



# **Análise e Otimização em Sistemas de Comunicação Ferroviária**

Fábio Ramos Batalha  
(Licenciado)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de mestre em Matemática Aplicada para a Indústria, na Área de Especialização de Tratamento de Dados

Orientadores:

Doutor Filipe Santiago Cal  
Doutor Nuno David de Jesus Lopes

Júri:

Presidente: Doutor Luís Manuel Ferreira da Silva

Vogais:

Doutor Bruno Miguel Almeida Martins Pereira  
Doutor Nuno David de Jesus Lopes

**novembro de 2025**



# **Análise e Otimização em Sistemas de Comunicação Ferroviária**

**Fábio Ramos Batalha**  
(Licenciado)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de mestre em Matemática Aplicada para a  
Indústria, na Área de Especialização de Tratamento de Dados

Orientadores:

Doutor Filipe Santiago Cal, ISEL

Doutor Nuno David de Jesus Lopes, ISEL

Júri:

Presidente: Doutor Luís Manuel Ferreira da Silva, ISEL

Vogais:

Doutor Bruno Miguel Almeida Martins Pereira, ISEL

Doutor Nuno David de Jesus Lopes, ISEL

**novembro de 2025**



## **Agradecimentos**

Gostaria de começar por expressar o meu agradecimento à SOLVIT, por ter acolhido o estágio e disponibilizado os recursos necessários à sua realização. Agradeço a confiança depositada, as condições proporcionadas e o ambiente profissional que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus orientadores externos, Professor Nuno Cota e Engenheiro André Faria, agradeço a orientação e o apoio numa área em que possuía inicialmente pouco conhecimento. Agradeço a disponibilidade e o tempo dedicados a ensinar-me, tanto sobre os aspetos técnicos desta área como sobre as dinâmicas da empresa.

Aos meus orientadores internos do ISEL, Professor Filipe Cal e Professor Nuno Lopes, manifesto igualmente a minha gratidão pelo acompanhamento contínuo, pelo incentivo na procura de novas soluções e pelo apoio prestado na redação deste relatório.

Agradeço também a todos os colegas com quem partilhei esta etapa no ISEL. Os debates, as ideias trocadas e até os desabafos foram fundamentais para a evolução do meu trabalho. Espero ter contribuído para os vossos projetos da mesma forma que contribuíram para o meu.

Finalmente, um agradecimento muito especial aos meus pais, à minha família e aos amigos mais próximos, pelo apoio incondicional em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis, ajudando-me a superá-los.

A todos os que aqui referi, muito obrigado.



## Declaração de integridade

Declaro que este relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor:



---

Lisboa, 24 de outubro de 2025



## Resumo

O presente relatório resulta do estágio curricular do Mestrado em Matemática Aplicada para a Indústria, realizado no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), em colaboração com a empresa SOLVIT – Innovation & Development on Telecommunications, Lda. O trabalho enquadrou-se na área das telecomunicações ferroviárias, com enfoque no estudo da qualidade de sinal do sistema GSM-R (*Global System for Mobile Communications – Railway*), tecnologia crítica para assegurar comunicações fiáveis e seguras entre maquinistas, centros de controlo e infraestruturas ferroviárias.

O estágio teve como principal objetivo a aplicação de metodologias matemáticas e computacionais à análise e otimização de comunicações móveis em ambiente ferroviário, com foco no sistema GSM-R, tendo sido desenvolvidos dois casos de estudo distintos e complementares.

O primeiro caso de estudo incidiu sobre a Linha do Algarve, com enfoque na deteção de padrões e anomalias na qualidade do sinal. Para tal, foi elaborado um processo sistemático de tratamento e padronização de dados recolhidos, envolvendo filtragem, normalização, interpolação e *smoothing* de séries temporais. Posteriormente, foram aplicadas técnicas estatísticas para identificar anomalias nos parâmetros que caracterizam a qualidade de comunicação da rede. Os resultados obtidos permitiram construir viagens modelo representativas do comportamento típico da rede e localizar segmentos críticos, constituindo um contributo para o desenvolvimento de ferramentas automáticas de monitorização e apoio à manutenção preventiva.

O segundo caso de estudo centrou-se no planeamento de frequências na Linha de Cascais, onde a topografia e a proximidade com o mar potenciam fenómenos de interferência nas comunicações. O problema foi formulado como uma tarefa de otimização combinatória, incorporando restrições práticas do sistema GSM-R, no que diz respeito à alocação de portadoras no mesmo site, ou em sites vizinhos. Para a sua resolução, foi desenvolvida uma estratégia híbrida baseada em técnicas *Max-Min* e heurísticas *greedy*, visando maximizar o rácio *carrier-to-interference* (C/I) ao longo do percurso. A configuração final obtida demonstrou melhorias expressivas, com ganhos significativos face às configurações de referência.

De forma global, o estágio permitiu combinar métodos de análise estatística e técnicas de otimização com aplicação prática no setor ferroviário, reforçando a importância da Matemática Aplicada como ferramenta de suporte à tomada de decisão em sistemas de comunicações críticas. Os resultados alcançados evidenciam não só a aplicabilidade das metodologias desenvolvidas em contextos reais, como também o seu potencial para serem adaptadas a outras linhas ferroviárias e a diferentes cenários tecnológicos.

**Palavras-chave: Telecomunicações Ferroviárias; GSM-R; Deteção de Anomalias; Planeamento de Frequências; Otimização**



## Abstract

This report presents the work carried out during the curricular internship of the Master's Degree in Applied Mathematics for Industry at the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), in collaboration with SOLVIT – Innovation & Development on Telecommunications, Lda. The project was developed in the field of railway telecommunications, with a particular focus on the analysis of the signal quality of the GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) system, a critical technology to ensure reliable and secure communications between train drivers, control centres, and railway infrastructures.

The main objective of the internship was the application of mathematical and computational methodologies to the analysis and optimisation of mobile communications in railway environments, with a focus on the GSM-R system, through two distinct and complementary case studies.

The first case study focused on the Algarve Line, aiming at the detection of patterns and anomalies in signal quality. For this purpose, a systematic process of data treatment and standardisation was developed using measurements collected from test locomotives. This included filtering, normalisation, interpolation, and time-series smoothing. Statistical techniques were then applied to identify anomalies in the parameters that characterise network communication quality. The results enabled the construction of representative reference journeys and the identification of critical segments, contributing to the development of automatic monitoring tools and preventive maintenance support.

The second case study focused on frequency planning for the Cascais Line, where the challenging topography and proximity to the sea increase interference in communications. The problem was formulated as a combinatorial optimization task, considering practical GSM-R constraints related to carrier allocation within channels at the same or neighboring sites. A hybrid strategy was developed, combining Max-Min techniques with greedy heuristics, aiming to maximise the carrier-to-interference ratio (C/I) along the line. The final configuration demonstrated significant improvements, with clear gains compared to the reference configurations.

Overall, the internship combined statistical analysis methods and optimisation techniques with direct applicability to the railway sector, reinforcing the role of Applied Mathematics as a decision-support tool in critical communication systems. The results highlight not only the practical relevance of the proposed methodologies but also their potential to be adapted to other railway lines and different technological contexts.

**Keywords: Railway Telecommunications; GSM-R; Anomaly Detection; Frequency Planning; Optimisation**



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Apresentação do estágio . . . . .	1
1.2	Estrutura do relatório . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Revisão da literatura . . . . .	5
2.2	Comparação e análise crítica . . . . .	6
2.3	Síntese do estado da arte . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Sistema GSM-R</b>	<b>9</b>
3.1	Estrutura do sistema . . . . .	9
3.2	Bandas de frequência . . . . .	9
3.3	Canais e estrutura de rádio . . . . .	10
3.4	Infraestrutura e cobertura da rede . . . . .	10
3.5	Resumo . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Caso de Estudo 1 - Reconhecimento de Padrões e Detecção de Anomalias na Linha do Algarve</b>	<b>13</b>
4.1	Processamento de dados . . . . .	14
4.1.1	Definição do sentido . . . . .	17
4.1.2	Definição das viagens . . . . .	19
4.1.3	Padronização dos dados . . . . .	20
4.2	Análise e identificação de anomalias . . . . .	22
4.2.1	Nível de sinal . . . . .	23
4.2.2	<i>Handover</i> . . . . .	25
4.2.3	Qualidade de sinal . . . . .	25
4.3	Linha do Algarve . . . . .	26
4.3.1	Percurso: Lagos-Tunes (451) Sentido: Ascendente . . . . .	27
4.3.2	Percurso: Lagos-Tunes (451) Sentido: Descendente . . . . .	32
4.3.3	Percurso: Tunes-Vila Real (452) Sentido: Ascendente . . . . .	37
4.3.4	Percurso: Tunes-Vila Real (452) Sentido: Descendente . . . . .	39

<b>5</b>	<b>Caso de Estudo 2 - Planeamento de Frequências na Linha de Cascais</b>	<b>45</b>
5.1	Linha de Cascais e características da rede . . . . .	46
5.1.1	Sistema GSM-R . . . . .	46
5.1.2	Problemas na linha . . . . .	47
5.2	<i>Carrier-to-Interference ratio C/I</i> . . . . .	48
5.3	Problema proposto . . . . .	49
5.4	Formulação matemática . . . . .	54
5.5	Estratégia de otimização . . . . .	58
5.6	Resultados . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>67</b>
6.1	Conclusões . . . . .	67
6.1.1	Reconhecimento de padrões na Linha do Algarve . . . . .	67
6.1.2	Planeamento de frequências da Linha de Cascais . . . . .	68
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	68
6.2.1	Reconhecimento de padrões . . . . .	68
6.2.2	Planeamento de frequências . . . . .	69
	<b>Bibliografia</b>	<b>70</b>

# Lista de Figuras

4.1	Sondas da SOLVIT instaladas nos comboios de teste. . . . .	14
4.2	Distribuição dos sistemas de rede e ferroviária em Portugal. Fonte: Adaptado de [6]. . . . .	15
4.3	Exemplo do impacto das médias móveis. . . . .	23
4.4	Localização dos segmentos da Linha do Algarve. . . . .	26
4.5	Nível de sinal GSM-TCH ao longo de uma viagem do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente. . . . .	28
4.6	Nível de sinal do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente. . . . .	28
4.7	Anomalias no nível de sinal do segmento do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente. . . . .	29
4.8	Deteção de tendências no nível de sinal do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente. . . . .	29
4.9	Células servidoras do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	30
4.10	Anomalias no <i>handovers</i> do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	31
4.11	Qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	31
4.12	Histogramas da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	32
4.13	Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	32
4.14	Anomalias na qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente. . . . .	33
4.15	Nível de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	33
4.16	Anomalias no nível de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	34
4.17	Deteção de tendências no nível de sinal no segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	34
4.18	Células servidoras do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	35
4.19	Anomalias no <i>handover</i> do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	35
4.20	Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	36
4.21	Anomalias na qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente. . . . .	37
4.22	Nível de Sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente. . . . .	38

4.23	Anomalias no nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.	38
4.24	Células servidoras do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente. . . . .	39
4.25	Anomalias no <i>handover</i> do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente. . .	39
4.26	Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente. . . . .	40
4.27	Anomalias na qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente. . . . .	40
4.28	Nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente. . . . .	41
4.29	Anomalias no nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.	41
4.30	Células servidoras do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente. . . . .	42
4.31	Anomalias no <i>handover</i> do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.	42
4.32	Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente. . . . .	43
4.33	Anomalias na qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente. . . . .	43
5.1	Mapa da Linha de Cascais, destacando estações ferroviárias e infraestrutura de comunicação. . . . .	46
5.2	Cobertura média de sinal GSM-R ao longo da Linha de Cascais. . . . .	48
5.3	Relação entre intervalos de C/I e RxQual. . . . .	49
5.4	Distribuição do sinal recebido em dB, modelado como variável normal com média $\mu_n$ e desvio padrão de 8.5 dB. . . . .	51
5.5	Distribuição do quociente $C/I$ obtida por simulações de Monte Carlo com 8 sinais interferentes, aproximando-se de uma distribuição normal. . . . .	53
5.6	Gráfico de C/I para a configuração inicial. . . . .	62
5.7	Gráfico de C/I para a configuração da fase 1. . . . .	63
5.8	Gráfico de C/I para a configuração da fase 1 com ajustes. . . . .	64
5.9	Gráfico de C/I para a configuração da fase 2. . . . .	64
5.10	Gráfico de C/I para a configuração final. . . . .	65

# Lista de Tabelas

4.1	Estrutura de dados inicial. . . . .	16
4.2	Estrutura de dados reduzida. . . . .	17
4.3	Estrutura de dados com o sentido. . . . .	18
4.4	Estrutura de dados com viagens. . . . .	19
4.5	Estrutura de dados com Pk normalizado. . . . .	21
4.6	Estrutura de dados com agregação de dados. . . . .	21
4.7	Estrutura de dados interpolados. . . . .	22
4.8	Resumo dos grupos de viagens. . . . .	27
5.1	Localização e configuração dos sites na Linha de Cascais. . . . .	47
5.2	Classificação da qualidade do quociente C/I segundo limites recomendados. . . . .	48
5.3	Exemplo de um planeamento de frequências inadequado. . . . .	50
5.4	Exemplo de um planeamento de frequências adequado. . . . .	50
5.5	Resultados das simulações de Monte Carlo para diferentes números de sinais interferentes ( $m$ ). . . . .	53
5.6	Tabela de adjacência entre sites. . . . .	59
5.7	Planeamento de frequências inicial. . . . .	62
5.8	Planeamento de frequências da fase 1. . . . .	63
5.9	Planeamento de frequências da fase 1 com ajustes. . . . .	63
5.10	Planeamento de frequências da fase 2. . . . .	64
5.11	Planeamento de frequências final. . . . .	65



# Lista de Símbolos

$ACIR$	<i>Adjacent Channel Interference Ratio</i>
$ACLR$	<i>Adjacent Channel Leakage Ratio</i>
$ACS$	<i>Adjacent Channel Selectivity</i>
$C/I[i, j, k, pk]$	<i>Carrier-to-Interference ratio</i>
$C/I_{95\%}[i, j, k, pk]$	<i>Carrier-to-Interference ratio</i> ajustado pela margem de desvanecimento
$d_{i,j,k,i',j',k'}$	Distância em número de portadoras entre dois canais
$\Delta_{95\%}$	Margem de desvanecimento de 95%
$i$	Site
$j$	Célula
$k$	Canal
$L$	Número total de pontos discretizados ao longo da linha
$M_{i,i'}$	Matriz de adjacência entre sites
$N$	Número total de sites
$P[i, j, k, pk]$	Potência recebida do canal num ponto
$P_{\text{int}}[i, j, k, pk]$	Potência total de interferência no canal
$PK$	Conjunto de pontos de medição ao longo da linha
$pk_{\text{end}}$	Ponto final no intervalo de cobertura do site
$pk_{\text{start}}$	Ponto inicial no intervalo de cobertura do site
$\rho_{k'}$	Fator de atividade do canal
$x_{i,j,k}$	Portadora atribuída ao canal
$y_{i,j,k,pk}$	Variável binária indicadora de cumprimento do C/I
$z$	Distância mínima global entre portadoras (variável Max-Min)



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Apresentação do estágio

Este relatório foi elaborado no decorrer do estágio curricular, do Mestrado em Matemática Aplicada para a Indústria, realizado no âmbito da parceria entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) e a SOLVIT, no período de 1 fevereiro 2025 a 15 de julho de 2025.

A *SOLVIT-Innovation & Development on Telecommunications, Lda* foi fundada a 22 de abril de 2015, com sede localizada em Angra do Heroísmo, nos Açores [1].

Desde a sua fundação, a SOLVIT é uma empresa especializada na prestação de serviços de engenharia e na implementação de soluções inovadoras no domínio das Telecomunicações e das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), com destaque para o setor das comunicações ferroviárias. O papel da empresa no mercado tem sido marcado pelo desenvolvimento de ferramentas e soluções capazes de responder a desafios críticos em infraestruturas de transporte, garantindo robustez, fiabilidade e qualidade na transmissão de informação [2].

Durante o estágio foram abordados dois casos de estudo complementares, ambos inseridos na área das comunicações ferroviárias:

**Caso de Estudo 1 — Reconhecimento de Padrões e Detecção de Anomalias na Linha do Algarve** O primeiro caso de estudo centrou-se na análise do comportamento do sistema GSM-R (*Global System for Mobile Communications – Railway*) ao longo da Linha do Algarve, uma infraestrutura ferroviária essencial na região sul do país. Este sistema, adaptado do GSM convencional, é utilizado para assegurar comunicações seguras entre maquinistas, centros de controlo e infraestruturas ferroviárias, desempenhando um papel crucial para a segurança operacional.

Neste contexto, o trabalho desenvolvido teve como principal objetivo a caracterização do comportamento habitual do sinal e a deteção de anomalias. Para isso, recorreu-se a dados recolhidos por sondas instaladas em locomotivas de ensaio, que registam continuamente parâmetros técnicos como o nível de sinal (*RxLevel*), a qualidade da ligação (*RxQual*) e os *handovers*, que representam eventos de transição entre zonas de cobertura, denominadas de células.

A abordagem envolveu um conjunto de etapas fundamentais:

- Processamento dos dados, incluindo a filtragem dos registos relevantes para o estudo, determinação automática do sentido de circulação do comboio e segmentação em viagens distintas;
- Padronização e normalização dos registos, assegurando comparabilidade entre diferentes viagens através da discretização dos pontos quilométricos, agregação de

valores, interpolação de lacunas e técnicas de *smoothing* para suavizar a curva do sinal;

- Construção de viagens modelo com base em métricas estatísticas, como medianas, modas e desvios absolutos medianos, permitindo estabelecer padrões de referência;
- Identificação de anomalias em métricas que descrevem a qualidade da rede com base nos padrões definidos na viagem modelo.

Os resultados deste estudo permitiram, não apenas compreender o desempenho típico do sistema GSM-R na Linha do Algarve, mas também criar bases metodológicas para ferramentas automáticas de monitorização que possam emitir alertas em tempo útil e apoiar a manutenção preventiva.

**Caso de Estudo 2 — Planeamento de Frequências na Linha de Cascais** O segundo caso de estudo incidiu sobre o planeamento de frequências do sistema GSM-R na Linha de Cascais, um troço ferroviário particularmente desafiante devido à sua proximidade com o mar e elevada densidade de tráfego ferroviário.

Neste contexto, o problema central consistiu em atribuir frequências aos canais de controlo (BCCH) e de tráfego (TCH) de forma a minimizar interferências, garantindo níveis adequados do quociente *carrier-to-interference* (C/I). Este quociente é um indicador crítico da qualidade da comunicação, determinando a fiabilidade das chamadas e a robustez das transmissões de dados.

A formulação do problema incorporou diversas restrições técnicas, como a necessidade de assegurar separações mínimas entre frequências nos canais do mesmo site e entre sites vizinhos, a diferenciação entre canais BCCH e TCH, e a consideração de margens de desvanecimento, com o objetivo de garantir a fiabilidade dos resultados a um nível de confiança elevado. Para responder a este desafio, foi desenvolvida uma abordagem heurística de otimização combinatória, composta por:

- uma fase inicial baseada em técnicas *Max-Min*, orientada para maximizar as distâncias entre frequências em situações críticas;
- uma fase complementar recorrendo a heurísticas *greedy*, permitindo ajustes locais.

Os resultados demonstraram ganhos significativos na qualidade global do sistema, nomeadamente um aumento da percentagem de pontos com C/I acima do limiar mínimo recomendado (12 dB), atingindo valores de cobertura superiores a 97%. Estes avanços reforçam a relevância prática do estudo, uma vez que contribuem para uma rede ferroviária mais segura e eficiente, capaz de sustentar as exigências operacionais do transporte ferroviário moderno.

## 1.2 Estrutura do relatório

O relatório está organizado de modo a apresentar de forma sistemática os trabalhos realizados, as metodologias aplicadas e os resultados obtidos em 6 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o enquadramento institucional e empresarial do estágio, descreve os dois casos de estudo de forma sucinta e explícita a estrutura global do relatório.

Capítulo 2 – Estado da Arte: realiza uma revisão dos principais trabalhos e conceitos relacionados com as áreas de estudo abordadas, nomeadamente a deteção de padrões em dados de comunicações ferroviárias e o planeamento de frequências em redes GSM-R. São analisadas metodologias existentes na literatura, com destaque para o trabalho

desenvolvido por Inês Henriques, que antecedeu o presente projeto, e para estudos de referência sobre problemas de otimização combinatória aplicados à gestão de espectro. Este capítulo estabelece o enquadramento teórico e técnico que fundamenta as abordagens adotadas nas fases seguintes do trabalho.

Capítulo 3 - Sistema Gsm-R: apresenta uma descrição geral sobre o sistema GSM-R, tecnologia de comunicações móveis desenvolvida para o setor ferroviário. Descreve o seu enquadramento e o papel que desempenha na transmissão de voz e dados entre o maquinista e o centro de controlo. São também introduzidos os principais componentes da rede, a sua estrutura funcional, as faixas de frequência utilizadas e os principais conceitos e designações técnicas, incluindo os tipos de canais e mecanismos de comunicação.

Capítulo 4 – Reconhecimento de Padrões na Linha do Algarve: expõe o primeiro caso de estudo, descrevendo a origem e características dos dados recolhidos, os métodos de processamento e padronização aplicados, bem como os algoritmos de deteção de anomalias implementados. São também discutidos os resultados obtidos, ilustrados através de mapas de calor, histogramas e métricas de qualidade do sinal.

Capítulo 5 – Planeamento de Frequências na Linha de Cascais: aborda o segundo caso de estudo, introduzindo o contexto da linha, as particularidades do sistema GSM-R e as dificuldades associadas à propagação de sinal e interferência. Segue-se a formulação matemática do problema, a descrição detalhada da estratégia de otimização e a apresentação dos resultados alcançados, com análise crítica da sua relevância prática.

Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros: sintetiza as principais contribuições do estágio, destacando os benefícios das metodologias propostas e identificando limitações e perspectivas de continuidade, incluindo a possibilidade de aplicação dos métodos desenvolvidos a outras linhas ferroviárias ou a novos contextos tecnológicos.



# Capítulo 2

## Estado da Arte

Neste capítulo apresenta-se o estado da arte relativo aos dois temas centrais do trabalho: reconhecimento de padrões e deteção de anomalias e o planeamento de frequências. Serão analisados os principais contributos identificados na literatura, com foco no contexto em que surgiram e nas abordagens metodológicas utilizadas. Esta revisão é essencial não apenas para fundamentar o desenvolvimento do presente trabalho e as escolhas metodológicas adotadas, mas também para identificar oportunidades de melhoria ou adaptação ao estudo em questão.

### 2.1 Revisão da literatura

#### Reconhecimento de padrões

Por se tratar do trabalho que antecedeu diretamente o presente projeto, foi também realizada uma revisão detalhada da dissertação de Inês Henriques [3], desenvolvida igualmente em colaboração com a SOLVIT. Este estudo explorou o uso de modelos de *machine learning* aplicados ao contexto das comunicações ferroviárias, constituindo uma base importante para a continuidade do trabalho agora apresentado. Nesse projeto, foram aplicadas técnicas de classificação, regressão e otimização combinadas, com o objetivo de identificar e prever parâmetros críticos de desempenho da rede GSM-R. Entre os principais contributos, destaca-se a utilização de modelos *ensemble* para melhorar a precisão na estimativa da posição quilométrica (PK) e na classificação de eventos de sinal, bem como o desenvolvimento de algoritmos automáticos para a geração de indicadores de desempenho (KPIs).

Esta abordagem demonstrou o potencial das metodologias de aprendizagem automática para problemas complexos e multivariados no domínio ferroviário, oferecendo uma perspetiva valiosa sobre a análise inteligente de dados de sinal. A revisão deste trabalho revelou-se particularmente relevante, uma vez que o presente estudo dá continuidade direta à mesma linha de investigação, reutilizando parte do conhecimento obtido sobre o comportamento do sinal GSM-R e as suas variações ao longo do percurso ferroviário, mas adotando metodologias distintas, mais leves e interpretáveis, para a deteção de padrões.

#### Planeamento de frequências

O *Frequency Assignment Problem* (FAP) constitui um problema central nas áreas de otimização combinatória e engenharia de telecomunicações. Este problema surge em contextos onde se pretende alocar frequências de rádio a um conjunto de transmissores, garantindo que restrições de interferência e capacidade sejam respeitadas. Este problema é crucial para a operação eficiente de redes de comunicação sem fio, incluindo sistemas móveis e redes de rádio.

Segundo Pardalos (1999) [4], o FAP pode ser descrito como a atribuição de um conjunto limitado de frequências a um conjunto de estações ou canais de comunicação, minimizando o risco de interferência entre transmissões, onde o objetivo é encontrar uma atribuição de frequências que satisfaça essas restrições, podendo incluir objetivos como:

- Minimização do número de frequências utilizadas;
- Minimização da interferência total;
- Satisfação de requisitos de separação mínima entre frequências atribuídas a estações vizinhas.

O FAP é conhecido por ser um problema *NP-Hard*, o que significa que não existe atualmente um algoritmo de complexidade polinomial capaz de resolvê-lo exatamente em tempo razoável. A complexidade combinatória cresce rapidamente com o aumento do número de elementos a alocar, tornando inviável a exploração exaustiva de todas as possíveis soluções. No contexto do planejamento de frequências em redes reais, isto traduz-se em situações com muitos sites, que representam a localização onde estão instaladas as bases transmissoras, ou situações com muitos canais, como é o caso no presente trabalho, tornando inviável a procura exaustiva por soluções ótimas. Pardalos (1999) identifica diversas variantes do problema, incluindo:

- Com restrições rígidas (*hard constraints*): Todas as restrições de interferência devem ser satisfeitas.
- Com restrições suaves (*soft constraints*): Algumas violações são permitidas, geralmente penalizadas em função do grau de interferência.

Este estudo descreve uma variedade de métodos utilizados para abordar o FAP, divididos em técnicas exatas e heurísticas:

- Métodos exatos:
  - Programação linear inteira (*Integer Linear Programming – ILP*);
  - Algoritmos de *branch-and-bound*.

Estes métodos garantem soluções ótimas, mas são limitados a instâncias pequenas devido à complexidade computacional.

- Métodos heurísticos e meta heurísticos
  - Algoritmos gulosos (*greedy*);
  - Algoritmos de busca local, como *simulated annealing* e *tabu search*;
  - Algoritmos evolutivos, incluindo *genetic algorithms*.

Estas abordagens não garantem a solução ótima, mas permitem resolver instâncias de maior dimensão em tempos computacionais aceitáveis.

O FAP tem aplicações diretas em redes móveis, redes militares e sistemas de comunicação via satélite. A sua relevância decorre da necessidade crescente de espectro de frequências e da complexidade das redes modernas, onde a otimização de recursos espectrais é fundamental para reduzir interferências e melhorar a qualidade do serviço.

## 2.2 Comparação e análise crítica

### Reconhecimento de padrões

A revisão do trabalho de Inês Henriques [3] evidenciou que este estudo constituiu uma base importante para a exploração inicial de modelos de *machine learning* aplicados ao

reconhecimento de padrões em dados GSM-R. As metodologias propostas permitiram testar técnicas de classificação, regressão e modelos *ensemble*, fornecendo percepções valiosas sobre o comportamento do sinal e a identificação de eventos críticos.

No contexto do presente trabalho, estas abordagens foram consideradas e utilizadas na fase exploratória; contudo, verificou-se que, dado o volume de dados disponível e as exigências computacionais associadas (como grandes quantidades de dados devidamente rotulados, etapas de treino computacionalmente exigentes e uma manutenção contínua para garantir a atualização do modelo), métodos estatísticos e determinísticos baseados em séries temporais mostraram-se mais adequados. Estas técnicas mais leves permitiram alcançar resultados consistentes, reduzindo consideravelmente o seu custo computacional, sem comprometer a qualidade da detecção de padrões, e constituindo uma evolução natural a partir do conhecimento previamente adquirido no estudo de Inês Henriques.

Assim, optou-se por um método matematicamente menos complexo e mais eficiente, capaz de fornecer resultados fiáveis em tempo reduzido, assegurando ao mesmo tempo uma implementação prática e sustentável no contexto industrial. Esta decisão reflete uma escolha consciente de equilíbrio entre precisão analítica e aplicabilidade operacional.

## Planeamento de frequências

A revisão da literatura do livro [4] revelou diversas abordagens para problemas de otimização e planeamento de frequências, incluindo métodos exatos, heurísticos e meta heurísticos. Embora estas metodologias tenham apresentado bons resultados em contextos gerais, o problema tratado neste trabalho apresenta características particulares que exigem adaptações específicas:

- Configuração única de canais e sites emissores: Cada site possui um conjunto de portadoras e canais com restrições particulares de separação, e a localização geográfica dos sites influencia diretamente a interferência entre células. Esta especificidade impede a aplicação direta de soluções genéricas da literatura sem ajustes.
- Registos de sinal únicos: A análise dos sinais emitidos e a avaliação de interferência dependem de dados experimentais próprios, com distribuições e padrões distintos daqueles utilizados em estudos prévios. Isso requer uma abordagem capaz de incorporar informações observacionais do sistema real.
- Complexidade combinatória elevada: O problema envolve múltiplos sites, células e canais, com restrições rigorosas. Métodos exatos para otimização inteira tornam-se impraticáveis, devido ao crescimento exponencial do espaço de soluções.

Diante dessas particularidades, optou-se por uma estratégia heurística em duas fases, inspirada em abordagens descritas na literatura, mas adaptada ao caso estudado: Otimização *Max-Min* das distâncias entre portadoras de sites adjacentes; Permutação local de portadoras dentro de cada site, baseado no algoritmo de *greedy*.

Portanto, a análise crítica evidencia que, embora a literatura ofereça técnicas consolidadas para planeamento de frequências, a adaptação das metodologias ao caso concreto é essencial para lidar com as restrições e particularidades do problema estudado. Esta adaptação garante que a solução obtida seja prática, robusta e adequada ao contexto real dos sites e canais analisados.

## 2.3 Síntese do estado da arte

A análise do estado da arte permitiu identificar duas áreas principais de relevância para o desenvolvimento do presente trabalho: a detecção de padrões e anomalias no sinal ferroviário

e o planeamento de frequências em redes GSM-R.

No que respeita à deteção de padrões e anomalias, a revisão do trabalho de Inês Henriques [3] revelou a aplicação bem-sucedida de métodos de *machine learning*, nomeadamente redes neuronais e modelos *ensemble*, para a previsão de PK e a análise de dados GSM-R. Apesar dos resultados positivos, a utilização dessas técnicas mostrou-se exigente em termos computacionais e dependente de grandes volumes de dados rotulados, o que limita a sua aplicabilidade em sistemas de monitorização contínua e com recursos restritos.

Relativamente ao planeamento de frequências, os estudos de referência apresentam o problema como otimização combinatória complexa, frequentemente abordada através de métodos heurísticos e meta heurísticos, nomeadamente algoritmos genéticos, *simulated annealing* e técnicas de relaxação linear. Estes métodos visam encontrar configurações de portadoras que maximizem o quociente *carrier-to-interference* (C/I) e minimizem a interferência entre canais adjacentes. Contudo, as soluções propostas na literatura assumem, na maioria dos casos, um contexto genérico de comunicações móveis, não considerando as especificidades dos sistemas ferroviários, como as restrições de cobertura linear e a criticidade das comunicações de controlo.

Assim, o presente trabalho propõe uma abordagem complementar, que privilegia o uso de métodos estatísticos e determinísticos para o reconhecimento de padrões no sinal, aliando simplicidade e eficiência computacional. Ao mesmo tempo, no domínio do planeamento de frequências, adota-se uma formulação de otimização combinatória estruturada, mas adaptada às características específicas da Linha de Cascais, conciliando as exigências práticas da operação ferroviária com a robustez analítica necessária para garantir níveis adequados de C/I.

Em conjunto, estas análises sustentam a opção metodológica adotada ao longo deste projeto: privilegiar soluções computacionalmente eficientes, mas tecnicamente sólidas, capazes de produzir resultados fiáveis e diretamente aplicáveis à realidade das comunicações ferroviárias em Portugal.

## Capítulo 3

# Sistema GSM-R

O *Global System for Mobile Communications - Railway* (GSM-R) é um sistema de telecomunicações móveis digitais desenvolvido especificamente para o domínio ferroviário. O GSM-R baseia-se no GSM público, mas incorpora um conjunto de funcionalidades adicionais necessárias à sua utilização ferroviária, incluindo chamadas de emergência com prioridade, mensagens de grupo e transmissão de dados de controlo. O GSM-R integra o *European Rail Traffic Management System* (ERTMS), sendo uma componente essencial para a comunicação e controlo de tráfego ferroviário na Europa [5].

### 3.1 Estrutura do sistema

A arquitetura do GSM-R segue o modelo de uma rede GSM público convencional, mas adaptada às necessidades operacionais ferroviárias. Os principais elementos são:

- *Base Transceiver Station* (BTS) – antenas instaladas ao longo da via, responsáveis por emitir sinal rádio para os comboios e receber os sinais enviados pelos equipamentos móveis a bordo. Cada BTS gera uma ou mais células, cada uma cobrindo uma zona específica da linha.
- *Base Station Controller* (BSC) – gere um conjunto de BTS, controlando recursos rádio e operações de handover entre células.
- *Mobile Switching Centre* (MSC) – comuta chamadas e gere a ligação entre a rede rádio e outras redes fixas ou móveis.
- *Operation and Maintenance Centre* (OMC-R) – supervisiona o desempenho global da rede, recolhendo métricas de desempenho (como níveis de sinal, falhas de handover, disponibilidade de células) e alarmes de rede (como falhas de BTS, degradação de potência, perdas de sincronismo).
- *Dispatchers e Control Centres* – permitem a comunicação direta entre o maquinista e o centro de controlo, com prioridade sobre outras chamadas.
- *Terminais Móveis* - Equipamentos instalados nas cabinas dos comboios ou utilizados por pessoal ferroviário. Permitem chamadas ponto-a-ponto, chamadas de grupo e comunicações de emergência.

### 3.2 Bandas de frequência

O GSM-R utiliza bandas de frequência dedicadas exclusivamente ao serviço ferroviário, garantindo isolamento em relação ao GSM público. No contexto GSM/GSM-R, uma portadora

é uma onda eletromagnética contínua utilizada como suporte para transmissão de informação. A portadora é posteriormente modulada para transportar voz, dados ou sinalização. Para os sistemas EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*), estão atribuídas:

- *Uplink* (comboio → estação base): 876–880 MHz
- *Downlink* (estação base → comboio): 921–925 MHz

Cada canal possui uma largura de banda de 200 kHz, permitindo múltiplas comunicações simultâneas dentro da mesma portadora.

### 3.3 Canais e estrutura de rádio

O GSM-R utiliza o mesmo princípio de divisão em canais do sistema GSM. Cada portadora tem 200 kHz de largura de banda e é subdividida em *time-slots* ao longo de quadros temporais. Cada *time-slot* pode ser atribuído a um utilizador diferente, permitindo que várias comunicações ocorram em simultâneo na mesma portadora.

Os principais tipos de canais são:

- BCCH (*Broadcast Control Channel*) – canal de controlo que transmite informação geral sobre a célula, como identificação e parâmetros de acesso.
- TCH (*Traffic Channel*) – canal dedicado à transmissão de voz ou dados durante a comunicação ativa.

Esta divisão é fundamental de modo a otimizar o uso do espectro disponível, permitindo que múltiplas comunicações ocorram simultaneamente sem interferência.

### 3.4 Infraestrutura e cobertura da rede

Um site é uma estrutura física onde são instalados equipamentos de rádio para a rede GSM-R. Cada site serve como ponto de emissão e receção de sinais, garantindo a cobertura ao longo da linha ferroviária. A rede GSM-R é composta por sites rádio distribuídos ao longo da linha ferroviária. Cada site inclui uma ou mais BTS, podendo operar com antenas direcionais ou omnidirecionais, montadas em torres, postes ou edifícios técnicos junto à linha ferroviária, dependendo das condições geográficas. As antenas omnidirecionais irradiam sinal de forma uniforme em todas as direções, sendo usadas quando se pretende cobrir uma área circular ao redor do site. Já as antenas direcionais concentram a energia num setor específico, permitindo maiores alcances e reduzindo interferências indesejadas. Na ferrovia, são especialmente úteis para orientar a cobertura ao longo da via, seguindo o traçado da linha.

A área coberta de cada BTS é designada de célula. As células são planeadas de forma a garantir a continuidade de comunicação durante a deslocação do comboio. Quando o terminal passa de uma célula para outra, ocorre o processo de *handover*, que assegura a transferência da ligação sem interrupção.

O planeamento da rede considera parâmetros como cobertura, capacidade, interferência e topografia, permitindo minimizar áreas sem cobertura e reduzir a ocorrência de falhas de comunicação. Adicionalmente, o GSM-R suporta funcionalidades específicas de prioridade, garantindo que chamadas de emergência e comunicações de controlo de tráfego têm precedência sobre comunicações regulares.

### **3.5 Resumo**

O GSM-R é uma adaptação do padrão GSM dirigida às necessidades ferroviárias. A sua arquitetura mantém os elementos fundamentais do GSM público, acrescentando serviços e requisitos funcionais específicos. A estrutura física da rede baseia-se em sites e células desenhadas para garantir cobertura contínua ao longo da via; a organização dos canais e a alocação espectral condicionam o dimensionamento da capacidade e a gestão do serviço.



## Capítulo 4

# Caso de Estudo 1 - Reconhecimento de Padrões e Detecção de Anomalias na Linha do Algarve

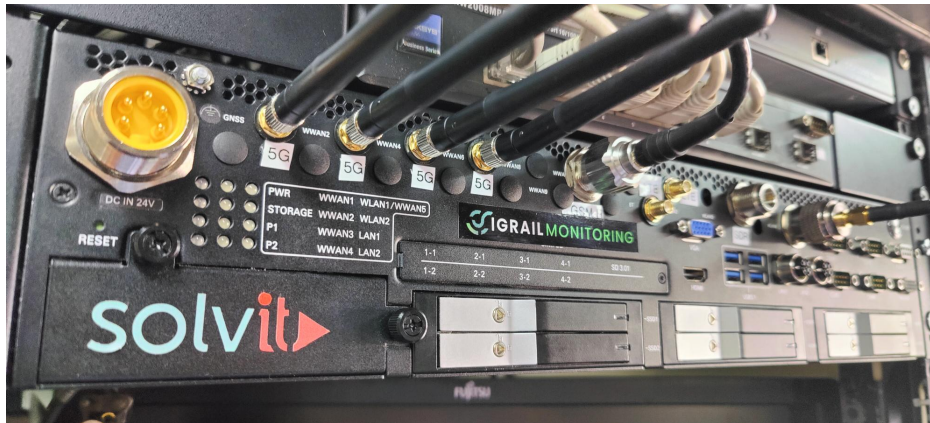
Uma das áreas de atuação da SOLVIT é a monitorização do sinal de rede recebido pelos comboios ao longo das linhas ferroviárias, nomeadamente o GSM-R (*Global System for Mobile Communications – Railway*), um sistema de telecomunicações móveis digitais, adaptado ao setor ferroviário para assegurar comunicações seguras e fiáveis entre maquinistas, controladores de tráfego e infraestruturas. Este processo é essencial para garantir as condições necessárias a uma comunicação estável e eficaz durante todo o percurso, permitindo deteção de falhas ou degradações do sinal em tempo oportuno. Estes eventos podem ocorrer devido a problemas de configuração da rede ou alterações ambientais, como novas construções, obstruções ou deslocação de antenas, que afetam a qualidade da receção.

Para identificar essas alterações, é essencial a utilização de uma ferramenta de análise de dados capaz de processar registos de sinais GSM-R e indicadores associados ao longo do espaço e do tempo. Esta ferramenta visa identificar automaticamente os momentos e locais em que ocorrem alterações no comportamento habitual dos parâmetros do sinal, tornando o processo de monitorização mais rápido e reduzindo a necessidade de intervenções no terreno.

Os dados utilizados neste estudo são recolhidos pela SOLVIT em parceria com a Infraestruturas de Portugal, através de sondas instaladas em comboios de teste que percorrem regularmente as linhas ferroviárias. Estas sondas, equipadas com recetores e sensores, registam parâmetros de qualidade do sinal de todos os sistemas de comunicações ferroviárias, incluindo GSM-R e CP-N (Rádio Solo-Comboio), ao longo do percurso. Os registos obtidos são posteriormente reportados à SOLVIT, permitindo a análise detalhada da cobertura e desempenho da rede [6]. As Figuras 4.1 apresentam as sondas da SOLVIT, equipamento responsável pela recolha dos dados analisados neste estudo, instaladas nos comboios de teste.

Embora a maior parte da rede ferroviária em Portugal utilize sistemas CP-N, o GSM-R está implementado em algumas linhas específicas, incluindo a Linha do Algarve, como ilustrado na Figura 4.2 [6].

Por este motivo, o presente estudo foi efetuado sobre a Linha do Algarve, composta por dois segmentos: a ligação Lagos–Tunes e a ligação Tunes–Vila Real de Santo António. Esta linha foi escolhida por estar monitorizada com equipamento GSM-R, por cobrir aproximadamente 137 km, e por apresentar a maior quantidade de medições disponíveis. Apesar do foco nesta linha do Algarve, a ferramenta desenvolvida está concebida para poder ser aplicada em qualquer linha ferroviária. O objetivo deste capítulo é o desenvolvimento e implementação dessa ferramenta de análise. A abordagem consiste em estudar o comportamento



**Figura 4.1:** Sondas da SOLVIT instaladas nos comboios de teste.

do sinal com base em dados históricos recolhidos em condições semelhantes, identificar padrões recorrentes e detetar desvios significativos em relação ao seu comportamento esperado.

Com base na experiência de trabalhos anteriores realizados pela SOLVIT, incluindo a dissertação de Inês Henriques [3], que explorou o uso de técnicas de *machine learning* para análise do sinal GSM-R. A presente abordagem opta por métodos estatísticos e determinísticos, como medianas, modas, desvios absolutos medianos, e variantes de regressões lineares em series temporais, tendo em consideração a dimensão e natureza dos dados disponíveis.

O capítulo está organizado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a caracterização dos dados disponíveis; depois, descrevem-se as técnicas utilizadas e as respetivas motivações no tratamento dos dados; em seguida, são apresentadas as técnicas de análise aplicadas ao reconhecimento de padrões e à deteção de anomalias; por fim, expõem-se os resultados obtidos e a respetiva discussão e interpretação.

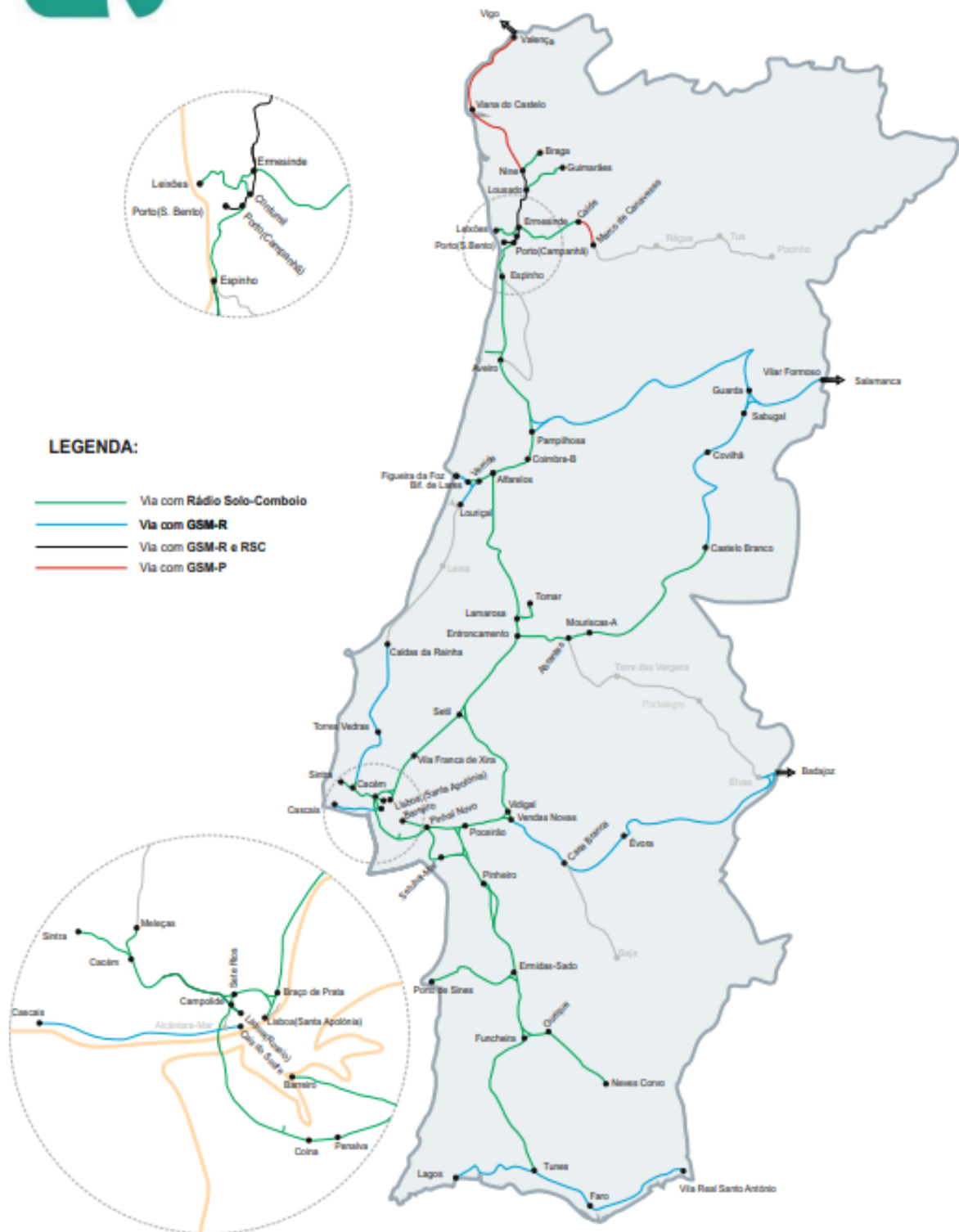
## 4.1 Processamento de dados

Para possibilitar a implementação desta ferramenta de análise, é necessário um processamento inicial dos dados, de forma a construir uma estrutura sólida que permita efetuar comparações consistentes e fiáveis.

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de sondas instaladas em locomotivas de teste, que circulam ao longo das linhas ferroviárias de Portugal. A função destas sondas consiste na monitorização contínua da ligação rádio durante o percurso, registando



## Comunicações Solo Comboio



Directório da Rede 2025

Figura 4.2: Distribuição dos sistemas de rede e ferroviária em Portugal. Fonte: Adaptado de [6].

parâmetros técnicos relativos à posição geográfica e à qualidade da ligação. Para este trabalho, os principais parâmetros disponibilizados encontram-se organizados segundo a estrutura exemplificada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Estrutura de dados inicial.

scan_date	lat	lon	elev	speed	state	pk	railway_id	cellType	gsm_cell_id	gsm_rx_level_bcch	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual
2023-06-06T07:59:09	37.01897	-7.94001	29.884	0.0396		339.9521	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		
2023-06-06T07:59:11	37.01897	-7.94	30.095	0.0324	DEDICATED	339.9519	452	SERVING_CELL	84FD	-39	-37	0
2023-06-06T07:59:11	37.01897	-7.94	30.095	0.0324	DEDICATED	339.9519	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		
2023-06-06T07:59:12	37.01897	-7.94	30.223	0.054	DEDICATED	339.9521	452	SERVING_CELL	84FD	-39	-37	0
2023-06-06T07:59:13	37.01897	-7.94	30.223	0.054	DEDICATED	339.9521	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		
2023-06-06T07:59:14	37.01897	-7.94	30.331	0.1152	DEDICATED	339.9522	452	SERVING_CELL	84FD	-39	-37	0
2023-06-06T07:59:15	37.01897	-7.94	30.548	0.0396	DEDICATED	339.9523	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		
2023-06-06T07:59:16	37.01897	-7.94	30.612	0.0216	DEDICATED	339.9524	452	SERVING_CELL	84FD	-39	-37	0
2023-06-06T07:59:17	37.01897	-7.93999	30.726	0.1116	DEDICATED	339.9526	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		
2023-06-06T07:59:18	37.01897	-7.93999	30.989	0.1188	DEDICATED	339.9526	452	SERVING_CELL	84FD	-39	-37	0
2023-06-06T07:59:19	37.01897	-7.93999	31.143	0.0468	DEDICATED	339.9528	452	NEIGHBOUR_CELL		-78		

Onde:

- `scan_date` — data da medição;
- `lat` — latitude da posição do comboio;
- `lon` — longitude da posição do comboio;
- `elev` — altitude em metros;
- `speed` — velocidade do comboio em km/h;
- `state` — estado do modem (dedicado ou *idle*);
- `pk` — posição quilométrica na linha ferroviária;
- `railway_id` — identificador único da linha ferroviária;
- `cellType` — informação sobre a célula responsável pelo sinal recebido (célula servidora ou vizinha);
- `gsm_cell_id` — identificador da célula GSM que emitiu o sinal;
- `gsm_rx_level_bcch` — nível de sinal do canal BCCH (*Broadcast Control Channel*), canal de controlo utilizado para transmitir informações de sincronização e configuração da rede, em dBm;
- `gsm_rx_level_tch` — nível de sinal do canal TCH (*Traffic Channel*), canal dedicado à comunicação de voz ou dados entre o comboio e a rede ferroviária, em dBm;
- `gsm_rx_qual` — qualidade de sinal, variando entre 0 (melhor) e 7 (pior).

Note-se que os valores de PK não são disponibilizados diretamente pela sonda, em vez disso, são calculados a partir das coordenadas de GPS por meio de um algoritmo desenvolvido no âmbito do trabalho de Inês Henriques [3].

Como se pode observar, nem todos os parâmetros recolhidos pelas sondas estão disponíveis em todos os instantes de medição. Em particular, métricas como o nível de sinal do canal de tráfego (TCH) ou a qualidade de receção (*RxQual*) apenas são reportadas quando o modem se encontra em modo dedicado, isto é, durante uma ligação ativa entre o comboio e a rede GSM-R. Por este motivo, a análise desenvolvida neste trabalho restringiu-se exclusivamente aos registos em modo dedicado.

Adicionalmente, considerou-se apenas a célula servidora (*servicing cell*), responsável pela prestação efetiva do serviço de comunicações ao comboio. Esta decisão implica uma redução natural do conjunto de variáveis de interesse: as colunas associadas ao canal de difusão (*BCCH*) deixam de ser relevantes, uma vez que apenas são significativas em contexto de células vizinhas, e os próprios campos `state` e `cellType` tornam-se redundantes,

dado que o subconjunto de dados já reflete apenas registos em dedicado e na célula servidora.

Assim, após esta filtragem, as variáveis de interesse para o presente projeto ficam reduzidas às apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Estrutura de dados reduzida.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual
2023-06-06T07:59:11.025	0.0324	339.9519	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:12.919	0.054	339.9521	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:14.815	0.1152	339.9522	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:16.701	0.0216	339.9524	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:18.581	0.1188	339.9526	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:20.47	0.0324	339.9529	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:22.358	0.1152	339.9531	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:24.244	0.1296	339.9532	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:26.13	0.036	339.953	452	84FD	-37	0
2023-06-06T07:59:28.013	0.0072	339.953	452	84FD	-37	0

Dado que o objetivo central deste projeto consiste no reconhecimento de padrões, torna-se indispensável que os dados estejam devidamente estruturados com informações contextuais, tais como o sentido de circulação do comboio e a viagem a que pertencem. Esta organização assegura que as comparações efetuadas entre diferentes trajetos sejam consistentes, uma vez que passam a considerar conjuntos de dados com características homogêneas. Assim, ao analisar o comportamento de uma viagem específica numa determinada linha e num dado sentido, garante-se que todos os registos estão alinhados com esse enquadramento, possibilitando uma avaliação mais rigorosa e representativa dos padrões subjacentes.

Como os dados disponibilizados pelas sondas não apresentam, à partida, esta estrutura organizada, torna-se necessário realizar um processamento prévio, de forma a extrair e organizar a informação relevante, permitindo a construção de uma base adequada para a análise e reconhecimento de padrões.

#### 4.1.1 Definição do sentido

O primeiro passo consistiu em determinar o sentido de movimento dos comboios em cada viagem. Para tal, foi analisada a evolução do PK, que representa a posição ao longo da linha ferroviária em quilómetros. Como o sinal de GPS está sujeito a imprecisões ocasionais, resultantes de falhas momentâneas de receção, podem ocorrer flutuações indesejadas na conversão para PK. Assim, se o sentido fosse atribuído apenas a partir da diferença entre a posição atual e a posição anterior, poderiam surgir falsas indicações de mudanças de sentido ao longo da viagem. Para mitigar este problema, foi adotada uma abordagem diferente.

Após a ordenação temporal dos dados, a lógica consiste, em primeiro lugar, verificar se o comboio se encontra em movimento, considerando apenas registos cuja velocidade ultrapassa um determinado limite de 15 Km/h (configurável). Para estes instantes, compara-se a posição PK com a média das posições registadas anteriormente dentro de uma janela temporal de 10 segundos (configurável). Se o valor do PK for superior à média, a observação é associada ao sentido ascendente; caso contrário, ao descendente. Para garantir consistência ao longo de todo o trajeto e preencher eventuais lacunas neste campo, aplicou-se uma interpolação dos sentidos, com base na proximidade dos dados.

Esta abordagem reduz consideravelmente a percentagem de erros obtida nos casos de interesse, quando o comboio está realmente a efetuar viagens. Demonstra menor precisão para casos onde a velocidade de deslocação é reduzida, que normalmente representam manobras, que não são relevantes para este trabalho.

A Tabela 4.3 demonstra um exemplo da nova estrutura de dados com a introdução deste algoritmo.

**Tabela 4.3:** Estrutura de dados com o sentido.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual	direction
2023-06-0	2.331	316.1774	452	84FD	-37	0	DESC
2023-06-0	4.24	316.1765	452	84FD	-38	0	DESC
2023-06-0	5.785	316.1751	452	84FD	-38	0	DESC
2023-06-0	8.249	316.173	452	84FD	-38	0	DESC
2023-06-0	10.146	316.1702	452	84FD	-39	0	DESC
2023-06-0	12.013	316.1671	452	84FD	-41	0	DESC
2023-06-0	13.736	316.1636	452	84FD	-41	0	DESC
2023-06-0	15.74	316.1596	452	84FD	-42	0	DESC
2023-06-0	18.35	316.1549	452	84FD	-42	0	DESC

#### 4.1.1.1 Algoritmo de atribuição do sentido

Apresenta-se de seguida o pseudocódigo 1 do algoritmo que permite identificar o sentido do comboio em cada instante.

---

**Algorithm 1:** Pseudocódigo da determinação do sentido de cada ponto

---

**Data:** Dados de PK e velocidade para cada ponto de cada linha ferroviária

**Result:** Sentido (ASC/DESC) de cada ponto

```

for cada linha ferroviária do
  for cada ponto da linha do
    if velocidade do ponto > limite de movimento then
      Definir janela temporal com pontos anteriores;
      Calcular média das PK dentro da janela;
      if PK atual > média then
        Sentido do ponto = ASC;
      end
    else
      Sentido do ponto = DESC;
    end
  end
  else
    Sentido do ponto = indefinida;
  end
end
Interpolat direções indefinidas ao longo da linha;
end

```

---

## 4.1.2 Definição das viagens

Uma vez atribuídos os sentidos de movimento a cada instante, a etapa seguinte consistiu na identificação das viagens. Nesta fase, cada observação foi associada a um identificador único de viagem, permitindo a análise estruturada de trajetos completos ao longo da linha ferroviária.

Os critérios principais para iniciar uma nova viagem são:

- Mudança de sentido: se a observação atual tem um sentido associado distinto do instante anterior, inicia-se uma nova viagem.
- Mudança de segmento: se o ponto atual está associado a um segmento de linha distinto do anterior, considera-se o início de uma nova viagem.
- Intervalo temporal: se o tempo entre duas observações excede um limite de uma hora (configurável), assume-se que a viagem anterior terminou.

Além disso, efetua-se um passo adicional para eliminar viagens demasiado curtas, que possam corresponder a manobras do comboio, a longos períodos em que este se encontra estacionado ou até mesmo a erros, caracterizadas por uma deslocação inferior a um limite mínimo de 1 Km. Desta forma, garante-se que apenas viagens significativas são consideradas.

Assim, associa-se a cada medição um id de viagem, como representado na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Estrutura de dados com viagens.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual	direction	journey
2023-06-0	2.331	316.1774	452	84FD	-37	0	DESC	1
2023-06-0	4.24	316.1765	452	84FD	-38	0	DESC	1
2023-06-0	5.785	316.1751	452	84FD	-38	0	DESC	1
2023-06-0	8.249	316.173	452	84FD	-38	0	DESC	1
2023-06-0	10.146	316.1702	452	84FD	-39	0	DESC	1
2023-06-0	12.013	316.1671	452	84FD	-41	0	DESC	1
2023-06-0	13.736	316.1636	452	84FD	-41	0	DESC	1
2023-06-0	15.74	316.1596	452	84FD	-42	0	DESC	1
2023-06-0	18.35	316.1549	452	84FD	-42	0	DESC	1

### 4.1.2.1 Algoritmo de viagens

Apresenta-se de seguida o pseudocódigo 2 do algoritmo que permite identificar as viagens.

---

**Algorithm 2:** Pseudocódigo para definição de viagens

---

**Data:** Dados de sentido, PK, timestamp e segmento para cada ponto da linha  
**Result:** Identificação da viagem (journey) de cada ponto  
Iniciar contador de viagens: `journey_counter = 0;`  
**for** *cada ponto da linha* **do**  
    **if** *primeiro ponto* **then**  
        Atribuir viagem atual (`journey_counter`);  
        **continue;**  
    **end**  
    **if** *sentido ou segmento indefinidos* **then**  
        **continue;**  
    **end**  
    Procurar último ponto anterior com sentido definida;  
    Calcular diferença de tempo (`time_diff`) entre ponto atual e ponto anterior;  
    **if** *sentido diferente do ponto anterior* **ou** *segmento diferente do ponto anterior* **ou**  
        *time\_diff > limite temporal* **then**  
            Incrementar `journey_counter` (nova viagem);  
    **end**  
    Atribuir `journey_counter` ao ponto atual;  
**end**  
**for** *cada viagem* **do**  
    Calcular PK máximo e mínimo;  
    **if** *PK máximo - PK mínimo < limite mínimo (journey\_length)* **then**  
        Remover viagem;  
        Remapear contadores das viagens restantes;  
    **end**  
**end**

---

### 4.1.3 Padronização dos dados

Para permitir a aplicação consistente de técnicas de reconhecimento de padrões e deteção de anomalias, foi necessário realizar um processo de padronização dos dados de entrada. Este procedimento teve como objetivo uniformizar as medições obtidas durante as viagens e reduzir oscilações naturais do sinal que poderiam comprometer a análise estatística.

**Normalização dos PK.** Os registos originais provenientes do sistema apresentavam valores de PK irregulares à ordem dos metros, o que impossibilita a comparação direta entre diferentes viagens para o mesmo valor de PK. Para garantir consistência, procedeu-se à discretização dos PK em intervalos fixos de 20 metros, considerando a dimensão das locomotivas. Assim, cada valor de PK foi arredondado para o múltiplo de 20 mais próximo, segundo a regra:

$$PK_{fixo} = \frac{round(\frac{PK \times 1000}{20}) \times 20}{1000} \quad (4.1)$$

Deste modo, este processo permite que todas as viagens, que efetuam o mesmo percurso, tenham exatamente os mesmos valores de PK disponíveis. A Tabela 4.5 representa a nova estrutura de dados, com os PK arredondados e novas observações sem medições.

**Tabela 4.5:** Estrutura de dados com Pk normalizado.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual	direction	journey
2023-06-0	83.63	314.26	452	84FD	-48	0	DESC	1
2023-06-0	83.67	314.26	452	84FD	-44	0	DESC	1
2023-06-0	84.081	314.24	452	84FD	-50	0	DESC	1
		314.22						
2023-06-0	84.488	314.2	452	84FD	-52	0	DESC	1
2023-06-0	85.036	314.18	452	84FD	-54	0	DESC	1
2023-06-0	85.04	314.18	452	84FD	-56	0	DESC	1
2023-06-0	85.522	314.16	452	84FD	-58	0	DESC	1
2023-06-0	85.959	314.14	452	84FD	-60	0	DESC	1
2023-06-0	86.487	314.12	452	84FD	-62	0	DESC	1
		314.1						
2023-06-0	86.279	314	452	84FD	-64	0	DESC	1
2023-06-0	85.604	314	452	84FD	-68	0	DESC	1

**Agregação dos valores.** Após a normalização, vários registos passaram a coincidir no mesmo PK fixo. Nesses casos, foi calculada a média dos valores associados a cada PK, de forma a obter um único valor representativo. Na Tabela 4.6 é possível visualizar-se como as medições foram agregadas.

**Tabela 4.6:** Estrutura de dados com agregação de dados.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual	direction	journey
2023-06-0	83.65	314.26	452	84FD	-46	0	DESC	1
2023-06-0	84.081	314.24	452	84FD	-50	0	DESC	1
		314.22						
2023-06-0	84.488	314.2	452	84FD	-52	0	DESC	1
2023-06-0	85.038	314.18	452	84FD	-55	0	DESC	1
2023-06-0	85.522	314.16	452	84FD	-58	0	DESC	1
2023-06-0	85.959	314.14	452	84FD	-60	0	DESC	1
2023-06-0	86.487	314.12	452	84FD	-62	0	DESC	1
		314.1						
2023-06-0	85.977	314	452	84FD	-66	0	DESC	1

**Interpolação de pontos em falta.** Nas novas observações geradas pelos processos anteriores, onde não existiam medições diretas, as medições foram estimadas através de interpolação linear [8] entre os pontos vizinhos mais próximos.

A interpolação linear é o método mais simples de interpolação, utilizado para estimar o valor de uma função entre dois pontos. A fórmula da interpolação linear para dois pontos  $(x_0, y_0)$  e  $(x_1, y_1)$  é dada por [8]:

$$y(x) = y_0 + \frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \cdot (y_1 - y_0) \quad (4.2)$$

Onde:

- $x_0$  e  $x_1$  são os pontos conhecidos,
- $y_0$  e  $y_1$  são os valores correspondentes de  $y$  nesses pontos,

- $x$  é o ponto onde se deseja estimar o valor de  $y$ .

A interpolação linear é adequada quando os dados entre os pontos são relativamente constantes e não há necessidade de modelar comportamentos complexos.

Este procedimento assegurou que todos os PK ao longo da linha apresentassem dados completos, exceto nas regiões onde não houvesse registos disponíveis, condição essencial para a construção de padrões contínuos. A Tabela 4.7 apresenta um exemplo do resultado da interpolação das medições.

**Tabela 4.7:** Estrutura de dados interpolados.

scan_date	speed	pk	railway_id	gsm_cell_id	gsm_rx_level_tch	gsm_rx_qual	direction	journey
2023-06-06T	83.65	314.26	452	84FD	-46	0	DESC	1
2023-06-06T	84.081	314.24	452	84FD	-50	0	DESC	1
2023-06-06T	84.2845	314.22	452	84FD	-51	0	DESC	1
2023-06-06T	84.488	314.2	452	84FD	-52	0	DESC	1
2023-06-06T	85.038	314.18	452	84FD	-55	0	DESC	1
2023-06-06T	85.522	314.16	452	84FD	-58	0	DESC	1
2023-06-06T	85.959	314.14	452	84FD	-60	0	DESC	1
2023-06-06T	86.487	314.12	452	84FD	-62	0	DESC	1
2023-06-06T	86.232	314.1	452	84FD	-64	0	DESC	1
2023-06-06T	85.977	314	452	84FD	-66	0	DESC	1

**Suavização do sinal.** Por fim, para reduzir pequenas oscilações irrelevantes no nível de sinal, que poderiam originar uma deteção de anomalias excessivamente sensível, aplicou-se uma técnica de *smoothing* baseada em médias móveis.

As médias móveis são ferramentas estatísticas que suavizam séries temporais, reduzindo o ruído e evidenciando tendências subjacentes. Calculam a média de um conjunto de valores dentro de uma janela deslizante de tamanho  $N$ . Essa técnica é especialmente útil no processamento de sinais para identificar padrões e tendências ocultas em dados ruidosos, removendo oscilações rápidas que dificultam a identificação de padrões. Definida como:

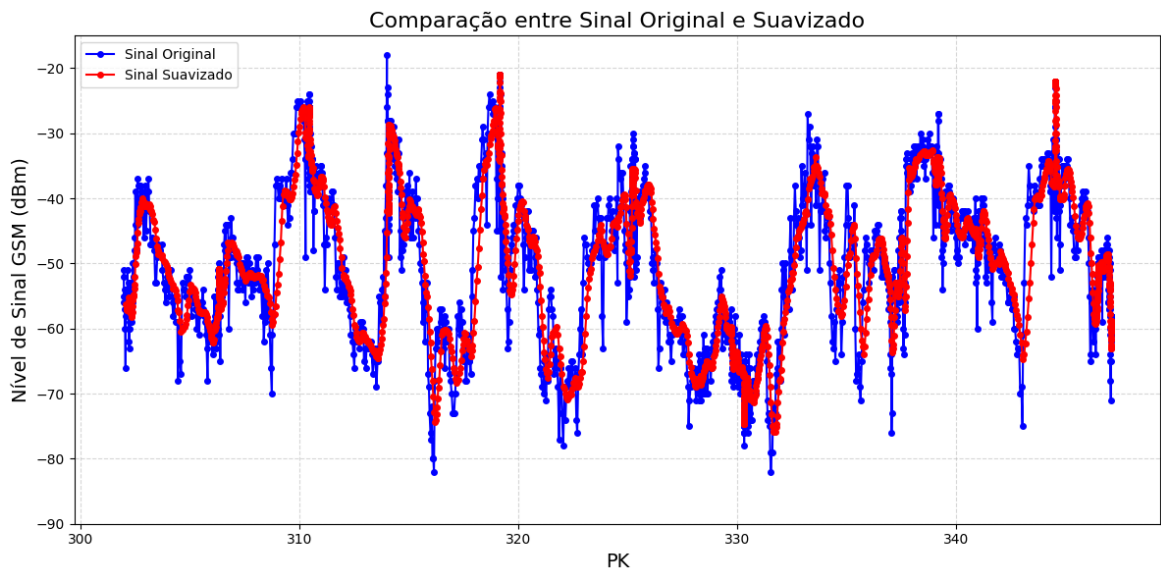
$$S_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t X_i \quad (4.3)$$

onde  $S_t$  representa o valor suavizado no instante  $t$ , e  $X_i$  são as observações dentro da janela.

Com este conjunto de transformações, os dados encontram-se normalizados, completos e suavizados, garantindo que as análises subsequentes de padrões e anomalias refletem de forma robusta o comportamento típico do sinal ao longo da linha. A Figura 4.3 demonstra o impacto que o processo de *smoothing* tem no sinal. É possível observar que, sobretudo nas extremidades, os picos pontuais do sinal são significativamente atenuados pela aplicação da média móvel, resultando numa curva suavizada que reflete apenas a tendência estrutural do comportamento do sinal, evitando que flutuações momentâneas interfiram na análise do padrão global.

## 4.2 Análise e identificação de anomalias

Com o tratamento de dados concluído, incluindo a determinação de um sentido e de uma viagem a cada observação e a padronização dos dados, estes encontram-se agora



**Figura 4.3:** Exemplo do impacto das médias móveis.

organizados de forma consistente e estruturada. Nesta subsecção, descrevem-se os métodos/algoritmos implementados para a identificação de anomalias, tendo como base os dados pré-processados de acordo com a secção anterior.

Uma célula é uma área de cobertura de uma estação base de rádio (BTS) que emite sinais GSM-R para comunicar com os comboios que circulam na linha. Cada célula garante a receção do sinal numa determinada região, permitindo que o comboio mantenha comunicação contínua com a rede ferroviária. Enquanto o comboio se desloca, a estação base comunica continuamente informações sobre a intensidade e a qualidade do sinal. À medida que o comboio avança e se afasta da área de cobertura de uma antena, ocorre um processo denominado *handover*, em que a ligação é transferida de uma antena para a seguinte, garantindo que a comunicação não é interrompida. Todos estes dados são registados pelo sistema a bordo do comboio, formando um histórico detalhado do comportamento do sinal ao longo de toda a viagem. Este processo garante que é possível monitorizar, em tempo real ou posteriormente, a cobertura da rede e identificar locais onde a receção pode ser fraca, instável ou sujeita a falhas, fornecendo a base para a análise de anomalias.

Para realizar esta análise, foram considerados os seguintes parâmetros:

- **Nível de sinal:** Representa a intensidade do sinal recebido pelo comboio, medida em dBm, permitindo avaliar se a receção é adequada ao longo do percurso e identificar áreas com cobertura fraca.
- **Qualidade do sinal:** Indicada numa escala qualitativa de 0 a 7, reflete a clareza e a fiabilidade do sinal recebido, sendo útil para detetar interferências ou degradação do sinal.
- **Handover:** Corresponde ao momento em que o comboio transita da cobertura de uma célula emissora de sinal para outra célula consecutiva, servindo como indicador da continuidade e estabilidade da comunicação.

#### 4.2.1 Nível de sinal

O primeiro parâmetro considerado na análise foi o nível de sinal, que corresponde à intensidade com que o sinal GSM-R é recebido pelo equipamento a bordo do comboio. Este valor é medido em decibéis-miliwatt (dBm) e apresenta-se geralmente como um número negativo,

sendo que valores mais próximos de zero indicam um sinal mais forte, enquanto valores mais afastados traduzem uma recepção mais fraca.

No contexto ferroviário, o nível de sinal assume particular importância por ser o indicador mais direto da cobertura da rede GSM-R ao longo da linha. A sua monitorização permite identificar zonas com sinal reduzido, nas quais as comunicações podem sofrer interrupções. Garantir níveis de sinal adequados é, portanto, essencial para assegurar uma comunicação contínua e fiável entre o maquinista e o centro de controlo, fator crítico para a segurança e a operação ferroviária. A análise não se limitou à verificação de valores de sinal abaixo dos limiares considerados críticos para a comunicação, mas incluiu também a deteção de desvios relevantes face ao comportamento esperado em cada zona da linha, os quais podem refletir modificações no planeamento da rede ou alterações estruturais no ambiente. Estes desvios podem ser pontuais, ocorrendo em viagens isoladas, ou podem ser progressivos, manifestando-se ao longo de diversas viagens.

O primeiro passo da análise consistiu na construção de uma viagem padrão (ou viagem modelo), que serve como referência para avaliar o comportamento do nível de sinal ao longo da linha. Esta viagem foi obtida através do agrupamento de viagens com as mesmas características (linha e sentido) e, para cada PK, do cálculo da mediana dos valores de sinal registados. A utilização da mediana permite reduzir o impacto de *outliers* e eventuais falhas pontuais de medição, representando o comportamento típico do sinal em condições normais.

A partir desta viagem padrão, foram definidas margens de tolerância para cada PK, utilizando o critério  $c \times MAD$  (Desvio Absoluto Mediano), onde  $c$  corresponde a um fator de ajuste, que ajusta os limites em função da variabilidade local.

O Desvio Absoluto Mediano é uma medida estatística que quantifica a dispersão dos dados em relação à mediana. É calculado como a mediana dos desvios absolutos em relação à mediana dos dados, fornecendo uma indicação robusta da variabilidade dos dados, e é definido como:

$$MAD = \text{mediana}(|X_i - \text{mediana}(X)|) \quad (4.4)$$

A aplicação conjunta da mediana e do MAD é eficaz na análise de dados, especialmente quando se lida com *outliers* ou distribuições não normais, pois ambas as medidas oferecem resistência a influências de valores extremos.

Assim, zonas com maior dispersão natural do sinal possuem margens mais largas, enquanto áreas estáveis permitem uma deteção mais sensível de desvios.

Para a identificação de anomalias, aplicaram-se dois critérios complementares: (i) valores que ultrapassam as margens de tolerância definidas para cada PK, considerados anomalias relativas em relação ao padrão; e (ii) valores inferiores a -95 dBm, considerados anomalias absolutas, uma vez que abaixo desse limite para efeitos de planeamento a comunicação GSM-R é praticamente inexistente.

Para a deteção de anomalias tendenciais, ou seja, alterações progressivas do sinal que se manifestam ao longo de várias viagens consecutivas, foi adotado o método de *Rolling Linear Regression* (RLR) [7]. Este método permite avaliar a evolução do sinal em cada PK, identificando tendências de melhoria ou degradação ao longo do tempo. Sempre que o módulo do declive obtido pela RLR ultrapassa um determinado limite  $d$ , o ponto é classificado como uma anomalia tendencial.

Uma etapa crítica nesta análise é a remoção prévia de *outliers*, uma vez que a presença de valores extremos pode distorcer significativamente a regressão linear, alterando o declive estimado e comprometendo a interpretação da tendência local. Ao eliminar estas observações isoladas antes da aplicação da RLR, é possível obter uma avaliação mais robusta e confiável das mudanças progressivas no nível de sinal ao longo das viagens.

Com esta abordagem, é possível realizar uma análise detalhada do nível de sinal,

identificando tanto falhas pontuais como tendências de degradação ao longo das viagens.

#### 4.2.2 Handover

O *handover* corresponde ao momento em que o comboio transita da cobertura de uma célula emissora de sinal para a célula vizinha. Este evento é um indicador crucial da continuidade e estabilidade da comunicação, uma vez que uma transição adequada garante que o maquinista e o centro de controlo permanecem sempre com ligação.

A análise do *handover* permite não apenas verificar se a cobertura é transmitida de forma contínua ao longo da linha, mas também identificar possíveis problemas de rede, como zonas com sobreposição excessiva de células, lacunas de cobertura ou falhas na sincronização entre estações base, que podem indicar a necessidade de uma nova configuração. O estudo detalhado destes eventos é, portanto, essencial para assegurar a fiabilidade do sistema GSM-R e antecipar situações que possam comprometer a operação ferroviária.

Na análise do *handover*, cada PK de cada viagem está associado à célula que o serve. Assim construiu-se uma viagem modelo, determinando para cada PK a célula mais frequente entre todas as viagens, obtendo-se a referência do comportamento esperado ao longo da linha. As zonas de *handover* foram identificadas como os pontos em que a célula da viagem modelo mudava de uma PK para a seguinte. Para permitir alguma tolerância, definiu-se uma margem de 200 metros antes e 200 metros depois de cada zona de transição, de modo a abranger pequenas variações normais. Sempre que uma viagem apresenta células diferentes da célula modelo fora desta margem de 400 metros, a zona é classificada como uma anomalia de *handover*.

#### 4.2.3 Qualidade de sinal

O parâmetro qualidade do sinal reflete a clareza e a fiabilidade da receção GSM-R a bordo do comboio, sendo geralmente indicado numa escala de 0 a 7. Valores mais baixos correspondem a uma comunicação mais estável e com menor interferência, enquanto valores mais altos indicam sinal degradado ou suscetível a falhas.

A análise da qualidade do sinal permite identificar regiões onde a comunicação pode estar comprometida, devido a interferências, obstáculos físicos ou sobreposição de células. Este parâmetro complementa a avaliação do nível de sinal e dos eventos de *handover*, fornecendo uma visão mais completa da eficiência e estabilidade da rede ao longo das viagens.

Para a análise da qualidade do sinal, foi adotada uma abordagem baseada na segmentação do percurso em zonas homogêneas, de forma a contextualizar a variação natural do parâmetro *RxQual* ao longo da linha. Reconheceu-se que a qualidade do sinal pode ser influenciada por fatores como topografia, densidade urbana ou distância às estações base, sendo, portanto, variável ao longo do trajeto. O percurso foi segmentado em intervalos de PK utilizando a regra de Freedman-Diaconis, de modo a agrupar zonas com comportamento semelhante.

A regra de Freedman-Diaconis é uma técnica estatística utilizada para determinar a largura ideal dos intervalos (*bins*) de um histograma, equilibrando viés e variância na representação gráfica da distribuição dos dados. Esta regra revela-se especialmente robusta face a *outliers* e distribuições assimétricas [9].

A largura  $h$  de cada bin é calculada da seguinte forma:

$$h = 2 \cdot \frac{IQR}{n^{1/3}} \quad (4.5)$$

onde:



resultados detalhados da análise dos três parâmetros monitorizados: nível de sinal, *handover* e qualidade do sinal.

Cada percurso foi analisado em ambos os sentidos, ascendentes e descendentes, resultando em quatro conjuntos de viagens representadas na tabela 4.8:

**Tabela 4.8:** Resumo dos grupos de viagens.

Linha	Sentido	Nº de viagens	PK mínimo	PK máximo	Período de recolha
451	Ascendente	49	300.0	347.0	24/03/2023 – 31/07/2024
451	Descendente	48	300.0	347.0	05/02/2023 – 27/07/2024
452	Ascendente	108	310.0	390.0	05/02/2023 – 31/07/2024
452	Descendente	105	310.0	390.0	05/02/2023 – 31/07/2024

Nem todas as viagens percorreram a linha completa; algumas são parciais ou apresentam dados incompletos devido a interrupções temporárias na recolha ou à indisponibilidade do sistema.

Como já foi referido anteriormente, o canal TCH é o canal através do qual ocorre a comunicação de voz ou dados entre o comboio e a rede ferroviária, sendo neste canal que se registam as medições de qualidade do sinal analisadas neste estudo. O canal BCCH é o canal de controlo da célula, utilizado para transmitir informações de sincronização e configuração da rede. Embora o BCCH forneça informações sobre a cobertura, os dados relativos à qualidade do sinal só podem ser obtidos a partir do TCH.

Portanto, o nível de sinal, qualidade de sinal e o *handover* referem-se a medições registadas nos canais TCH.

Os próximos subcapítulos serão dedicados ao estudo dos dois segmentos de linha em estudo, para cada um dos sentidos, repetindo-se o mesmo processo para cada um.

### 4.3.1 Percurso: Lagos-Tunes (451) Sentido: Ascendente

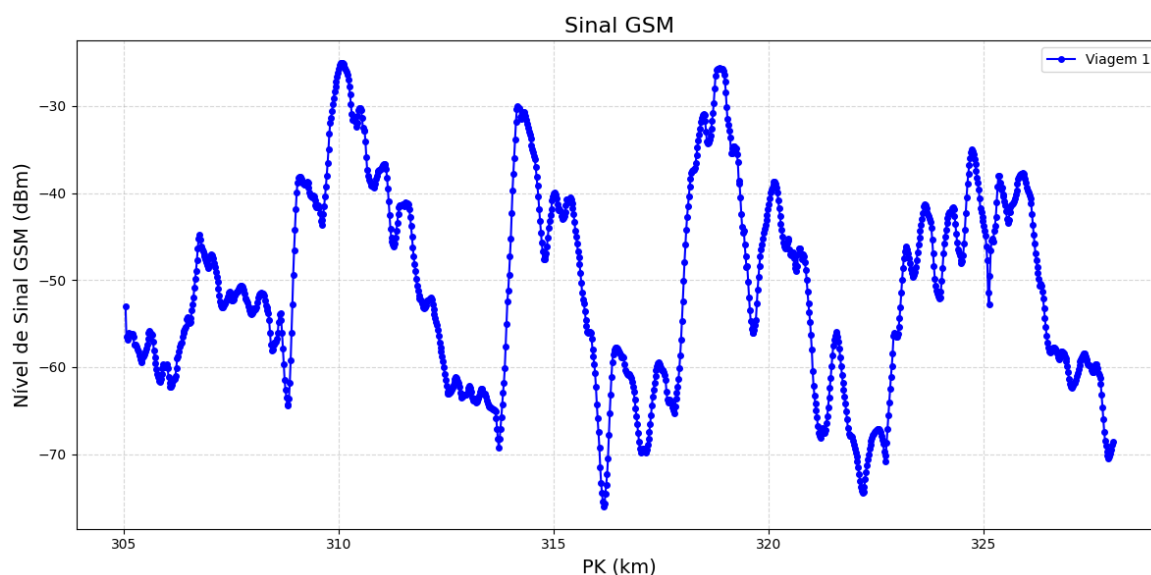
As próximas análises vão ser efetuadas no percurso Lagos-Tunes, sentido Tunes → Lagos (Ascendente).

#### 4.3.1.1 Nível de sinal

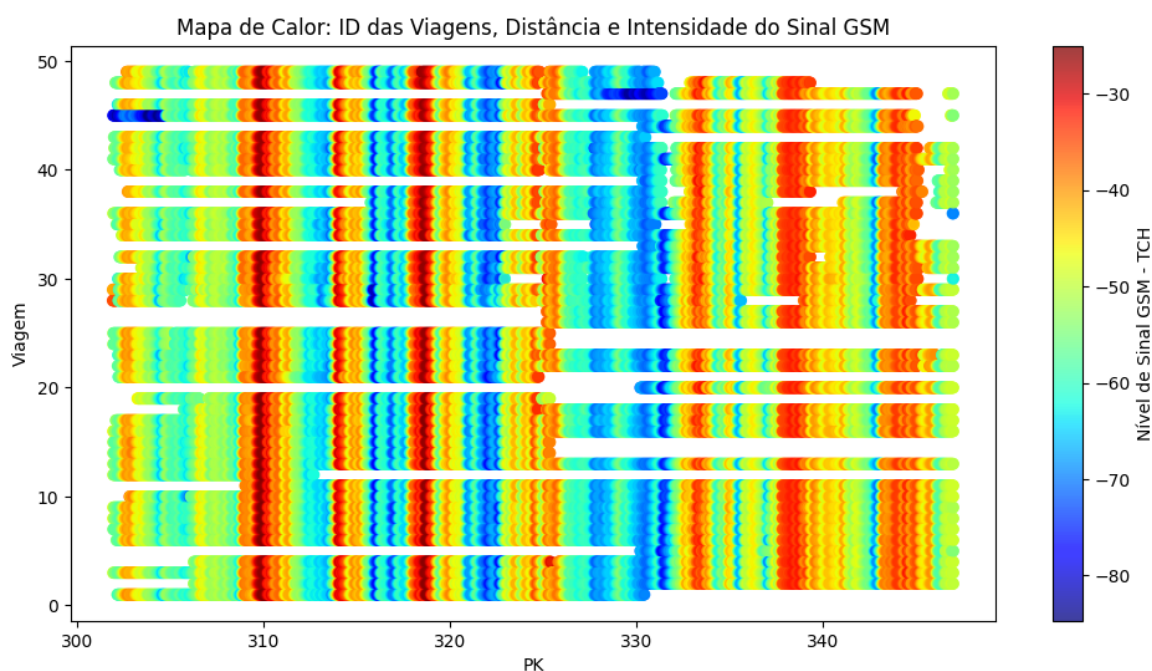
Para facilitar a interpretação dos gráficos que apresentam o comportamento do sinal ao longo do percurso, é útil, primeiro, observar o sinal de uma única viagem. A Figura 4.5 apresenta o nível de sinal GSM-TCH registado ao longo de uma viagem aleatória no sentido ascendente do segmento Lagos-Tunes. No eixo X apresenta-se o PK, representando a posição ao longo da linha, enquanto o eixo Y indica o nível de sinal em dBm. As linhas do gráfico evidenciam a evolução do sinal ao longo do percurso, permitindo identificar zonas de cobertura mais fraca ou mais instável e os picos que devem estar situados nas proximidades de uma célula.

Após analisar o sinal de uma viagem individual, a Figura 4.6 apresenta a visualização agregada de todas as viagens com o mesmo sentido e linha. Neste gráfico, o eixo X representa o PK ao longo da linha, enquanto o eixo Y indica as diferentes viagens. A intensidade da cor reflete o nível de sinal GSM-TCH, permitindo identificar rapidamente padrões recorrentes na vertical, zonas com cobertura fraca ou instável e eventuais anomalias pontuais entre as viagens. Zonas em branco refletem a ausência de dados.

A Figura 4.7 apresenta o mesmo mapa de cores de nível de sinal, mas agora com as anomalias identificadas sobrepostas. Nesta figura, sobressaem ocorrências de anomalias durante um período prolongado de tempo nas viagens 45 e 47, que evidenciam falhas graves. É possível ainda observar que algumas viagens, em particular as viagens 28 e 29,



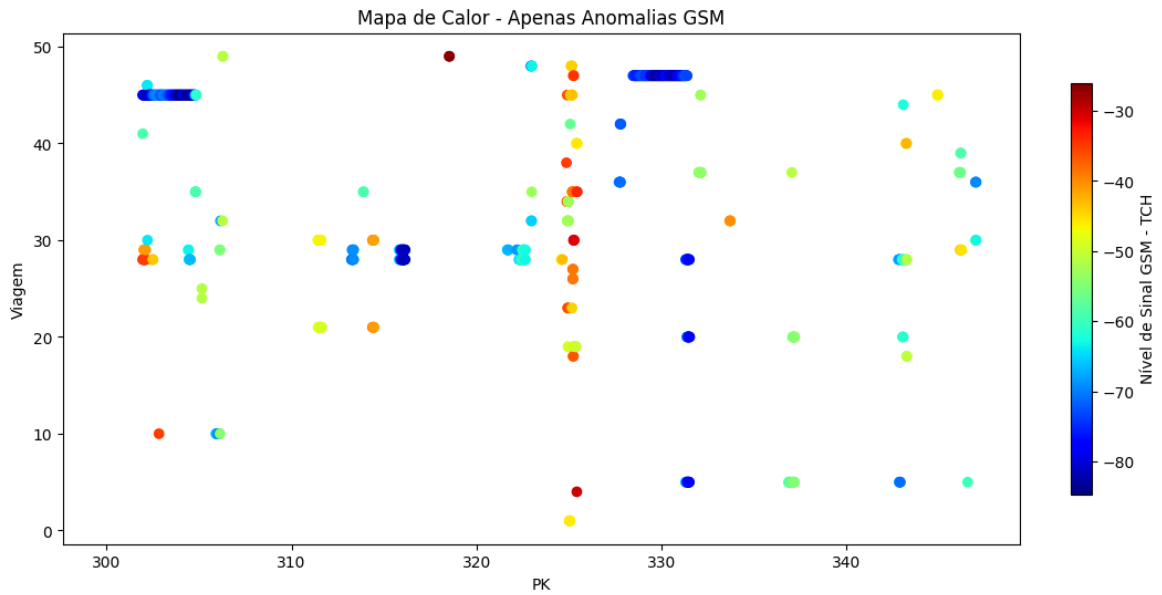
**Figura 4.5:** Nível de sinal GSM-TCH ao longo de uma viagem do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente.



**Figura 4.6:** Nível de sinal do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente.

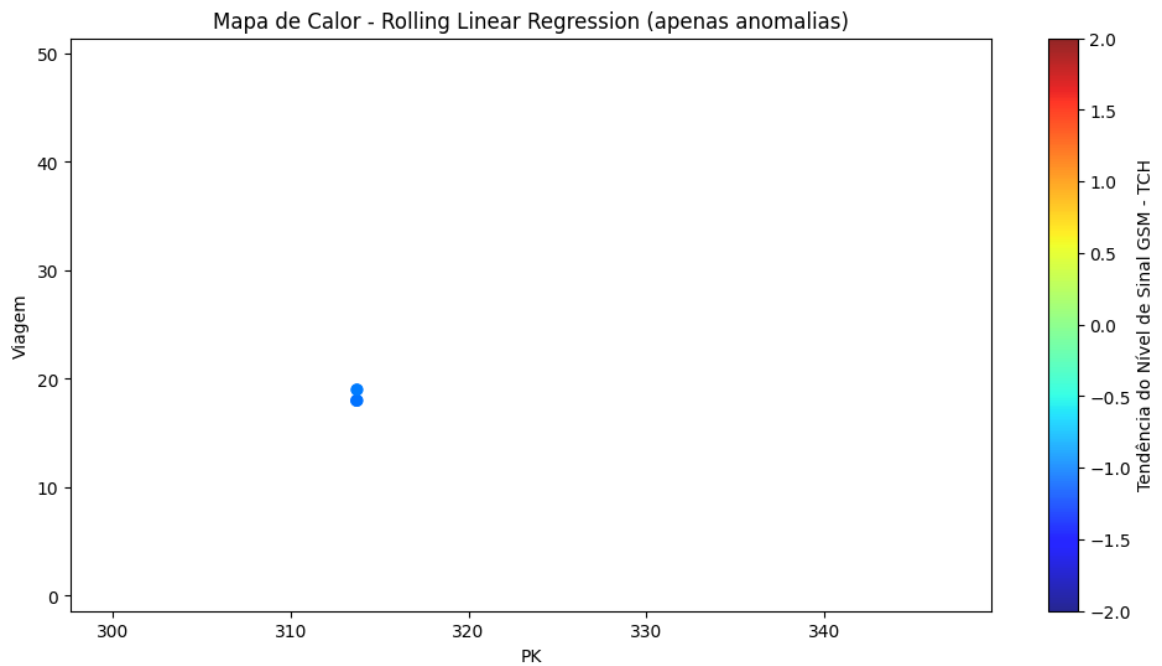
apresentam quedas no nível de sinal mais precoces em determinados momentos onde o sinal é habitualmente mais fraco, comparativamente com as restantes viagens, refletindo problemas pontuais ao longo do percurso. No PK 325, verifica-se a ocorrência recorrente de anomalias na maioria das viagens, sugerindo a possibilidade de uma questão estrutural ou de cobertura nessa zona. Fora desses pontos, as anomalias são ocasionais e pontuais, indicando que, de forma geral, os dados apresentam padrões regulares e consistentes, com boa estabilidade do sinal ao longo do percurso.

Para a análise de anomalias tendenciais foi utilizado um novo mapa de calor na Figura 4.8, baseado na Rolling Linear Regression (RLR), que permite avaliar variações progressivas do sinal ao longo das viagens. Esta figura representa a verde as regiões em que não



**Figura 4.7:** Anomalias no nível de sinal do segmento do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente.

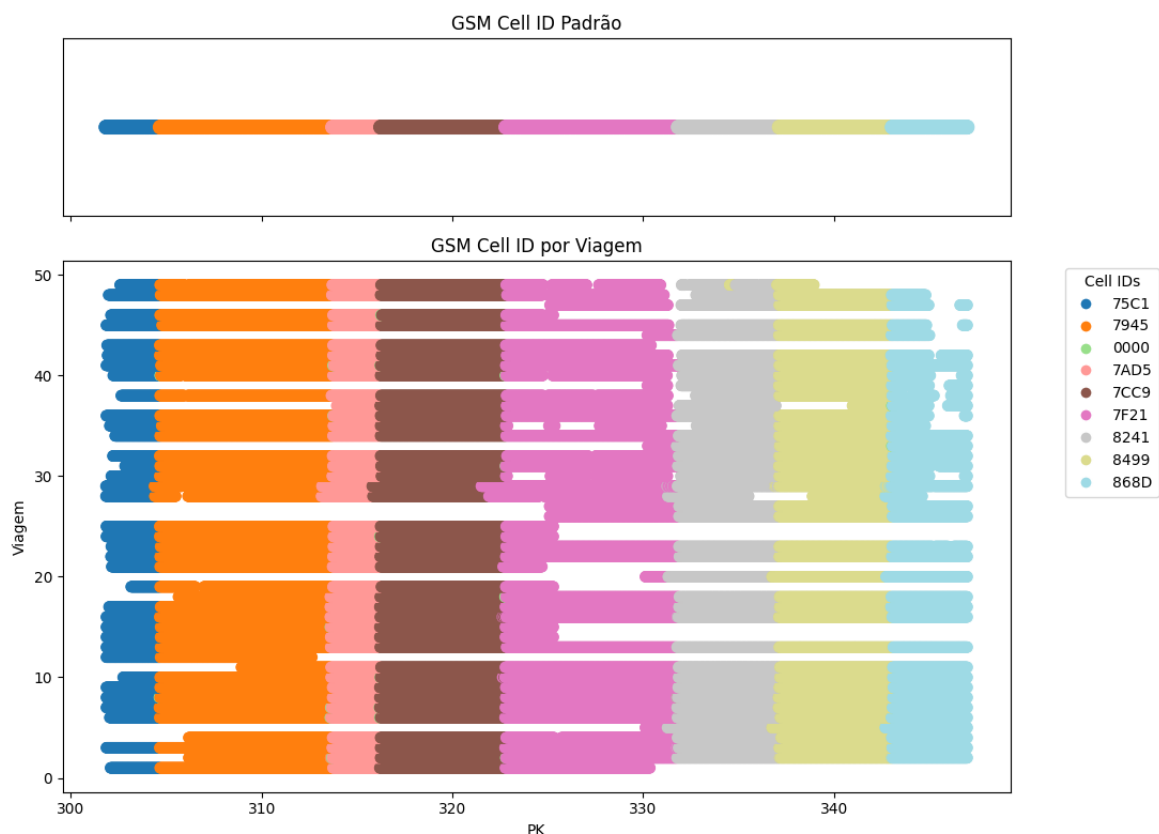
se observa qualquer tendência relevante no sinal; a azul, as zonas em que é possível identificar uma degradação progressiva ao longo das viagens; e, a vermelho, as áreas que evidenciam um aumento gradual do nível de sinal. Neste contexto, observou-se na zona do PK 314 uma degradação de curta duração em três viagens consecutivas. No entanto, dada a sua expressão reduzida, este comportamento pode corresponder apenas a flutuações momentâneas do sinal. De forma geral, a métrica não evidenciou tendências relevantes de degradação, confirmando a estabilidade do nível de sinal ao longo deste percurso.



**Figura 4.8:** Detecção de tendências no nível de sinal do segmento Lagos-Tunes – sentido ascendente.

### 4.3.1.2 Handover

A análise do processo de handover foi iniciada com a construção de um mapa de cor, representado na Figura 4.9, em que cada cor representa o identificador de uma célula (*Cell ID*) ao longo das viagens. Este gráfico permite observar, de forma imediata, a distribuição das células na linha e identificar as regiões em que ocorrem transições entre coberturas.



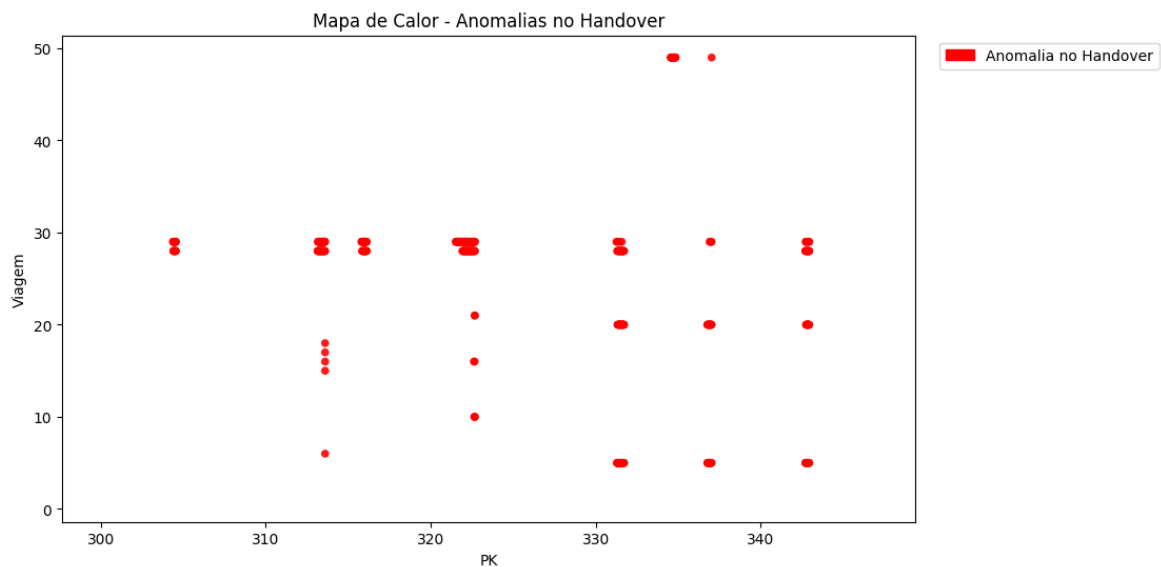
**Figura 4.9:** Células servidoras do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.

Por fim, na Figura 4.10 são assinalados os locais em que se registaram anomalias no processo de handover. Observa-se que, mais uma vez, os problemas parecem acontecer sobretudo nas viagens 28 e 29. Estas situações correspondem a transições fora das zonas esperadas, o que pode indicar falhas de planeamento, problemas de cobertura ou variações inesperadas na propagação do sinal.

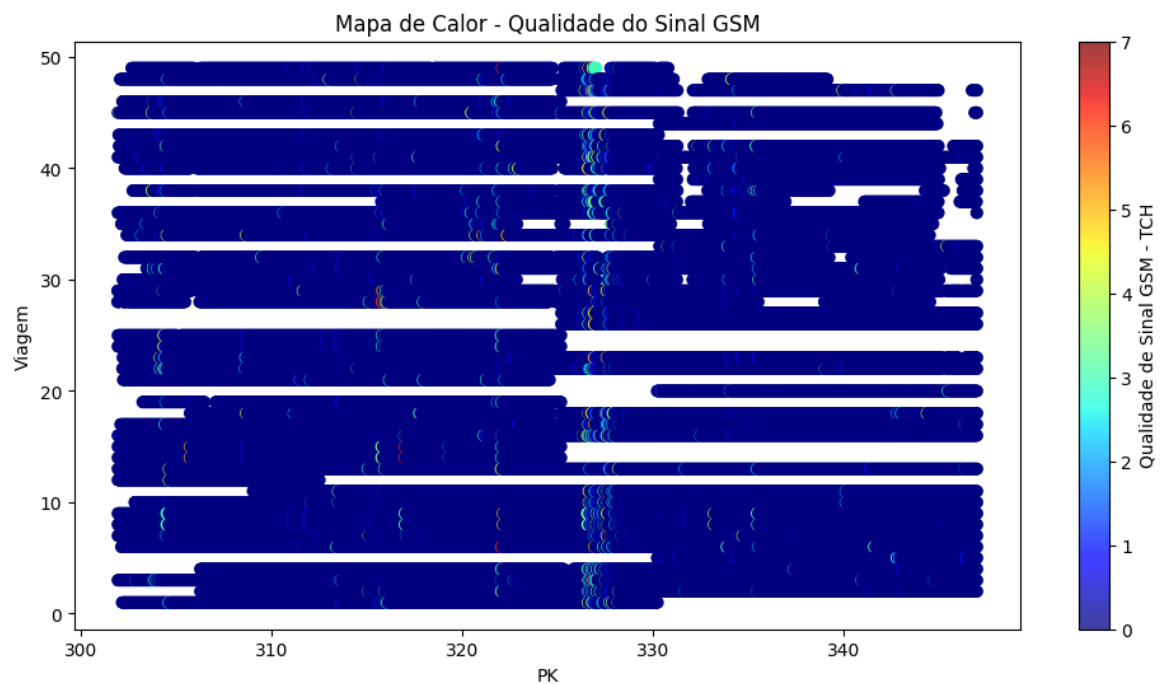
### 4.3.1.3 Qualidade de sinal

A Figura 4.11 apresenta o mapa de calor da qualidade de sinal (*RxQual*) ao longo das viagens. É possível identificar zonas específicas em que os valores de qualidade se encontram mais elevados, sugerindo maior suscetibilidade a problemas de comunicação. No PK 322 o gráfico apresenta um maior número de ocorrências com uma qualidade de sinal mais elevada. Também depois do PK 326 verifica-se uma presença mais consistente de valores elevados.

De modo a analisar de forma mais detalhada estas variações, procedeu-se à segmentação do percurso em intervalos homogêneos. A Figura 4.12 ilustra a distribuição percentual detalhada e individual dos diferentes valores de *RxQual* em cada segmento, permitindo identificar os intervalos em que valores mais elevados de degradação surgem de forma recorrente.



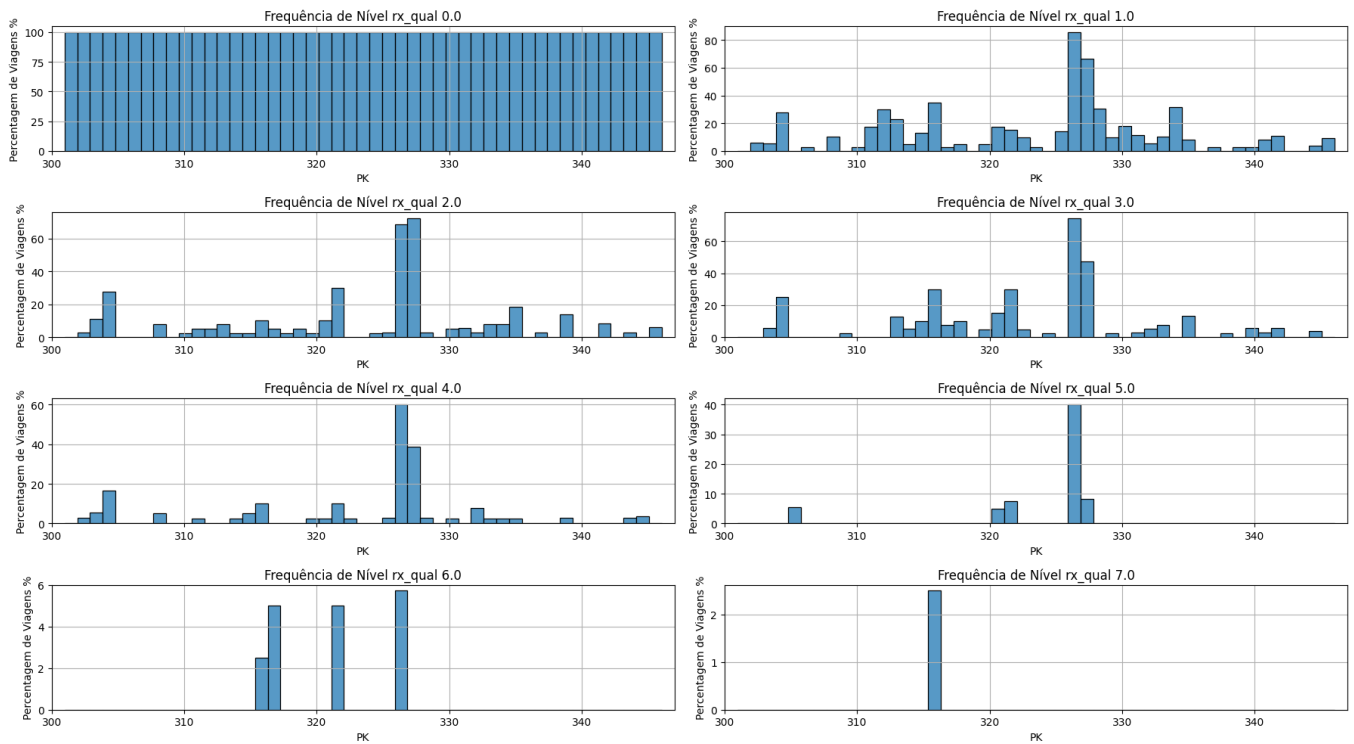
**Figura 4.10:** Anomalias no *handovers* do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.



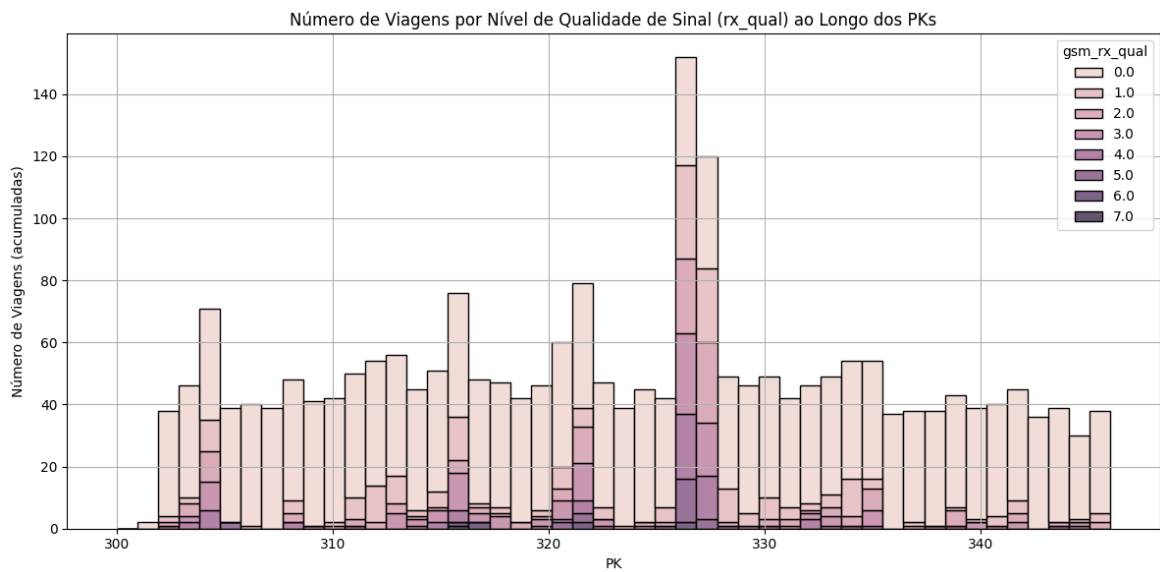
**Figura 4.11:** Qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.

Na sequência, a Figura 4.13 apresenta o histograma global, resultante da agregação dos histogramas individuais anteriormente descritos, proporcionando uma visão conjunta do seu comportamento. Deste modo, verifica-se que os histogramas confirmam a presença de valores mais elevados nos intervalos referidos anteriormente.

Por fim, a Figura 4.14 apresenta o mapa de calor final, onde estão assinaladas as anomalias de qualidade de sinal. Estas correspondem a situações em que os valores ultrapassam os limites aceitáveis definidos para cada zona, evidenciando pontos críticos da linha que merecem especial atenção. Neste percurso, não ocorreram anomalias na qualidade do sinal com elevada frequência, contudo, verifica-se que, quando ocorreram, foram mais frequentes nas regiões dos PK 315, 322 e 328.



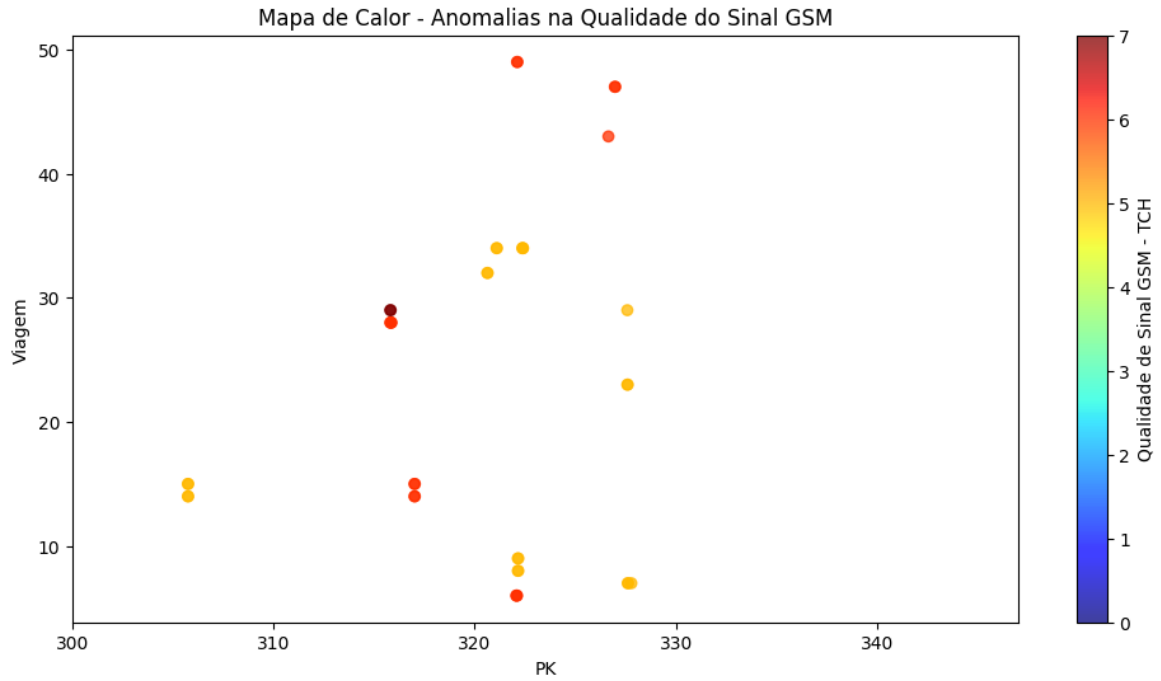
**Figura 4.12:** Histogramas da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.



**Figura 4.13:** Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.

### 4.3.2 Percurso: Lagos-Tunes (451) Sentido: Descendente

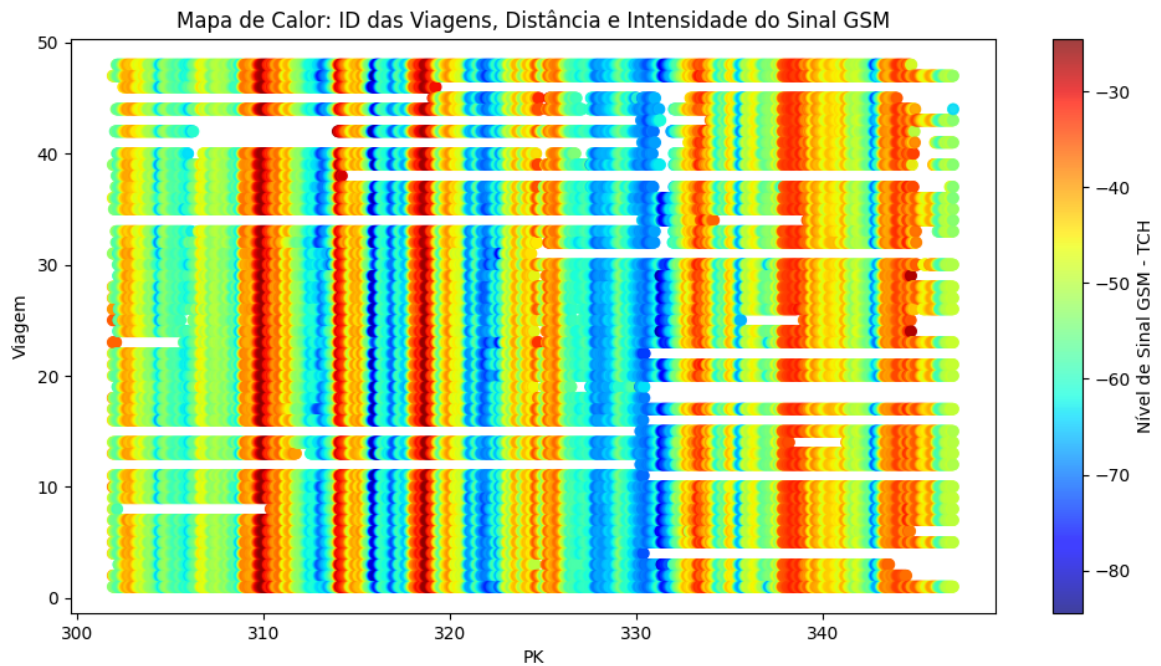
As próximas análises vão ser efetuadas no percurso Lagos-Tunes, sentido Lagos → Tunes (Descendente).



**Figura 4.14:** Anomalias na qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido ascendente.

#### 4.3.2.1 Nível de sinal

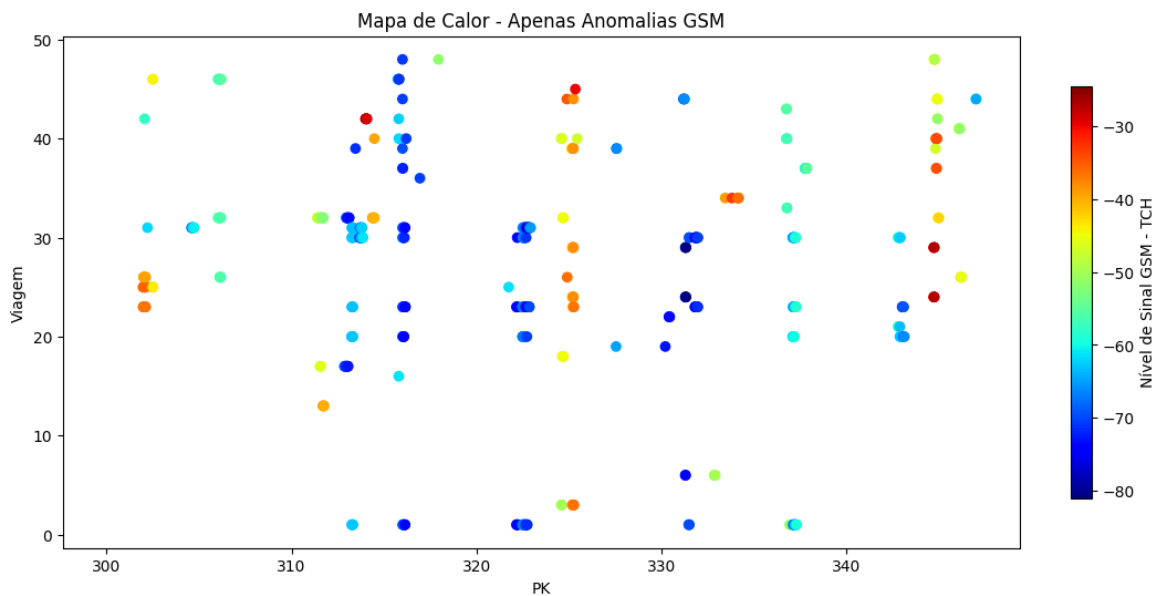
A análise do nível de sinal, apresentada na Figura 4.15, evidencia um comportamento globalmente consistente ao longo das viagens, com padrões bem definidos e apenas alguns valores pontuais fora da tendência geral.



**Figura 4.15:** Nível de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

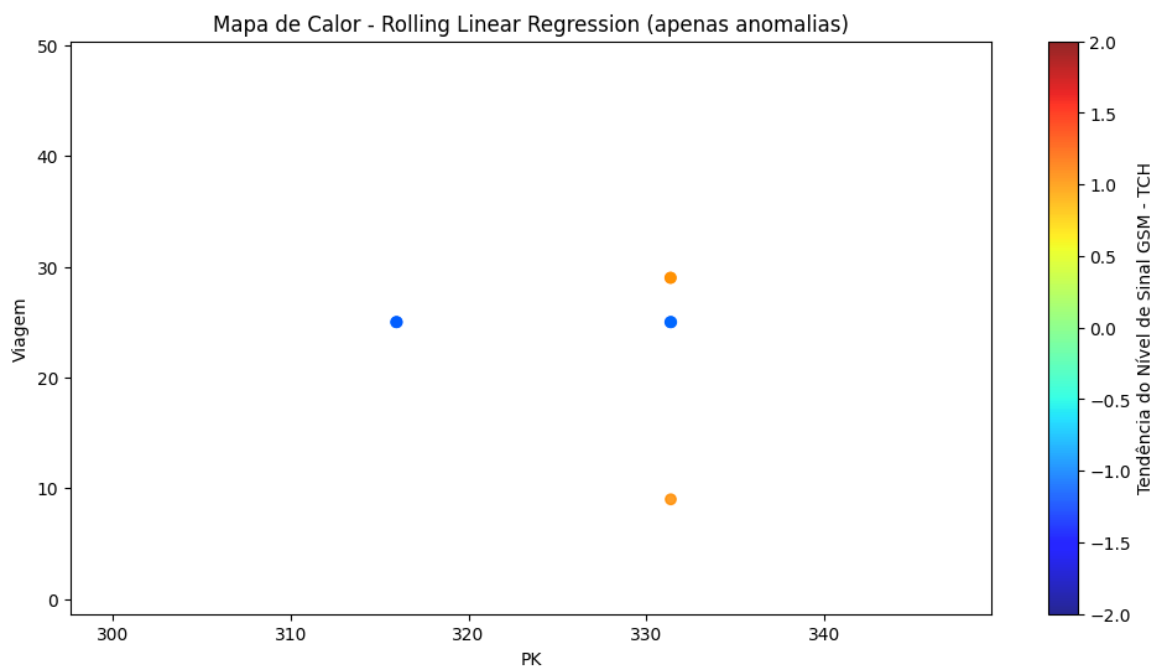
Ao observar a Figura 4.16, que destaca as anomalias detetadas, nota-se uma maior recorrência de problemas próximo do PK 316. Além disso, as viagens 30 e 31 apresentam

um número superior de anomalias nos momentos em que o sinal atinge valores mais baixos.



**Figura 4.16:** Anomalias no nível de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

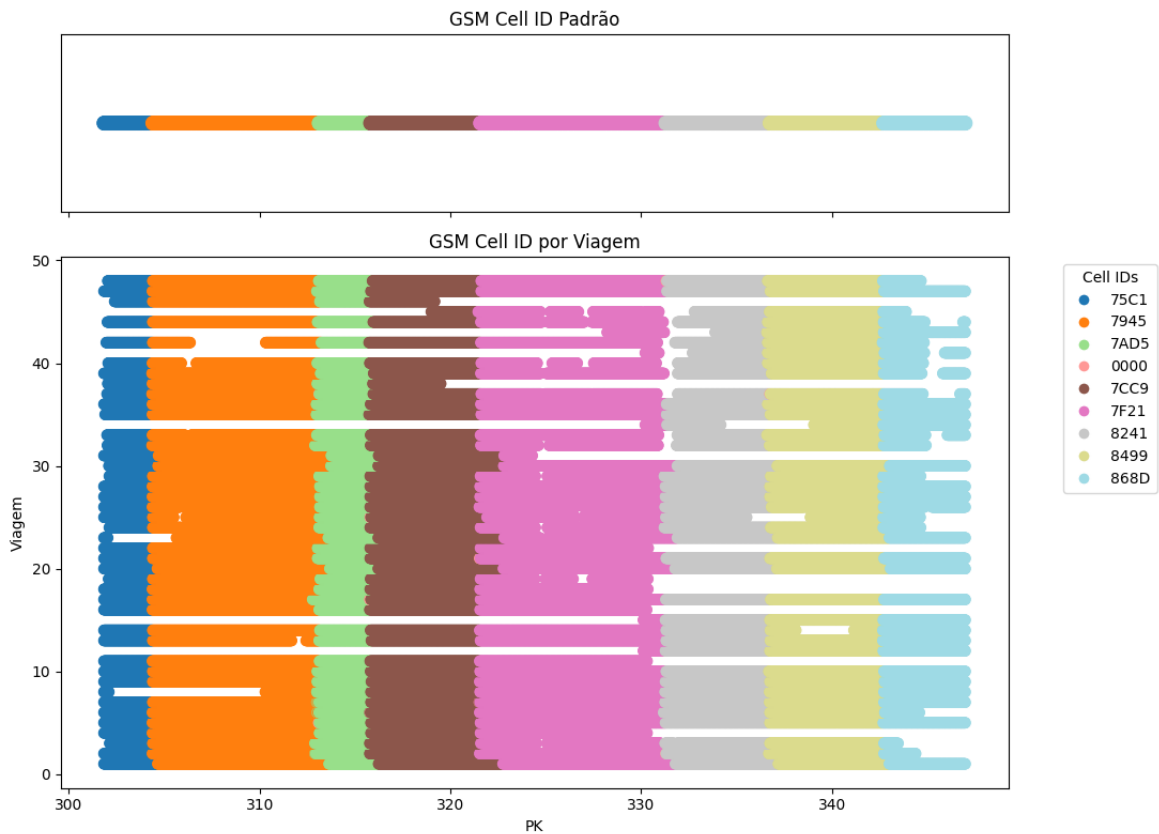
Contudo, de forma geral, a análise confirma a estabilidade do sinal neste percurso, com exceção das proximidades do PK 316. Em relação a problemas tendenciais do sinal, a Figura 4.17 demonstra que não há nada de relevante a retirar.



**Figura 4.17:** Detecção de tendências no nível de sinal no segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

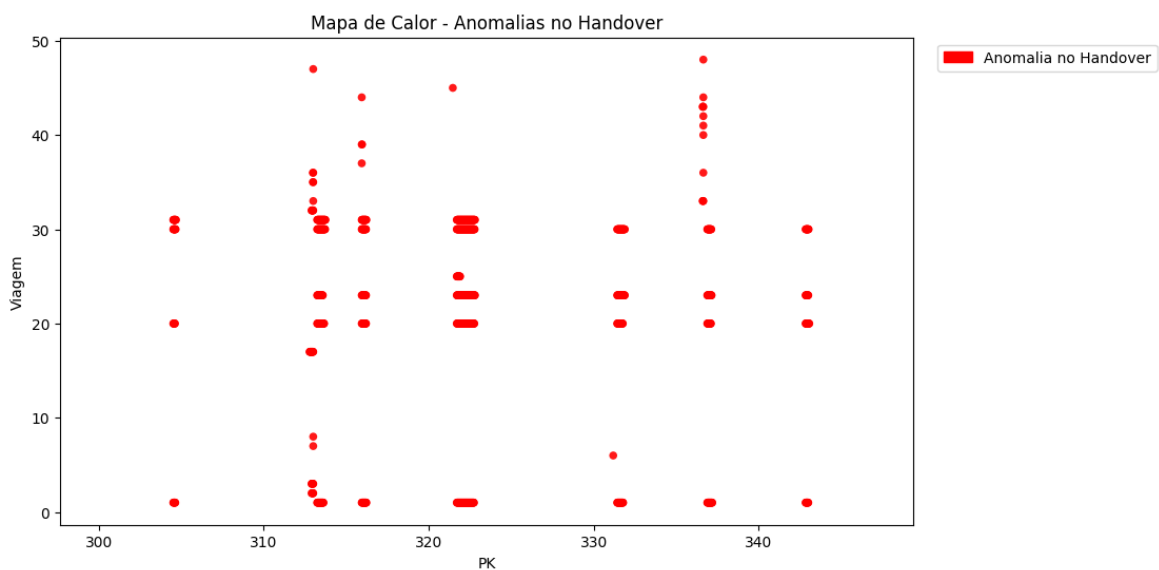
#### 4.3.2.2 Handover

A Figura 4.18 apresenta a distribuição das células servidoras ao longo do percurso, onde cada cor corresponde a uma célula distinta.



**Figura 4.18:** Células servidoras do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

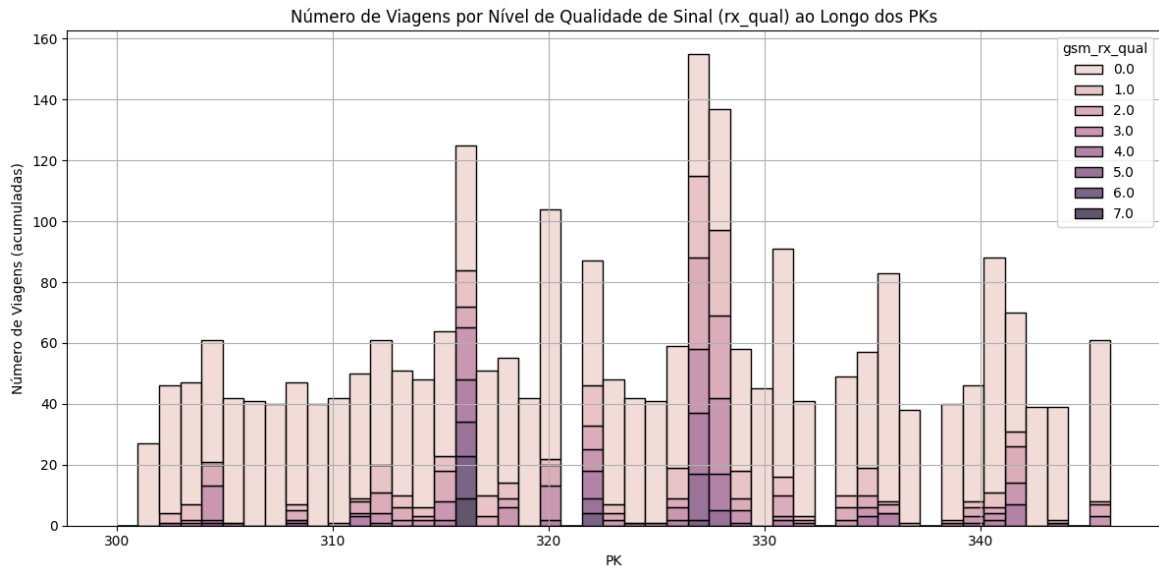
Na Figura 4.19, que destaca as anomalias identificadas, observa-se a ocorrência de problemas mais evidentes nas regiões do PK 314 e PK 336 e, em menor grau, próximo do PK 322. Estes pontos sugerem uma execução de *handover* menos estável nessas localizações específicas.



**Figura 4.19:** Anomalias no *handover* do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

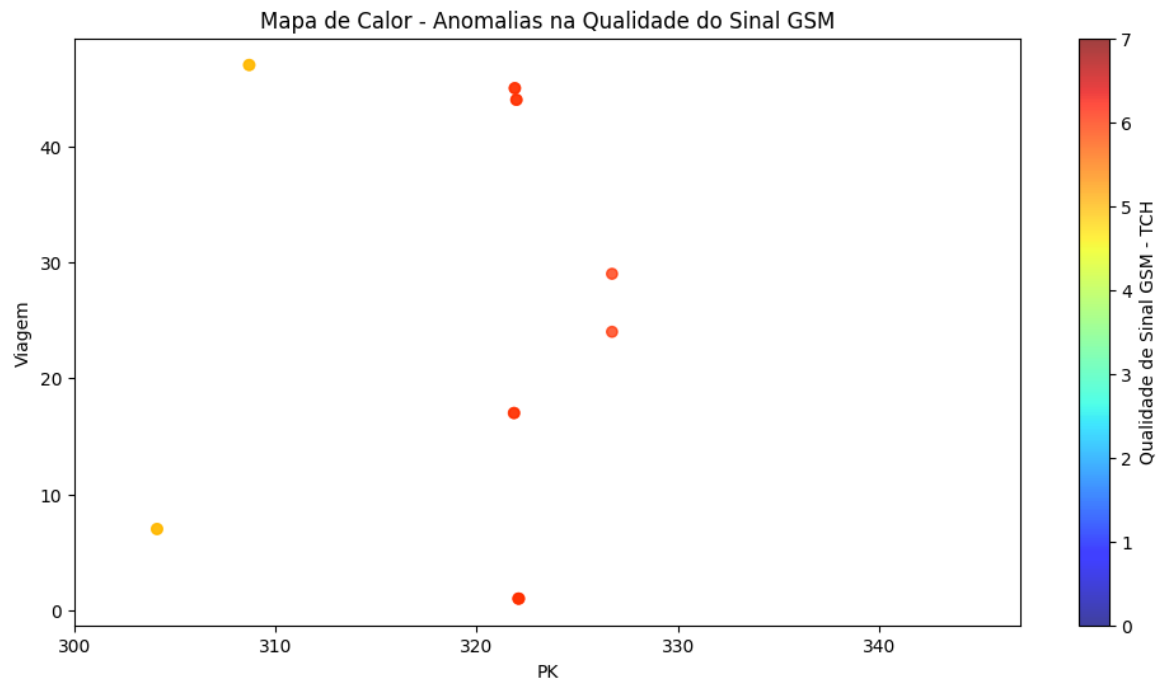
### 4.3.2.3 Qualidade de sinal

Através da Figura 4.20, que apresenta a distribuição percentual dos diferentes valores de qualidade de sinal (*RxQual*) segmentada ao longo do percurso, é possível identificar três zonas em que os valores de qualidade se encontram mais elevados e, portanto, mais propensas à degradação do sinal: imediatamente após o PK 316, próximo do PK 322 e novamente após o PK 326.



**Figura 4.20:** Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

Já na Figura 4.16, o mapa de calor com as anomalias de qualidade de sinal mostra que a maior recorrência de anomalias ocorre na região do PK 322, enquanto nas restantes zonas as ocorrências são esporádicas e pouco significativas, confirmando que a qualidade do sinal se mantém adequada na maior parte do percurso.



**Figura 4.21:** Anomalias na qualidade de sinal do segmento Lagos-Tunes sentido descendente.

### 4.3.3 Percurso: Tunes-Vila Real (452) Sentido: Ascendente

As próximas análises vão ser efetuadas no percurso Tunes-Vila Real, sentido Tunes → Vila Real (Ascendente).

#### 4.3.3.1 Nível de sinal

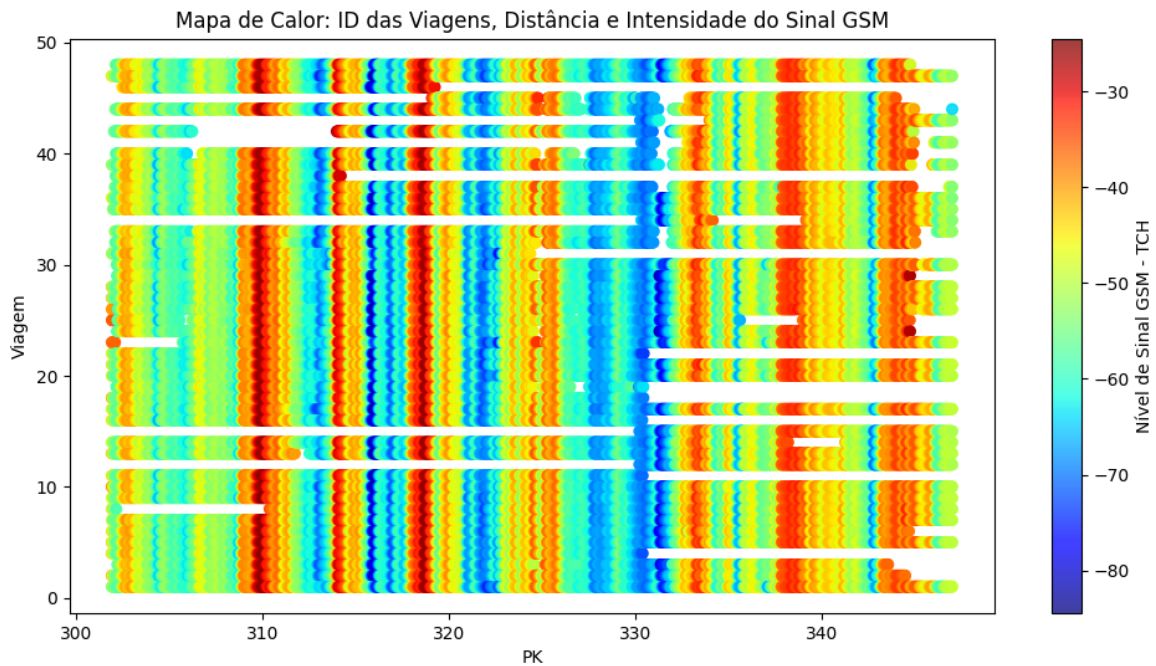
A análise conjunta das Figuras 4.22 e 4.23 evidencia que esta linha apresenta alguns problemas de nível de sinal, tanto estruturais como pontuais, em viagens isoladas.

É possível identificar locais com recorrência de anomalias, como os PK 323, 340, 350 e 371, que apresentam desvios frequentes em relação ao padrão esperado. Adicionalmente, a viagem 16 mostra uma degradação muito nítida do sinal entre os PK 350 e 360, provavelmente correspondendo a uma situação em que a locomotiva não se ligou corretamente à célula servidora, gerando uma falha localizada na comunicação. Em relação a anomalias tendenciais, não se reportam casos relevantes.

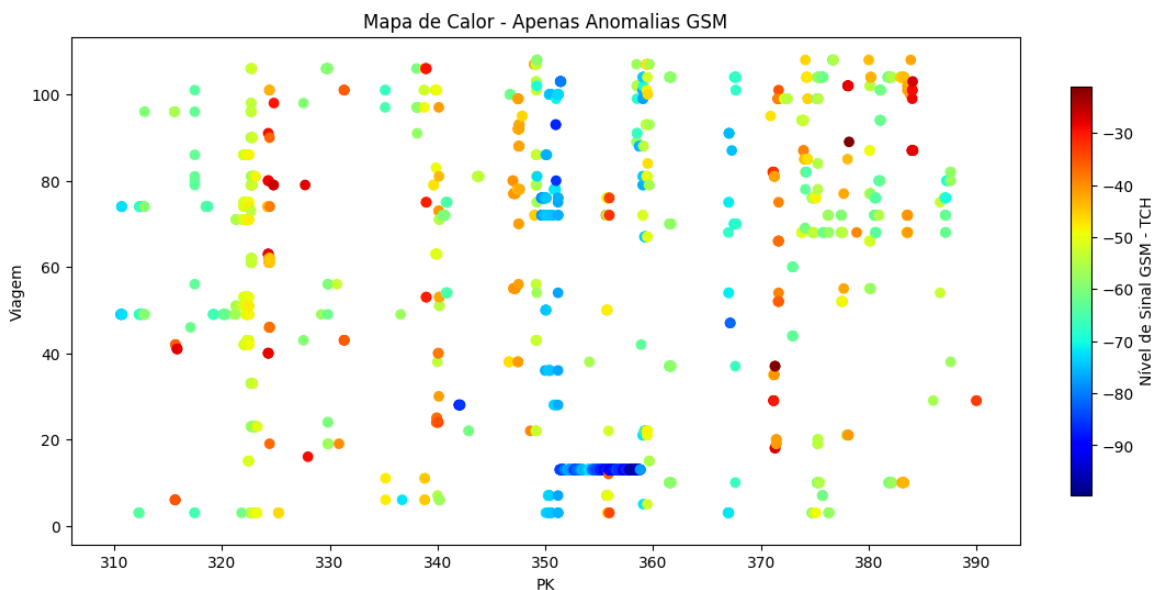
#### 4.3.3.2 Handover

A análise das Figuras 4.24 e 4.25 revela a ocorrência de problemas de *handover* em locais específicos, nomeadamente nos PK 322, 350 e 388. Contudo, é possível também observar que apenas no Pk 350 o sinal é baixo, o que significa, que nos outros casos não se geram problemas na comunicação, apenas um desvio do padrão.

Na viagem 16, observa-se de forma particularmente clara que, durante o intervalo entre os PK 350 e 360, a locomotiva permaneceu ligada a uma célula incorreta. Este comportamento confirma a suspeita levantada pela análise do nível de sinal, evidenciando uma falha localizada de handover que afetou a continuidade da comunicação nesse segmento.



**Figura 4.22:** Nível de Sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.

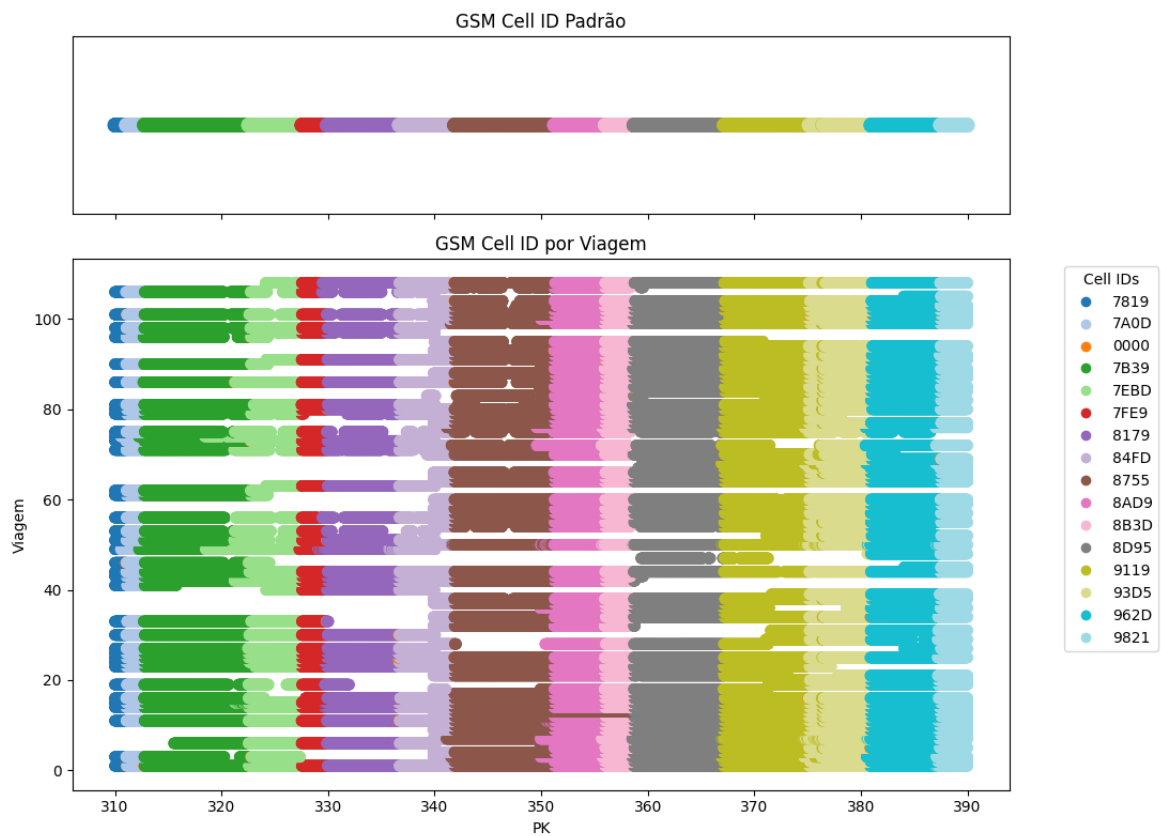


**Figura 4.23:** Anomalias no nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.

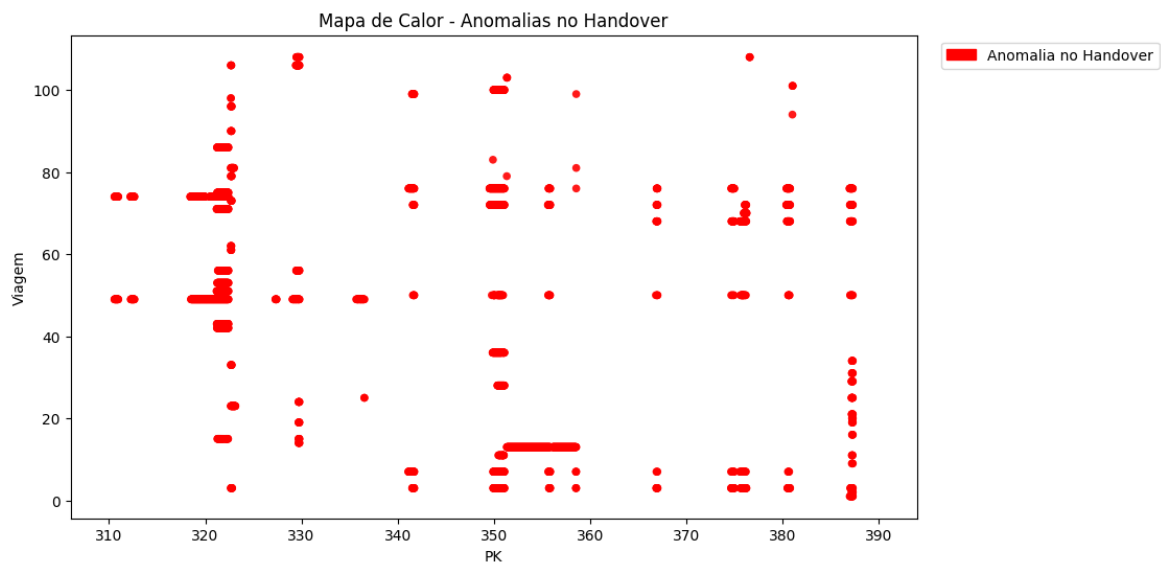
### 4.3.3.3 Qualidade de sinal

O histograma apresentado na Figura 4.26 evidencia que, nas proximidades dos PK 340 e 350, os valores de *RxQual* apresentam maior variabilidade, refletindo uma maior instabilidade da qualidade do sinal nessas zonas.

A análise do mapa de calor com anomalias (Figura 4.27) mostra que os PK 322, 341, 350 e 368 são os mais problemáticos, apresentando ocorrências recorrentes de degradação do sinal. A viagem 16 destaca-se novamente no segmento entre os PK 350 e 360, confirmando a persistência de uma situação localizada de comunicação comprometida.



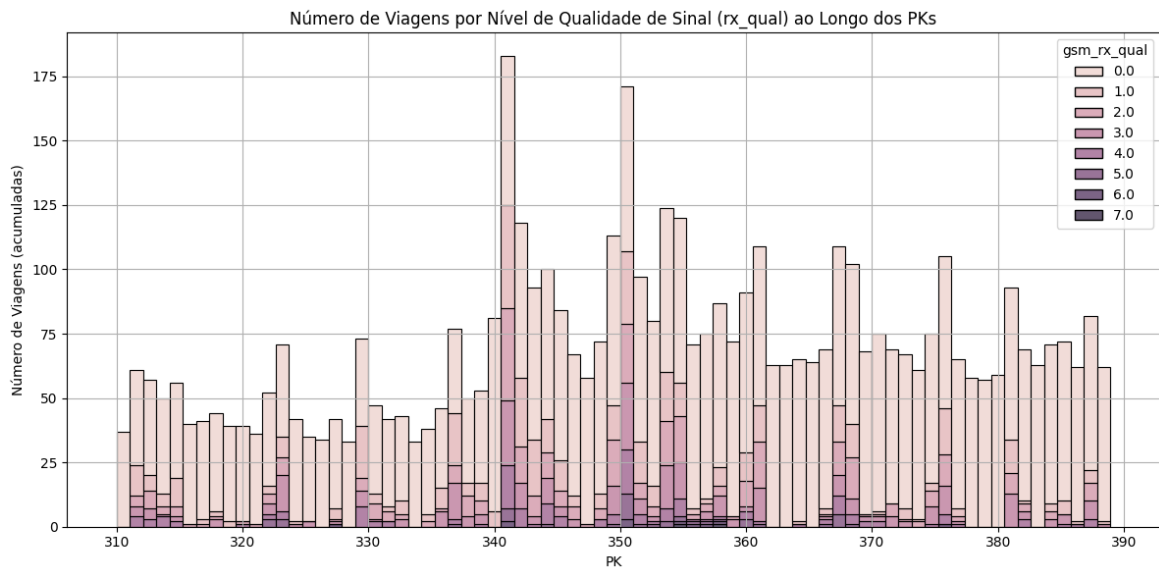
**Figura 4.24:** Células servidoras do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.



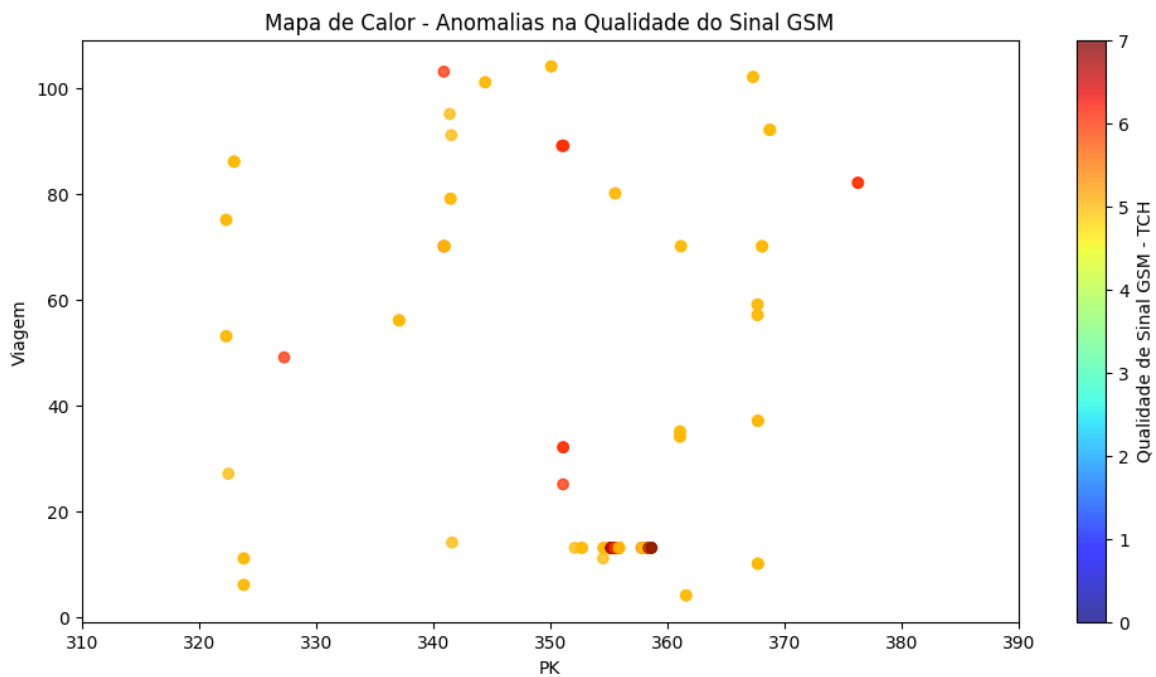
**Figura 4.25:** Anomalias no *handover* do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.

#### 4.3.4 Percurso: Tunes-Vila Real (452) Sentido: Descendente

As próximas análises vão ser efetuadas no percurso Tunes-Vila Real, sentido Vila Real → Tunes (Descendente).



**Figura 4.26:** Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.

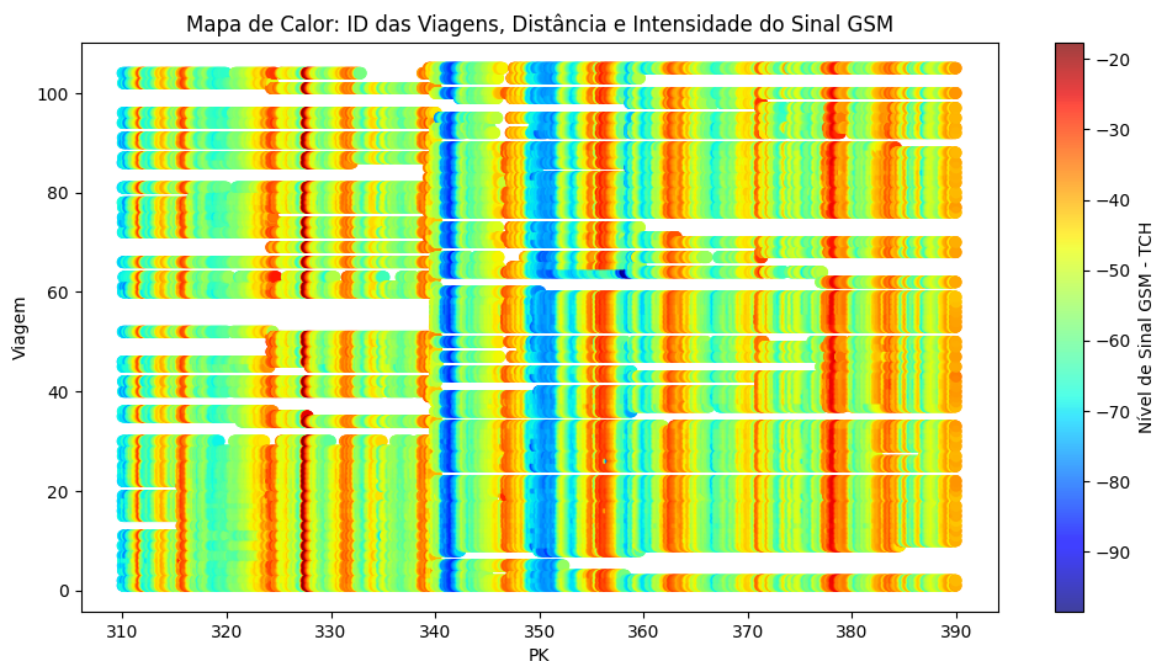


**Figura 4.27:** Anomalias na qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido ascendente.

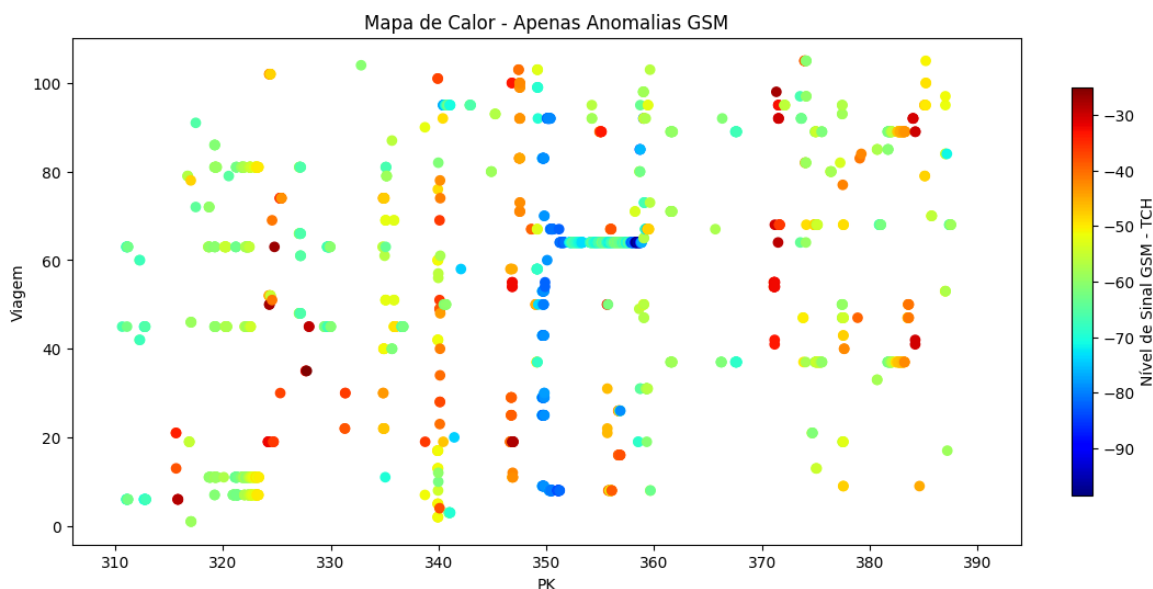
#### 4.3.4.1 Nível de sinal

A análise das Figuras 4.28 e 4.29 evidencia irregularidades recorrentes ao longo do percurso, com maior incidência nos PK 340, 350 e 360.

Algumas viagens apresentam problemas mais frequentes, destacando-se a viagem 64, em que se observa novamente uma falha na conexão à célula correta, semelhante à identificada no grupo de viagens anterior. De forma geral, estas anomalias indicam pontos críticos do percurso que podem comprometer temporariamente a qualidade da comunicação.



**Figura 4.28:** Nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.

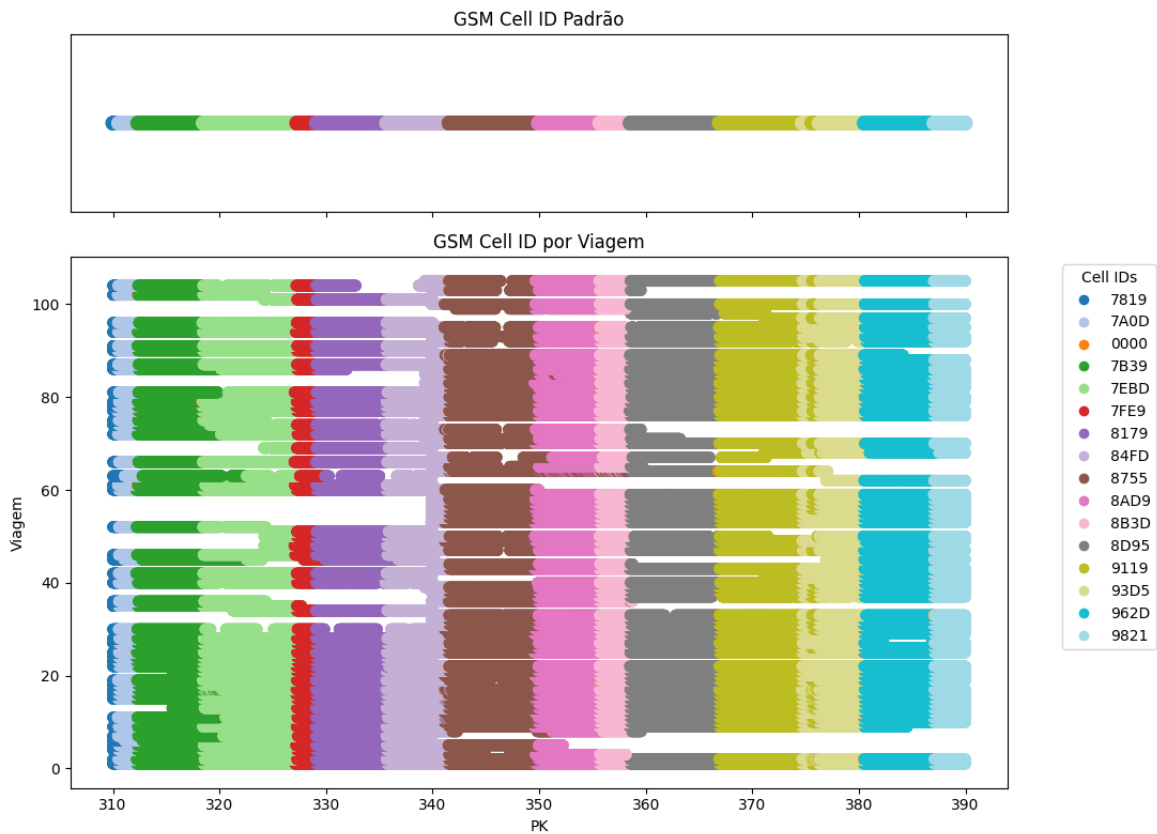


**Figura 4.29:** Anomalias no nível de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.

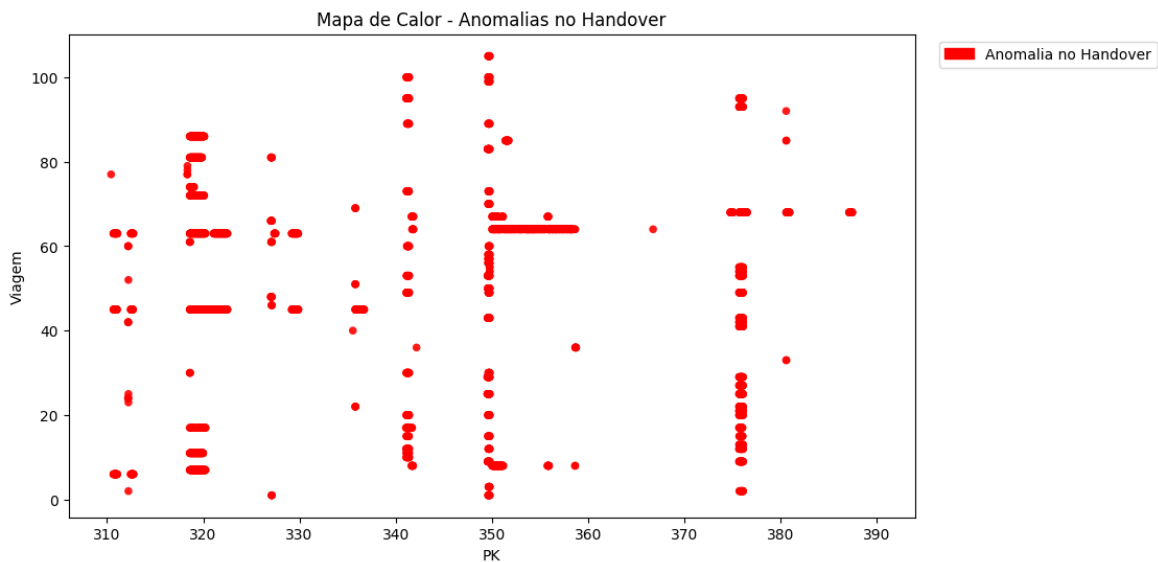
#### 4.3.4.2 Handover

A análise das Figuras 4.30 e 4.31 revela problemas recorrentes nos *handovers* nos PK 320, 340, 350 e 376. Contudo, mais uma vez, é possível também observar que apenas no PK 350 o sinal é baixo, o que significa, que nos outros casos não se geram problemas na comunicação, apenas um desvio do padrão.

Na viagem 64, observa-se claramente que a locomotiva permaneceu ligada à célula incorreta, confirmando a suspeita levantada pela análise do nível de sinal e evidenciando uma falha localizada de handover nesta secção.



**Figura 4.30:** Células servidoras do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.



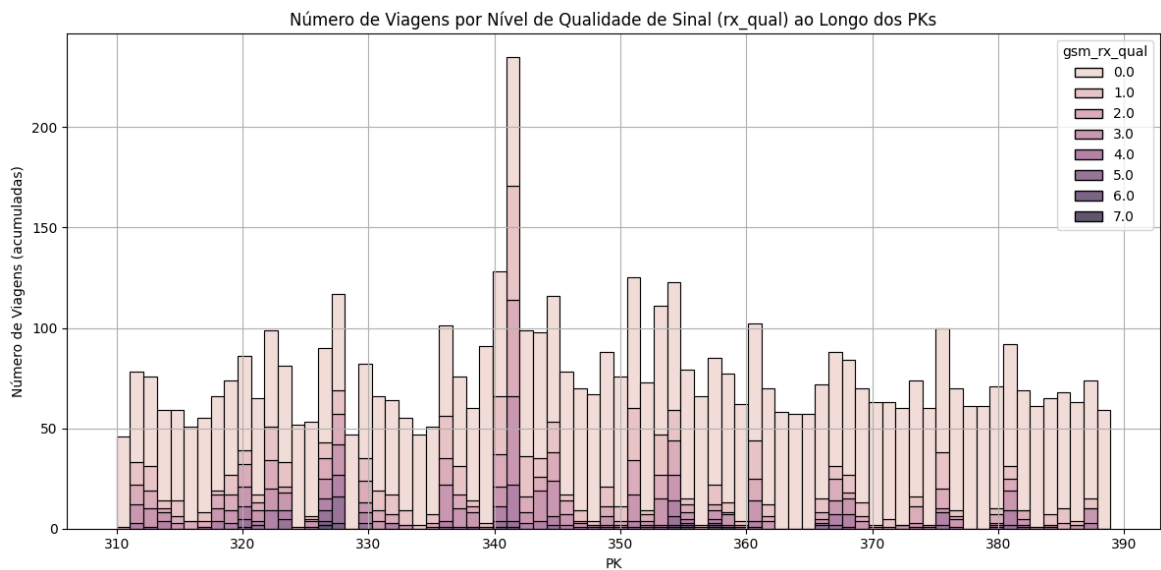
**Figura 4.31:** Anomalias no *handover* do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.

#### 4.3.4.3 Qualidade de sinal

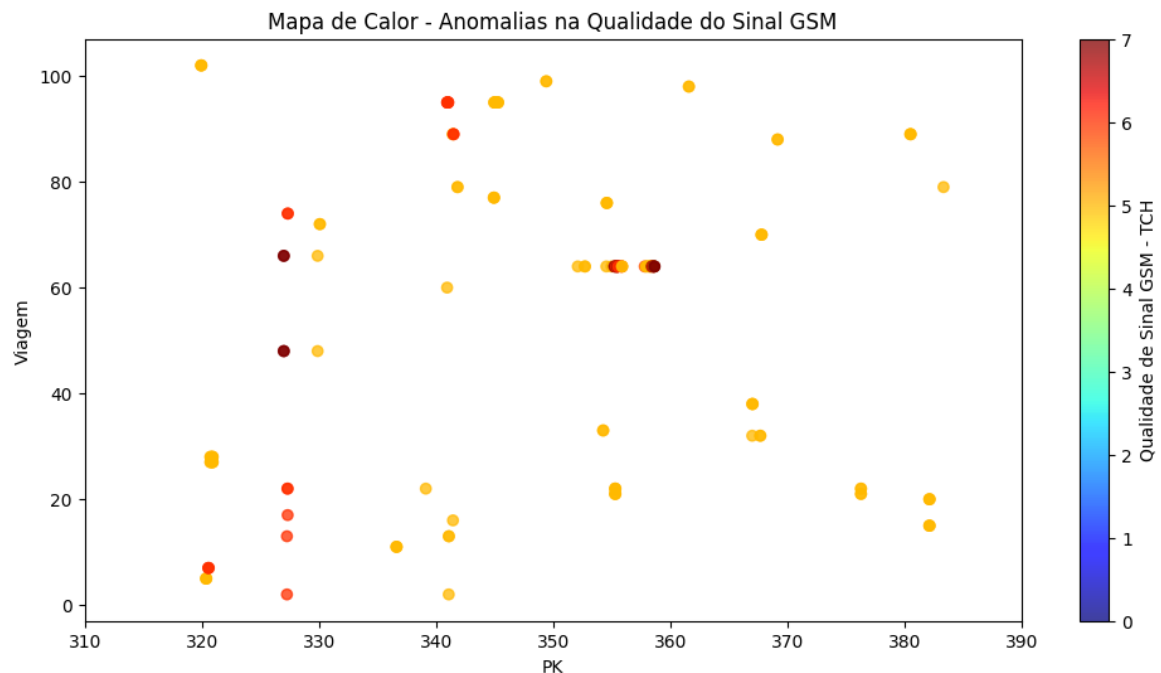
O histograma apresentado na Figura 4.32 destaca a região próxima do PK 340 como a zona com maior diversidade de valores de *RxQual*, indicando maior instabilidade da qualidade do sinal.

O mapa de calor com anomalias (Figura 4.33) evidencia problemas graves no PK 327 e também no PK 340, embora neste último com menor intensidade. A viagem 64 apresenta

múltiplas anomalias de qualidade de sinal nos segmentos em que a locomotiva se manteve ligada à célula incorreta, corroborando as falhas previamente observadas nos parâmetros de nível de sinal e *handover*.



**Figura 4.32:** Histograma cumulativo da qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.



**Figura 4.33:** Anomalias na qualidade de sinal do segmento Tunes-Vila Real sentido descendente.

Finalizado o primeiro caso de estudo, centrado na análise e deteção de padrões no comportamento do sinal GSM-R, o segundo caso aborda um problema de natureza distinta, porém complementar. Focado no planeamento de frequências, este estudo surge de uma necessidade identificada pela empresa, com o objetivo de melhorar a qualidade e continuidade do serviço através de uma atribuição mais eficiente dos recursos espectrais disponíveis (portadoras). Assim, enquanto a análise da Linha do Algarve permitiu compreender e caracterizar o desempenho real da rede, o estudo da Linha de Cascais visa atuar de forma preventiva e otimizada sobre o planeamento, reforçando a fiabilidade global do sistema GSM-R.

## Capítulo 5

# Caso de Estudo 2 - Planeamento de Frequências na Linha de Cascais

O planeamento de frequências constitui uma etapa fundamental no projeto e otimização de redes de comunicações móveis, particularmente em ambientes ferroviários, onde a continuidade do serviço, a robustez da comunicação e a mitigação de interferências assumem especial relevância. Neste contexto, uma portadora corresponde a uma frequência específica dentro da banda GSM-R, funcionando como “canal” sobre o qual é transmitida a informação entre a rede e o comboio. Cada portadora pode ser utilizada para canais de controlo (BCCH) ou de tráfego (TCH), ocupando uma largura de banda de 200 kHz. Para efeitos de modelação matemática, cada portadora é representada por um número inteiro único, facilitando a atribuição e o planeamento. O processo de planeamento consiste, assim, na atribuição eficiente das portadoras disponíveis, assegurando que os diversos canais coexistam sem comprometer a qualidade do sinal ou a integridade das transmissões.

Cada célula utiliza um conjunto específico de frequências de rádio, que devem ser escolhidas de forma a não interferirem umas com as outras. A atribuição inadequada de frequências pode provocar interferências, sobretudo nestas zonas, que se manifestam de duas formas principais:

- Interferência co-canal: Ocorre quando duas células próximas utilizam exatamente a mesma frequência.
- Interferência de canal adjacente: Ocorre quando canais utilizam frequências vizinhas, onde sinais muito próximos podem ainda assim afetar a receção devido às limitações dos equipamentos de rádio.

Estas interferências comprometem a qualidade da comunicação, podendo causar falhas no *handover*, perda de chamadas ou redução da taxa de dados. Um indicador chave é o quociente *carrier-to-interference* (C/I), que mede a força do sinal desejado em relação ao ruído e interferência. Se o C/I for demasiado baixo, o recetor pode não conseguir distinguir corretamente o sinal, resultando em comunicações instáveis ou falhadas.

A Linha de Cascais, localizada na região metropolitana de Lisboa, apresenta características topográficas e operacionais que tornam o planeamento de frequências um desafio técnico significativo. A presença de baías e a proximidade de água podem potenciar o alcance de sinais interferentes fora da sua área prevista de cobertura, exigindo soluções que garantam cobertura fiável e comunicação contínua, mesmo em condições adversas.

O objetivo deste estudo é desenvolver um plano de frequências que minimize interferências, respeitando as restrições técnicas da tecnologia GSM-R, incluindo a separação adequada entre canais BCCH e TCH, tanto no mesmo site como entre sites diferentes. A abordagem adotada combina dados de cobertura simulados com técnicas de otimização combinatória, visando maximizar o número de instantes em que o quociente C/I excede o

limiar mínimo de qualidade, permitindo aferir o seu impacto na fiabilidade e desempenho da rede ao longo da Linha de Cascais.

## 5.1 Linha de Cascais e características da rede

A Linha de Cascais é um troço ferroviário de elevada importância na região metropolitana de Lisboa, servindo tanto passageiros como operações urbanas regulares. O traçado apresenta características topográficas e operacionais que impactam diretamente o desempenho das comunicações móveis a bordo dos comboios, tornando o planeamento de frequências um desafio técnico relevante. Como se pode observar na Figura 5.1, a linha é composta por diversas curvas e percorre zonas em grande proximidade com o mar, fatores que podem amplificar ou refletir o sinal de forma inesperada.

Para uma compreensão detalhada do cenário de estudo, é fundamental considerar a distribuição das infraestruturas de comunicação ao longo da linha. A Figura 5.1 apresenta um mapa ilustrativo, destacando a localização das estações ferroviárias e das antenas da rede GSM-R, permitindo visualizar a relação entre o traçado ferroviário e os pontos de emissão de sinal.



**Figura 5.1:** Mapa da Linha de Cascais, destacando estações ferroviárias e infraestrutura de comunicação.

### 5.1.1 Sistema GSM-R

A rede GSM-R implementada ao longo da Linha de Cascais é composta por 10 sites principais de comunicação: Cais do Sodré (CSOD), Alcântara (ALCA), Belém (BELE), Cruz Quebrada (CRQB), Paço de Arcos (PARC), PK16\_A, PK16\_B, Parede (PARD), São João (SJOA) e Cascais (CASC). Cada site contém duas células independentes, o que permite aumentar a fiabilidade da rede: caso uma das células apresente falhas ou degradação, a outra assegura a continuidade do serviço. Cada célula é configurada com canais específicos que desempenham funções distintas:

- BCCH: canal de controlo, encarregado de difundir informações fundamentais sobre a rede, como a identificação da célula e parâmetros de acesso.
- TCH: canal de tráfego, utilizado para a transmissão de voz e dados durante a comunicação ativa.

Esta estrutura resulta numa elevada densidade de canais ao longo da linha, o que reforça a necessidade de um planeamento criterioso para minimizar interferências e garantir a qualidade de serviço.

Adicionalmente, cada site dispõe de duas antenas direcionais, orientadas para os sentidos ascendente e descendente da linha ferroviária. Esta configuração assegura que cada direção de circulação dos comboios tenha cobertura dedicada, reduzindo a probabilidade de interferências cruzadas entre sentidos.

A Tabela 5.1 apresenta a localização e configuração dos sites implementados atualmente.

Para simplificar a formulação do problema, e considerando que a diferença de potência entre os sinais emitidos para cada lado da antena é da ordem dos 40 dB, optou-se por

Transmitter	Direction	Site	Cell	Layer	PK
CSOD_A_L1	Asc.	CSOD	CSOD_L1	1	0.43
CSOD_A_L2	Asc.	CSOD	CSOD_L2	2	0.43
ALCA_A_L1	Asc.	ALCA	ALCA_L1	1	2.63
ALCA_B_L1	Desc.	ALCA	ALCA_L1	1	2.63
ALCA_A_L2	Asc.	ALCA	ALCA_L2	2	2.63
ALCA_B_L2	Desc.	ALCA	ALCA_L2	2	2.63
BELE_A_L1	Asc.	BELE	BELE_L1	1	4.85
BELE_B_L1	Desc.	BELE	BELE_L1	1	4.85
BELE_A_L2	Asc.	BELE	BELE_L2	2	4.85
BELE_B_L2	Desc.	BELE	BELE_L2	2	4.85
CRQB_A_L1	Asc.	CRQB	CRQB_L1	1	9.89
CRQB_B_L1	Desc.	CRQB	CRQB_L1	1	9.89
CRQB_A_L2	Asc.	CRQB	CRQB_L2	2	9.89
CRQB_B_L2	Desc.	CRQB	CRQB_L2	2	9.89
PARC_A_L1	Asc.	PARC	PARC_L1	1	13.15
PARC_B_L1	Desc.	PARC	PARC_L1	1	13.15
PARC_A_L2	Asc.	PARC	PARC_L2	2	13.15
PARC_B_L2	Desc.	PARC	PARC_L2	2	13.15
PK16_A_L1	Asc.	PK16_A	PK16_A_L1	1	16.87
PK16_B_L1	Desc.	PK16_B	PK16_B_L1	1	16.87
PK16_A_L2	Asc.	PK16_A	PK16_A_L2	2	16.87
PK16_B_L2	Desc.	PK16_B	PK16_B_L2	2	16.87
PARD_A_L1	Asc.	PARD	PARD_L1	1	19.61
PARD_B_L1	Desc.	PARD	PARD_L1	1	19.61
PARD_A_L2	Asc.	PARD	PARD_L2	2	19.61
PARD_B_L2	Desc.	PARD	PARD_L2	2	19.61
SJOA_A_L1	Asc.	SJOA	SJOA_L1	1	22.47
SJOA_B_L1	Desc.	SJOA	SJOA_L1	1	22.47
SJOA_A_L2	Asc.	SJOA	SJOA_L2	2	22.47
SJOA_B_L2	Desc.	SJOA	SJOA_L2	2	22.47
CASC_B_L1	Desc.	CASC	CASC_L1	1	25.29
CASC_B_L2	Desc.	CASC	CASC_L2	2	25.29

**Tabela 5.1:** Localização e configuração dos sites na Linha de Cascais.

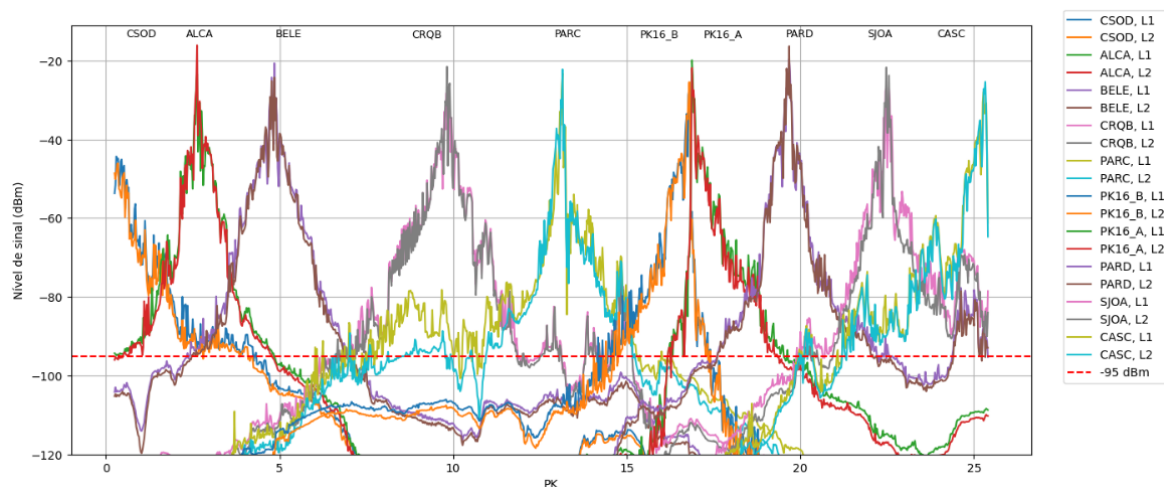
modelar cada célula como possuindo uma única antena bidirecional. Esta simplificação foi implementada atribuindo a cada célula, em cada ponto quilométrico, o valor de sinal correspondente ao mais forte dos dois sentidos originalmente simulados. Desta forma, elimina-se a duplicação de antenas sem perda significativa de representatividade. Esta aproximação não tem impacto relevante nos cálculos de interferência, permitindo reduzir a complexidade sem comprometer a fiabilidade da análise.

### 5.1.2 Problemas na linha

A Figura 5.2 ilustra o nível mediano de sinal ao longo do percurso, considerando a cobertura global atribuída a cada antena. Este sinal foi calculado a partir da mediana das medições de receção recolhidas em diferentes pontos da linha.

Esta figura permite ainda observar os efeitos da geografia na propagação radioelétrica. Devido à proximidade do mar e ao traçado sinuoso do percurso, registam-se extensões de cobertura que extravasam os limites esperados. Exemplos evidentes são a propagação do sinal do site de Paço de Arcos, que se prolonga até à área de Belém, e a do site de Cascais, que chega à zona de Parede. Estes comportamentos confirmam a complexidade

do planeamento de frequências na linha, já que zonas de sobreposição inesperada podem potenciar fenómenos de interferência.



**Figura 5.2:** Cobertura média de sinal GSM-R ao longo da Linha de Cascais.

## 5.2 Carrier-to-Interference ratio C/I

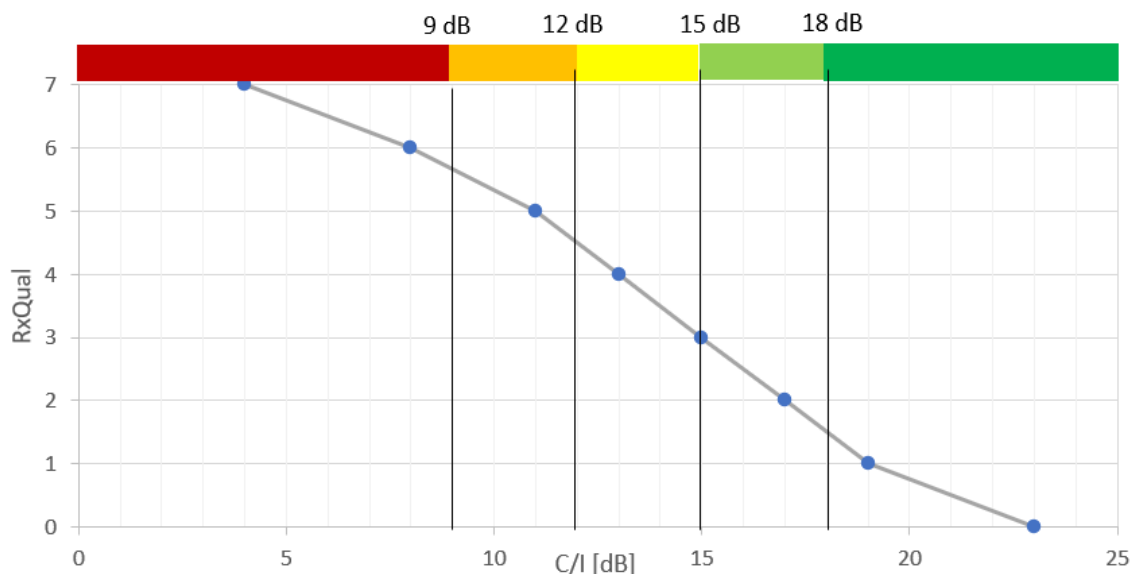
O principal indicador de qualidade em sistemas GSM-R é o quociente portadora/interferência ( $C/I$ , *Carrier to Interference ratio*), que expressa a diferença, em dB, entre a potência do sinal útil recebido e a potência das interferências presentes no mesmo canal ou em canais adjacentes. Valores mais elevados de  $C/I$  traduzem-se numa maior capacidade do recetor em distinguir o sinal desejado, assegurando comunicações fiáveis; por outro lado, valores baixos estão associados a falhas de ligação, degradação da qualidade de voz e perda de chamadas. De acordo com a especificação EIRENE, deve ser garantido um valor mínimo de  $C/I$  de 12 dB para suportar serviços de dados [10]. A Tabela 5.2 apresenta uma classificação detalhada dos intervalos de  $C/I$  recomendados e a respetiva interpretação qualitativa. Observa-se que valores inferiores a 9 dB são considerados insuficientes, enquanto valores acima de 18 dB correspondem a condições de comunicação muito boas.

**Tabela 5.2:** Classificação da qualidade do quociente  $C/I$  segundo limites recomendados.

$C/I$ (dB)	Descrição
<9	Insuficiente
9–12	Suficiente (voz)
12–15	Suficiente (dados)
15–18	Bom
>18	Muito bom

A relação entre o valor de  $C/I$  e a qualidade do sinal encontra-se representada na Figura 5.3, onde se pode observar a correspondência entre intervalos de  $C/I$  e a métrica  $RxQual$ . Esta representação evidencia como a degradação progressiva do  $C/I$  se traduz em piores classificações de qualidade de sinal, reforçando a importância do planeamento adequado das frequências atribuídas às células da rede.

Em suma, o planeamento de frequências na Linha de Cascais deve assegurar que o  $C/I$  permaneça, de forma consistente, acima dos limiares definidos, garantindo não apenas a qualidade da voz, mas também a fiabilidade das comunicações críticas de dados.



**Figura 5.3:** Relação entre intervalos de C/I e RxQual.

### 5.3 Problema proposto

O desafio colocado pela empresa consiste em desenvolver um plano de frequências que assegure, com um nível de confiança de 95%, que em todos os instantes ao longo da Linha de Cascais o quociente C/I se mantenha acima do limiar mínimo de 12 dB. Este requisito visa garantir não apenas a fiabilidade das comunicações de voz, mas também a robustez necessária para suportar os serviços críticos de dados associados ao ETCS (*European Train Control System*).

Para este cenário, importa recordar que a rede é composta por 10 sites, cada um com duas células. A célula 1 opera com dois canais (um BCCH e um TCH), enquanto a célula 2 opera apenas com o canal BCCH. Assim, o problema de planeamento traduz-se na atribuição de portadoras a um total de 30 canais ( $10 \times 2 + 10 = 30$ ).

Foi estabelecido um limite máximo de 19 portadoras distintas para a atribuição destes 30 canais, implicando, portanto, a reutilização eficiente das frequências disponíveis. Essa reutilização deve ser cuidadosamente planeada para respeitar as restrições técnicas definidas, de modo a minimizar as interferências e assegurar os níveis de qualidade de serviço exigidos. As restrições impostas pela empresa são uma primeira tentativa empírica com o objetivo de orientar o planeamento de frequências de forma a reduzir o risco de interferências e garantir níveis mínimos de qualidade de comunicação. Estas regras funcionam como uma primeira abordagem empírica ao problema, procurando alcançar valores aceitáveis de C/I sem ainda recorrer a uma otimização global e formal do sistema.

De forma geral, estas restrições podem ser agrupadas em duas dimensões principais:

- **Separação BCCH/TCH:**
  - Os canais BCCH e TCH devem utilizar conjuntos de portadoras distintos.
  - Os canais BCCH requerem maior proteção, assumindo-se uma atividade contínua de 100%.
  - Os canais TCH, sendo menos exigentes, assumindo-se uma atividade média de 40%.
- **Regras de separação entre canais:**
  - Dentro da mesma célula: deve existir uma separação mínima de 3 portadoras.

- Dentro do mesmo site: deve existir uma separação mínima de 2 portadoras.
- Entre células adjacentes:
  - \* Uma separação mínima de 3 portadoras entre canais BCCH.
  - \* Uma separação mínima de 2 portadoras entre canais TCH.

Estas condições transformam o planeamento de frequências num problema de otimização combinatória, em que o objetivo é encontrar uma atribuição que satisfaça simultaneamente as restrições de separação, o limite de portadoras disponíveis e o requisito de  $C/I \geq 12$  dB na maior parte do percurso ferroviário.

A Tabela 5.3 apresenta um exemplo de um planeamento de frequências inadequado, utilizado para ilustrar situações típicas de interferência que podem comprometer a qualidade do sistema GSM-R.

Neste exemplo, as portadoras atribuídas aos canais BCCH dos sites 1 e 2 (assinaladas a vermelho) estão configuradas em frequências adjacentes. Esta configuração representa um caso de interferência de canal adjacente, uma vez que dois sites consecutivos utilizam portadoras imediatamente vizinhas no espetro. Nestas condições, o sinal recebido em zonas de transição entre os dois sites poderá apresentar níveis semelhantes, aumentando a probabilidade de sobreposição de espetros e dificultando a correta distinção entre as portadoras, o que se traduz em degradação da qualidade de receção e possíveis falhas de comunicação durante o *handover*.

Adicionalmente, no site 4, observa-se que os canais BCCH e TCH utilizam a mesma portadora (9), também assinalada a vermelho. Esta situação caracteriza um caso de interferência co-canal, uma vez que dois canais distintos operam exatamente na mesma frequência dentro do mesmo site. Tal configuração é particularmente crítica, pois provoca interferência direta entre canais de natureza diferente (controlo e tráfego), podendo resultar em falhas de sincronização, perda de chamadas ou degradação severa do desempenho da célula.

**Tabela 5.3:** Exemplo de um planeamento de frequências inadequado.

Camada	Canal	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Layer 1	BCCH	1	2	3	9
	TCH	3	4	7	9
Layer 2	BCCH	7	6	10	1

A Tabela 5.4 apresenta um exemplo de um planeamento de frequências adequado, em que as portadoras estão devidamente espaçadas e distribuem-se de forma equilibrada entre os diferentes sites e canais.

Nesta configuração, observa-se que as frequências atribuídas aos canais BCCH e TCH apresentam separações suficientemente amplas, tanto entre sites adjacentes como dentro do mesmo site, reduzindo significativamente o risco de interferência de canal adjacente.

**Tabela 5.4:** Exemplo de um planeamento de frequências adequado.

Camada	Canal	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Layer 1	BCCH	4	11	5	2
	TCH	7	1	8	12
Layer 2	BCCH	16	19	15	18

Estes exemplos evidenciam a importância de respeitar as regras de separação mínima entre portadoras, tanto dentro de um mesmo site como entre sites adjacentes, reforçando a necessidade de um planeamento de frequências criterioso que assegure margens ade-

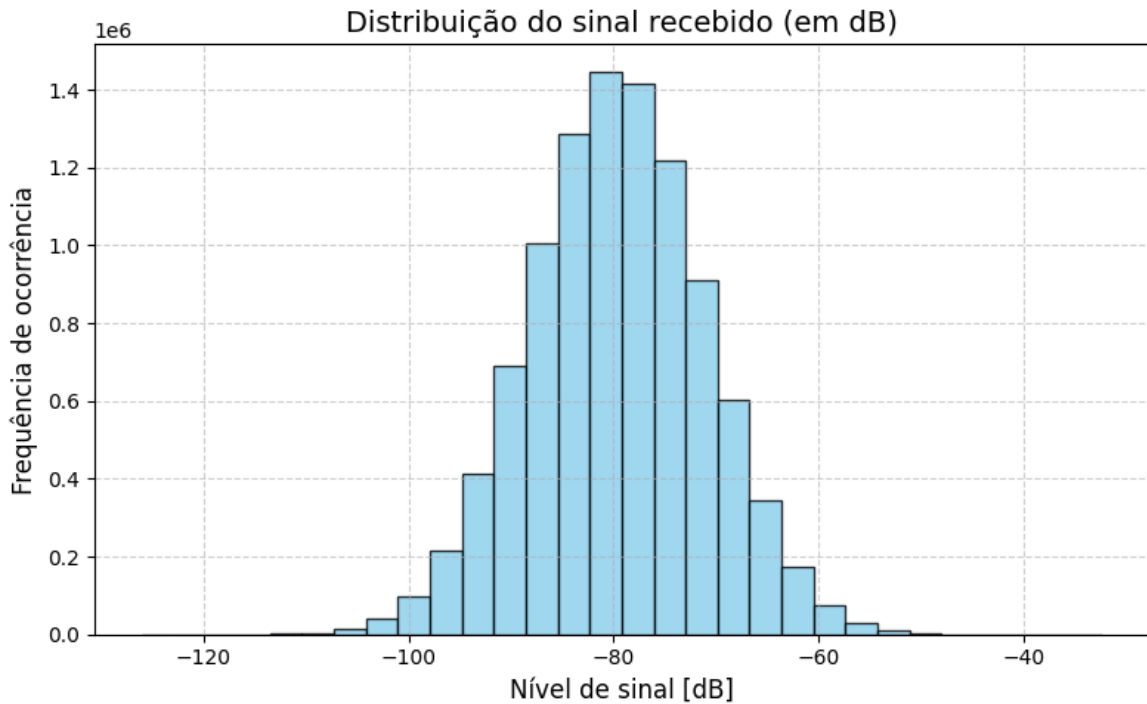
quadas de isolamento espectral. Deste modo, estabelece-se a base necessária para o desenvolvimento do problema de otimização do quociente C/I.

## Pressupostos

O nível de sinal utilizado neste estudo corresponde à mediana dos valores recolhidos ao longo de um determinado período de tempo. Como tal, estes valores não representam o valor instantâneo do sinal nem a sua variabilidade real, mas apenas o ponto central da distribuição medida. Isto significa que, para cada localização, existe aproximadamente uma probabilidade de 50% de o valor real do sinal estar acima deste valor reportado e 50% de estar abaixo.

Para modelar esta incerteza, assume-se que cada nível de sinal em cada posição segue uma distribuição normal, centrada no valor mediano observado e com um desvio padrão de 8.5 dB, refletindo a variabilidade típica associada ao canal rádio.

A Figura 5.4 ilustra a distribuição normal assumida para o sinal recebido, com média  $\mu$  e desvio-padrão de 8.5 dB, representando as flutuações de uma única amostra do canal rádio.



**Figura 5.4:** Distribuição do sinal recebido em dB, modelado como variável normal com média  $\mu_n$  e desvio padrão de 8.5 dB.

O objetivo desta fase do estudo é estimar o valor de C/I correspondente a um nível de confiança de 95%. Em outras palavras, pretende-se obter um valor de C/I tal que, em pelo menos 95% dos casos, o valor real observado seja igual ou superior ao valor estimado. Para tal, é necessário ajustar os valores de C/I pela aplicação de uma margem de desvanecimento, correspondente ao percentil de 5% da distribuição teórica. A aplicação desta margem resulta num valor mais conservador, garantindo que o desempenho estimado corresponde a um cenário mais pessimista.

Nesta etapa, será inicialmente estimada a distribuição do C/I através de simulações estocásticas baseadas no modelo de variabilidade definido. Seguidamente, será analisado o impacto do número de interferentes no valor final de C/I, de forma a determinar um número adequado de contribuições interferentes para este caso de estudo.

## Estimativa do C/I com confiança de 95%

Para avaliar a robustez da ligação rádio, é necessário estimar o C/I com um nível de confiança de 95%. Este cálculo envolve incertezas tanto no sinal útil como nas potências dos sinais interferentes.

Assume-se que o sinal recebido de um canal  $n$ , expresso em dB, segue uma distribuição normal:

$$X_n \sim \mathcal{N}(\mu_n, \sigma^2 = 8.5^2) \quad (5.1)$$

Para somar corretamente os sinais interferentes, é necessário converter os valores de dB para potência linear, já que a escala em dB é logarítmica e não permite a soma direta. Esta conversão é feita considerando:

$$Y_n = 10^{X_n/10} \quad (5.2)$$

Sendo  $Y_m$  a potência linear do sinal do interferente  $m$ , a soma total da interferência é dada por:

$$W = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N Y_m \quad (5.3)$$

e a correspondente potência interferente total  $X_w$  em dB é:

$$X_w = 10 \cdot \log_{10}(W) \quad (5.4)$$

Finalmente, o C/I é obtido como a diferença entre o sinal útil e o nível de interferência total:

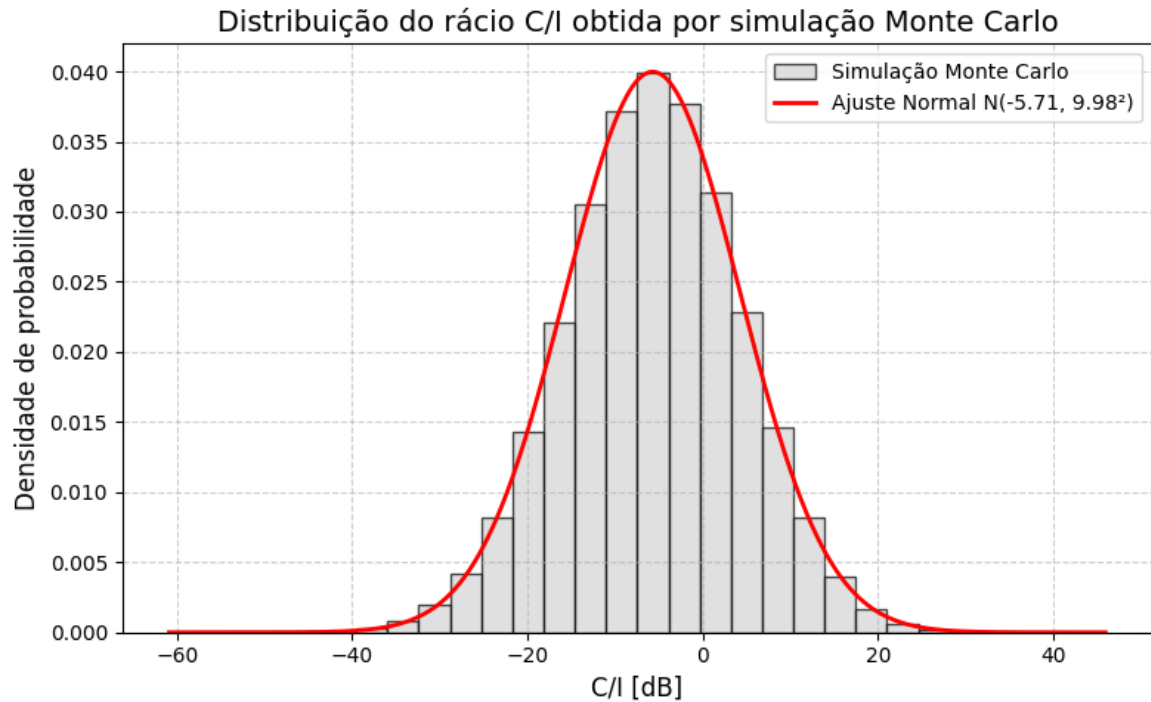
$$Z = X_n - X_w \quad (5.5)$$

Através de simulações de Monte Carlo [11] realizadas neste estudo, avaliou-se o comportamento estatístico do quociente C/I, assumindo que tanto o sinal útil como os sinais interferentes são variáveis aleatórias com distribuição normal. Para cada medição, considerou-se uma média igual ao valor medido e desvio padrão de 8.5 dB, refletindo a variabilidade típica do canal rádio.

Nestas simulações, foram gerados vetores de amostras aleatórias para o sinal útil e para os interferentes, seguindo a distribuição normal assumida. Para cada amostra calculou-se o valor correspondente de C/I, permitindo observar a sua variabilidade estatística, que não seria visível caso apenas se utilizassem os valores médios.

Após a conversão para potência linear e cálculo da soma total dos sinais interferentes, verificou-se que a distribuição resultante do C/I ( $Z$ ) apresenta uma forma aproximadamente normal, confirmando que o C/I segue aproximadamente uma distribuição normal, para efeitos de análise de desempenho e definição de margens de confiança.

A Figura 5.5 apresenta a distribuição resultante do quociente  $C/I$ , obtida pela diferença entre o sinal e o nível total de interferência. Os resultados demonstram que  $Z = C/I$  mantém uma forma aproximadamente normal, confirmando que o quociente resultante de uma amostra de sinal útil e dos sinais interferentes também segue uma distribuição normal, com um desvio-padrão estimado de cerca de 9.9 dB.



**Figura 5.5:** Distribuição do quociente  $C/I$  obtida por simulações de Monte Carlo com 8 sinais interferentes, aproximando-se de uma distribuição normal.

Para aprofundar esta análise, foram realizadas simulações adicionais variando o número de sinais interferentes ( $m$ ), cujos resultados se encontram resumidos na Tabela 5.5, onde foram realizadas 500000 simulações, de forma a reduzir a variabilidade das estimativas. Observou-se que, à medida que  $m$  aumenta, o desvio-padrão tende a estabilizar, aproximando-se de um valor em torno de 8.5 dB. Este comportamento é expectável, uma vez que a soma de várias potências interferentes reduz gradualmente a variabilidade global do  $C/I$ .

**Tabela 5.5:** Resultados das simulações de Monte Carlo para diferentes números de sinais interferentes ( $m$ ).

Número de sinais interferentes ( $m$ )	Desvio-padrão estimado do $C/I$ [dB]
1	11.99
2	10.82
4	10.03
8	9.50
16	9.15
32	8.92
64	8.5
128	8.5

Considerando o contexto prático da rede ferroviária GSM-R, adotou-se  $m = 8$  como cenário representativo, correspondendo a interferências de células adjacentes e de segunda ordem. Para este caso, o desvio-padrão do  $C/I$  convergiu para aproximadamente 9.5 dB, valor que foi utilizado no cálculo da margem de desvanecimento ( $\Delta_{95\%}$ ).

Deste modo, para obter um  $C/I$  com 95% de confiança, aplica-se um fator de correção

correspondente ao percentil inferior (5%) da distribuição normal, o que implica:

$$CI_{95\%} = CI_{mediana} - 1.645 \times 9.5 \approx CI_{mediana} - 15.67 \text{ dB} \quad (5.6)$$

Assim conclui-se que, a margem de desvanecimento  $\Delta_{95\%}$  a usar é de 15.67 dB. Este valor de desvanecimento garante que, em pelo menos 95% dos casos, o C/I real será superior ao valor estimado, oferecendo uma estimativa conservadora e fiável para análise da qualidade de serviço.

## 5.4 Formulação matemática

O planeamento de frequências na Linha de Cascais pode ser formulado como um problema de otimização combinatória, em que o objetivo é encontrar a melhor atribuição de portadoras aos diferentes canais do sistema GSM-R, garantindo níveis aceitáveis de qualidade de comunicação e minimizando interferências.

De modo a formalizar matematicamente este problema, este pode ser descrito como um problema de programação inteira, em que cada decisão corresponde à atribuição de uma portadora a um canal específico. Esta formulação integra:

- As restrições técnicas impostas pela tecnologia GSM-R e pelas regras da empresa;
- O modelo de interferência, que define a forma como os sinais de diferentes células e canais interagem;
- A função objetivo, que visa maximizar a percentagem de pontos da linha ferroviária em que o C/I cumpre o limiar mínimo de 12 dB, considerado adequado para garantir qualidade de comunicação em serviços críticos.

### Notação e definições

Para traduzir o problema de planeamento de frequências para um modelo matemático, começamos por identificar os elementos fundamentais da rede. Cada site ( $i$ ) contém duas células ( $j$ ), e cada célula pode disponibilizar até dois tipos de canais: um BCCH ( $k=1$ ), e quando aplicável, um TCH ( $k=2$ ). Assim, os índices principais do modelo serão:

$$i \in \{1, \dots, N\}, \quad j \in \{1, 2\}, \quad k \in \{1, 2\} \quad (5.7)$$

onde  $N = 10$  corresponde ao número de sites da Linha de Cascais.

Cada site é responsável por cobrir uma zona geográfica definida, delimitada por pontos onde ocorrem o processo de *handover*, obtidos a partir da análise do histórico dos dados de cobertura. Para cada site  $i$ , definem-se dois pontos:

$$pk_{\text{start}}^i, \quad pk_{\text{end}}^i$$

correspondentes ao início do intervalo de cobertura do site  $i$  ( $pk_{\text{start}}^i$ ) e o fim do intervalo de cobertura do mesmo ( $pk_{\text{end}}^i$ ). Para garantir robustez, considera-se uma margem de  $\pm 200$  m em torno dos limites de *handover* para avaliar a qualidade da cobertura.

O conjunto de portadoras a distribuir pelos canais é limitado a 19 frequências distintas, definidas como:

$$x_{i,j,k} \in \{1, \dots, 19\}, \quad \forall i, j, k \quad (5.8)$$

Dada esta atribuição, a distância em número de portadoras, entre dois canais quaisquer é representada por:

$$d_{i,j,k,i',j',k'} = |x_{i,j,k} - x_{i',j',k'}|, \quad \forall i, j, k \quad (5.9)$$

Esta variável permitirá expressar de forma simples as restrições de separação mínima exigidas pela empresa.

## Restrições

Como referido anteriormente, este problema deve respeitar algumas restrições de alocação de portadoras. Estas condições são impostas de forma a reduzir o risco de interferência entre canais próximos.

### a) Separação dentro da mesma célula

Em cada célula, quando coexistem os canais BCCH e TCH, deve ser garantida uma separação mínima de três portadoras:

$$d_{i,j,1,i,j,2} \geq 3, \quad \forall i, j \quad (5.10)$$

### b) Separação dentro do mesmo site

Entre células pertencentes ao mesmo site, a separação mínima entre canais é de duas portadoras:

$$d_{i,j,k,i,j',k'} \geq 2, \quad \forall i, (j, k) \neq (j', k') \quad (5.11)$$

### c) Separação entre sites adjacentes

Entre sites consecutivos, aplicam-se regras distintas para canais BCCH e TCH:

- Para canais BCCH:

$$d_{i,j,k,i+1,j',1} \geq 3, \quad \forall i, j, j', k \quad (5.12)$$

- Para canais TCH:

$$d_{i,j,k,i+1,j',2} \geq 2, \quad \forall i, j, j', k \quad (5.13)$$

## Modelação do C/I

Em cada ponto da linha, a avaliação do C/I e para cada canal  $(i, j, k)$  baseia-se nas potências recebidas do sinal útil e dos sinais interferentes, tendo em conta a atenuação relativa à proximidade das portadoras e a atividade dos canais. Para clarificar este processo, apresentam-se de seguida os conceitos e definições fundamentais que permitem formalizar o cálculo do C/I.

### Fator de atividade

O Fator de atividade  $\rho_{k'}$  modela a probabilidade média de ocupação de cada canal  $k'$ , e influencia a contribuição de cada canal interferente para a interferência total de um canal,

onde:

$$\rho_{k'} = \begin{cases} 1 & , \text{ se } k' = 1 \\ 0.4 & , \text{ se } k' = 2 \end{cases} \quad (5.14)$$

### Cálculo do ACIR (*Adjacent Channel Interference Ratio*)

O *ACIR* — *Adjacent Channel Interference Ratio* — representa a atenuação efetiva da interferência causada por um emissor em canais adjacentes [12]. Este parâmetro é essencial para modelar de forma precisa a degradação da qualidade do sinal devido à interferência intercanal, especialmente em redes como o GSM-R, onde o espectro é estreito e as portadoras estão próximas.

O valor de ACIR combina os efeitos de duas limitações:

- *ACLR* (*Adjacent Channel Leakage Ratio*): Limitação do emissor, quantifica a quantidade de sinal que vaza para canais adjacentes.
- *ACS* (*Adjacent Channel Selectivity*): Limitação do receptor, quantifica a capacidade de rejeitar sinais em canais vizinhos.

A combinação dos dois é feita pela seguinte relação:

$$ACIR := \left( \frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

Todos os parâmetros são expressos em escala linear nesta fórmula. Após o cálculo, o ACIR final pode ser convertido para dB:

$$ACIR_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(ACIR) \quad (5.16)$$

**Integração sobre múltiplas portadoras:** Para a estimativa do cálculo do valor de ACIR é considerado o sinal interferente sobre um conjunto limitado de portadoras:

- A portadora central GSM-R (em que se avalia o C/I);
- As 3 portadoras adjacentes inferiores;
- As 3 portadoras adjacentes superiores.

Apenas se consideram três portadoras acima e abaixo, pois a interferência proveniente de portadoras mais distantes é desprezável face à atenuação proporcionada pelo ACIR, tornando-se irrelevante para o cálculo do C/I. Esta abordagem reflete a realidade do espectro GSM-R, onde o sinal útil pode ser afetado não apenas pela interferência direta da mesma portadora, mas também pelas portadoras adjacentes próximas.

Assim, o modelo implementado integra as contribuições interferentes com base na separação entre portadoras, associando um valor de ACIR específico a cada diferença de frequência (em número de portadoras), tipicamente de acordo com uma Tabela como a seguinte:

Separação em portadoras	ACIR (dB)
0	0 (interferência total, mesma portadora)
±1	15.23
±2	36.04
±3	55.43
> 3	(interferência desprezável)

Assim:

$$ACIR[i, j, k, i', j', k'] = \begin{cases} 0 & , \text{ se } |d_{i,j,k,i',j',k'}| = 0 \\ 15.23 & , \text{ se } |d_{i,j,k,i',j',k'}| = 1 \\ 36.04 & , \text{ se } |d_{i,j,k,i',j',k'}| = 2 \\ 55.43 & , \text{ se } |d_{i,j,k,i',j',k'}| = 3 \\ M & , \text{ se } |d_{i,j,k,i',j',k'}| \geq 4 \end{cases} \quad (5.17)$$

Onde o valor  $M$  representa um número suficientemente grande, de modo a tornar combinações de portadoras com separação maior que 3 desprezáveis na avaliação do C/I.

### Potência e potência total de interferência

Seja  $PK = \{pk_i\}_{i=1}^L$  com  $L \in \mathbb{N}$  o conjunto de pontos de medição ao longo da linha ferroviária, onde cada  $pk \in PK$  representa uma posição discretizada ao longo do percurso, a potência recebida no ponto  $pk$  proveniente do canal  $(i, j, k)$  será denotada por:

$$P[i, j, k, pk_i], \quad i \in \{1, \dots, N\}, \quad j \in \{1, 2\}, \quad k \in \{1, 2\}, \quad pk_i \in PK \quad (5.18)$$

A potência total de interferência num dado ponto  $pk_i$ , associada ao canal  $(i, j, k)$ , resulta da soma das potências lineares dos demais canais, ponderadas pela atividade dos canais  $\rho_{k'}$  e pela atenuação associada à diferença entre a portadora do canal emissor e a portadora do canal adjacente (ACIR). Especifica-se:

$$P_{\text{int}}[i, j, k, pk_i] = \sum_{\substack{i'=1 \\ (i',j',k') \neq (i,j,k)}}^N \sum_{j'=1}^2 \sum_{k'=1}^2 \rho_{k'} \cdot 10^{(P[i',j',k',pk_i] - ACIR(|x_{i,j,k} - x_{i',j',k'}|)) / 10} \quad (5.19)$$

Note que:

- A soma exclui o canal  $(i, j, k)$  para não contar o próprio sinal como interferência;
- $\rho_{k'}$  representa a probabilidade média de ocupação do canal  $k'$  (1 para BCCH e 0.4 para TCH);
- A função ACIR traduz a atenuação em dB causada pela diferença de portadoras;
- A conversão de dBm para potência linear é feita por  $10^{P/10}$ , permitindo somar diretamente as contribuições interferentes.

### Cálculo do C/I

O C/I em dB para o canal  $(i, j, k)$  no ponto  $pk$  é definido como:

$$C/I[i, j, k, pk] = P[i, j, k, pk] - 10 \log_{10} (P_{\text{int}}[i, j, k, pk]) \quad (5.20)$$

### Função objetivo: Maximizar a cobertura ( $C/I \geq 12$ dB)

Seja  $\Delta_{95\%}$  a margem de desvanecimento calculada, no caso concreto  $\Delta_{95\%} \approx 15.67$  dB). Define-se o  $C/I_{95\%}$  como:

$$C/I_{95\%}[i, j, k, pk] = C/I[i, j, k, pk] - \Delta_{95\%}, \quad (5.21)$$

Seja  $Y$  uma variável binária indicadora, tal que:

$$y_{i,j,k,pk} \in \{0, 1\}, \quad (5.22)$$

onde  $y_{i,j,k,pk} = 1$  se, e só se,  $C/I_{95\%}[i, j, k, pk] \geq 12$  dB.

A função objetivo visa maximizar o número total de pontos (ou a percentagem) que satisfazem o requisito de qualidade:

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{pk \in PK} y_{i,j,k,pk}. \quad (5.23)$$

## 5.5 Estratégia de otimização

Devido à elevada dimensão do problema de otimização inteira, envolvendo múltiplos sites, células e canais com restrições rigorosas de separação, encontrar a solução globalmente ótima torna-se computacionalmente impraticável. Este tipo de problema enquadra-se na classe dos “*Frequency Assignment Problems*”, reconhecidos por serem NP-Hard [13] (ver também Capítulo 2), o que significa que a complexidade combinatória cresce rapidamente com o número de sites e canais, tornando inviável a exploração exaustiva de todas as possíveis atribuições de portadoras em tempo aceitável. O estudo detalhado da complexidade do problema não é abordado neste trabalho.

Para contornar esta limitação e ainda assim obter uma solução de qualidade, optou-se por uma abordagem heurística em duas fases complementares. O objetivo desta estratégia não é garantir a solução ótima, mas sim gerar uma alocação robusta e prática, que maximize a separação entre canais próximos e minimize a interferência ao longo de toda a linha.

- Fase 1 – Otimização *Max-Min* das distâncias de portadoras entre sites adjacentes: nesta fase, o foco recai sobre a atribuição de portadoras aos canais de modo a maximizar a distância mínima entre portadoras de sites adjacentes, reduzindo assim a interferência co-canal e de canais adjacentes.
- Fase 2 – Permutação de portadoras no mesmo site: após a configuração global, realiza-se um ajuste local dentro de cada site, reorganizando as portadoras para melhorar a separação entre canais da mesma célula ou site, sempre respeitando as restrições impostas.

### Fase 1 – Otimização *Max-Min* das distâncias de portadoras entre sites adjacentes

Nesta fase inicial, o objetivo é assegurar que as portadoras atribuídas a canais de sites adjacentes estejam suficientemente afastadas no espectro, de modo a minimizar a interferência direta entre eles. Para isso, o problema de otimização original foi transformado num problema do tipo *Max-Min*, criando uma variável auxiliar  $z$ , que representa a separação mínima global entre portadoras em todo o sistema. Esta variável será útil para a formulação do objetivo de otimização.

Dada a matriz de adjacência  $M_{i,i'} \in \{0, 1\}$ , que representa as adjacências críticas entre sites, permitindo que a otimização foque nos casos de maior risco de interferência, onde:

$$M_{i,i'} = \begin{cases} 1, & \text{se o site } i \text{ é adjacente ao site } i' \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Dois sites  $i$  e  $i'$  foram considerados adjacentes quando o site  $i$  apresenta um nível de sinal semelhante ao do site  $i'$  na área de cobertura de um dos dois sites, indicando um maior risco de interferência. As adjacências entre sites consideradas na resolução deste problema estão representadas na Tabela 5.6. Estas foram definidas manualmente com os critérios definidos anteriormente.

**Tabela 5.6:** Tabela de adjacência entre sites.

Site	Sites Adjacentes
0	0, 1
1	0, 1, 2
2	1, 2, 3, 4
3	2, 3, 4, 5
4	3, 4, 5
5	3, 4, 5, 6
6	5, 6, 7
7	6, 7, 8, 9
8	7, 8, 9
9	7, 8, 9

A formulação matemática do problema é do tipo *Max-Min* e visa a maximizar o mínimo das distâncias entre portadoras, sendo:

$$\max z \quad (5.24)$$

Sujeito às restrições:

$$z \cdot M_{i,i'} \leq d_{i,j,k,i',j',k'}, \quad \forall i, i', j, k, j', k' \quad (5.25)$$

Onde:

- $d_{i,j,k,i',j',k'}$  é a distância entre duas alocações de portadoras;
- $z$  é a menor distância entre canais de sites adjacentes, a ser maximizada.

## Fase 2 – Permutação de portadoras dentro do mesmo site

Na segunda fase da otimização, é considerada a diferença de taxa de atividade entre canais:

- Canais BCCH apresentam 100% de atividade;
- Canais TCH apresentam uma taxa de atividade de 40%;

Esta diferença tem impacto direto no cálculo da interferência, uma vez que o nível de interferência gerado por um canal é ponderado pela sua taxa de atividade. Desta forma, a atribuição de portadoras mais "sensíveis", ou seja, com menor margem de interferência, aos canais de menor atividade pode melhorar significativamente os valores de C/I nas zonas críticas.

**Pseudocódigo:** Foi aplicado um algoritmo de otimização local baseado em busca gulosa (*greedy*) [14], com as seguintes regras:

1. Para cada site, identifica-se o conjunto de posições válidas, excluindo o canal TCH da segunda célula ( $j = 1, k = 1$ );
2. Geram-se todas as permutações possíveis entre as portadoras atribuídas a essas posições dentro do site;
3. Para cada permutação, calcula-se a percentagem de amostras com  $C/I \geq 12$  dB, com 95% de confiança;
4. Se a permutação resultar numa melhoria na percentagem total de amostras com  $C/I \geq 12$  dB, a nova configuração é guardada e o processo reinicia do primeiro site;
5. Caso não haja melhoria, a configuração original é mantida e a próxima permutação é testada;
6. O processo termina quando é percorrido todo o conjunto de sites numa iteração sem que nenhuma permutação tenha resultado em melhoria.

Note-se que a geração de todas as permutações possíveis constitui, em geral, um problema *NP-Hard*. No entanto, neste caso, tal abordagem é possível, uma vez que as permutações são restritas a um número reduzido de sites (três), mantendo a dimensão do problema computacionalmente viável.

Apresenta-se de seguida o pseudocódigo 3 do algoritmo que permite executar este processo:

---

**Algorithm 3:** Pseudocódigo para otimização local do C/I por site

---

**Data:** Configuração inicial de portadoras  $x$ , matriz de cobertura  $P$ , sites de handover  $handovers\_sites$ , taxa de atividade TCH  $tch\_percentage$

**Result:** Configuração otimizada  $new\_x$  e melhor  $CI$

```
 $new\_x \leftarrow x;$   
 $best\_CI \leftarrow \text{calcular\_CI}(x, P, handovers\_sites, tch\_percentage);$   
 $improve \leftarrow True;$   
while  $improve$  do  
   $improve \leftarrow False;$   
  for cada site em  $new\_x$  do  
    Identificar posições válidas para permutar (não NaN, não célula 2-TCH);  
    for cada permutação das portadoras válidas do  
      Aplicar permutação no site atual;  
      if BCCH e TCH da célula 1 têm separação  $< 3$  then  
        continue;  
      end  
      if BCCH viola separação mínima com sites adjacentes then  
        continue;  
      end  
       $temp\_CI \leftarrow \text{calcular\_CI}(configuracao\_permuta);$   
      if  $temp\_CI > best\_CI$  then  
        Atualizar  $new\_x$  com configuração permutada;  
         $best\_CI \leftarrow temp\_CI;$   
         $improve \leftarrow True;$   
        break do ciclo de permutações do site;  
      end  
    end  
  if  $improve$  then  
    break do ciclo de sites;  
  end  
end  
end  
return  $new\_x, best\_CI;$ 
```

---

Esta abordagem permite explorar soluções locais mais eficientes, ajustando dinamicamente as portadoras em função da sua criticidade e da utilização efetiva, enquanto respeita as restrições impostas por interferência espectral e atividade dos canais.

Tanto o algoritmo utilizado na primeira fase como o da segunda fase não garantem a obtenção de soluções ótimas globais. No entanto, dado que o problema em questão é de natureza combinatória, não linear e de elevada complexidade, estas abordagens permitem alcançar soluções satisfatórias com um tempo computacional inferior a 10 minutos.

Na **Fase 1**, o objetivo principal consiste em minimizar a interferência entre sites adjacentes, garantindo uma separação mínima aceitável entre portadoras de células interferentes. Embora esta abordagem não assegure a melhor distribuição possível de frequências em toda a rede, ela tende a reduzir significativamente o risco de interferência entre sites vizinhos, contribuindo para uma solução global mais robusta.

Na **Fase 2**, o algoritmo atua de forma local e *gulosa*, apenas aceitando alterações que resultem em melhoria da métrica de desempenho (percentagem de pontos com C/I  $\geq 12$  dB). Nesta fase, o objetivo é refinar a alocação para minimizar, não só, a interferência entre sites adjacentes, mas sobretudo, a interferência no mesmo site, explorando combinações de portadoras dentro de cada site. Este comportamento conduz tipicamente a um mínimo local.

Apesar destas limitações teóricas, os métodos propostos apresentam resultados práticos satisfatórios, sendo adequados ao contexto do problema.

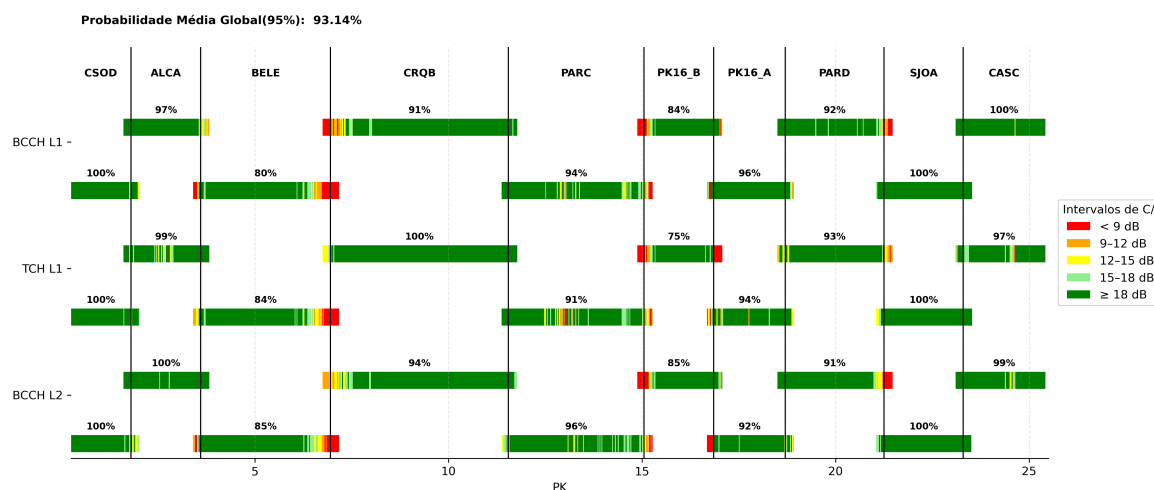
## 5.6 Resultados

Esta secção apresenta os resultados obtidos, incluindo as configurações de atribuição de portadoras e gráficos ilustrativos dos valores de C/I por canal ao longo de toda a linha.

**Solução Inicial:** A solução inicial fornecida pela empresa encontra-se na Tabela 5.7. A Figura 5.6 apresenta a variação dos valores de C/I para cada canal ao longo dos intervalos de cobertura de cada site. Cada barra de cor corresponde a um canal, sendo a tonalidade utilizada indicativa do nível de C/I em cada ponto do percurso. O intervalo de cobertura considerado inclui ainda uma margem adicional de 200 metros para além da área de cobertura do site, de modo a contemplar eventos de *handover* mais deslocados da sua localização habitual prevista. Nestas barras, a cor verde indica zonas com valores de C/I superiores a 18 dB. A cor verde-claro representa valores entre 15 e 18 dB, o amarelo corresponde ao intervalo entre 12 e 15 dB, enquanto as áreas onde o requisito mínimo de 12 dB não é cumprido estão representadas a laranja (9 a 12 dB) e a vermelho (inferior a 9 dB). Como se observa, surgem problemas significativos nas zonas de *handover* entre Belém e Cruz Quebrada, entre Paço de Arcos e PK16, assim como no centro da área de cobertura de Paço de Arcos. Esta configuração garante uma probabilidade de cobertura de 93.14% com um nível de confiança de 95%.

**Tabela 5.7:** Planeamento de frequências inicial.

Camada	Canal	CSOD	ALCA	BELE	CRQB	PARC	PK_16 B	PK_16 A	PARD	SJOA	CASC
L1	BCCH1	3	15	13	19	12	18	14	4	8	1
L1	TCH1	7	17	11	16	7	5	9	16	6	3
L2	BCCH2	12	19	6	4	9	1	7	19	13	18

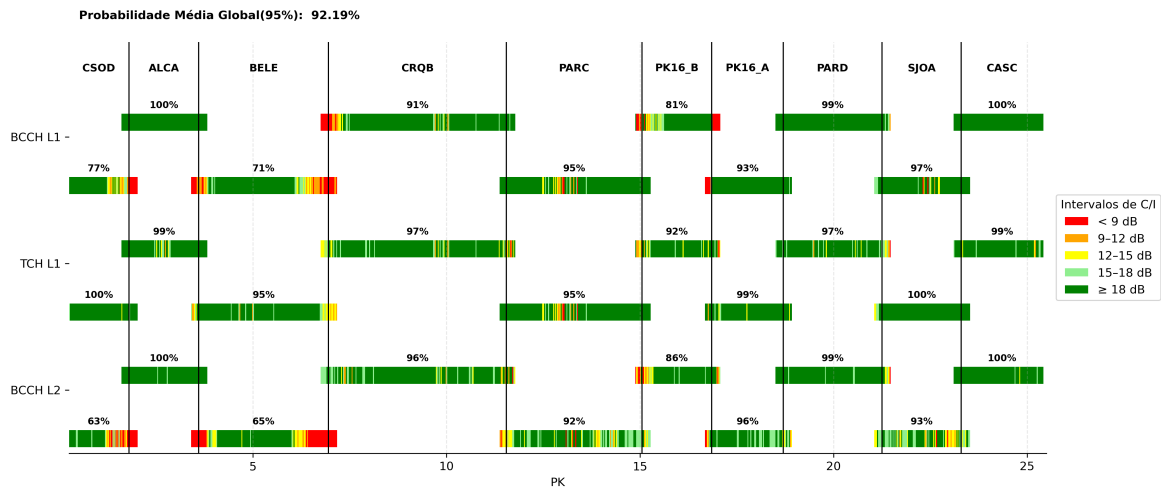


**Figura 5.6:** Gráfico de C/I para a configuração inicial.

**Fase 1 — Maximização da distância entre portadoras:** Aplicando a primeira fase do método de otimização, que visa a maximização da distância entre portadoras de sites adjacentes, obteve-se a configuração apresentada na Tabela 5.8 e Figura 5.7. Aqui verifica-se uma probabilidade de cobertura de 92.19%. Embora este valor represente uma ligeira diminuição face à solução inicial, observa-se uma melhoria nas zonas de handover mais críticas, nomeadamente nos *handovers* Paço de Arcos - PK16 B (PK 15) e Parede - São João (PK 21), onde o nível de C/I apresenta níveis mais elevados e maior estabilidade em comparação com a configuração anterior. Estas melhorias sugerem uma melhor separação de frequências entre sites adjacentes nessas regiões.

**Tabela 5.8:** Planeamento de frequências da fase 1.

Camada	Canal	CSOD	ALCA	BELE	CRQB	PARC	PK_16 B	PK_16 A	PARD	SJOA	CASC
L1	BCCH1	1	9	6	9	15	7	10	1	9	14
	TCH1	4	12	3	13	19	4	13	7	3	17
L2	BCCH2	6	14	1	11	17	2	15	5	11	19



**Figura 5.7:** Gráfico de C/I para a configuração da fase 1.

**Ajustes manuais:** Após uma análise visual, constatou-se que esta configuração resolve de forma eficaz várias zonas críticas, especialmente em áreas de *handovers* complexos. No entanto, em sites menos críticos, possivelmente menos destacados pela matriz de adjacências, observaram-se algumas irregularidades no comportamento do C/I, não habituais.

Deste modo, foram realizados pequenos ajustes manuais, corrigindo algumas situações, onde sites 2-adjacentes tinham as mesmas portadoras, que podiam estar a causar uma interferência maior do que o esperado. As alterações estão descritas na Tabela 5.9 e Figura 5.8, e resultaram num aumento de 2.91%, alcançando assim uma cobertura de 95.10%. Observam-se melhorias claras nos *handovers* Cais do Sodrê - Alcântara, Alcântara - Belém e Belém - Cruz Quebrada, correspondentes aos PK 1, 4 e 7, respetivamente, onde o C/I apresenta níveis consistentemente mais elevados face à configuração anterior.

**Tabela 5.9:** Planeamento de frequências da fase 1 com ajustes.

Camada	Canal	CSOD	ALCA	BELE	CRQB	PARC	PK_16 B	PK_16 A	PARD	SJOA	CASC
L1	BCCH1	18	9	5	9	15	6	10	1	9	14
	TCH1	4	12	3	13	19	4	13	7	3	17
L2	BCCH2	6	14	1	11	17	2	16	5	11	19

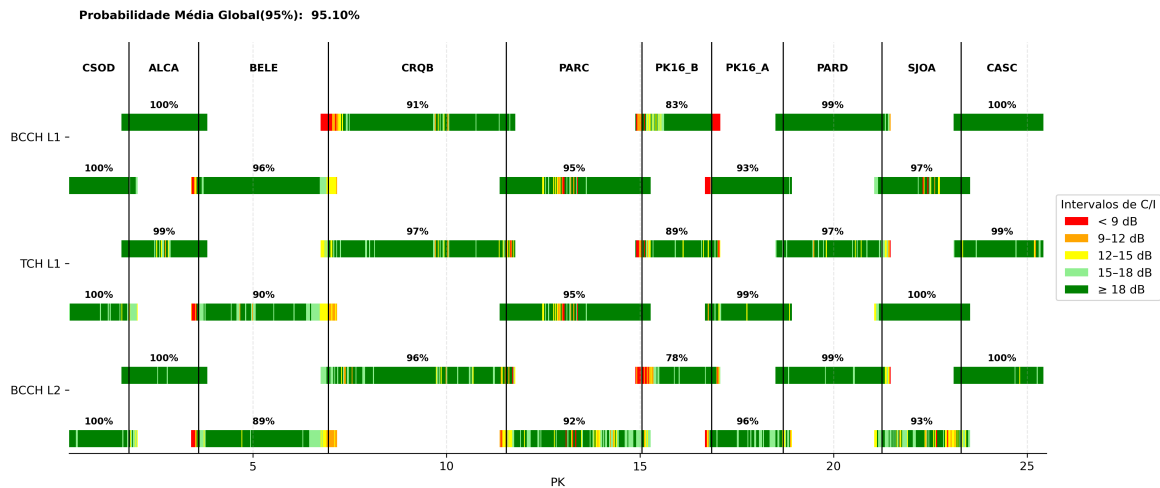


Figura 5.8: Gráfico de C/I para a configuração da fase 1 com ajustes.

**Fase 2 — Permutações locais:** Na fase final de otimização, foram realizadas permutações entre portadoras do mesmo site, assegurando que todas as alterações continuassem a respeitar as restrições aplicáveis, tanto internamente no site como em sites adjacentes. No total, foram aplicadas 8 permutações, resultando na configuração final representada na Tabela 5.10 e Figura 5.9. Esta configuração permitiu atingir uma cobertura de 96.00%. Observa-se que esta fase foi particularmente eficaz na redução da interferência dentro do mesmo site, resultando numa maior estabilidade dos níveis de C/I ao longo do respetivo intervalo de cobertura. Os valores mantêm-se mais consistentes e, em geral, superiores aos obtidos anteriormente. O caso do site “PK16 A” ilustra claramente este comportamento, apresentando uma distribuição de C/I mais uniforme e consistente, com valores superiores a 18 dB em todo o seu percurso de cobertura.

Tabela 5.10: Planeamento de frequências da fase 2.

Camada	Canal	CSOD	ALCA	BELE	CRQB	PARC	PK_16 B	PK_16 A	PARD	SJOA	CASC
L1	BCCH1	18	12	1	9	19	6	10	1	11	14
L1	TCH1	2	9	3	13	15	2	16	7	3	17
L2	BCCH2	6	14	5	11	17	4	13	5	9	19

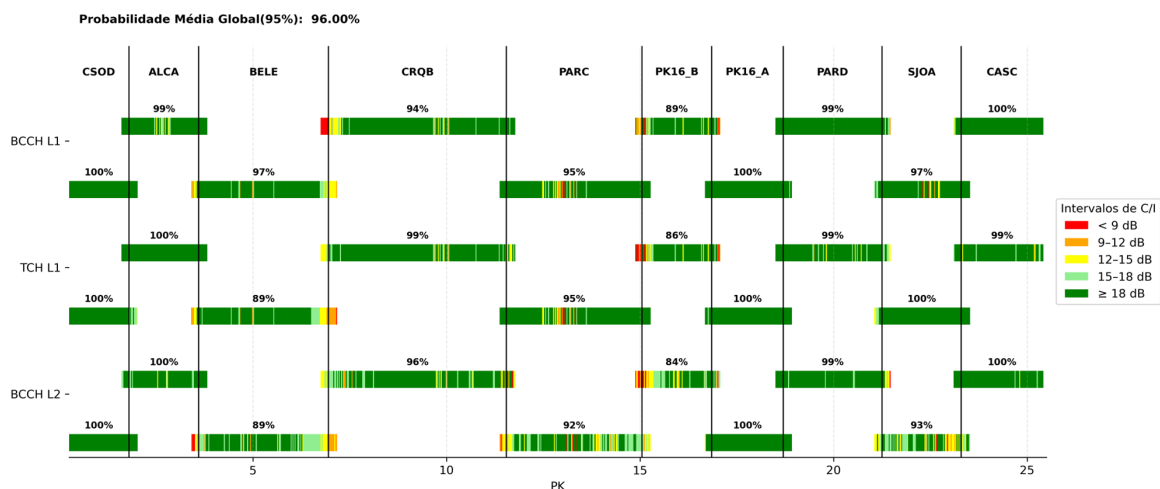


Figura 5.9: Gráfico de C/I para a configuração da fase 2.

**Relaxamento das restrições de portadoras:** Como até este ponto, não foi possível encontrar uma configuração capaz de garantir cobertura completa da linha com C/I adequado, usando as restrições iniciais de alocação de portadoras, optou-se por relaxar as restrições de portadoras, permitindo uma maior flexibilidade na atribuição dos canais e ampliando o espaço de soluções. Esta abordagem visa investigar se a eliminação das limitações artificiais poderia gerar configurações com cobertura mais ampla ou C/I melhorado.

As novas condições aplicadas foram:

- Dentro da mesma célula, deve ser garantida uma separação mínima de 2 portadoras;
- Dentro do mesmo site, deve ser garantida uma separação mínima de 2 portadoras;
- Entre células adjacentes, deve ser garantida:
  - Uma separação mínima de 2 portadoras entre canais BCCH;
  - Uma separação mínima de 2 portadoras entre canais TCH.

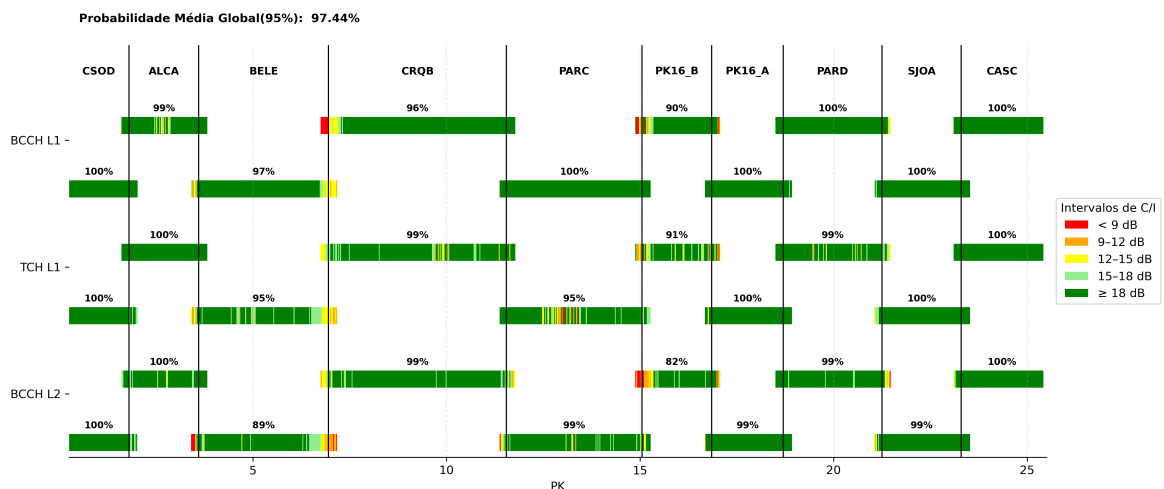
Com este relaxamento, foi possível melhorar ainda mais a probabilidade de cobertura, atingindo 97.44%, como se pode observar na Figura 5.10, o que representa um aumento de:

- 4.3% em relação à solução inicial fornecida pela empresa.
- 5.25% em relação à configuração da Fase 1;
- 2.34% em relação à configuração ajustada após a Fase 1.
- 1.44% em relação á configuração da Fase 2.

Aplicando o algoritmo de permutações com estas novas condições, sem as restrições de alocação de portadoras no mesmo site ou em sites vizinhos, e com um total de 13 permutações, obteve-se a configuração final representada na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11:** Planeamento de frequências final.

Camada	Canal	CSOD	ALCA	BELE	CRQB	PARC	PK_16 B	PK_16 A	PARD	SJOA	CASC
L1	BCCH1	18	12	1	9	19	6	10	1	11	17
	TCH1	2	9	3	11	17	4	13	5	9	19
L2	BCCH2	6	14	5	13	15	2	16	7	3	14



**Figura 5.10:** Gráfico de C/I para a configuração final.

Os resultados obtidos evidenciam que o relaxamento controlado das restrições permite explorar combinações de portadoras que reduzem interferências e aumentam a estabilidade

do C/I, especialmente em zonas de handover críticas. Este facto sugere que futuras iterações do algoritmo poderiam incluir estratégias adaptativas, que ajustem dinamicamente as restrições com base na criticidade do site ou da área de cobertura, permitindo uma otimização ainda mais eficiente e robusta.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido permitiu a conceção e implementação de duas abordagens complementares para a análise e otimização das comunicações GSM-R em ambiente ferroviário: o reconhecimento de padrões de desempenho e o planeamento de frequências.

Do ponto de vista prático, as soluções apresentadas oferecem à empresa uma base sólida para a análise e melhoria contínua da rede GSM-R, permitindo uma maior previsibilidade na operação, uma redução do risco de falhas de comunicação e um aumento global da qualidade de serviço ferroviário.

Além disso, a integração futura dos dois módulos — análise de padrões e planeamento de frequências — num sistema de monitorização unificado abre perspectivas promissoras. Tal integração permitiria não apenas detetar anomalias de forma automática, mas também ajustar dinamicamente os parâmetros de rede com base nos resultados da análise, potenciando uma gestão inteligente e proativa das comunicações ferroviárias.

#### 6.1.1 Reconhecimento de padrões na Linha do Algarve

Comparativamente ao trabalho anterior desenvolvido por Inês, este estudo apresentou melhorias significativas ao nível da complexidade computacional e do tempo de execução. A utilização de métodos estatísticos simples, como a medianas, o MAD, regressões lineares móveis e modas, revelou-se substancialmente mais eficiente do que abordagens baseadas em redes neuronais, reduzindo o tempo de processamento sem comprometer a qualidade dos resultados. Pelo contrário, verificou-se que estes métodos mais leves produziram resultados mais consistentes neste contexto específico.

A implementação do algoritmo de análise de padrões GSM-R permitiu automatizar e otimizar o processo de avaliação dos dados reportados pelos dispositivos embarcados nos comboios. As metodologias aplicadas demonstraram ser adequadas para identificar tendências, irregularidades e comportamentos repetitivos ao longo do percurso ferroviário, fornecendo resultados claros num tempo reduzido. No entanto, verificou-se que a representatividade da amostra é um fator crítico, a existência de um número suficiente de observações por segmento da linha e por viagem é essencial para aumentar a fiabilidade da deteção de padrões e para reduzir ambiguidades estatísticas.

Relativamente aos resultados do caso de estudo, observou-se que o segmento Lagos–Tunes apresenta níveis regulares e estáveis de sinal, com um comportamento consistente tanto no sentido ascendente como descendente. Já o segmento Tunes–Vila Real evidenciou um número significativamente superior de anomalias, tanto no nível de sinal como na qualidade do sinal, bem como múltiplas ocorrências de *handovers* falhados. Este comportamento mais irregular pode ser parcialmente justificado pela extensão do percurso,

dados que este último segmento possui aproximadamente 90 km, quase o dobro da distância do primeiro (cerca de 47 km), aumentando a probabilidade de falhas de cobertura e eventos operacionais críticos.

Adicionalmente, foi possível verificar a correlação entre o nível de sinal, a qualidade de sinal e os *handovers*. Nos casos em que a viagem permaneceu desligada da célula habitual durante períodos prolongados, observou-se que o nível de sinal diminuía, a qualidade de sinal apresentava valores mais elevados e ocorriam falhas de handover, gerando anomalias simultâneas nas três métricas avaliadas. Esta relação reforça a importância de considerar conjuntamente estas variáveis para caracterizar de forma completa a estabilidade operacional do sistema GSM-R ao longo do percurso.

### **6.1.2 Planeamento de frequências da Linha de Cascais**

No segundo caso de estudo, relativo ao planeamento da rede GSM-R na Linha de Cascais, verificou-se que o principal desafio estava relacionado com a proximidade da linha à água e à presença de baías ao longo do percurso. Estas condições provocam reflexões e amplificação do sinal de determinados sites em zonas onde interferem com a cobertura de outros sites, gerando interferência superior ao esperado e dificultando a obtenção de cobertura uniforme.

Para contornar estes problemas, recorreu-se à utilização combinada de dois métodos de otimização: o algoritmo *Max-Min*, baseado na maximização das distâncias entre portadoras em sites interferentes; e o método *greedy* baseado na maximização local da cobertura de  $C/I$ , conduziu a melhorias significativas na cobertura da rede, particularmente nas zonas críticas do traçado. Verificou-se ainda que, ao flexibilizar as restrições associadas às alocações iniciais de portadoras, é possível alcançar soluções com desempenho superior. Tal deve-se à influência da taxa de atividade do canal TCH no cálculo da probabilidade de cobertura de  $C/I$ , bem como à expansão do espaço de soluções viáveis. Com a configuração final obtida, foi alcançada uma percentagem de cobertura de 97.44% com 95% de confiança, representando um ganho de 4.30% em relação à solução inicial fornecida pela empresa. Estas melhorias representam um avanço relevante na qualidade das comunicações ferroviárias da Linha de Cascais, contribuindo para uma maior fiabilidade no sistema de comunicações da infraestrutura ferroviária.

Apesar destes ganhos, não foi possível encontrar uma configuração capaz de garantir 100% de cobertura com  $C/I$  superior a 12 dB, nomeadamente na zona de handover entre Belém e Cruz Quebrada. Nesta área, nenhuma configuração conseguiu cobrir totalmente a linha, situação que se deve principalmente a dois fatores: primeiro, a presença de três sinais interferentes com níveis de sinal semelhantes; segundo, ao nível de sinal médio nesta zona, que já se encontra abaixo de -80 dBm. Estes resultados sugerem que, para atingir cobertura completa nesta linha, será necessário um novo planeamento de rede, de modo a otimizar a distribuição de sinal e reduzir interferências nesta zona crítica.

## **6.2 Trabalhos futuros**

### **6.2.1 Reconhecimento de padrões**

No primeiro caso de estudo, o algoritmo de deteção de padrões baseia-se exclusivamente na localização ao longo da linha e na direção do comboio, sem considerar outras variáveis que possam influenciar os parâmetros de sinal. Uma Linha de desenvolvimento futura poderá passar pela integração de variáveis adicionais, como condições meteorológicas, ocupação da rede, horário de operação ou velocidade do comboio. A inclusão destas variáveis permitiria uma análise mais robusta e detalhada dos desvios ao padrão, contribuindo para uma deteção mais precisa de anomalias na qualidade da rede.

### 6.2.2 Planeamento de frequências

Na abordagem atual ao problema do plano de frequências, o algoritmo *Max-Min* considera apenas a maximização da separação entre portadoras de sites com potencial interferência, o que já se revelou eficaz. No entanto, esta formulação não está diretamente associada à maximização explícita do  $C/I$  acima de 12 dB, que constitui um objetivo mais diretamente ligado à qualidade de serviço. Como continuação deste trabalho, propõe-se a formulação matemática de um problema de otimização, cuja função objetivo seja precisamente a maximização da cobertura de  $C/I > 12$  dB, permitindo a aplicação de técnicas de *integer programming* ou outros *solvers* de otimização global. Esta reformulação poderá abrir caminho para soluções ótimas garantidas e mais generalizáveis a outros cenários ferroviários.



# Bibliografia

- [1] Raciús. SOLVIT – Innovation on Telecommunications. Disponível em: <https://www.racius.com/solvit-innovation-development-on-telecommunications-lda/>. Acesso em 27 de janeiro 2025.
- [2] SOLVIT. SOLVIT – Innovation on Telecommunications. Disponível em: <https://solvit.pt/>. Acesso em 27 de janeiro 2025.
- [3] HENRIQUES, Inês Figueiredo Leão. *Railway Signal Monitoring: An Algorithmic Approach for Improved Maintenance Strategies*. Relatório de Estágio de Mestrado em Matemática Aplicada à Indústria – Área de Especialização em Tratamento de Dados. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, outubro 2024.
- [4] PARDALOS, Panos M. Frequency Assignment Problem. In: *Handbook of Combinatorial Optimization. Supplement. Volume A*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] ERA – European Union Agency for Railways. Radio Communication – GSM-R. Disponível em: [https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms/radio-communication\\_en](https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms/radio-communication_en). Acesso em 25 de março de 2025.
- [6] Infraestruturas de Portugal. Diretório da Rede 2025. Disponível em: <https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/Diretorio%20da%20Rede%202025.pdf>. Acesso em 19 de setembro 2025.
- [7] LOST-STATS. Time Series / Rolling Regression. Disponível em: [https://lost-stats.github.io/Time\\_Series/Rolling\\_Regression.html](https://lost-stats.github.io/Time_Series/Rolling_Regression.html). Acesso em 25 de março de 2025.
- [8] Burden, R. L., Faires, J. D., & Burden, A. M. (2022). *Numerical Analysis* (10th ed.). Cengage Learning.
- [9] D. Freedman and P. Diaconis. On the histogram as a density estimator:  $L_2$  theory. *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, 57(4):453–476, 1981. doi: 10.1007/BF01025868.
- [10] CEPT. ECC Report 229 – Protection Criteria for GSM-R. European Communications Committee, 2013.
- [11] N. Metropolis and S. Ulam. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247):335–341, 1949. doi: 10.1080/01621459.1949.10483310.
- [12] 4G Americas. Spectrum Sharing – Adjacent Channel Interference concepts: ACIR, ACS, ACLR. White Paper, 2014. Disponível em: [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/4G\\_Americas\\_Spectrum\\_Sharing\\_-\\_FINAL\\_Oct\\_2014.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/4G_Americas_Spectrum_Sharing_-_FINAL_Oct_2014.pdf). Acesso em 20 de maio de 2025.

- [13] GAREY, Michael R.; JOHNSON, David S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman and Company, 1979.
- [14] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press, 2009.