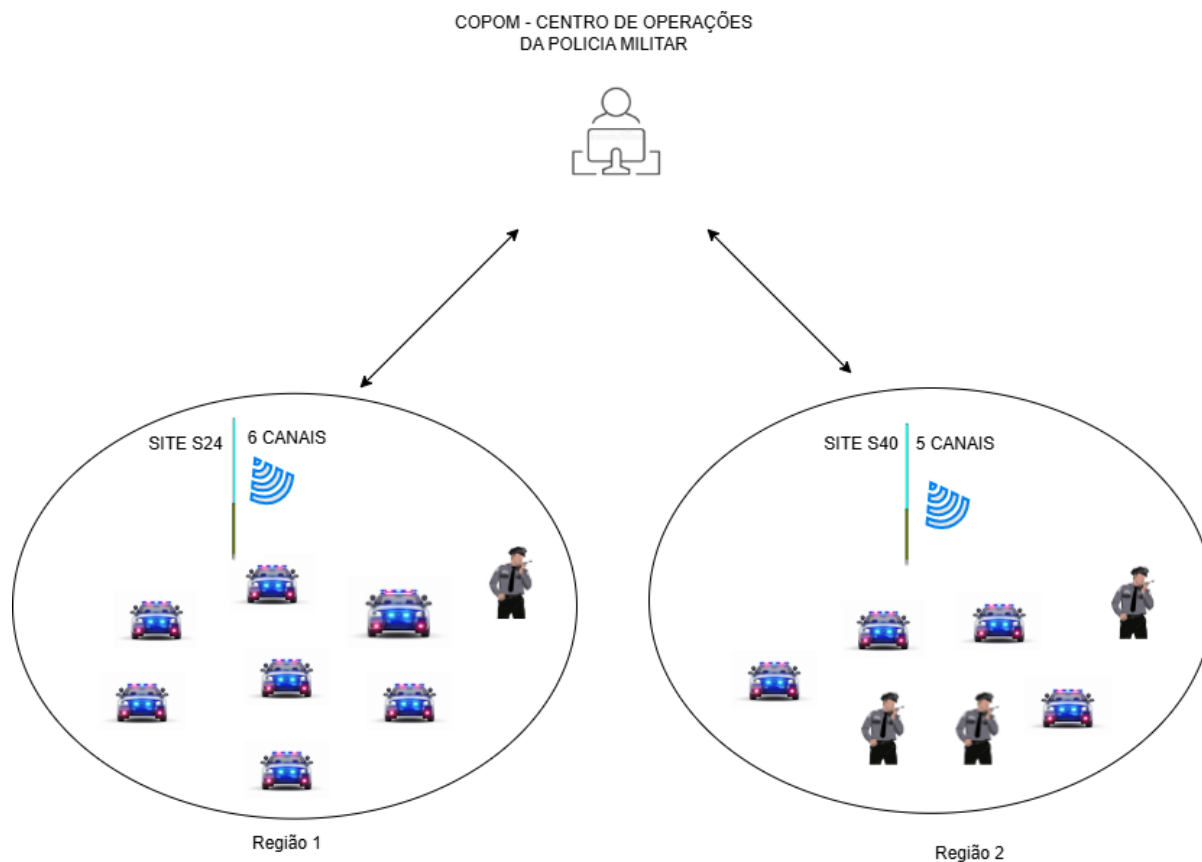


Fonte: Autor, 2025

As duas bases de dados foram extraídas diretamente deste sistema na forma de relatórios tabulares. A primeira base contém registros detalhados do tráfego de chamadas realizados nos respectivos canais pertencentes a cada site, abrangendo a quantidades e a duração das chamadas realizadas naquele período. A segunda base complementa com informações do tráfego de chamadas total realizada pelo site, além das chamadas que entraram na fila de espera e a duração da indisponibilidade na ocupação total dos canais.

Os nomes dos *sites* foram anonimizados pelo pesquisador para preservar o sigilo operacional da organização, em conformidade com a legislação de proteção de dados. Para fins de análise, as localidades foram substituídas por identificadores genéricos e sequenciais, denominados de S01 a S42.

Figura 17 – Anonimização dos pontos de repetição e espectro licenciado.



Fonte: Autor, 2025

Foram identificados os números de canais de cada site, onde os sites são compostos por N canais por site, totalizando 260 canais licenciados para uso na RMSP.

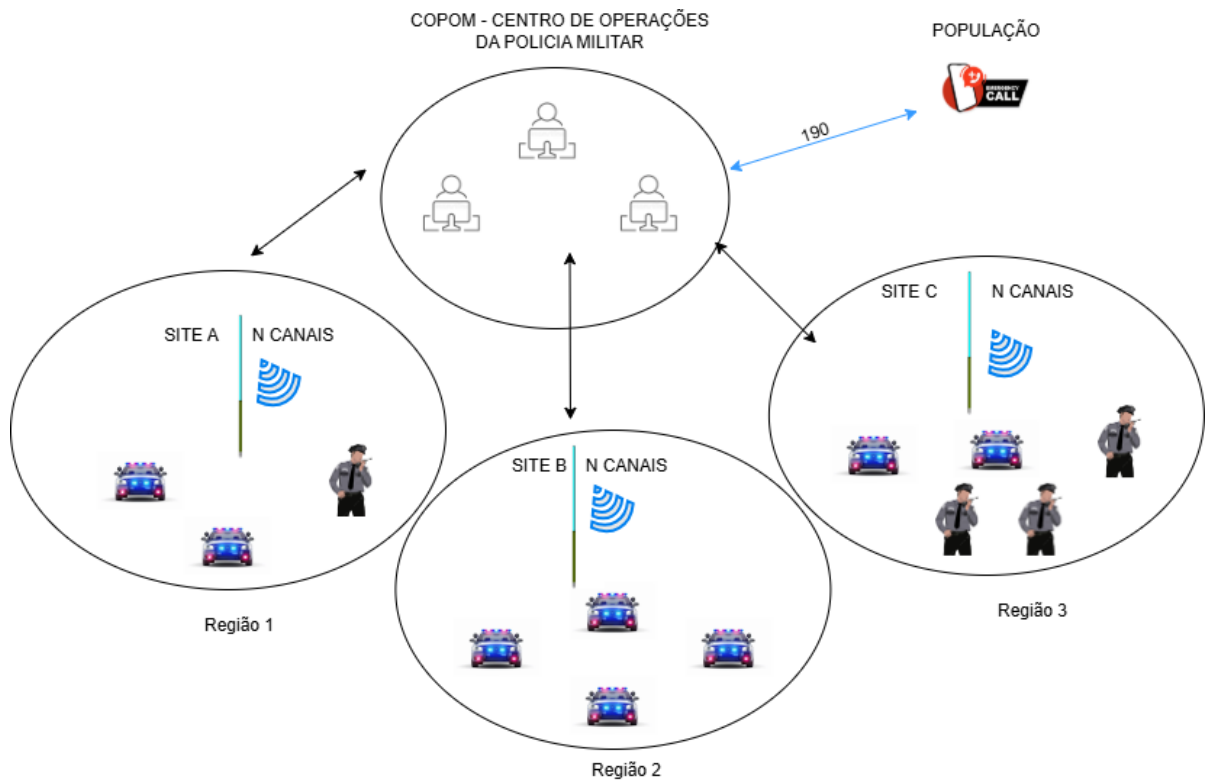
A força de Policiamento Militar de São Paulo possui 42 sites, distribuídos em regiões na RMSP. Essas repetidoras/sites são cruciais para assegurar a comunicação e o atendimento do efetivo militar em suas respectivas áreas de atuação.

A operação de cada repetidora/site é essencial para a comunicação bilateral e imediata do efetivo policial em campo com a central de atendimento "190". Esta central, por sua vez, recebe as ocorrências da população e as distribui para o efetivo policial em suas respectivas regiões conforme a demanda.

A partir da chamada telefônica 190 o operador responsável no COPOM realiza o contato com o efetivo em campo através do sistema de radiocomunicação para deliberar a ocorrência em sua região, conforme ilustrada na Figura 18 uma chamada 190 com ocorrência na região 1 o operador ao realizar a chamada via

radiocomunicação do efetivo em campo a repetidora/site “A” é acionada e realiza a repetição da chamada para as viaturas e rádios portáteis da região que recebem a ocorrência e deliberam as ações necessárias.

Figura 18 – Ciclo da comunicação chamadas de emergências policiais.



Fonte: Autor, 2025

Na região Metropolitana de São Paulo as 42 repetidoras/sites operam na faixa de espectro VHF e UHF, em modo Troncalizado, seguindo o padrão APCO 25. Cada site possui uma quantidade definida de canais operando com faixas de espectro licenciados pela ANATEL, no modelo de alocação estática.

Para a realização da presente pesquisa, foram utilizadas duas bases de dados extraídas do servidor central responsável pelo gerenciamento dos sistemas de radiocomunicação digital Troncalizado. Essas bases representam os relatórios gerados por pontos de repetição que integram a infraestrutura de comunicação da corporação na região da capital de São Paulo em estudo.

A primeira base, estruturada em formato tabular, contém registros diários do tráfego de chamadas em cada canal site e seus respectivos sites. A base de dados “Canais” representando um fragmento dos dados gerais, é apresentada a seguir:

Tabela 4 – Fragmento da base de dados “Canais”, contendo dados mínimos necessários

Site	Canal	Data	Canais dados	Chamadas ativas	Bloqueio	% uso	Canais dados Tempo	Chamadas ativas Tempo	Média de chamadas Tempo	Canal controle Tempo
S31	A31	07/03/2025	0	0	00:00:00	100	00:00:00	00:00:00	00:00:00	24:00:00
S31	B31	07/03/2025	8	340	00:00:00	14	02:58:56	03:58:31	00:00:11	00:00:00
S31	C31	07/03/2025	53	3.606	00:00:00	56	08:09:42	18:42:12	00:00:11	00:00:00
S31	D31	07/03/2025	40	4.351	00:00:00	51	05:44:19	18:50:32	00:00:11	00:00:00
S31	E31	07/03/2025	62	4.115	00:00:00	51	06:16:19	18:22:06	00:00:11	00:00:00
S31	F31	07/03/2025	3	19	00:00:00	3	00:42:46	00:45:20	00:00:10	00:00:00

Fonte: Autor, 2025

A descrição de cada item contido na base de dados “Canais” é apresentada a seguir:

Quadro 1 – Descrição dos itens da base de dados “faixa de espectro”

Caraterística	descrição
<i>Site Alias</i>	Indica o ponto de repetição anonimizado, apenas o pesquisador principal conhece a identificação de cada local.
<i>Channel ID</i>	Identificador do canal de comunicação, faixa de frequência do espectro licenciado anonimizado pelo pesquisador.
<i>Date</i>	O registro de tempo em que a observação ou medição foi feita. Indica o momento específico dos dados.
<i>Total Active Calls</i>	O número total de chamadas ativas em um canal ocorridos em um determinado intervalo de tempo.
<i>Blocked Duration</i>	O tempo total em que chamadas foram bloqueadas ou não puderam ser estabelecidas devido à falta de recursos (canais ocupados, sobrecarga).
<i>Percent Usage</i>	A porcentagem de tempo em que um canal “espectro licenciado” esteve ocupado/em uso de voz e dados em relação ao tempo total disponível.
<i>Percent Complete</i>	A porcentagem de dados coletados para um intervalo, cem por cento indica que todos os dados foram coletados
<i>Group Call Duration</i>	A duração total acumulada de todas as chamadas ativas dentro de um determinado intervalo de tempo.
<i>Control Channel Duration</i>	A duração total de dados em um canal ativos dentro de um determinado intervalo de tempo

Fonte: Motorola, 2022

A segunda base “Sites” complementa o tráfego de chamadas de todos os N canais em seus respectivos sites, com registros diários identificando os total de chamadas ocupadas e seu tempo de duração.

Tabela 5 – Fragmento da base de dados “Sites”, contendo dados mínimos necessários

Site	Data	Chamadas ativas	Chamadas ativas Tempo	Chamadas Fila	Chamadas fila Tempo	Média de tempo chamadas	Canais dados Tempo	Bloqueadas Tempo	% uso
S31	07/03/2025	12431	60:38:29	3	00:00:02	00:00:11	23:51:57	00:00:00	41
S31	08/03/2025	13606	63:41:13	2	00:00:00	00:00:11	23:48:20	00:00:00	42
S31	09/03/2025	13101	62:57:15	0	00:00:00	00:00:11	23:41:23	00:00:00	42
S31	10/03/2025	15723	70:52:40	57	00:01:49	00:00:11	24:46:23	00:00:00	45
S31	11/03/2025	11948	60:40:54	4	00:00:00	00:00:11	23:58:34	00:00:00	41
S31	12/03/2025	13707	64:56:51	0	00:00:00	00:00:11	24:16:19	00:00:00	43

Fonte: Autor, 2025

A descrição de cada item contido na base de dados “Sites” é apresentada a seguir:

Quadro 2 – Descrição dos itens da base de dados “Ocupado”

Caraterística	descrição
<i>Site Alias</i>	Indica o ponto de repetição anonimizado, apenas o pesquisador principal conhece a identificação de cada local.
<i>Time</i>	O registro de tempo em que a observação ou medição foi feita. Indica o momento específico dos dados.
<i>Total Active Calls</i>	O número total de chamadas ativas em um determinado intervalo de tempo.
<i>Total Active Duration</i>	A duração total acumulada de todas as chamadas (voz e dados) ativas dentro de um determinado intervalo de tempo.
<i>Total Busy Calls</i>	O número total de chamadas que entraram na fila devido a ocupações dos canais.
<i>Total Busy Duration</i>	O tempo total acumulado em que chamadas ficaram na fila de espera devido à ocupação (canais ocupados, sobrecarga) e não puderam ser completadas.
<i>Total Push To Talks</i>	O número total de eventos/chamadas de rádio " <i>Push-to-Talk</i> " (PTT) realizados.
<i>Percent Usage</i>	A porcentagem de dados coletados para um intervalo, cem por cento indica que todos os dados foram coletados
<i>Percent Complete</i>	A duração total acumulada de todas as chamadas ativas dentro de um determinado intervalo de tempo.

Fonte: Motorola, 2022

Os dados utilizados neste estudo foram adquiridos no período de maio de 2025 a fevereiro de 2026. Com a análise desses conjuntos de dados, espera-se obter um panorama detalhado do padrão de uso do espectro, identificar ineficiências na alocação estática atual e quantificar o potencial de otimização no uso dos canais de radiocomunicação, buscando fundamentar propostas para um gerenciamento mais dinâmico e eficiente do espectro.

As bases de dados foram consolidadas e padronizadas para garantir a consistência das informações e facilitar a aplicação das análises estatísticas e condições de tráfego real de cada site.

Estatísticas Descritivas: Foram calculadas medidas de tendência central como mediana e percentil (95 e 99) para as principais métricas de tráfego, como *Group Call* e *Group Call Duration* para os dados “Canais” e *Total Busy Calls* e *Total Busy Duration* para os dados “sites”. Isso permitirá uma compreensão quantitativa da intensidade do uso do espectro em diferentes canais e nos sites.

Foram calculadas a mediana e percentil devido ao comportamento não paramétrico dos dados em que determinados momentos alguns resultado chegam a picos elevados “outliers” que podem gerar influências sobre a média e levando a uma interpretação equivocada sobre os resultados.

Análise de Distribuição de Frequência: Gráficos de frequência e histogramas serão utilizados para visualizar a distribuição do *Group Call Duration* e *Total Busy Duration* em diferentes canais. Essa análise revelará a proporção de tempo em que os canais estão subutilizados ou congestionados.

Os estudos serão conduzidos com o objetivo de caracterizar o padrão de uso do espectro da rede de radiocomunicação da Polícia Militar na região Metropolitana.

Com os valores contidos no relatório podemos conhecer o tráfego real de cada site, e para isso primeiramente identificamos que o sistema trabalha por filas, onde a chamada entra em uma fila de espera quando todos os canais estão ocupados.

Usaremos a fórmula de Erlang C, o tráfego em Erlang foi encontrado através do tempo total de chamadas de voz (*Group Call Duration*) sobre o tempo total de intervalo (Interval Length) medidos no período de 1 dia.

$$A_{(E)} = \frac{GCD}{IL}$$

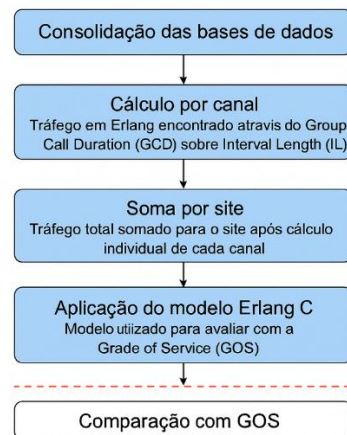
$A_{(E)}$ = tráfego Erlang

GCD (*Group Call Duration*) = Tempo total das chamadas de voz.

IL (Interval Length) = Período de leitura das chamadas.

Para determinar o tráfego em Erlang C de cada site, foi realizado inicialmente o cálculo individual por canal. Cada canal dos respectivos sites teve seu tráfego $A_{(E)}$ medido separadamente, considerando o volume de chamadas e a ocupação registrada. Em seguida, os valores obtidos para todos os canais de um mesmo site foram somados, resultando no tráfego total do site. Com esse valor consolidado, aplicou-se Erlang C P_w , permitindo avaliar as condições de ocupação e os recursos de cada site. Esse procedimento garante uma análise precisa da capacidade e do nível de serviço nos canais e do site.

Figura 19 – Fluxograma do processo de consolidação dos dados para cálculo Erlang C.



Fonte: Autor, 2025

Para entendermos se o site está trabalhando dentro da sua capacidade aplicamos a fórmula de Erlang C para um grau de serviço GOS de 1% que é adotado para sistemas de missão crítica devido a exigência de qualidade que este serviço necessita (ITU-R, 2021).

3.2.1. TRATAMENTO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados utilizados correspondem ao uso de terminais de rádios em uma rede troncalizada, onde cada *Site ID* representa uma estação e cada *Channel ID* um canal de voz. A base consolidada foi obtida a partir dos dois relatórios diários colhido para a análise, unificados em um único arquivo CSV contendo os campos importantes para a presente pesquisa, como:

Time: data de referência (d/m/y),

Site ID: identificador da estação,

Channel ID: identificador do canal,

Percent Usage: percentual de uso do canal,

Group Call Duration: tempo total de chamadas em grupo no canal (horas ou HH:MM:SS).

Após a concatenação e padronização dos arquivos, foram calculadas estatísticas por site e dia, incluindo número de canais, mediana, percentil (95 e 99) e contagem do tráfego em Erlang dos canais, resultando na porcentagem de uso real

do tráfego de voz em cada canal e distinguindo as instancias com porcentagem acima de 70%. Instâncias desbalanceadas foram definidas como aquelas com pelo menos um canal acima de 70% e mais de um canal disponível (ITU-R, 2021). O limiar de 70% foi adotado como ponto operacional de alerta, considerando que, em sistemas troncalizados, níveis de ocupação superiores a esse valor aumentam de forma não linear a probabilidade de espera (P_w), especialmente em cenários de tráfego variável.

Foram selecionadas apenas as combinações (Site ID, Time) consideradas desbalanceadas, definidas segundo o critério:

- pelo menos um canal com Percent Usage $> 70\%$, e
- existência de mais de um canal no site (i.e., $n_{\text{canais}} > 1$).

Essas combinações representam cenários de operação com risco de saturação de recursos e foram utilizadas como instâncias do problema de otimização.

3.2.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE BALANCEAMENTO DE CARGA.

No contexto da otimização do uso do espectro em redes de radiocomunicação de missão crítica, objetivos como minimizar o pico de ocupação de um canal, reduzir o número de instâncias que excedem o limiar de 70% de utilização e diminuir o desvio de uso entre os canais em relação à distribuição atual da carga entram naturalmente em conflito. Por esse motivo, uma abordagem baseada em algoritmos de otimização multiobjetivo, como o NSGA-II, mostra-se adequada para lidar simultaneamente com esses desafios.

Manter determinada carga de tráfego concentrada em um único canal pode levar à sua sobrecarga e, conseqüentemente, à formação de filas de espera para as chamadas. Por outro lado, aumentar a carga nos demais canais e promover uma distribuição mais equilibrada reduz a percepção de subutilização e possibilita um uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Esse conflito melhorar o desempenho de um canal enquanto, teoricamente, se “piora” o de outros pode, em última análise, diminuir a necessidade de novas faixas de espectro, reforçando a validade da formulação do problema como uma otimização multiobjetivo.

Para cada instância identificada como desbalanceada (Site ID, Time), o problema de redistribuição interna da carga foi formulado como um problema independente de otimização multiobjetivo. Sejam:

$C = \{1, 2, \dots, N\}$ o conjunto de canais do site,

U_c o uso atual (Percent Usage) do canal c ,

$L = \sum_{c \in C} U_c$ a carga total agregada daquele site na data considerada.

A distribuição atual de carga entre os canais é dada por:

$$p_c = \frac{U_c}{L}, \forall c \in C$$

Fonte: Autor

assumindo $L > 0$. O objetivo da otimização é determinar uma nova distribuição de carga $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, em que:

x_c representa a fração da carga total L atribuída ao canal c após o balanceamento,

$$x_c \geq 0, \forall c \in C,$$

$$\sum_{c \in C} x_c = 1.$$

Dessa forma, o uso otimizado previsto para cada canal é dado por:

$$U'_c = x_c \cdot L, \forall c \in C$$

Essas funções objetivo capturam diferentes aspectos da eficiência e do equilíbrio de uso do espectro. Elas são definidas da seguinte forma:

O problema é formulado como uma otimização multiobjetivo com três funções objetivo:

Minimizar o uso máximo entre os canais

$$f_1(\mathbf{x}) = \max_{c \in C} U'_c$$

Esse objetivo busca reduzir o pico de utilização, evitando sobrecargas e diminuindo a probabilidade de filas de espera.

Esse critério é particularmente relevante em sistemas de missão crítica, onde a saturação de um único canal já é suficiente para comprometer o desempenho operacional.

Minimizar os excedentes acima de m limiar de uso (70%)
 Seja $U_{\text{limiar}} = 70\%$. Define-se:

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{c \in C} \max(0, U'_c - U_{\text{limiar}})^2$$

Essa função penaliza de forma quadrática os canais que permanecem acima do limite desejado, incentivando uma utilização mais equilibrada.

Minimizar o desvio em relação à distribuição atual de carga

$$f_3(\mathbf{x}) = \sum_{c \in C} (x_c - p_c)^2$$

Esse objetivo preserva, na medida do possível, a configuração atual do sistema, evitando mudanças bruscas que poderiam impactar a operação.

Assim, para cada instância (Site ID, Time), busca-se um conjunto de soluções $\mathbf{x}$ que minimizem simultaneamente f_1 , f_2 e f_3 , sujeito às restrições de normalização das frações x_c . O uso de algoritmos como o NSGA-II permite identificar soluções de compromisso (*trade-offs*) entre os objetivos conflitantes, fornecendo um conjunto Pareto-ótimo de distribuições de carga.

3.2.3. ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO (NSGA-II)

Para resolver o problema multiobjetivo de otimização da distribuição de recursos em uma rede de radiocomunicação troncalizada, foi adotado o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*). Este algoritmo é reconhecido por sua eficiência em lidar com múltiplos objetivos conflitantes, garantindo uma convergência rápida para a Fronteira de Pareto e uma boa distribuição das soluções ao longo dela.

Cada indivíduo da população, nesse contexto, representa uma configuração candidata completa para a distribuição de recursos ou carga de tráfego para o conjunto total de canais em um site da rede, em um dado período. Ou seja, um indivíduo (cromossomo) é definido como um site com N canais é configurada.

3.3.2.1. CODIFICAÇÃO E NORMALIZAÇÃO

Os indivíduos são representados por vetores reais $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N)$, inicialmente gerados de forma aleatória no intervalo $[0,1]$.

Como esses valores representam proporções de carga, cada vetor é normalizado da seguinte forma:

$$x_c = \frac{\tilde{x}_c}{\sum_{j \in C} \tilde{x}_j}, \forall c \in C$$

Desde que $\sum_j \tilde{x}_j > 0$.

Caso contrário (situação degenerado), utiliza-se uma distribuição uniforme:

$$x_c = \frac{1}{N}$$

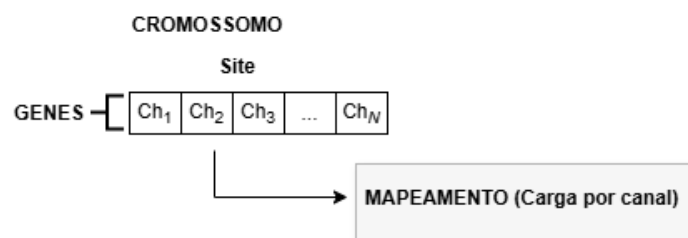
Os indivíduos são representados por vetores reais de X_n posições, onde cada posição corresponde a um canal específico em um site.

Isso assegura que a capacidade total de canais de cada site (6 canais em um site por exemplo) seja devidamente considerada e que os recursos não sejam "movidos" entre sites.

A estrutura do cromossomo, que ilustra essa codificação segmentada por site e canais, é detalhada na Figura 20.

Cromossomos por site (Site ID, Time) com seus respectivos canais.

Figura 20 – Representação cromossômica da população.



Fonte: Autor, 2026

Cada cromossomo representa a configuração de distribuição da carga de tráfego de um determinado site. Os genes do cromossomo correspondem aos canais

disponíveis no site ($Ch_1, Ch_2, Ch_3, \dots, Ch_n$), sendo que cada gene armazena a parcela de carga atribuída ao respectivo canal.

Dessa forma, o cromossomo codifica uma solução candidata para o problema de balanceamento de carga, definindo como o tráfego total do site será distribuído entre seus canais. O mapeamento dos genes para os valores de carga por canal permite avaliar o desempenho da solução quanto aos objetivos de minimizar a ocupação máxima, reduzir a probabilidade de espera das chamadas e promover uma distribuição mais equilibrada dos recursos espectrais disponíveis.

Durante a execução do algoritmo genético NSGA-II, operadores de seleção, cruzamento e mutação geram novas combinações de distribuição de carga, preservando a carga total transportada pelo site e respeitando as restrições operacionais do sistema. As soluções resultantes são então avaliadas por meio das funções objetivo, sendo iterativamente refinadas até a convergência para uma resposta subótima, composta pelas melhores soluções não dominadas encontradas durante o processo evolutivo.

3.3.2.2. AVALIAÇÃO DOS INDIVÍDUOS

Após a normalização dos vetores, calcula-se o uso previsto de cada canal:

$$U'_c = x_c \cdot L,$$

Em seguida, computam-se os valores das funções objetivo:

- $f_1(\mathbf{x})$ — minimização do uso máximo;
- $f_2(\mathbf{x})$ — penalização de excedentes acima de 70%;
- $f_3(\mathbf{x})$ — desvio em relação à distribuição atual.

O vetor de objetivos de cada indivíduo é utilizado pelo NSGA-II para:

- realizar a ordenação não-dominada (Pareto-ranking),
- calcular a distância de aglomeração (*crowding distance*),
- selecionar os indivíduos para reprodução e composição das próximas gerações.

3.3.2.3. OPERADORES GENÉTICOS E PARÂMETROS

Foram utilizados operadores de cruzamento e mutação clássicos para variáveis reais, como:

- Cruzamento do tipo *Simulated Binary Crossover* (SBX),
- Mutação polinomial (*polynomial mutation*).

Após o cruzamento e a mutação, os vetores resultantes ficam dentro do intervalo $[0,1]$ e novamente normalizados, garantindo de forma estrita que a soma de suas frações de carga resulte em 1, conforme a equação:

$$\sum_c x_c = 1$$

Os principais parâmetros utilizados foram:

- tamanho da população: 60 indivíduos;
- número de gerações: 150;
- probabilidade de cruzamento: 0,9;
- taxa de mutação: $1/N$ por gene;
- Índice de mutação (n_m): 20.

Esses valores foram escolhidos de forma a equilibrar custo computacional e qualidade das soluções, permitindo a exploração adequada do espaço de busca.

3.2.4. PROCEDIMENTO GLOBAL DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS SITES

O procedimento de otimização foi aplicado de forma sistemática às múltiplas instâncias de desbalanceamento identificadas na rede, conforme descrito a seguir:

- IDENTIFICAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

A partir da base consolidada, foram listadas todas as combinações (Site ID, Time) que satisfaziam o critério de desbalanceamento (ao menos um canal com uso superior a 70% e mais de um canal disponível no site).

- CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA POR INSTÂNCIA

Para cada combinação (Site ID, Time):

- 1 - foram extraídos os canais correspondentes,

- 2 - calculados os usos atuais U_c , a carga total L e a distribuição atual p_c ,
- 3 - instanciado o problema multiobjetivo com as funções f_1, f_2, f_3 .

- EXECUÇÃO DO NSGA-II POR INSTÂNCIA

O NSGA-II foi executado de forma independente para cada par (Site ID, Time) desbalanceado, produzindo uma fronteira de Pareto de distribuições X viáveis.

- SELEÇÃO DA SOLUÇÃO RECOMENDADA

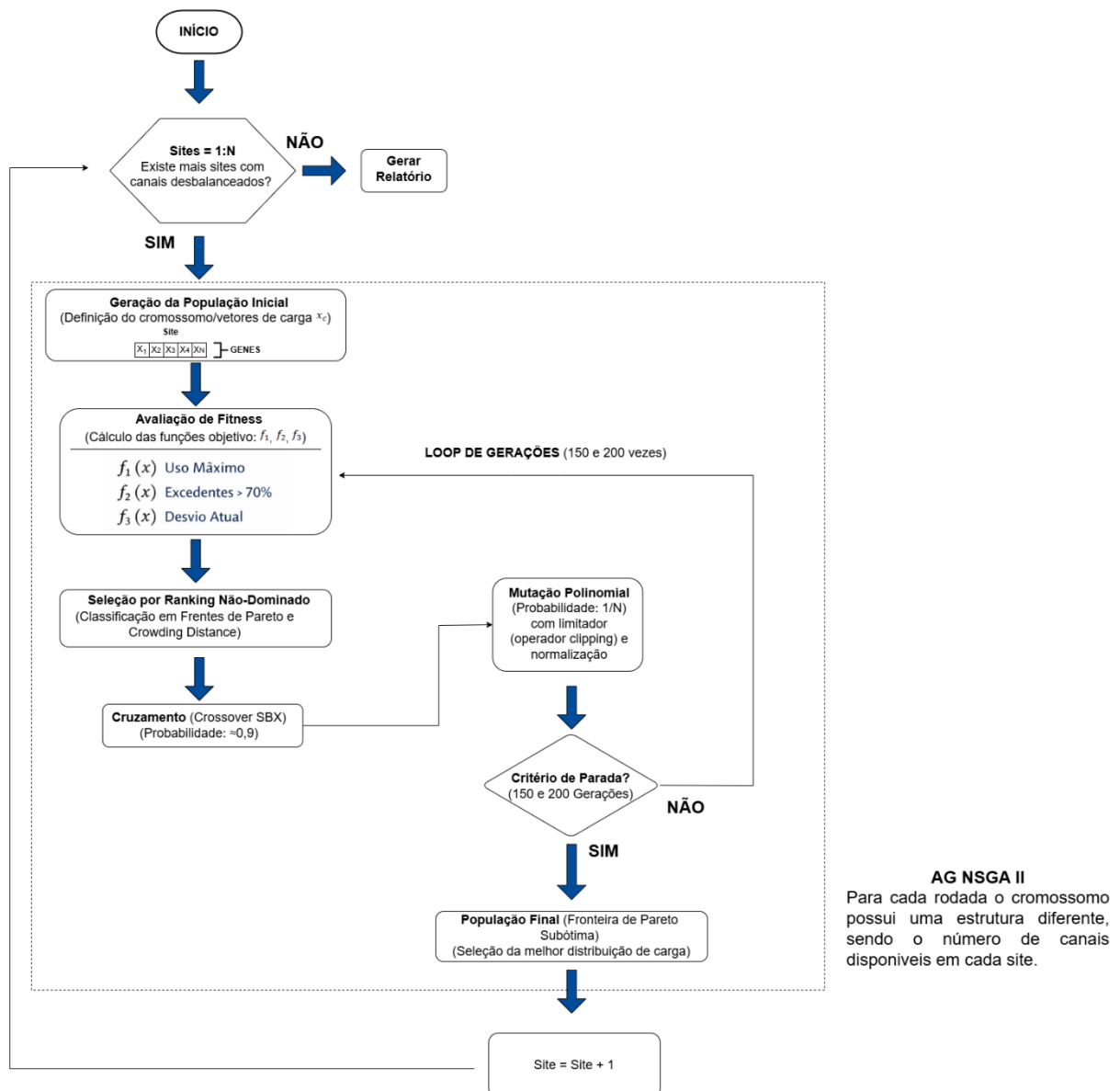
Entre as soluções não-dominadas obtidas para cada instância, foi selecionada, para fins de recomendação operacional, aquela que apresenta o menor valor de f_1 (uso máximo entre canais), ou seja, a solução que minimiza a saturação máxima do sistema, dentro do conjunto Pareto subótimo.

A escolha foi realizada exclusivamente dentre as soluções pertencentes à fronteira de Pareto, garantindo ausência de dominância por alternativas superiores nos objetivos considerados. Assim, a decisão preserva simultaneamente os compromissos estabelecidos com a redução da probabilidade de espera (Pw) e com os requisitos de qualidade de serviço (GoS), respeitando integralmente as restrições estruturais e operacionais do sistema.

O critério adotado prioriza a mitigação de saturações localizadas por representar o fator operacional de maior criticidade em redes de missão crítica, nas quais picos elevados de ocupação podem comprometer diretamente a disponibilidade de chamadas. Dessa forma, a seleção da solução recomendada configura uma decisão técnico-operacional fundamentada na hierarquização dos riscos operacionais, e não uma escolha arbitrária dentre alternativas equivalentes.

A Figura 21 resume o ciclo evolutivo aplicado em cada instância (Site ID, Time), incluindo a representação dos cromossomos, normalização, avaliação multiobjetivo, seleção, cruzamento, mutação, elitismo e geração do resultado subótimo. Este diagrama sintetiza todas as etapas descritas nas subseções anteriores e encerra o processo metodológico de otimização empregado nesta pesquisa.

Figura 21 – Fluxo do processo de otimização multiobjetivo utilizando o NSGA-II.



Fonte: Autor, 2025

3.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A presente pesquisa apresenta limitações inerentes ao seu delineamento metodológico, ao escopo dos dados analisados e às premissas adotadas no modelo de otimização. Tais limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados e na generalização das conclusões. Destacam-se:

Especificidade dos Dados: Os dados utilizados provêm exclusivamente da rede de radiocomunicação da (Polícia Militar do Estado de São Paulo) operando em

arquitetura troncalizado digital. Embora representem uma conjunto robusto e operacionalmente relevante para o contexto analisado, os resultados obtidos não podem ser automaticamente generalizados para outras forças policiais, estados ou arquiteturas de rede sem validação adicional.

Delimitação temporal da amostra: A análise está restrita aos dados coletados durante o período mensal de março de 2025 a fevereiro de 2026. Esta limitação temporal impede a observação de padrões plurianuais, tendências estruturais de longo prazo ou efeitos decorrentes de sazonalidades. Assim, os resultados refletem o comportamento da rede dentro do intervalo analisado.

Variáveis Externas Não Controladas: O tráfego operacional, o uso do espectro e o desempenho do sistema podem ser influenciados por fatores externos (como eventos sazonais, grandes operações de segurança pública, mudanças em políticas operacionais ou tecnológicos) que, embora parcialmente refletidas nos dados observados, não são explicitamente modeladas nem controladas na metodologia proposta, podendo impactar pontualmente os resultados.

Granularidade dos Dados: Embora as bases de dados sejam detalhadas, sua granularidade em alguns atributos ou sua frequência de registro pode apresentar restrições para certas inferências ou modelagens preditivas de curtíssimo prazo que poderiam ser desejáveis em outros contextos de pesquisa.

Escopo restrito à redistribuição interna por site: O modelo proposto considera exclusivamente a redistribuição interna de carga entre canais pertencentes a um mesmo site. Não são abordadas estratégias de compartilhamento ou realocação intersites, tampouco alterações estruturais na topologia da rede. Estudos envolvendo alocação dinâmica entre sites configuram possível extensão futura da pesquisa.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise dos dados reais de ocupação dos canais da rede de radiocomunicações troncalizado da Polícia Militar do Estado de São Paulo na Região Metropolitana de São Paulo. A aplicação das métricas estatísticas e do modelo de otimização permitiu caracterizar o padrão de uso dos canais, identificar instâncias de desbalanceamento de carga e avaliar quantitativamente os ganhos decorrentes da redistribuição interna proposta.

Os resultados demonstram que a aplicação do modelo de otimização baseado no algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II permitiu reduzir em aproximadamente 50% os picos de ocupação dos canais e promover um balanceamento praticamente uniforme da carga, sem necessidade de expansão da infraestrutura ou aquisição de novas faixas de espectro.

4.1. ANÁLISE DO PADRÃO DE USO DO ESPECTRO

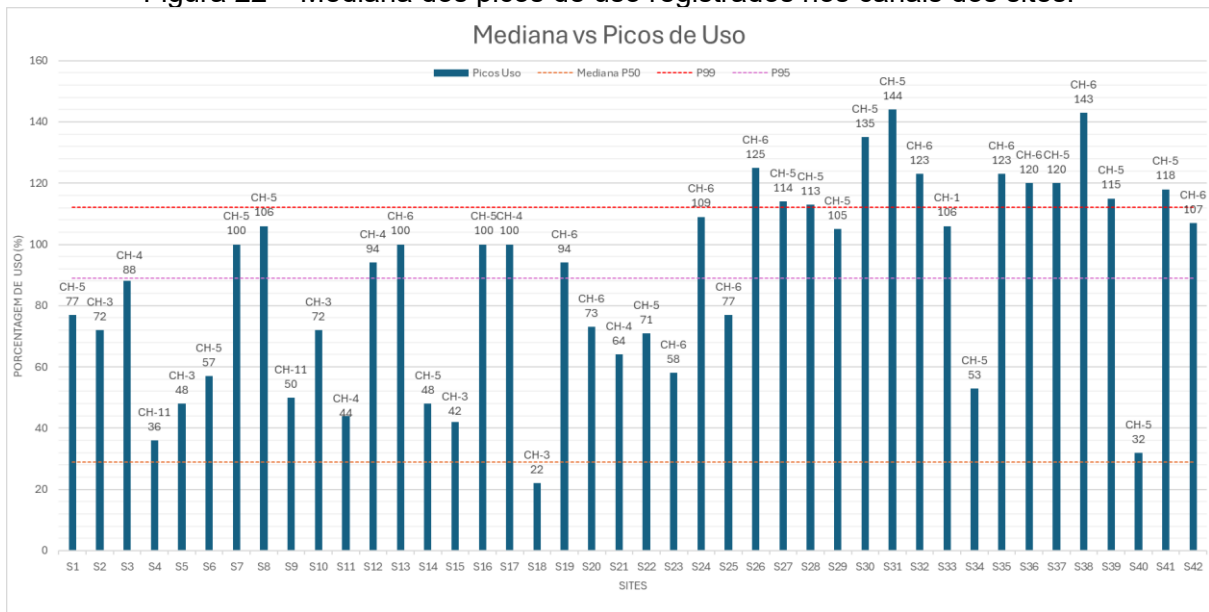
A análise das duas bases de dados forneceu um panorama detalhado e quantificável do padrão de uso dos canais em seus respectivos sites. A avaliação dos registros permitiu identificar canais com maior carga de utilização e compreender o comportamento geral da utilização do espectro em diferentes canais e sites.

O gráfico da Figura 22 apresenta a mediana dos picos de intensidade de tráfego estimados para os canais analisados, expressos como percentual da capacidade de referência obtida pelo cálculo de Erlang. Observa-se que diversos sites apresentam picos superiores aos níveis de referência estatística, incluindo valores acima de 100%.

Esses valores não representam uma ocupação física do canal superior à sua capacidade, mas indicam que a demanda de tráfego estimada ultrapassou a capacidade de referência de um único canal. Por exemplo, um pico de 144% corresponde a uma intensidade de tráfego equivalente a 1,44 vez a capacidade de referência, indicando uma condição de demanda elevada que, caso ocorresse de forma simultânea, poderia levar à indisponibilidade de recursos e ao congestionamento do canal.

A ocorrência de valores acima dos percentis P95 e P99 evidencia períodos de elevada demanda de tráfego, que podem estar associados à concentração de comunicações ou a eventos operacionais específicos. Dessa forma, esses resultados devem ser interpretados como indicadores de pressão sobre a capacidade do sistema, e não, isoladamente, como evidência de saturação efetiva da rede.

Figura 22 – Mediana dos picos de uso registrados nos canais dos sites.

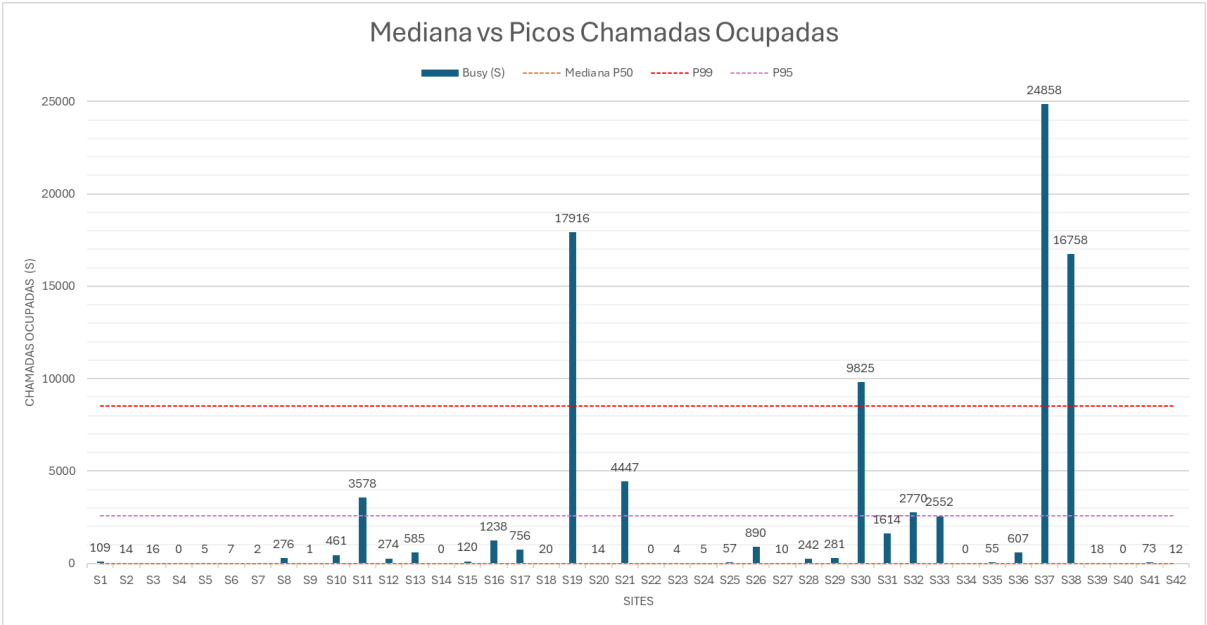


Fonte: Autor, 2026

As métricas *Total Busy Calls* e *Total Busy Duration* mostraram-se fundamentais para quantificar a ocorrência de chamadas bloqueadas e, consequentemente, estimar a demanda reprimida no sistema. A análise dos picos apresentados no gráfico evidencia os momentos e os sites onde o congestionamento é mais pronunciado. Sites como S37 e S38, que apresentam valores muito acima dos percentis superiores (P95 e P99), indicam situações críticas de ocupação, nas quais o número de chamadas ocupadas/espera ultrapassa amplamente o comportamento típico da rede.

Identificou-se que a variável duração das chamadas de voz influencia diretamente a formação de filas de espera, dependendo da quantidade de chamadas, tempo de duração e configuração dos sites e canais. Em momentos de alto tráfego, essa dinâmica pode gerar filas significativas.

Figura 23 – Mediana dos picos de duração de chamadas ocupadas/espera do site.



Fonte: Autor, 2026

Por meio da formulação de Erlang C, foi possível determinar o tráfego de cada site, analisando os registros de duração das chamadas por canal e avaliando a condição operacional com base na qualidade de serviço estabelecida para missões críticas (GoS = 1%).

Tabela 6 – Dados tratados e padronizados para a otimização.

Site ID:	Channel ID:	Time	Uso (%)	Percent Complete	Group Call Duration	Uso E (%)
S1	1	07/03/2025	100	100	0:00:00	0
S1	2	07/03/2025	14	100	0:59:35	4
S1	3	07/03/2025	56	100	10:32:30	44
S1	4	07/03/2025	51	100	13:06:13	55
S1	5	07/03/2025	51	100	12:05:47	50
S1	6	07/03/2025	3	100	0:02:34	0

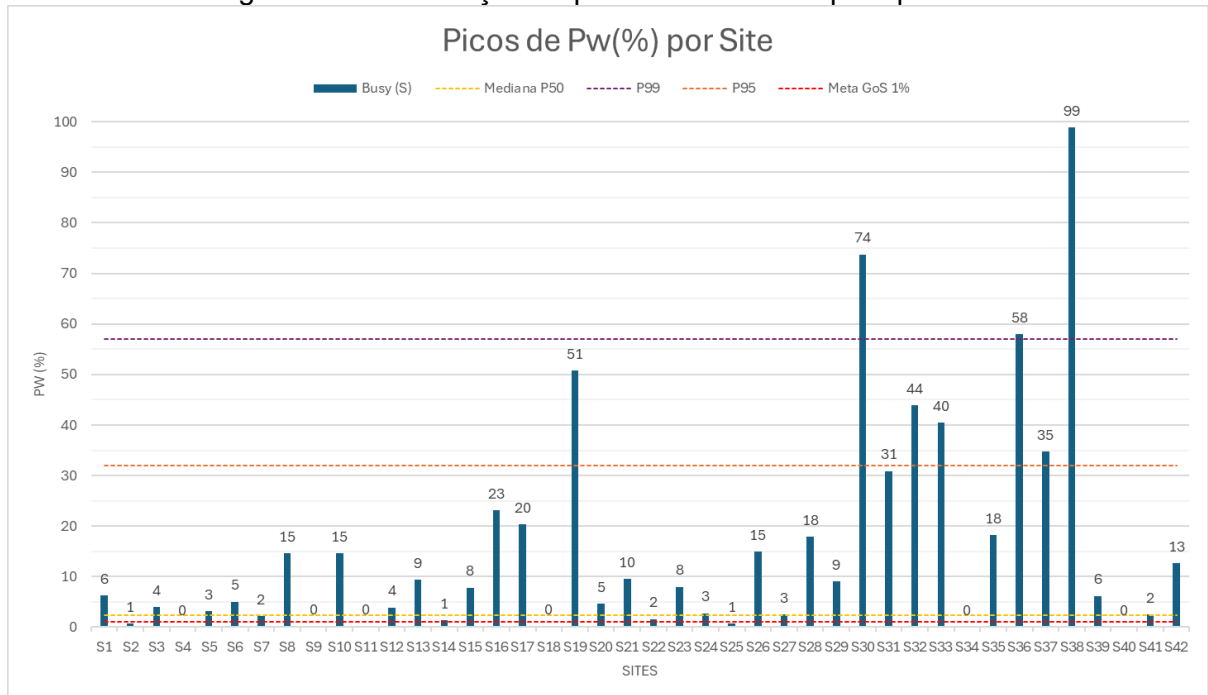
Fonte: Autor, 2025

O resultado de Erlang C da probabilidade de espera P_w gerou a coluna Uso_E (%), são os valores calculados para o tráfego de voz contidos nos dados e o parâmetro que usaremos para realizar a otimização.

4.2. DISTRIBUIÇÃO DA PROBABILIDADE DE ESPERA (Pw)

O gráfico da figura 24 apresenta a distribuição da probabilidade de espera (Pw%) por Site ID considerando os dias analisados.

Figura 24 – Distribuição de probabilidade de espera por site.



Fonte: Autor, 2026

O gráfico evidencia os picos de probabilidade de espera (Pw%) por site, comparados aos percentis estatísticos P50, P95 e P99, bem como à meta de GoS de 1%. Observa-se que a mediana (P50) encontra-se acima da meta, indicando que o comportamento típico do sistema já opera em condição de violação do grau de serviço, e não apenas em eventos excepcionais.

Além disso, diversos sites apresentam picos de Pw (%) situados entre os percentis P95 e P99, e em vários casos acima do P99, caracterizando momentos de tráfego extremo nos quais a capacidade dimensionada e instalada se mostra insuficiente. Em alguns sites, a probabilidade de espera atinge valores significativamente elevados, evidenciando saturação dos canais e degradação severa do serviço.

Esses resultados demonstram que o sistema possui baixa margem de absorção de picos de demanda, sendo altamente sensível a variações de tráfego. Assim, ainda que alguns sites apresentem valores medianos próximos ao limite

aceitável, os eventos de pico resultam em violação recorrente do GOS, reforçando a necessidade de otimização.

4.3. IDENTIFICAÇÃO DE INEFICIÊNCIAS NO BALENCIAMENTO DOS CANAIS

A análise integrada das bases de dados evidenciou desbalanceamento de carga entre os canais, bem como picos na duração das chamadas, fatores que elevam a probabilidade de espera (P_w) acima da meta de GoS = 1% em diversos sites.

As métricas *Total Busy Calls* e *Total Busy Duration* permitiram quantificar a demanda reprimida e identificar os pontos de maior congestionamento, conforme resultados observados por meio da métrica *Group Call Duration*, apresentados nos Gráficos 22 e 23.

Complementarmente, o Gráfico da Figura 24 apresenta o pico de P_w (%) por site, comparado às referências estatísticas de mediana (P50) e percentis P95 e P99, além da meta de GoS de 1%. Observa-se que, em diversos sites, tanto os valores medianos quanto os picos de P_w situam-se acima da meta estabelecida, evidenciando situações recorrentes de saturação da capacidade dimensionada e instalada. Nessas condições, a capacidade total do site é atingida, aumentando significativamente a probabilidade de as chamadas entrarem em espera, especialmente em períodos de tráfego extremo.

Nos sites em estudo, observou-se a coexistência de canais sobrecarregados, caracterizados por elevada taxa de ocupação em Erlang, e canais subutilizados, configurando ineficiência no balanceamento de carga. Esse comportamento é evidenciado pela distribuição e variabilidade dos valores observados, conforme apresentado no boxplot, e resulta da distribuição fixa do tráfego, sem ajuste às variações temporais de demanda e à maior duração das chamadas em períodos críticos.

Figura 25 – Dispersão da taxa de ocupação atual dos canais em cada site.

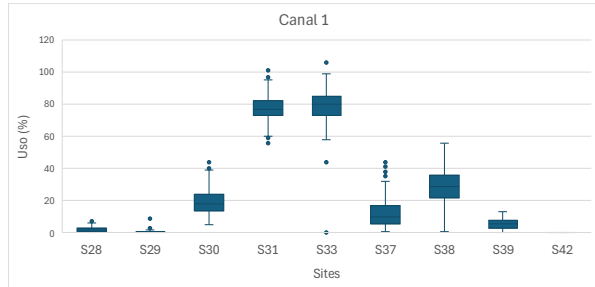


Figura 25(a) – Mediana e picos canal 1

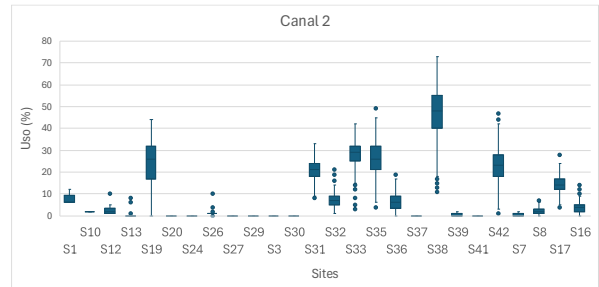


Figura 25(b) – Mediana e picos canal 2

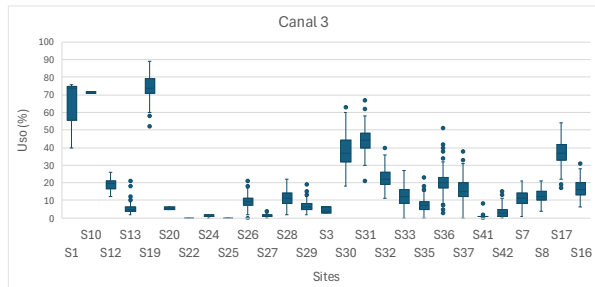


Figura 25(c) – Mediana e picos canal 3

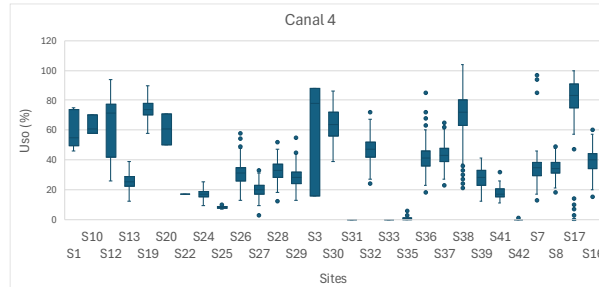


Figura 25(d) – Mediana e picos canal 4

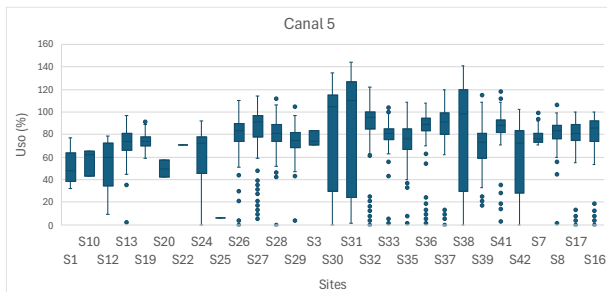


Figura 25(e) – Mediana e picos canal 5

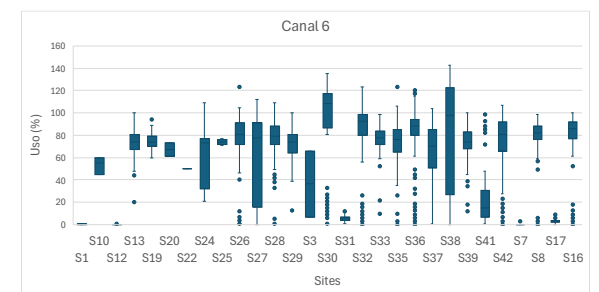


Figura 25(f) – Mediana e picos canal 6

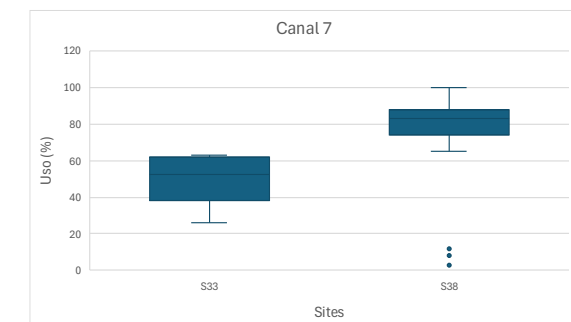


Figura 25(g) – Mediana e picos canal 7

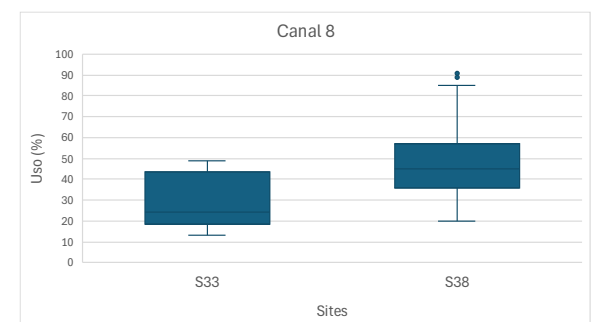


Figura 25(h) – Mediana e picos canal 8

Fonte: Autor, 2026

4.4. POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO NO GERENCIAMENTO DO ESPECTRO

A proposta de uma abordagem de otimização multiobjetivo NSGA-II é minimizar a taxa de ocupação em canais sobrecarregados reduzindo a probabilidade de chamadas entrarem em espera, o balanceamento entre os canais dos sites e com isso limitar o custo operacional com aquisição de novas faixas de espectro, respeitando restrições físicas e de priorização.

4.4.1. REDUÇÃO DO USO MÁXIMO DE CANAL

A aplicação do Algoritmo Genético multiobjetivo NSGA-II às combinações (Site ID, Time) identificadas como desbalanceadas produziu uma redução significativa no uso máximo em canais em toda a rede analisada. Considerando as 4300 instâncias de desbalanceamento avaliadas, o uso máximo inicial dos canais apresentava valores variando entre 71% e 143%, nos diferentes sites, com uma média das ocupações máximas de aproximadamente 87,4%. Após o balanceamento, o uso máximo passou a variar entre 20,33% e 99,2%, reduzindo a média dos valores máximos para aproximadamente 47,3%.

Em termos absolutos, a redução média do uso máximo foi da ordem de 47,3%, o que corresponde a uma redução relativa média de cerca de 40,1 pontos percentuais em relação ao valor original. Na prática, isso significa que, em uma situação típica de desbalanceamento, o canal mais congestionado passou a operar com pouco mais da metade do nível de ocupação observado antes da otimização. Esse resultado é coerente com o objetivo de minimizar o risco de saturação e aumentar a probabilidade de atendimento das chamadas dentro dos requisitos de disponibilidade.

A Figura 26 apresenta a dispersão das taxas de ocupação observadas após a otimização dos canais em cada site. Os resultados estão organizados individualmente por canal, permitindo comparar a mediana e os picos de ocupação e avaliar a distribuição da carga entre os canais. De modo geral, observa-se uma redução da concentração da utilização em canais específicos, indicando uma distribuição mais equilibrada da carga após a otimização.

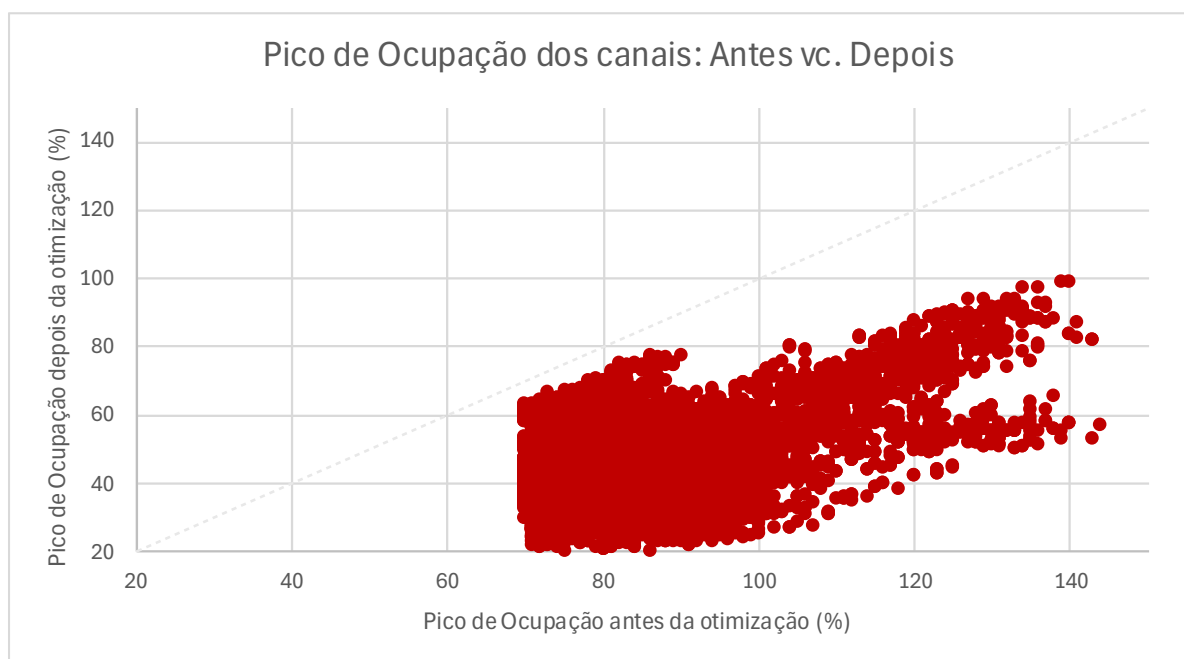
Figura 26 – Dispersão da taxa de ocupação após a otimização dos canais em cada site.



Fonte: Autor, 2026

A figura 27, apresenta um gráfico de dispersão comparando o pico de ocupação dos canais antes e após a otimização, permitindo visualizar o efeito do processo de balanceamento da carga entre os canais. O gráfico relaciona, no eixo horizontal, os picos dos canais antes da otimização (%) e, no eixo vertical, os picos dos canais após a otimização (%). Cada ponto representa uma solução avaliada durante o processo de otimização.

Figura 27 - Uso máximo antes versus depois.



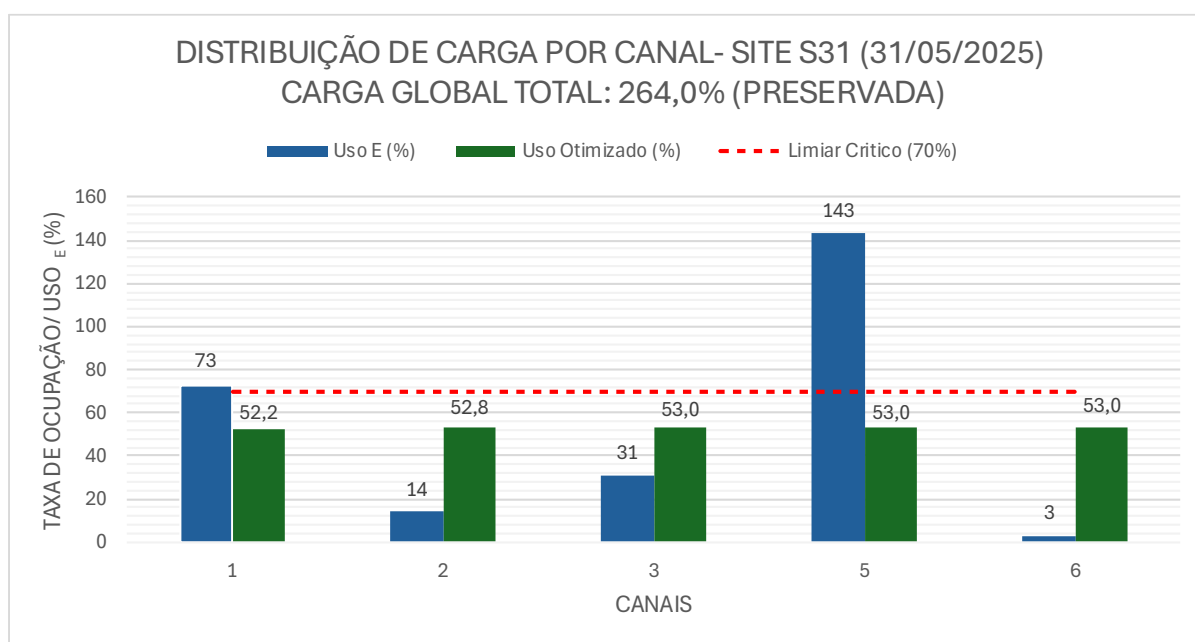
Fonte: Autor, 2026

A análise global dos resultados aponta que a maioria dos picos de uso se posiciona significativamente abaixo do limiar de 70%, o que comprova reduções expressivas na saturação da rede. Para ilustrar a dimensão desse efeito em cenários críticos com os resultados da otimização, detalhamos os comportamentos do Site S31 (em 20/09/2025) e do Site S38 (em 30/03/2025), cujos perfis históricos de tráfego apresentavam desbalanceamento.

No caso do Site S31, conforme ilustrado na Figura 28, o canal de maior taxa de ocupação operava originalmente com picos de uso de 143% de sua capacidade nominal, indicando uma severa sobrecarga em momentos de picos. Após a aplicação do algoritmo de otimização, o pico de uso do site foi reduzido para 53%, distribuindo a carga de forma perfeitamente uniforme entre os 5 canais ativos da estrutura. É fundamental destacar que a carga total transportada pela infraestrutura foi

integralmente preservada em 264,0%, demonstrando que o balanceamento não resultou em redução da capacidade de atendimento do sistema. Ao mesmo tempo, a redistribuição da carga entre os canais eliminou o gargalo localizado, contribuindo para a redução da probabilidade de as chamadas entrarem em fila de espera. Ressalta-se ainda que a ausência do canal 4 nos resultados apresentados deve-se à sua atuação como canal de controle durante os períodos observados.

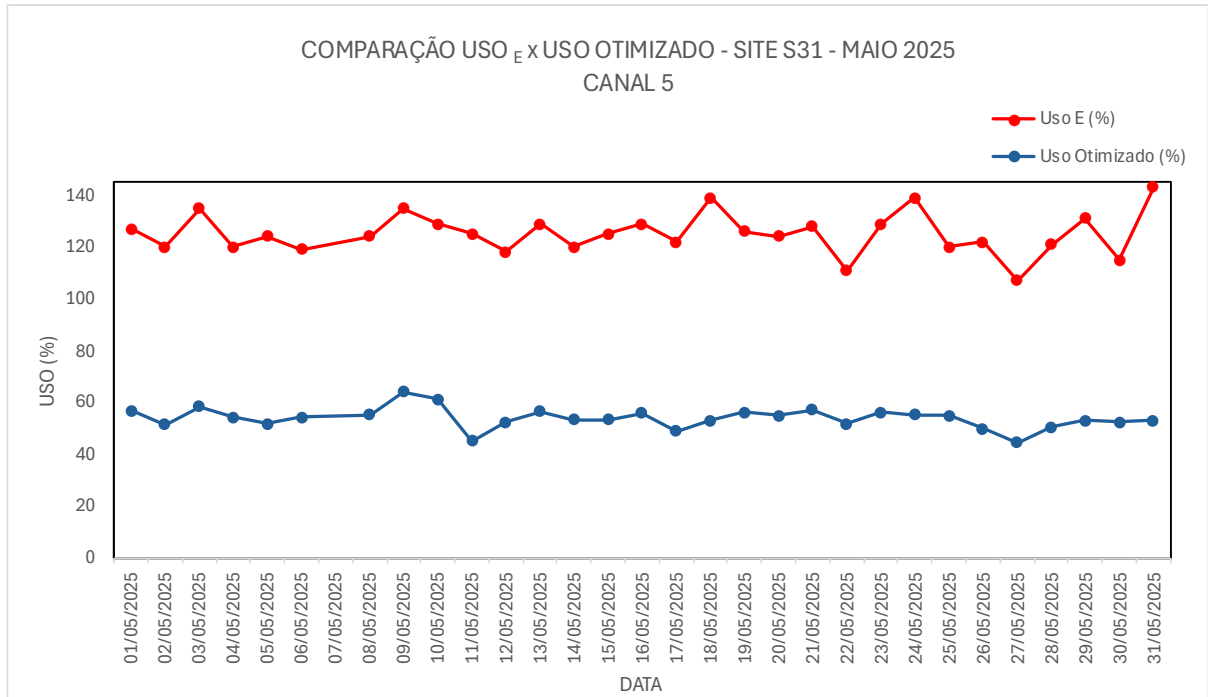
Figura 28 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização dos canais no site S31.



Fonte: Autor, 2026

Os impactos temporais dessa otimização, evidenciados na série histórica da Figura 29, revelam o comportamento do Canal 5 antes e depois do balanceamento. No perfil histórico, o canal operava usualmente acima do limiar crítico de 70%, atingindo frequentes períodos de saturação. Com a introdução da solução proposta, o tráfego foi reacomodado, permitindo que o canal operasse de forma contínua e estável abaixo do limite de segurança.

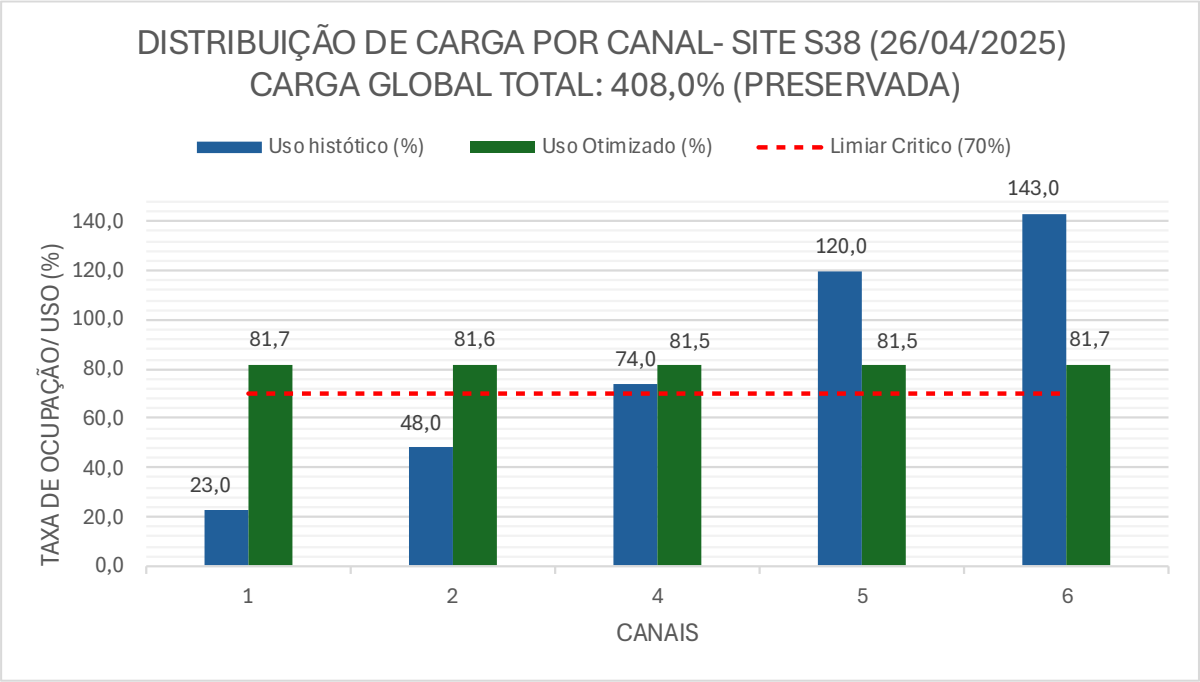
Figura 29 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização do canal 1 no site S31 no mês de maio.



Fonte: Autor, 2026

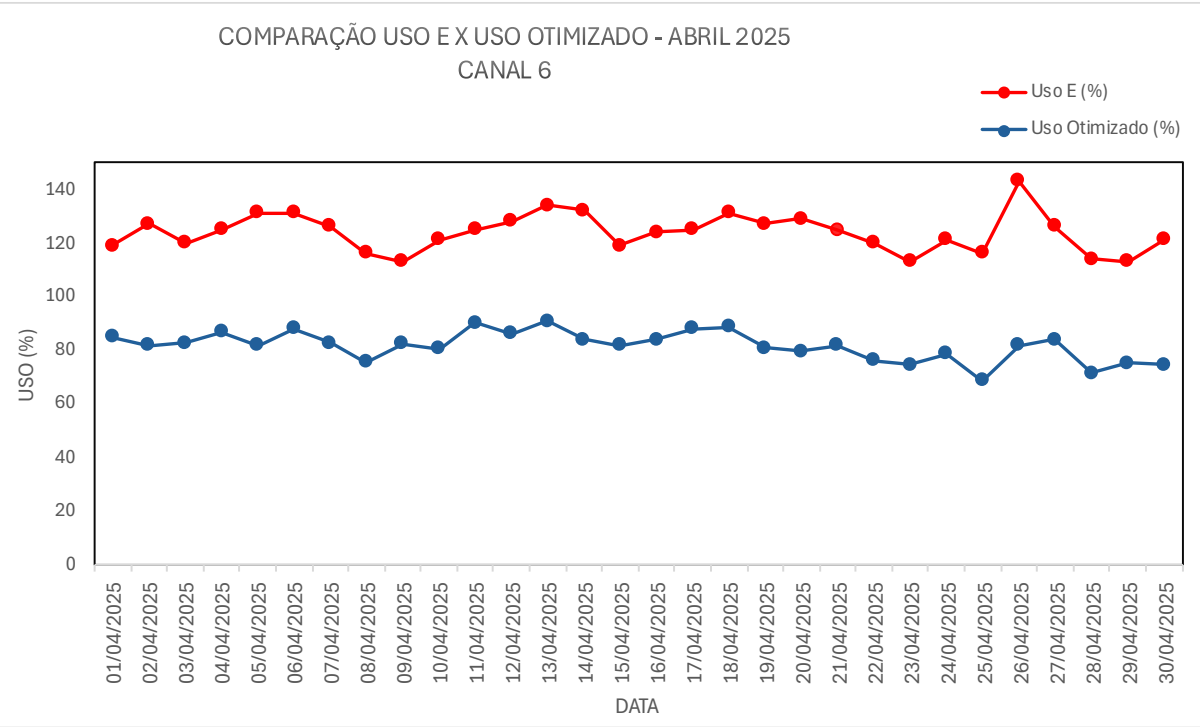
Comportamento análogo de eficiência, porém com uma particularidade operacional, foi observado no Site S38, conforme ilustrado na Figura 30. Nessa estrutura, o canal de maior ocupação operava originalmente com picos de uso de 143% de sua capacidade nominal. Após a aplicação do algoritmo de otimização, o pico de uso foi reduzido para 81,7%, distribuindo a carga de forma perfeitamente uniforme entre os 5 canais ativos do site. Destaca-se que a carga total transportada pela infraestrutura foi integralmente preservada em 408,0%, eliminando o gargalo severo em um único canal e mitigando a probabilidade de as chamadas entrarem em fila de espera.

Figura 30 – Comparação do valor máximo antes de depois da otimização dos canais no site S38.



Fonte: Autor, 2026

Figura 31 – Comparação do pico de uso antes de depois da otimização do canal 6 no site S38 no mês de abril.



Fonte: Autor, 2026

Os impactos temporais dessa otimização, evidenciados na série histórica da Figura 31, revelam o comportamento do Canal 5 sob a nova distribuição. Diferente do cenário anterior, a solução otimizada manteve o canal trabalhando de forma estável em 81,6%, ou seja, acima do limiar de 70%. Esse comportamento demonstra que todos os canais do site passaram a operar de maneira equilibrada e próxima à sua capacidade nominal total, evidenciando que o algoritmo conseguiu evitar o colapso por sobrecarga individual mesmo em uma infraestrutura com alta densidade de tráfego.

Desse modo, o algoritmo demonstrou alta capacidade exploratória no espaço de soluções ao convergir para distribuições que atenuam drasticamente os gargalos operacionais e respeitam, de forma estrita, as restrições de conservação de fluxo da rede de radiocomunicação.

Um aspecto relevante é que os ganhos observados foram obtidos exclusivamente por meio da redistribuição inteligente do tráfego entre os canais existentes. Em nenhum momento houve aumento da quantidade de canais disponíveis ou ampliação da capacidade física dos sites, evidenciando que parte significativa do congestionamento era decorrente de ineficiências de balanceamento e não da falta de espectro.

4.4.2. MELHORIA NA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA ENTRE CANAIS

Além da redução do uso máximo, um aspecto relevante para a operação do sistema é a homogeneidade da distribuição de carga entre os canais de cada site. Para quantificar essa dimensão, foi analisado o desvio padrão do uso percentual dos canais antes e depois da otimização.

Nos dados originais, o desvio padrão médio do uso entre canais em cada site era de aproximadamente 39,0%, indicando uma distribuição bastante desigual, com alguns canais sobrecarregados e outros subutilizados. Após a aplicação do NSGA-II, o desvio padrão médio caiu para aproximadamente 0,18%, o que representa uma redução relativa média de cerca de 99,5%. Em termos práticos, isso significa que, para a maioria das instâncias, os canais de um mesmo site passaram a operar com níveis de ocupação muito próximos entre si, resultando em um balanceamento quase uniforme da carga.

Mapeando o pico de ocupação global, observou-se uma redução expressiva no uso máximo dos canais. Em média, o pico de ocupação foi reduzido de aproximadamente 87,4% para 47,3%, correspondendo a uma diminuição de cerca de 40,0 pontos percentuais. Esse resultado evidencia a mitigação de gargalos operacionais críticos, garantindo uma distribuição mais equilibrada e eficiente da carga entre os canais.

Os resultados para os casos do Site S31 (31/05/2025) e do Site S38 (26/04/2025) exemplificam claramente esse comportamento, conforme podemos visualizar na tabela 7. No Site S31, para o período avaliado, o canal de maior ocupação operava com pico de uso de 143,0% no cenário original; após o balanceamento, a carga foi distribuída e todos os canais passaram a operar com uso otimizado de 53,02% de uso. De forma semelhante, no Site S38, o pico inicial de uso no pior canal era de 143,0% e, após a otimização, convergiu para uma taxa equilibrada de 81,7% para todos os canais. Essa transição de um perfil altamente assimétrico para uma distribuição praticamente uniforme comprova a eficiência do algoritmo em redistribuir o tráfego, aproveitando os recursos anteriormente subutilizados.

Tabela 7 – Resultado obtidos após a otimização dos casos S31 e S38.

Site ID	Time	Channel ID	Uso Atual (%)	Distribuição Atual p_c	Distribuição Recomendada x_c	Uso Otimizado (%)	Uso Máximo Atual (%)	Uso máximo Otimizado (%)	L (Soma Uso %)
S31	09/03/2025	5	140	0,486111111	0,20066903	57,79268073	140	57,79268073	288
S31	26/04/2025	5	140	0,484429066	0,199890229	57,76827608	140	57,86423858	289
S31	26/11/2025	5	140	0,484429066	0,199890229	57,76827608	140	57,86423858	289
S31	30/03/2025	5	144	0,505263158	0,200137562	57,03920523	144	57,14096498	285
S31	31/05/2025	5	143	0,541666667	0,200676633	52,9786312	143	53,02364278	264
S38	19/06/2025	6	141	0,341404358	0,199709404	82,4799838	141	82,74253304	413
S38	20/06/2025	5	141	0,324137931	0,200250333	87,10889497	141	87,16842414	435
S38	22/03/2025	6	140	0,282828283	0,200086306	99,04272156	140	99,21087748	495
S38	26/04/2025	6	143	0,350490196	0,200309488	81,72627114	143	81,72627114	408
S38	26/11/2025	6	143	0,350490196	0,200309488	81,72627114	143	81,72627114	408
S38	27/04/2025	5	140	0,334128878	0,200050506	83,82116203	140	83,82282875	419
S38	27/11/2025	5	140	0,334128878	0,200050506	83,82116203	140	83,82282875	419

Fonte: Autor, 2026.

A síntese dos cenários evidencia que o modelo proposto alcança um equilíbrio consistente entre a eficiência teórica e a aderência às condições reais de uso da infraestrutura. A aplicação do NSGA-II mostrou-se particularmente eficaz em explorar soluções viáveis dentro de um espaço de decisão complexo, permitindo ganhos

simultâneos em disponibilidade, robustez e equilíbrio de utilização entre canais. Os resultados mostram que, mesmo priorizando a minimização do uso máximo, as soluções preservam coerência com os padrões originais e evitam configurações que comprometeriam a operação cotidiana. Isso reforça que técnicas meta-heurísticas, quando adequadamente estruturadas, podem oferecer recomendações realistas e de alto impacto.

Dessa forma, os achados consolidam a relevância do método proposto como instrumento de suporte à decisão. A abordagem não apenas otimiza métricas objetivas de desempenho, mas também respeita restrições práticas frequentemente negligenciadas em modelos teóricos. Esse alinhamento entre rigor analítico e aplicabilidade operacional destaca o potencial do modelo como base para políticas mais avançadas de gestão de recursos em redes troncalizados, especialmente em ambientes críticos.

É importante ressaltar que a otimização realizada pelo algoritmo NSGA-II não altera a capacidade volumétrica total de tráfego suportada pelo site, uma vez que o número total de canais N permanece constante. Contudo, o desbalanceamento observado no perfil histórico invalidava as premissas de distribuição uniforme de filas, provocando saturações prematuras e microcongestionamentos localizados nos canais de maior carga.

Ao equalizar a ocupação (reduzindo o pico do pior canal em até 50% no caso do Site S31), a otimização restabeleceu a eficiência espectral da infraestrutura. Considerando a relação não linear entre ocupação e probabilidade de espera descrita pela teoria de Erlang C, a redução dos picos de utilização implica uma diminuição substancial da probabilidade de filas e bloqueios, contribuindo diretamente para a aproximação do GoS real aos requisitos operacionais de missão crítica.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou o problema de escassez do espectro na gestão dos canais em redes de radiocomunicações de missão crítica, utilizando dados reais de uma rede em operação na região Metropolitana de São Paulo, pertencente às forças de Policiamento Militar. O estudo evidenciou a necessidade de uma abordagem de otimização para melhorar a taxa de ocupação do tráfego de chamadas de voz nos canais licenciados e utilizados pela instituição.

A análise dos dados demonstrou um desbalanceamento significativo na ocupação de determinados canais em cada site da rede, caracterizando um problema de otimização multiobjetivo com soluções conflitantes. A aplicação do algoritmo NSGA-II mostrou-se adequada para tratar esse cenário, alcançando redução expressiva dos picos de uso e maior uniformidade na distribuição da carga entre os canais. Os resultados indicaram uma redução da taxa média de ocupação dos canais por chamadas de voz, de aproximadamente 87,4% antes do balanceamento para 47,3% após sua aplicação. Essa variação corresponde a uma redução de 40,1 pontos percentuais na ocupação média dos canais licenciados nos momentos de maior demanda.

Essa abordagem apresenta viabilidade técnica e potencial de eficiência econômica, mitigando riscos de ocupação excessiva e espera nas chamadas de voz sem demandar investimentos imediatos em expansão da infraestrutura.

Em síntese, esta pesquisa contribui para uma gestão mais inteligente do espectro, reforçando que a otimização não é apenas uma solução técnica, mas também uma estratégia essencial para aprimorar a capacidade e a eficiência no uso dos recursos disponíveis.

Esta dissertação apresenta contribuição científica ao propor e validar um modelo de otimização multiobjetivo aplicado à redistribuição interna de carga em canais licenciados de uma rede dedicada de radiocomunicação de missão crítica, utilizando dados reais de ocupação espectral provenientes de operação contínua na Região Metropolitana de São Paulo.

Embora a literatura existente privilegie abordagens baseadas em compartilhamento dinâmico e ambientes simulados, esta pesquisa concentra-se na

otimização interna de canais licenciados em regime de ocupação contínua e sob restrições físicas e regulatórias reais quanto à expansão espectral. Assim, a pesquisa desloca o foco tradicional da ampliação de faixa ou migração tecnológica para a eficiência operacional da infraestrutura existente.

Do ponto de vista metodológico, o problema foi formalizado como um modelo de otimização multiobjetivo, considerando simultaneamente a redução de picos de ocupação, a mitigação da probabilidade de espera (P_w) e a preservação dos requisitos de qualidade de serviço (GoS) característicos de comunicações de missão crítica. A aplicação do algoritmo NSGA-II demonstrou que técnicas evolutivas podem produzir ganhos quantitativos significativos mesmo em ambientes de alta carga e com restrições estruturais severas.

Além disso, o estudo contribui ao distinguir quantitativamente limitações estruturais do espectro de ineficiências operacionais na alocação interna de canais, fornecendo subsídios técnicos para decisões estratégicas de planejamento de capacidade em redes críticas metropolitanas.

A metodologia desenvolvida apresenta potencial de replicabilidade para outras redes dedicadas que operem sob condições semelhantes de limitação espectral, configurando uma contribuição aplicável ao campo da gestão de espectro em sistemas de comunicação de missão crítica.

Além da contribuição científica apresentada, este trabalho oferece contribuições técnicas relevantes para a gestão operacional de redes de radiocomunicação de missão crítica.

Os resultados demonstram que a aplicação do modelo de otimização multiobjetivo permite identificar e corrigir desbalanceamentos de carga entre canais licenciados, reduzindo picos de ocupação e mitigando a probabilidade de espera em chamadas de voz. Essa abordagem evidencia que parte das limitações observadas na rede não decorre exclusivamente da escassez estrutural de espectro, mas também de ineficiências na distribuição interna dos recursos disponíveis.

Do ponto de vista prático, o modelo pode ser utilizado como ferramenta de suporte à decisão para:

- avaliação periódica do balanceamento de canais por site;
- identificação de padrões de tráfego e sazonalidades;

- planejamento preventivo para períodos de alta demanda operacional;
- suporte técnico à decisão sobre redistribuição intersites de canais;
- embasamento quantitativo para eventual necessidade de ampliação da faixa licenciada.

A viabilidade prática dessa abordagem foi constatada a partir da correção manual da matriz de prioridades, com a reorganização e distribuição dos grupos de conversação e dos parâmetros de alocação da controladora. Essa adequação permitiu melhorar a distribuição e o gerenciamento dos canais no site operado pela PMESP, resultando em uma redução significativa da probabilidade de espera para o estabelecimento das chamadas, após a mitigação dos desbalanceamentos identificados.

Dessa forma, a pesquisa reforça a importância da análise baseada em dados reais como instrumento de aprimoramento da eficiência espectral, contribuindo diretamente para maior segurança operacional e melhor aproveitamento dos recursos licenciados já disponíveis.

Como desdobramento desta pesquisa, sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

- avaliação da aplicação do modelo em diferentes períodos sazonais e eventos extraordinários;
- integração do modelo a sistemas automatizados de monitoramento de tráfego;
- análise da viabilidade de implementação em ambientes multi-faixa;
- comparação com outras meta-heurísticas evolutivas e métodos híbridos.

Essas extensões podem ampliar a robustez e a generalização da abordagem proposta.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Regulamentação do espectro no Brasil**. Brasília, DF: Anatel, 2023. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES (Alemanha). **EUMETSAT mission statement**. Darmstadt: Eumetsat, 2021. Disponível em: <https://www.eumetsat.int/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION (Estados Unidos). **Public safety spectrum allocations**. Washington, DC: FCC, 2022. Disponível em: <https://www.fcc.gov/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (Estados Unidos). **Wireless communication standards**. New York: IEEE, 2022. Disponível em: <https://www.ieee.org/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (Suíça). **Radio Regulations 2021**. Geneva: ITU, 2021. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (Suíça). **Radio Regulations, 2024**: agenda for the 2027 World Radiocommunication Conference (WRC-27): Agenda Item 1.7: IMT in 4400-4800 MHz and 7125-8400 MHz. Geneva: ITU, 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (Estados Unidos). **Satellite communication systems**. Washington, DC: NASA, 2022. Disponível em: <https://www.nasa.gov/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (Estados Unidos). **Weather radar systems**. Washington, DC: NOAA, 2023. Disponível em: <https://www.noaa.gov/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

NATIONAL TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION ADMINISTRATION (Estados Unidos). **Spectrum management for critical services**. Washington, DC: NTIA, 2021. Disponível em: <https://www.ntia.doc.gov/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ABRTEL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RÁDIO E TELEVISÃO (Brasil). **Comunicação via rádio para segurança privada e eventos**. São Paulo: Abratel, 2023. Disponível em: <https://www.abratel.org.br/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). Conselho Diretor. **Análise nº 25/2024/CL**: processo SEI nº 12145300. Deliberação que estende o prazo para licenciamento das faixas UHF 821–824 MHz e 866–869 MHz até 29/11/2028 e mantém as condições definidas pelo Ato nº 4.981/2020, Resolução nº 455/2006 e Resolução nº 757/2022. Brasília, DF: Anatel, 2024. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/>.
MOTOROLA SOLUTIONS (Estados Unidos). **Radiocomunicação no setor privado**: aplicações e tendências. Chicago: Motorola Solutions, 2021. Disponível em: <https://www.motorolasolutions.com/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

AREDO, Shenko Chura; WEDAJO, Hailu Jelde; BELAY, Hailu; KORNEGAY, Kevin T. Performance analysis of 5G enabled mission critical push-to-talk (MCPTT) services for secured smart city. **IEEE Access**, v. 11, p. 114115–114130, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10285403>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ARRUDA, C. A.; LIMA, R. P.; FERREIRA, M. Radiocomunicação industrial: aplicações e desafios. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 28, n. 3, p. 45-60, 2022. Disponível em: <https://www.rbepro.org.br>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SILVA, J. R.; PEREIRA, F. A.; SOUZA, L. C. Radiocomunicação no Brasil: desafios e regulamentação. **Revista Brasileira de Telecomunicações**, v. 37, n. 2, p. 22-35, 2021. Disponível em: <https://www.rbt.org.br>. Acesso em: 12 mar. 2025.

3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP) (França). **Standardization of mission-critical communications**. Sophia Antipolis: 3GPP, 2023. Disponível em: <https://www.3gpp.org>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ISLAM, Md Habibul *et al.* Spectrum sharing issues: a survey. **Journal of Communications**, v. 3, n. 10, p. 80-89, 2008.

OFFICE OF COMMUNICATIONS (Reino Unido). Giro de notícias regulatórias: regulamentações de 5G, espectro de resposta a emergências e muito mais. **BNamericas**, 20 ago. 2024. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/pt/noticias/giro-de-noticias-regulatorias-regulamentacoes-de-5g-espectro-de-resposta-a-emergencias-e-muito-mais>. Acesso em: 8 abr. 2025.

LUNDBORG, M.; REICHL, W.; RUHLE, E.-O. Spectrum allocation and its relevance for competition. **Telecommunications Policy**, v. 36, n. 8, p. 664-675, 2012.

QAMAR, F. *et al.* Issues, challenges, and research trends in spectrum management: a comprehensive overview and new vision for designing 6G networks. **Electronics**, v. 9, n. 9, 1416, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics9091416>. Acesso em: 16 jun. 2026.

BROWN, C.; GHASEMI, A. Evolution toward data-driven spectrum sharing: opportunities and challenges. **IEEE Access**, v. 11, p. 99680-99692, 2023.

PARVINI, M. *et al.* A comprehensive survey of spectrum sharing schemes from a standardization and implementation perspective. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 24, n. 3, p. 1505–1544, 2022.

DGANI, D.; COHEN, K. Efficient cumulant-based automatic modulation classification using machine learning. **IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking**, v. 10, n. 1, p. 12–25, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10367858>. Acesso em: 28 abr. 2025.

HU, Q. S.; CHEN, J.; ZHU, H. Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5G: a survey. **IEEE Wireless Communications**, v. 25, n. 5, p. 80–87, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8458187>. Acesso em: 6 maio 2025.

LÄHETKANGAS, K. *et al.* LSA system development with sensing for rapidly deployable LTE network. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS*. Cham: Springer, 2018. p. 143-153.

LÄHETKANGAS, K. *et al.* Licensed shared access system possibilities for public safety. **Mobile Information Systems**, v. 2016, p. 1–14, 2016. Acesso em: 6 maio 2025.

HÖYHTYÄ, M. *et al.* Critical communications over mobile operators' networks: 5G use cases enabled by licensed spectrum sharing, network slicing and QoS control. **IEEE Access**, v. 6, p. 73570-73582, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883787.

XU, Y. *et al.* Cognitive radio networks: technologies, challenges and applications. **Sensors**, v. 25, n. 4, 1011, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25041011>. Acesso em: 6 maio 2025.

MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. **IEEE Personal Communications**, v. 6, n. 4, p. 13–18, ago. 1999.

CULLEN, A. C. *et al.* Predicting dynamic spectrum allocation: a review covering simulation, modelling, and prediction. **Artificial Intelligence Review**, v. 56, p. 10921–10959, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-023-10449-9>. Acesso em: 8 maio 2025.

PATIL, A.; KADAM, V.; SANGLE, S. A comprehensive survey on spectrum sharing techniques for 5G/B5G intelligent wireless networks: opportunities, challenges and future research directions. **Computer Networks**, v. 253, 110697, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128624005292>. Acesso em: 8 maio 2025.

RASTI, M. *et al.* Highly dynamic and flexible spatio-temporal spectrum management with AI-driven O-RAN: a multi-granularity marketplace framework. **arXiv preprint**, arXiv:2502.13891, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2502.13891>. Acesso em: 8 maio 2025.
WANG, Q. *et al.* When machine learning meets spectrum sharing security: methodologies and challenges. **arXiv preprint**, arXiv:2201.04677, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2201.04677>. Acesso em: 8 maio 2025.

RAMOS, A. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Editora Blucher, 2016. *E-book*. p. 261. ISBN 9788521209706. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521209706/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NIRINGIYE, Godfrey; OTEYO, Isaac Nyabisa; BULEGA, Tonny. Spectrum Sensing for Cognitive VHF Land Mobile Radio Communication Networks Using Energy Sensing Techniques. **Journal of Telecommunications and Information Technology**, 2022.

TANG, Hao; ZHANG, Jie. Auction-based Theory for Dynamic Spectrum Access: a Review. **IEEE Access**, 2023.

HUNT, B. J. **The Maxwellians**. Ithaca: Cornell University Press, 1991.

BERTSEKAS, D. P. **Nonlinear programming**. Belmont: Athena Scientific, 1999.

DANTZIG, G. B. The diet problem. **Interfaces**, v. 20, n. 4, p. 43–47, 1990.

ASKARI, Mehdi; DASTANIAN, Rezvan. An optimized spectrum sharing scheme for cognitive radio. **Wireless Networks**, [S.l.], Springer Nature, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03084-4>. Acesso em: 10 maio 2025.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. **Ant colony optimization**. Cambridge: MIT Press, 2004.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

KIRKPATRICK, S.; GELATT Jr, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.

BOUALLEGUE, B.; FRIKHA, M. *et al.* Genetic algorithms for spectrum management in cognitive radio networks. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 10, n. 11, p. 1487–1500, 2010.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

BERTSEKAS, D. P. **Network Optimization: Continuous and Discrete Models**. Belmont: Athena Scientific, 1998.

CHACHUAT, B. **Nonlinear and Dynamic Optimization: From Theory to Practice**. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/37452197_Nonlinear_and_Dynamic_Optimization_From_Theory_to_Practice. Acesso em: 21 maio 2025.

CHVÁTAL, V. *Linear Programming*. New York: W. H. Freeman, 1983.

WOLSEY, L. A.; NEMHAUSER, G. L. **Integer and Combinatorial Optimization**. New York: Wiley-Interscience, 1999.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless communications: principles and practice**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 maio 2025.

REEVES, Charles M. **An overview of trunking techniques in mobile radio systems**. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 30., 1980, [S.l.]. Proceedings [...]. [S.l.]: IEEE, 1980. v. 30.

RAPPAPORT, Theodore S. Wireless Communications: Principles and Practice, Second Edition. (The Book End). **Microwave Journal**, v. 45, n. 12, p. 128, dez. 2002. Disponível em: <https://link.gale.com/apps/doc/A97115718/AONE?u=anon~14e522f6&sid=googleScholar&id=2f5b84cd>. Acesso em: 28 nov. 2025.

ANGUS, Ian. An introduction to Erlang B and Erlang C. **Telemanagement**, v. 187, p. 6-8, 2001.

DEB, Kalyanmoy; AGRAWAL, Samir; PRATAP, Amrit; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

FONSECA, Carlos M.; FLEMING, Peter J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGORITHMS, 5., 1993, [S.l.]. **Proceedings** [...]. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1993. p. 416-423.

SCHÄFFER, J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGORITHMS AND THEIR

APPLICATIONS, 1., 1985, [S.l.]. **Proceedings** [...]. [S.l.]: Lawrence Erlbaum Associates, 1985. p. 93-100.

ZITZLER, Eckart; THIELE, Lothar. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.

ZITZLER, Eckart; LAUMANN, Marco; THIELE, Lothar. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. In: **EVOLUTIONARY METHODS FOR DESIGN, OPTIMIZATION AND CONTROL WITH APPLICATIONS TO INDUSTRIAL PROBLEMS**, 2001, Athens. **Proceedings** [...]. Athens: [s.n.], 2001.

SINHA, Ankur; WALLENIS, Jyrki. MCDM, EMO and hybrid approaches: tutorial and review. **Mathematical and Computational Applications**, v. 27, n. 112, p. 1-34, 2022.

SÃO PAULO (Estado). Polícia Militar do Estado de São Paulo. Organização/Organograma. São Paulo: PMESP, 2025. Disponível em: <https://www.policiamilitar.sp.gov.br/institucional/organizacao-organograma>. Acesso em: 28 jan. 2026.

SÃO PAULO (Estado). Polícia Militar do Estado de São Paulo. Portal Institucional. São Paulo: PMESP, 2025. Disponível em: <https://www.policiamilitar.sp.gov.br/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

ESQUEMA de segurança em SP terá 36 mil policiais nas ruas para o 7 de Setembro. CNN Brasil, São Paulo, 3 set. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/esquema-de-seguranca-em-sp-tera-36-mil-policiais-nas-ruas-para-o-7-de-setembro/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

SÃO Paulo terá patrulhamento policial inédito para o 7 de Setembro. Poder360, Brasília, DF, 4 set. 2025. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/brasil/sao-paulo-tera-patrulhamento-policial-inedito-para-o-7-de-setembro/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

SILVA, Wesley Reis da; ANJOS, André Antônio dos; SOUZA, Rausley Adriano Amaral de. Análise Comparativa de Técnicas de Sensoriamento Espectral baseadas em Redes Neurais, Matriz de Covariância e Densidade Espectral de Potência. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS**, 41., 2023, São José dos Campos. **Anais** [...]. São José dos Campos: SBrT, 2023. p. 1-5. Disponível em: <https://openaes.sbrt.org.br/>. Acesso em: 10 fev. 2026.

ELHACHMI, Jamal; GUENNOUN, Zouhair. Cognitive radio spectrum allocation using genetic algorithm. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2016, n. 1, p. 1-11, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0620-6>. Acesso em: 29 jan. 2026.

CHIGABA, Ancilla Wadzanai et al. A Multi-Objective Genetic Algorithm–Deep Reinforcement Learning Framework for Spectrum Sharing in 6G Cognitive Radio Networks. **Applied Sciences**, v. 15, n. 17, p. 9758, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15179758>. Acesso em: 09 fev. 2026.

SINGH, Wangjam Niranjana; MARCHANG, Ningrinla. Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks Using Gene Therapy-Based Evolutionary Algorithms. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 47, n. 2, p. 2351–2366, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06543-1>. Acesso em: 29 jan. 2026.

NETO, João Scudeler; GUIMARÃES, Dayan Adionel. Sensoriamento espectral cooperativo baseado em autovalores para rádios cognitivos. **Revista Telecomunicações**, v. 14, n. 1, p. 1-9, 2012.

GOLDBARG, Elizabeth. **Otimização Combinatória e Meta-heurísticas - Algoritmos e Aplicações**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2015. *E-book*. p.1. ISBN 9788595154667. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595154667/>. Acesso em: 31 ago. 2025.