



**PROPOSTA DE FRAMEWORK EMBASADO EM ALGORITMO
GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ACORDOS DE
COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA PARA O 5G**

VANESSA DE OLIVEIRA VASCONCELLOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**A FRAMEWORK PROPOSAL BASED ON GENETIC ALGORITHM
FOR OPTIMIZING INFRASTRUCTURE SHARING AGREEMENTS
FOR 5G**

**PROPOSTA DE FRAMEWORK EMBASADO EM ALGORITMO
GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ACORDOS DE
COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA NO CONTEXTO
DO 5G**

VANESSA DE OLIVEIRA VASCONCELLOS

ORIENTADOR: LEONARDO R. A. X. MENEZES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM-771/21

BRASÍLIA/DF: JUNHO - 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROPOSTA DE FRAMEWORK EMBASADO EM ALGORITMO
GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ACORDOS DE
COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA PARA O 5G**

VANESSA DE OLIVEIRA VASCONCELLOS

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

APROVADA POR:

**Leonardo R. A. X. Menezes
Presidente**

**Adoniran Judson de Barros Braga
Membro Interno**

**Robson Domingos Vieira
Membro Externo**

BRASÍLIA, 30 DE JUNHO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA VASCONCELLOS, VANESSA

Proposta de Framework Embasado em Algoritmo Genético para Otimização de Acordos de Compartilhamento de Infraestrutura para o 5G [Distrito Federal] 2021.

xvi, 119p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2021).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|---------------------------------------|--------------------|
| 1. Otimização de Acordos | 2. Aceleração 5G |
| 3. Compartilhamento de Infraestrutura | 4. Implantação 5G |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE OLIVEIRA VASCONCELLOS V. (2021). Proposta de Framework Embasado em Algoritmo Genético para Otimização de Acordos de Compartilhamento de Infraestrutura para o 5G . Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-771/21, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vanessa de Oliveira Vasconcellos

TÍTULO: Proposta de Framework Embasado em Algoritmo Genético para Otimização de Acordos de Compartilhamento de Infraestrutura para o 5G .

GRAU: Mestre ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Vanessa de Oliveira Vasconcellos

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

ACKNOWLEDGMENTS

Mãe, pai, obrigada pelo apoio durante toda a minha trajetória. Eu sou um reflexo de tudo o que vocês dois me ensinaram e agradeço imensamente pelos valores que levo comigo.

Jéssica e Marina, obrigada pelas revisões, pela torcida a cada submissão de artigo e pela comemoração com o azeite. Também agradeço por sempre me darem força e me ajudarem a manter a motivação nos dias mais difíceis. Sem vocês este trabalho não existiria.

Cássia e Elisabete, obrigada por ajudarem com todo o processo logístico do mestrado 1.0. Matrícula, inscrição e todas as burocracias enquanto eu estava no intercâmbio. Sem vocês duas eu não estaria sequer graduada. Obrigada, também, por sempre torcerem por mim.

Miryam e Thiago, vocês aturaram todo o meu nervosismo pré-projeto e comemoraram comigo o "sim" no mestrado 1.0. Meus parceiros de nerdice, que me lembram o quão legal é esse "mundo científico". Foi um prazer conhecer vocês, levarei a nossa amizade aonde for!

Amigos de SP, que se tornaram a minha família desde 2017, muito obrigada por me incentivarem... Vocês acompanharam bem de perto essa fase da minha vida e sabem que não foi fácil. Obrigada mesmo por não me deixarem desistir, ouvirem os meus desabafos e por entenderem a minha ausência. Paulinha Minas, Paulinha Rio, Chico, Vini, Mari (sim, SP) e May, vocês são demais!

Também, Artur e Haigo, os maiores presentes que a graduação na UnB me deu. Com perfis tão diferentes, mas que me completam de forma tão parecida... Obrigada por tornarem meus dias mais leves e também pelos puxões de orelha necessários.

Ao Professor Portela, que me fez gostar de telecom no temido 6º semestre de faculdade, foram muitas dúvidas esclarecidas, tivemos um artigo publicado, e finalmente um desafio superado. Por essa jornada que deveria ter sido apenas um complemento do primeiro mestrado, mas acabou se tornando um trabalho completamente novo e, que mesmo sendo fora da sua especialidade, você ter me apoiado e suportado do início a o fim, o meu muito obrigada!

Por fim, ao Professor Leonardo RAX por todo o apoio com as questões administrativas (infinitas) e à UnB pela infraestrutura e por todos os recursos que pude acessar ao longo dos anos de pesquisa. Sem isso não seria possível chegar até aqui

RESUMO

Título: Proposta de Framework Embasado em Algoritmo Genético para Otimização de Acordos de Compartilhamento de Infraestrutura no Contexto do 5G

Autor: Vanessa de Oliveira Vasconcellos

Orientador: Leonardo R. A. X. Menezes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, 30 de junho de 2021

Com o avanço da tecnologia 5G no Brasil, espera-se que novos acordos de compartilhamento de infraestrutura surjam entre as operadoras de telefonia, incluindo-se modelos de parceira com entidades terceiras que ofereçam infraestrutura passiva. O compartilhamento traz inúmeros benefícios, mas é um modelo complexo, que a médio e longo prazo pode gerar efeitos na competitividade do mercado em que se inserem. Neste sentido, esse trabalho propõe um framework de avaliação de acordos de compartilhamento embasado em algoritmo genético, que vai desde a etapa de dimensionamento de rede, passando pela otimização de custos entre os parceiros envolvidos, concluindo-se a análise com a avaliação dos efeitos de mercado trazidos pelo acordo ótimo. Constrói-se uma ferramenta em código aberto para aplicação do framework, trazendo-se seus resultados para três tipos de cenários brasileiros: uma rede urbana densa, em São Paulo, uma rede urbana em Brasília, e uma rede rural em Goiás.

Palavras-chave: Implantação do 5G, Compartilhamento de Infraestrutura, Framework em Código Aberto, Avaliação de Competitividade, Avaliação Técnico-econômica

ABSTRACT

Title: A Framework Proposal Based on Genetic Algorithm for Optimizing Infrastructure Sharing Agreements for 5G

Author: Vanessa de Oliveira Vasconcellos

Supervisor: Leonardo R. A. X. Menezes

Graduate Program in Electrical Engineering

Brasília, June 30th, 2021

With the advance of 5G in Brazil, new infrastructure sharing agreements are expected among operators, including partnership models with third party agents offering passive infrastructure. Infrastructure sharing is a beneficial agreements, however on the mid to long term might generate impacts in market competitiveness where they are inserted. In this sense, this work proposes a framework for assessment of infrastructure sharing agreements, which begins at the radio network dimensioning phase, passing by the optimization of costs among partners, concluding the analysis at an evaluation of the effects of the optimal calculated deal on the market. A open-source tool for application of the framework is built, and its results are evaluated for three types of brazilian scenarios: a dense urban network, in São Paulo city, a urban network in Brasília, and a rural network in Goiás state.

Keywords: 5G roll out, Infrastructure Sharing, Open-source framework, competition assessment, technoeconomical assessment

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3	OBJETIVO	6
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	7
2	COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA	8
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	8
2.2	COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA PASSIVA	10
2.2.1	COMPARTILHAMENTO DE <i>Sites</i>	10
2.2.2	COMPARTILHAMENTO DE TORRES/MASTROS	10
2.3	COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA ATIVA	11
2.3.1	COMPARTILHAMENTO DA REDE DE ACESSO DE RÁDIO (RAN)	11
2.3.2	COMPARTILHAMENTO <i>Core</i>	11
2.3.3	ROAMING	12
2.4	ASPECTOS GERAIS DO COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA	12
2.4.1	ASPECTO TÉCNICO	12
2.4.2	ASPECTO REGULATÓRIO	14
2.4.3	ASPECTO ECONÔMICO	18
3	PANORAMA REGULATÓRIO BRASILEIRO: 5G NO BRASIL E COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA	21
3.1	PANORAMA 5G NO BRASIL	21
3.2	ANATEL E O COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA	23
3.3	COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA E COMPETIÇÃO	26
3.4	PARTICIPAÇÃO DO OPERADOR NEUTRO NO MERCADO 5G	28
4	MODELAGEM DO PROBLEMA	29
4.1	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE ACORDOS DE COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA	29
4.2	COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA COM OPERADOR NEUTRO	40
5	OTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS MULTI-OBJETIVO	43
5.1	CONCEITOS BÁSICOS	43
5.1.1	PROBLEMAS MULTI-OBJETIVO	43
5.1.2	FRONTEIRA DE PARETO E ESPAÇO DE SOLUÇÕES	44

5.2 ANÁLISE DAS TÉCNICAS DE SOLUÇÃO MOO	45
5.2.1 TEORIA DOS JOGOS	45
5.2.2 OTIMIZAÇÃO POR METAHEURÍSTICAS	46
5.2.2.1 OTIMIZAÇÃO POR NUVEM DE PARTÍCULAS - <i>Particle Swarm Optimization Method</i> (PMSO)	47
5.2.2.2 RECOZIMENTO SIMULADO - <i>Simulated Annealing</i> (SA)	48
5.2.2.3 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIO - <i>Evolutionary Algorithms</i> (EA)	48
5.3 NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM (NSGA) - II	50
5.3.1 ORDENAÇÃO RÁPIDA DE SOLUÇÕES NÃO DOMINADAS	50
5.3.2 PRESERVAÇÃO DA DIVERSIDADE	51
5.3.2.1 ESTIMATIVA DE DENSIDADE	51
5.3.2.2 OPERADOR DE COMPARAÇÃO DE MULTIDÃO	52
5.3.3 LAÇO PRINCIPAL DO NSGA-II	53
6 PROPOSTA DE <i>FRAMEWORK</i> PARA OTIMIZAÇÃO DE ACORDOS DE COMPARTILHAMENTO	55
6.1 INTRODUÇÃO	55
6.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	56
6.3 APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE <i>Framework</i>	57
6.3.1 BLOCO A - DADOS DE ENTRADA	58
6.3.2 BLOCOS B E D - DIMENSIONAMENTO DE INFRAESTRUTURA E INTERPOLAÇÃO	60
6.3.3 OTIMIZAÇÃO DE COMPARTILHAMENTO DE SITES	63
7 RESULTADOS	65
7.1 DADOS COMUNS A TODAS AS SIMULAÇÕES	66
7.2 RESULTADOS PARA ESTUDO DE CASO DE REFERÊNCIA	68
7.2.1 DADOS PARA AS REDES URBANAS ULTRA-DENSAS	68
7.2.2 DADOS PARA AS REDES RURAIS	72
7.2.3 RESULTADOS PARA O ESTUDO DE CASO DE REFERÊNCIA	74
7.2.3.1 CASO 1: COMPARTILHAMENTO DE TORRES/MASTROS - REDES ULTRADENSAS EQUILIBRADAS E PREÇO LIVRE	74
7.2.3.2 CASO 2 - COMPARTILHAMENTO DE MASTRO/TORRES - REDES RURAIS EQUILIBRADAS PREÇO LIVRE	81
7.2.3.3 CASO 3: COMPARTILHAMENTO DE SITES - REDES ULTRADENSAS MERCADO DESBALANCEADO	85
7.2.3.4 COMPARTILHAMENTO DE TORRES/MASTROS - REDES RURAIS MERCADO DESBALANCEADO	90
7.3 CASOS DE ESTUDO DE MERCADO	97
7.3.1 RESULTADOS - VILA OLÍMPIA SÃO PAULO	97

<i>SUMÁRIO</i>	x
7.3.1.1 ANÁLISE DE RESULTADOS	99
7.3.2 RESULTADOS - ASA SUL BRASÍLIA	100
7.3.2.1 DADOS REDES URBANAS.....	100
7.3.2.2 RESULTADOS PARA O COMPARTILHAMENTO DE TORRES/- MASTROS	104
7.3.3 RESULTADOS - RIO VERDE GOIÁS	107
7.3.3.1 ANÁLISE DE RESULTADOS	110
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	111
8.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	112
REFERÊNCIAS.....	112

LISTA DE FIGURAS

1.1	Expectativa de Desempenho das Redes 5G Adaptado de [1]. * 100 Mbps/usuário ** ou até 20 Gbps	2
1.2	Ultra densificação da Rede [2]	3
1.3	Distribuição da Participação de Mercado das Operadoras A, B e C	4
4.1	Ilustração do Cenário de Interesse de Cobertura entre Operadoras	30
4.2	Representação do conjunto S de combinações possíveis de acordos de compartilhamento entre duas operadoras	30
4.3	Cenário de Simulação para Cálculo de Eficiência Espectral	31
4.4	Probabilidade de Transição entre operadoras	37
5.1	Representação de uma Fronteira de Pareto de Objetivos de Maximização Conflitantes.....	45
5.2	Ilustração da distância de multidão. Adaptado de [3].....	52
5.3	Ilustração do Laço Principal do NSGA-II.....	54
6.1	Framework de Otimização de Acordos de Compartilhamento	58
6.2	Ilustração do Simulador de Monte Carlo, Adaptado de [4]	60
6.3	Dimensões para estimar a perda de percurso.....	62
7.1	Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes 3.5 GHz MIMO	70
7.2	Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes 26 GHz SISO	71
7.3	Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes Urbanas em 700 MHz SISO.....	73
7.4	Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio	74
7.5	Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A Vermelho:Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D Cinza: Fronteira de Pareto.....	75
7.6	Comportamento da Migração de Usuários para o Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A Vermelho:Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D Cinza: Fronteira de Pareto.....	75
7.7	Descrição do Problema de Maximização do Lucro Mínimo	77
7.8	Descrição do Cenário de Maximização da Taxa de Transmissão para <i>Market Share</i> Idêntico entre Operadoras.....	78

7.9	Descrição do Problema de Maximização de Taxa de Transmissão Média pela Óptica do Custo da Infraestrutura	79
7.10	Descrição do Problema de Maximização de Taxa de Transmissão Média pela Óptica da Taxa de Transmissão	79
7.11	Taxa de Transmissão Média/Operadora para o Cenário do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio.....	80
7.12	Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio	82
7.13	Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A Vermelho:Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D Cinza: Fronteira de Pareto.....	82
7.14	Variação de Usuários para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio	83
7.15	Taxa de Transmissão Média para o Estudo de Caso de Referência de Rede Rural Equilibrada	85
7.16	Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço	86
7.17	Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço. Legenda. Roxo:Operadora A Vermelho:Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D Cinza: Fronteira de Pareto.....	86
7.18	Variação de Usuários para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço	87
7.19	Taxa de Transmissão para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço	89
7.20	Comparativo de Lucro entre os cenários UDN Equilibrado e em Desbalanço. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o lucro após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em roda é o desvio padrão com compartilhamento	89
7.21	Comparativo de Custos entre os cenários UDN Equilibrado e em Desbalanço. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o custo (CAPEX ou OPEX) após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento.....	90
7.22	Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado Desbalanceado	91

7.23	Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado Desbalanceado. Legenda: Roxo: Operadora A Vermelho: Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D	91
7.24	Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo: Operadora A Vermelho: Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D	92
7.25	Taxa de Transmissão Média para Redes Rurais em Desbalanço com Preço Livre.....	93
7.26	Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Livre. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o lucro após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento.....	94
7.27	Comparativo de Custos entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Livre. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o custo (CAPEX ou OPEX) após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento	94
7.28	Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Equilíbrio para Preço Livre e para Preço Linear	95
7.29	Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Desbalanço para Preço Livre e para Preço Linear.....	96
7.30	Comparativo de Custos entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Linear	96
7.31	Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Região da Vila Olímpia em São Paulo	98
7.32	Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência Rural em um Mercado Desbalanceado com Preço Linear. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho: Operadora Claro Azul: TIM Laranja: Oi.....	98
7.33	Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo:Vivo Vermelho: Claro Azul: Tim Laranja: Oi.....	99
7.34	Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes Urbanas em 3.5 GHz SISO102	
7.35	Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes Urbanas em 26 GHz GHz	103
7.36	Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas na Asa Sul em Brasília	105

- 7.37 Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas na Asa Sul em Brasília. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho: Operadora Claro Azul: TIM Laranja: Oi 105
- 7.38 Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo:Vivo Vermelho: Claro Azul: Tim Laranja: Oi 106
- 7.39 Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Rurais na cidade de Rio Verde em Goiás 108
- 7.40 Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Rurais na cidade de Rio Verde em Goiás. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho: Operadora Claro Azul: TIM Laranja: Oi 109
- 7.41 Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo:Vivo Vermelho: Claro Azul: Tim Laranja: Oi 109

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela Indicativa de Custos Compartilhados por Modalidade de Acordo.....	10
2.2	Diagrama Orientativo para Seleção de Modelos de Compartilhamento	14
3.1	Proposta de Faixas de Frequência para Leilão 5G [5]	22
4.1	Tabela de Variáveis.....	42
6.1	Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	59
6.2	Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	59
6.3	Dados do Tipo de Compartilhamento	59
6.4	Dados das Operadoras.....	59
7.1	Tabela de Estudos de Caso de Referência que Serão Analisados.....	65
7.2	Custos de Infraestrutura [4].....	67
7.3	Tabela Indicativa de Custos Compartilhados por Modalidade de Acordo.....	67
7.4	Dados de Preço (R\$/Mbps) e Reputação das Operadoras [6], [7]	68
7.5	Dados da Infraestrutura para Simulação da Relação ISD vs Capacidade de Redes Ultradensas [4]	69
7.6	Dados do Local Utilizados para Simulação das Redes Ultradensas.....	69
7.7	Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	72
7.8	Dados do Local Utilizados para Simulação das Redes Ultradensas.....	73
7.9	Lista do Número de ERBs/Solução para ERBs do tipo micro	76
7.10	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referên- cia de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio	76
7.11	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Re- ferência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio	77
7.12	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referên- cia de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio	83
7.13	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Re- ferência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio	83
7.14	Lista do Número de ERBs/Solução para ERBs do tipo micro.....	84
7.15	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referên- cia de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço	87
7.16	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Re- ferência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço	87
7.17	Lista do Número de ERBs/Solução para ERBs do tipo micro.....	88

7.18	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Desbalanço	92
7.19	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio	92
7.20	Coalizões para Redes Rurais com Mercado em Desbalanço.....	93
7.21	Tabela de <i>MarketShare</i> no Estudo de Caso de Mercado da Vila Olímpia, São Paulo	97
7.22	Desempenho Financeiro para o do Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Vila Olímpia, São Paulo.....	99
7.23	Custos de CAPEX e OPEX para o do Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Vila Olímpia, São Paulo.....	99
7.24	Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	101
7.25	Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	104
7.26	Dados da Operadora que Devem ser Informados pelo Usuário do <i>Framework</i> .	104
7.27	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas em um Mercado em Desbalanço com Preço Linear	106
7.28	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas - Asa Sul Brasília	106
7.29	Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do <i>Framework</i>	107
7.30	Dados da Operadora que Devem ser Informados pelo Usuário do <i>Framework</i> .	108
7.31	Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas em um Mercado em Desbalanço com Preço Linear	110
7.32	Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas - Asa Sul Brasília	110

ACRÔNIMOS

1G	1ª geração de redes móveis
2G	2ª geração de redes móveis
3G	3ª geração de redes móveis
4G	4ª geração de redes móveis
5G	5ª geração de redes móveis
AC	<i>Alternate Current</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CI	Compartilhamento de Infraestrutura
DC	<i>Direct current</i>
eMBB	<i>enhanced mobile broad band</i>
ERB	Estação Rádio Base
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis
GSMA	GSM Association
HLR	<i>Home Location Register</i>
ICT	Infraestrutura comunicação e informação
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISD	Distância entre Sites
LTE	<i>Long-term Evolution</i>
MCOM	Ministério das Comunicações
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i>
MOCN	Rede Core Ativa Móvel
MORAN	Rede de Rádio Ativa Móvel
MS	<i>Market Share</i>
NH	<i>Neutral Host</i>
NSGA-II	<i>Non-sorting genetic algorithm II</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PGMC	Plano Geral de Metas de Comunicação
PMS	Poder de Mercado Significativo
QoS	Qualidade de Serviço
RAN	Rede de Rádio Ativa
UDN	Redes ultra-densas
URLLC	<i>Ultra reliable low latency communications</i>
VAS	Sistema de Valor Agregado

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A tecnologia de quinta geração (5G) surge como uma revolução dos sistemas de comunicações móveis celulares. Quebrando o paradigma evolutivo da primeira (1G) à quarta geração (4G), que manteve o foco na comunicação entre pessoas e na melhoria da qualidade de serviço (QoS), o 5G também procura atender aos requisitos da comunicação homem-máquina e máquina-máquina. As soluções propostas são divididas em três categorias: (IoT) massiva (*massive machine type communication* - mMTC), controle e missão crítica (*ultra reliable low latency communications* - URLLC), e banda larga móvel avançada (*enhanced mobile broadband* - eMBB) [8], como mostra a Figura 1.1.

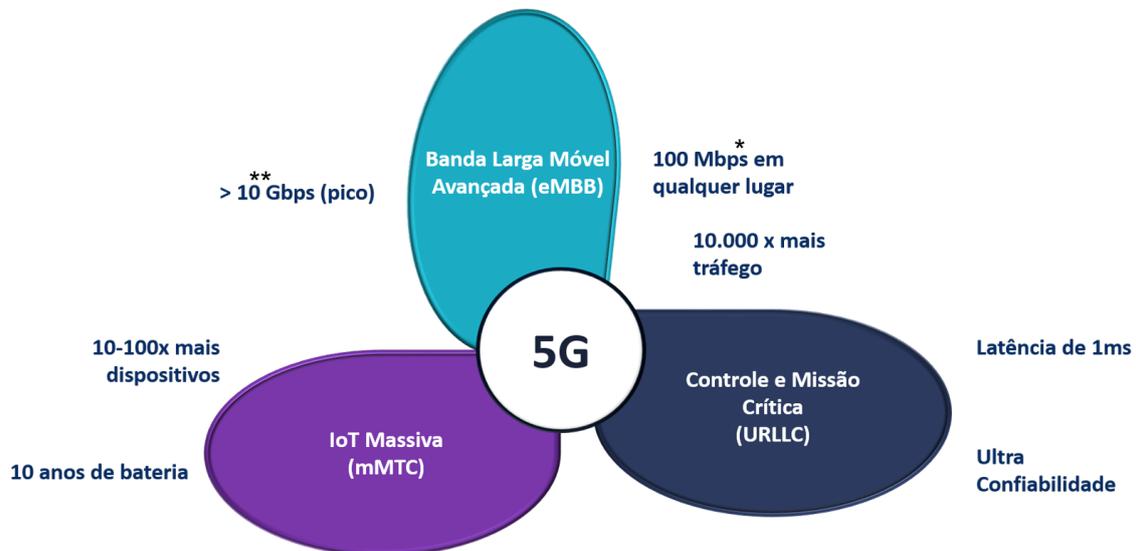


Figura 1.1 – Expectativa de Desempenho das Redes 5G Adaptado de [1]. * 100 Mbps/usuário | ** ou até 20 Gbps

Para que essa tecnologia alcance a todos, é necessário que se construa uma infraestrutura de telecomunicações que seja acessível e confiável e que os países que desejam implantá-la adotem medidas que incentivem as operadoras a estender essa tecnologia a diferentes regiões, inclusive os locais mais isolados, reduzindo-se assim eventuais disparidades entre a qualidade da tecnologia de comunicação disponível de região para região.

No Brasil, o edital de licitação de frequências para construção de redes em tecnologia

5G, elaborado pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) [5], propõe que, para que uma entidade obtenha a concessão de uso do espectro em frequências sub-6GHz, seja necessária uma contrapartida de cobertura a municípios e estradas que hoje não possuem tecnologia de quarta geração (4G).

Essa medida é essencial para o desenvolvimento nacional, mas por outro lado, representa um grande desafio em termos da sustentabilidade econômica do projeto. As regiões que hoje não possuem 4G são regiões de baixa densidade populacional, que por muitas vezes não representam atratividade para implantação de redes de comunicação pela óptica financeira.

Ainda, a necessidade de expansão de infraestrutura pode se apresentar como um grande desafio à disseminação mais acelerada do 5G [9], não somente nas localidades mais isoladas, que costumam ser regiões rurais, mas também no cenário urbano. Nessas regiões, espera-se um alto desenvolvimento das aplicações categorizadas como de banda larga móvel avançada. Uma solução possível para permiti-las é a ultra densificação da rede (UDN), com a criação de microcélulas em frequências mais altas do espectro (Figura 1.2) para criação de redes de mais capacidade [10].

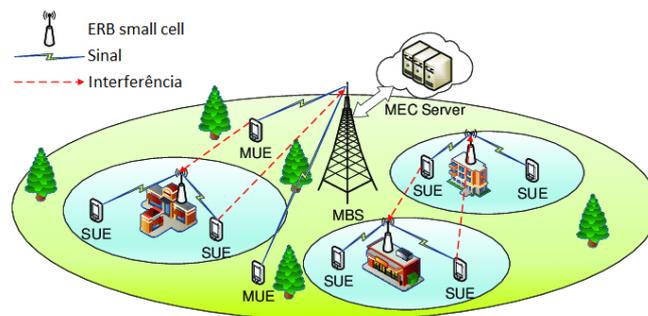


Figura 1.2 – Ultra densificação da Rede [2]

O emprego de estratégias de compartilhamento de infraestrutura (CI) como forma de reduzir os custos de implantação de redes móveis [11] neste tipo de cenário pode ser interessante. Na China, por exemplo, o Estado criou condições para possibilitar o compartilhamento de recursos entre operadoras como forma de aceleração da implantação da nova tecnologia [12].

No Brasil, a prática de compartilhamento de infraestrutura já é adotada há algum tempo, existindo inclusive situações em que é obrigatória [13]. No âmbito do 5G, a Anatel recomenda que essa estratégia seja novamente adotada [14], ficando a critério das operadoras quando optar por esta tática.

Com a espera de uma ampliação do movimento de compartilhamento de infraestrutura, a proposta deste trabalho é desenvolver um *framework* orientativo, tanto para as operadoras quanto para a agência regulatória, a respeito do compartilhamento de infraestrutura. Após revisão bibliográfica, notou-se uma lacuna neste tema em relação a ferramentas que auxiliem

as partes envolvidas em um acordo de compartilhamento a definirem a estratégia ótima para o uso mútuo de seus recursos de rede. Este trabalho busca superar justamente esta lacuna, que será detalhada na próxima seção.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Compartilhar infraestrutura otimiza o uso de recursos financeiros à medida em que dispensa uma operadora de investir sozinha na construção de uma rede de comunicação, inclusive em regiões mais distantes, reduzindo, assim, os seus custos de instalação, manutenção e operação [15], permitindo a destinação do valor economizado a outras finalidades. Apesar dos benefícios, trata-se de um modelo de negócios que requer um planejamento cauteloso, que, se não for definido de forma adequada, pode acabar gerando efeitos indesejados.

Primeiramente, acordos de compartilhamento de infraestrutura podem afetar a competitividade entre operadoras na região em que são praticados. Para exemplificar esta situação, considera-se um cenário em que três operadoras (A, B e C) oferecem seus serviços, mas possuem uma participação de mercado, isto é, uma quantidade de assinantes, não equilibrada, como mostra a Figura 1.3.

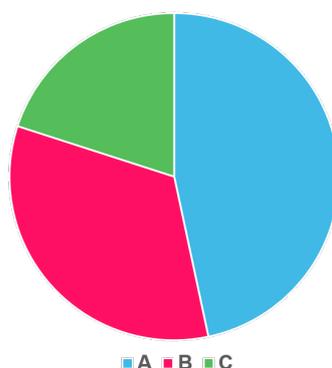


Figura 1.3 – Distribuição da Participação de Mercado das Operadoras A, B e C

Suponha agora que as operadoras A e B decidam expandir suas infraestruturas por meio de um acordo de compartilhamento, mantendo C fora desta negociação. Considere ainda que a operadora C também precise ampliar a sua rede para atender à demanda de seus usuários. Neste cenário, A e B podem ter menos custos com a expansão de sua infraestrutura, podendo, futuramente, oferecer os mesmos serviços que a operadora C a preços mais baixos.

Neste contexto, a médio prazo, provavelmente os clientes da operadora C acabarão por migrar suas assinaturas para as operadoras A e B, e C será extinta desse mercado. Como consequência secundária, pela redução da competitividade, também existe a possibilidade de que A e B reduzam a qualidade de seus serviços, tendo em vista a falta de incentivo

competitivo em mantê-la em um nível elevado.

Uma entidade regulatória, ao receber a solicitação de autorização para compartilhamento entre A e B, vai fazer justamente uma análise dos riscos envolvidos neste acordo comercial. Desta forma, é interessante que esteja à disposição do regulador uma ferramenta que torne esta avaliação mais prática e os resultados desta mais confiáveis.

Por outro lado, não é apenas a questão da competitividade que pode trazer impeditivos ao compartilhamento de infraestrutura. Duas operadoras C e D podem ter interesse em compartilhar infraestrutura para reduzir custos, porém, a distribuição geográfica de seus usuários pode não favorecer este acordo. Neste caso, talvez, a figura de um provedor de infraestrutura neutro (NH - *neutral host*) possa ser a melhor alternativa para trazer as vantagens almejadas por estas operadoras. Existe ainda a possibilidade de que o envolvimento de uma terceira operadora E, cuja rede seja mais diluída na região em estudo, traga as mesmas vantagens oferecidas pelo NH às operadoras C e D, ou até mesmo mais vantagens. Neste caso, um *framework* orientativo poderia auxiliar C e D em seu processo de decisão.

As situações hipotéticas apresentadas fornecem um bom panorama dos obstáculos técnico-comerciais que podem ser observados ao se optar por um acordo de infraestrutura. Elas apontam para três necessidades distintas: um planejamento da rede compartilhada, considerando a mesma tecnologia sendo aplicada por todas elas, para que seja possível compará-la a rede resultante do planejamento individual e constatar se há realmente a vantagem esperada em realizar o acordo de compartilhamento; na existência de mais de uma possibilidade de acordo de compartilhamento, um otimizador de acordos, que garanta que a opção escolhida seja a que traz mais vantagens do ponto de vista global, em comparação a todas as possibilidades disponíveis; e, por fim, um avaliador dos efeitos do CI no mercado em análise.

O Otimizador de acordos deverá buscar dois objetivos simultaneamente: maximizar o lucro da operadora que obtém o menor desempenho financeiro em relação às demais e maximizar a taxa de transmissão média oferecida pelas operadoras aos seus usuários, como será detalhado mais adiante neste trabalho. O recurso utilizado para a otimização multi-objetivo será o algoritmo evolutivo NSGA-II (*Non-sorting genetic algorithm-II*), algo inédito neste contexto de aplicação.

Neste trabalho, propõe-se um *framework* que cubra estas três necessidades de forma modular e integrada. Até o momento de escrita deste trabalho, não foi encontrada na literatura uma ferramenta em código aberto capaz de cobrir estes três pontos e é justamente uma ferramenta deste tipo que será desenvolvida aqui.

1.3 OBJETIVO

À luz da importância do compartilhamento de infraestrutura e das lacunas identificadas na otimização deste processo, este trabalho tem por objetivo a construção de um *framework* fim-a-fim do compartilhamento de infraestrutura, para que seja possível avaliar este modelo comercial desde a fase de planejamento da rede de comunicação, passando pela otimização dos acordos de CI disponíveis, chegando, por fim, a análise dos efeitos desta prática no mercado.

Este *framework* é transformado em um *software* em código aberto (Python) com o objetivo de torná-lo acessível a qualquer interessado. Os benefícios dessa abordagem são inúmeros, podendo um recurso como este ser utilizado não somente pelas operadoras para decidir se participam ou não de um acordo de compartilhamento de infraestrutura, mas também pelas entidades regulatórias, para responderem se autorizam ou não este tipo de acordo entre partes solicitantes.

Neste *framework*, tanto modelos entre operadoras quanto modelos de parceira com *neutral hosts* podem ser avaliados.

As principais contribuições do trabalho são resumidas a seguir:

1. Modelagem fim a fim do problema de compartilhamento de infraestrutura, associada a uma ferramenta unificada que permite desde o planejamento de rede até os efeitos de mercado do acordo de compartilhamento, algo inédito pelo conhecimento da autora;
2. Criação de uma *framework* acessível, que pode ser utilizada no meio acadêmico, pelas operadoras, pela entidade regulatória;
3. Uso de algoritmos evolutivos para análise da otimização de acordos de compartilhamento como um problema multi-objetivo. Em outros trabalhos, cada problema vinha sendo tratado de maneira individual.
4. Inclusão de uma metodologia para avaliação dos impactos na competitividade

Entende-se o compartilhamento de infraestrutura como facilitador da implantação do 5G no país. É nessa esteira que esse trabalho se propõe a analisar seus efeitos nas diversas regiões do Brasil, demonstrando-se o impacto de se utilizar deste recurso na aceleração da implementação da tecnologia de quinta geração em âmbito nacional. Neste sentido, os resultados da aplicação do *framework* serão apresentados neste formato: comparando regiões do Brasil selecionadas, de forma a orientar as melhores estratégias por localidade.

1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

O trabalho é desenvolvido conforme a seguir: o Capítulo 2 apresenta os diferentes modelos de compartilhamento e seus aspectos técnicos, regulatórios e econômicos; o Capítulo 3 traz o panorama de compartilhamento no âmbito do 5G no Brasil e aspectos do mercado nacional, com suas regras e modelos; O Capítulo 4 traz a modelagem para o problema descrito no Capítulo 1. O capítulo 5 descreve os algoritmos de otimização utilizados no *framework*. O capítulo 6 descreve o *framework* de otimização desenvolvido neste trabalho e o capítulo 7 os resultados de sua aplicação. O capítulo 8 encerra o conteúdo com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A CISCO apontou em [16] que, em 2023, com a tecnologia 5G, a velocidade esperada será 13 vezes maior do que o desempenho observado em 2018. Como solução para esse cenário, a GSMA apresenta em [10] a densificação de estações rádio-base, por meio da aplicação de *small cells*, para aumentar a capacidade das redes móveis tornando-as capazes de absorver esse crescimento. Esta estratégia é bastante conhecida e nesse contexto, pode surgir um efeito de limitação de espaço físico para a instalação da infraestrutura necessária para construção dessas redes, ainda que as antenas tenham tamanho reduzido com o aumento da frequência. Este desafio existe tanto para ambientes externos, em que torres e mastros podem estar completamente ocupados, e internos, como edifícios, em que replicar uma infraestrutura de telecomunicações já é um obstáculo, mesmo fora do âmbito em discussão [17].

Além da limitação de espaço, ainda que potencialmente menos custosa que uma arquitetura composta apenas por *macrocells*, o uso de células de tamanho reduzido com o objetivo de aumentar capacidade torna a rede 5G mais cara em comparação à rede 4G, por exemplo. Ainda, deve-se levar em consideração a necessidade de ampliação de um outro recurso para tornar a rede apta a absorver o tráfego de dados previsto para o futuro, sendo esse o *backhaul*. Observa-se então, não somente a questão da limitação física de espaço, mas também um obstáculo financeiro que pode atrasar a implantação de toda a infraestrutura necessária para cobrir a demanda por dados esperada nos próximos anos [17].

Além da questão ligada a capacidade, com o intuito de uniformizar o acesso às redes móveis, em diversos processos de concessão de uso de espectro para construção de redes 5G, foram atrelados à liberação de licenças, requisitos de cobertura de regiões mais remotas [18], geralmente caracterizadas por uma distância relativa aos grandes centros urbanos e baixa densidade populacional, cenário pouco atrativo para as operadoras pelo menos até o 4G, devido a uma baixa relação de custo-benefício [19] entre investimento em instalação de infraestrutura e receita obtida com a provisão de serviços nessas localidades. Buscando superar os obstáculos de investimento e de disponibilidade de espaço físico para implantação da infraestrutura 5G, diversos países [12] vem-se utilizando de uma estratégia já consolidada no mercado de telecomunicações para expandir as suas redes: o compartilhamento de infraestrutura.

O compartilhamento de infraestrutura se encaixa perfeitamente no contexto descrito e existem diferentes modelos desta estratégia que podem ser utilizados. O uso, por exemplo, de uma infraestrutura passiva comum (compartilhamento passivo [17]), ou seja, estruturas civis e componentes não eletrônicos, reduziria a probabilidade de indisponibilidade de espaço em um centro urbano.

Ao mesmo tempo, ao se tratar da expansão de redes móveis às regiões mais remotas, uma parcela bastante onerosa do investimento nessas redes é justamente a infraestrutura civil. Se uma operadora opta por expandir sozinha essa infraestrutura até essas regiões, pode inviabilizar o atendimento à uma comunidade que, apesar de apresentar demanda considerável por uma rede de banda larga, não ofereceria receita suficiente para cobrir os custos desta operadora de levar a rede à sua região. Se essa mesma rede fosse compartilhada entre mais de uma operadora, existiriam mais chances de se tornar a provisão de serviços rentável neste local.

Independentemente do contexto, se das regiões urbanas ou dos locais mais isolados, usualmente zonas rurais, o compartilhamento de infraestrutura passivo pode ser benéfico [20], mas, se houver interesse das operadoras, o compartilhamento da infraestrutura ativa também pode ser uma estratégia que pode trazer vantagens ainda maiores do ponto de vista financeiro. Por muitas vezes, implica o compartilhamento da operação das redes e algumas vezes até mesmo o uso mútuo de uma faixa do espectro e, por esses motivos, essa modalidade pode ter restrições regulatórias [17], sendo inclusive proibida em alguns países.

No caso brasileiro, tanto o cenário de regiões urbanas densas quanto o das obrigações regulatórias de expansão de cobertura estão presentes no contexto de implantação das redes 5G. Ainda que não o faça de forma explícita, a Anatel incentiva o compartilhamento de infraestrutura entre as operadoras para implantação da nova tecnologia de comunicações móveis no país. O compartilhamento de infraestrutura passiva é bem regulamentado e pode ser obrigatório em alguns casos, como será visto mais adiante [13], no capítulo 3.

Feita esta contextualização a respeito do compartilhamento de infraestrutura, descrevem-se nas seções a seguir os diferentes tipos de compartilhamento, vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tabela Indicativa de Custos Compartilhados por Modalidade de Acordo

Componente	CAPEX	OPEX	Site	Mastro/ Torre	Backhaul	RAN	Core
Antena (1 setor)	S	S	N	N	N	S	S
Unidade de rádio remota	S	S	N	N	N	S	S
Unidade de rádio banda base	S	S	N	N	N	S	S
Torre	S	N	N	S	N	S	S
Materiais	N	S	S	S	N	S	S
Transporte	N	S	S	S	N	S	S
Instalação	S	N	S	S	N	S	S
Aluguel	N	S	N	S	S	S	S
Alimentação AC/Gerador/Bateria	S	S	S	S	S	S	S
Hub de alta velocidade	S	S	N	N	S	S	S
Roteador	S	S	N	N	S	S	S

2.2 COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA PASSIVA

2.2.1 Compartilhamento de Sites

No compartilhamento de *Sites* é a forma mais fácil e mais comum de compartilhamento de infraestrutura [10]. Trata-se do uso do mesmo espaço físico por duas ou mais operadoras, mantendo-se em separado torres, antenas, gabinete e *backhaul* [21], sendo possível, nesta modalidade, fazer uso mútuo dos serviços auxiliares (alimentação AC e DC), bem como de ar-condicionado e outros recursos deste tipo.

Os custos compartilháveis em relação a este tipo de compartilhamento podem ser vistos na Tabela 2.1, na coluna "Site".

2.2.2 Compartilhamento de Torres/Mastros

O compartilhamento de Torres/Mastros dá um passo a mais em relação ao compartilhamento de *sites*. Neste caso, além de compartilharem o mesmo espaço físico, as operadoras fazem uso da mesma estrutura de torres ou mastros [2] para instalar suas antenas, que por sua vez, são individuais.

Para esta modalidade, é possível fazer uso da infraestrutura de terceiros, os chamados operadores de infraestrutura, para o compartilhamento. No Brasil, os setores de energia, telecomunicação e petróleo possuem acordos para uso mútuo de infraestrutura de postes e

gasodutos para suporte a equipamentos de telecomunicação. No Capítulo 3 as regras para esses acordos serão descritas em mais detalhes.

Os custos compartilháveis em relação a este tipo de compartilhamento podem ser vistos na Tabela 2.1, na coluna "Torres".

2.3 COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA ATIVA

2.3.1 Compartilhamento da Rede de Acesso de Rádio (RAN)

O compartilhamento de infraestrutura ativa é o compartilhamento dos ativos eletrônicos da rede. Para a RAN, trata-se do uso mútuo de antenas, rádios e controladores, e também do *backhaul* [10].

Cada uma das redes RAN é incorporada a uma rede única, motivo pelo qual este tipo de compartilhamento é também chamado de rede de acesso de rádio multi-operadora (MORAN) [10]. Esta rede única só é separada novamente no ponto de conexão com o core. Isto garante que a rede lógica das operadoras, bem como o espectro, mantenham-se sempre separados.

Os custos compartilháveis em relação a este tipo de compartilhamento podem ser vistos na Tabela 2.1, na coluna "RAN".

2.3.2 Compartilhamento Core

Para definir o compartilhamento do *core*, é interessante descrever o que faz parte desta rede [21]:

- Anel de transmissão do *core*
- Centro de chaveamento com o registro de localização de origem (HLR - *home location register*)
- Plataforma de cobrança
- Sistemas de valor agregado (VAS) - entidades lógicas

O compartilhamento do core pode ser dar a nível do anel de transmissão, ou a nível das entidades lógica, a depender dos recursos que estão disponíveis para ser compartilhados.

Vale destacar que o compartilhamento do core é uma outra forma de compartilhamento da rede ativa. Neste caso, faz-se o uso compartilhado dos mesmos equipamentos descritos

na MORAN, e também dos ativos do core acima descritos, além do mesmo espectro, podendo não haver a mencionada separação das redes lógicas das operadoras [10]. Este tipo de compartilhamento recebe o acrônimo MOCN (*multi-operator core network*).

Os custos compartilháveis em relação a este tipo de compartilhamento podem ser vistos na Tabela 2.1, na coluna "Core".

2.3.3 Roaming

O *Roaming* é um tipo de acordo que pode se dar no contexto internacional, nacional ou inter-sistema [21]. Neste tipo de acordo, na realidade, a rede de uma operadora A carrega o tráfego de uma operadora B, não havendo uma concessão de infraestrutura de fato. Para o *roaming* nacional e internacional, este tráfego é permitido quando a rede hospedeira do usuário B não está disponível em determinada localidade [21].

No caso do *roaming* inter-sistema, a transferência de tráfego acontece entre redes de tecnologias distintas, por exemplo GSM e 3G.

Qualquer que seja o tipo de *roaming*, trata-se de um modelo complexo, com o qual as entidades regulatórias tendem a se preocupar, quando há o risco de redução da competitividade [10].

Na Tabela 2.1 não foi considerado o *roaming* tendo em vista que não existem requisitos para qualquer elemento comum de rede para que esse tipo de compartilhamento ocorra [21].

Agora que os tipos de compartilhamento de infraestrutura são conhecidos, apresentam-se na próxima seção os aspectos técnico, econômico e regulatório destes acordos.

2.4 ASPECTOS GERAIS DO COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA

2.4.1 Aspecto Técnico

Os modelos de compartilhamento de infraestrutura podem ser divididos em diferentes categorias. Pelo critério técnico, encontra-se na literatura até 5 classes [20] diferentes de compartilhamento, observando-se um consenso em separá-las em três grupos principais: o compartilhamento da rede de acesso de rádio (RAN) passiva, o compartilhamento da rede de acesso de rádio ativa e o *roaming* [10], [11].

Dentre os ativos que podem ser compartilhados, pode-se citar o *site*, o *espectro*, a estação rádio base (ERB), o *backhaul*, o controlador de rádio e a rede *core* [10]. Na modalidade de compartilhamento da rede passiva, compartilham-se o *site*, o *backhaul* ou os dois, mas

nenhum dos outros ativos. O compartilhamento da rede ativa pode envolver diversas combinações do uso mútuo dos demais componentes [15] e cada combinação resulta em uma subcategoria diferente de compartilhamento de infraestrutura ativa. As mais recorrentes serão apresentadas em detalhe no capítulo que trata especificamente dos modelos de compartilhamento.

A opção por um modelo em detrimento de outro é justificada nos trabalhos analisados pelos objetivos que uma operadora tem em se utilizar da estratégia de compartilhamento de infraestrutura.

Em acordo com [20], deve-se optar pelo compartilhamento da rede passiva em áreas com grande volume de assinantes, alta competitividade entre as operadoras e necessidade de diversificação de serviços. O compartilhamento da RAN ativa, por sua vez, deve ser uma escolha para áreas com potencial de negócios moderado, competição média entre as empresas que fornecem serviços de telecomunicação e em que não se observe a necessidade pelo controle completo dos ativos em uso.

Uma visão um pouco distinta é trazida por Meddour [18], que sugere que a opção por determinado modelo de compartilhamento está mais ligada ao tipo de mercado que é alvo da operadora que pratica essa tática. Em seu trabalho, ele afirma que empresas que estejam investindo em mercados emergentes ou em desenvolvimento costumam procurar formas mais econômicas para ampliar capacidade e cobertura, sendo estas, então, mais inclinadas a se utilizar do compartilhamento da infraestrutura passiva. Por outro lado, operadoras que estejam em mercados mais maduros já se encontram em uma fase em que precisam otimizar custos e implementar novas tecnologias, sendo o compartilhamento da rede ativa uma opção mais atrativa nesses casos.

No Brasil, a expansão da tecnologia 5G pode se desdobrar em diversos contextos: mercados já consolidados, que hoje já atingiram a capacidade máxima de suas redes e os níveis de cobertura praticamente em sua totalidade; áreas urbanas pouco densas, que não estão 100% cobertas, mas já representam um mercado emergente; a expansão de rede a locais que ainda são atendidos por tecnologia de 3ª geração (3G) e com cobertura limitada, ou seja, um novo mercado.

Independentemente do tipo de mercado, com o objetivo de otimizar custos, pode ser interessante para uma operadora adotar o compartilhamento da rede ativa, ainda que se trate de um mercado emergente. Por outro lado, caso a empresa com a qual esta operadora deseja fazer parceria domine o mercado na região que se deseja atender, essa opção pode se tornar menos atraente do ponto de vista financeiro. É por este motivo que o *market share* é posto como a principal restrição. Uma abordagem adaptada de [20], porém mais distante de [18].

Ainda que o *market share* seja a restrição escolhida como mais importante, a partir de [10], [20], fez-se um resumo do que pode ser atendido com cada tipo de compartilhamento.

Quando os cenários brasileiros estiverem sob análise, esta lista será utilizada como forma de priorizar a avaliação dos modelos de compartilhamento à disposição. Em cenários de maior risco, a escolha por determinada modalidade será pautada pelo atendimento às necessidades mínimas das operadoras envolvidas, sem funcionalidades extras.

Tabela 2.2 – Diagrama Orientativo para Seleção de Modelos de Compartilhamento

Tipo de Compartilhamento	Fase da Tecnologia	Mercado	Ambiente
Compartilhamento Passivo	<i>Roll out</i> e Expansão	Emergente	Urbano
Compartilhamento Ativo	Consolidação	Consolidado	Rural

Existem ainda outras categorias que aparecem de forma secundária em alguns estudos [20], [22], como por exemplo a operadora móvel virtual (MVNO). Como o objetivo desse estudo é tratar do compartilhamento de infraestrutura no escopo do *roll-out* do 5G, essa modalidade, bem como a do *roaming*, citado anteriormente, apesar de relevantes, não serão consideradas aqui.

Anteriormente, citaram-se as operadoras como participantes do processo de compartilhamento, mas na realidade existem outras possibilidades para os modelos de parceria. Observa-se em [11] e [23] a figura do operador neutro (*neutral host*), um terceiro participante do processo de compartilhamento, que é dono, além de poder operar e manter a rede de comunicação para duas ou mais operadoras. Esse formato pode englobar os dois modelos principais de compartilhamento, o de rede ativa ou o de rede passiva.

Desdobramentos do compartilhamento, tais como essa figura do "operador neutro", ou mesmo a escolha por uma modalidade de compartilhamento da rede ativa, podem esbarrar em critérios regulatórios. A seção a seguir resume as implicações observadas em outros trabalhos da literatura.

2.4.2 Aspecto Regulatório

A maior preocupação em relação ao compartilhamento de infraestrutura, do ponto de vista regulatório, é a redução da competitividade entre as operadoras, que pode trazer prejuízos para a sociedade, à medida que os serviços oferecidos pelas operadoras podem perder qualidade em um contexto não competitivo.

Em 2005, Beckman observava em [11] que esse era o grande obstáculo para que os reguladores passassem a incentivar a estratégia de compartilhamento. Nesse mesmo momento, o mercado de telefonia móvel nos Estados Unidos era um dos mais competitivos do mundo, e, lá, o compartilhamento de infraestrutura se disseminou rapidamente, surgindo inclusive a figura do *neutral host*, um terceiro participante, proprietário da rede de comunicação e responsável pela operação e manutenção dessa estrutura.

Isso demonstra que existem meios de possibilitar o compartilhamento de infraestrutura,

sem que este seja nocivo à competitividade. Inclusive, no contexto descrito, essa estratégia surgiu naturalmente dentro de um ambiente de alta competição. Nesse cenário o que ocorreu e que deveria ter sido evitado foi o fato de as operadoras terem revertido as economias com o compartilhamento em ações de *marketing*, em vez de diferenciarem seus serviços no mercado. Houve benefícios com o compartilhamento, mas sem esta escolha, eles poderiam ter sido muito melhores [24].

Percebe-se, então, que a competitividade não é a única preocupação que a entidade regulatória precisa ter. É necessário pensar, também, em medidas que estimulem as empresas a converterem os investimentos antes utilizados para infraestrutura na melhoria dos serviços prestados [24], de tal forma que a sociedade se beneficie diretamente do uso do compartilhamento [17].

Desde o momento da publicação de [11], o panorama do compartilhamento de infraestrutura mudou bastante, e hoje é possível observar que as entidades reguladoras surgem, inclusive, em uma posição que não somente incentiva que as operadoras compartilhem suas infraestruturas, mas até mesmo torna esse uso mútuo mandatório.

Importante mencionar que, para o caso Brasil, o compartilhamento de infraestrutura pode ser obrigatório, como na Lei das antenas [35] que obriga o compartilhamento de torres entre operadoras em determinadas condições e, como já mencionado, o compartilhamento entre empresas intersetoriais (energia, telecomunicação e gás). Por outro lado, esta prática chamou a atenção, levando ao surgimento de um novo tipo de provedor de serviço no mercado brasileiro: o detentor de infraestrutura passiva (operador neutro) vem-se observando diversos movimentos que impactam no compartilhamento de infraestrutura, tal como a atualização da lei das antenas em relação ao uso de infraestrutura de forma mútua pelas operadoras. Por outro lado, essa não é a origem mais comum para um acordo de compartilhamento.

Em [17], a associação de reguladores europeus apresenta o resultado de uma pesquisa sobre o uso do compartilhamento de infraestrutura em seus países associados, demonstrando que praticamente todos os correspondentes praticavam pelo menos uma modalidade de compartilhamento.

Nesse relatório ([17]), constata-se que o compartilhamento de infraestrutura é, em geral, uma decisão comercial das próprias operadoras, mesmo que possa acontecer, também, por incentivo ou até mesmo como uma obrigação imposta pelas entidades regulatórias.

Um plano de compartilhamento costuma ser imposto por um regulador em situações particulares, como por exemplo o ingresso de uma nova operadora no mercado [25], situação em que seria difícil para essa empresa atingir o mercado da zona rural logo de início, por exemplo, e que, com o intuito de garantir a diversificação do mercado, o regulador obriga que uma empresa já consolidada compartilhe sua infraestrutura nessa região rural por um período delimitado de tempo, até que essa nova operadora tenha maturidade o suficiente

para construir sua própria infraestrutura ou para arcar com um plano de compartilhamento próprio.

Uma outra forma que tem origem no regulador é o incentivo ao uso do compartilhamento de infraestrutura para expandir a região de cobertura das operadoras, ainda que já consolidadas. Essa também é uma forma de facilitar que as redes de comunicação alcancem as localidades que em geral não são tão atrativas do ponto de vista econômico [24].

Em resumo, a entidade regulatória tem um papel fundamental de garantir que a sociedade tenha benefícios diretos de uma estratégia de compartilhamento de infraestrutura, sendo este benefício relacionado a uma maior disponibilidade de serviços, a uma região de cobertura mais extensa ou a preços mais acessíveis, haja vista a diversificação do mercado, somada a eficiente alocação de recursos que o compartilhamento possibilita.

A associação de reguladores e a ITU em [17] [24] ressaltam, por outro lado, que o regulador pode atuar, também nos processos de compartilhamento que não sejam influenciados diretamente por esse tipo de entidade.

Compartilhar infraestrutura, apesar de trazer os diversos benefícios expostos, requer um planejamento cauteloso. Trata-se de um modelo técnico-comercial complexo, e se suas regras não forem muito bem definidas, pode acabar gerando alguns obstáculos.

O primeiro ponto de atenção, que é observado pelos autores de [10] e de [17] e que se aplica a todas as modalidades de compartilhamento, é a necessidade de um planejamento de rede sendo feito em conjunto. As dificuldades decorrentes disso estão ligadas à definição de quem será o responsável por esse planejamento, a definição do momento de implantação, os critérios e a demanda por cobertura e a capacidade de cada envolvido, dentre outras questões.

Além disso, [17] traz situações que foram observadas a partir da experiência europeia, em que se pode notar a dificuldade de operadoras não participantes em um acordo de infraestrutura a passarem a participar desse, tanto no modelo passivo, quanto no ativo. Outro tipo de parceiro que acabou sendo excluído desse tipo de estratégia foram as MVNOs, que não encontraram muito espaço dentro desse tipo de modelo de negócios.

Principalmente para o caso de compartilhamento de infraestrutura passiva, comenta-se a respeito da sobrecarga da rede principal, com os equipamentos das redes parceiras, que pode limitar a expansão dessa infraestrutura no futuro, haja vista a sua saturação [17].

Outros destaques estão mais atrelados às modalidades de compartilhamento da infraestrutura ativa. Esse tipo de modelo é mais delicado que o compartilhamento de infraestrutura passiva, haja vista a necessidade de compartilhamento, também, do controle da rede de comunicação, o que exige um alto nível de coordenação entre os parceiros envolvidos [20].

Em [10], cita-se a dificuldade que uma operadora teria em deixar de fazer parte de um acordo de compartilhamento do tipo MORAN ou MOCN. Esse mesmo trabalho comenta

o desafio da diferenciação de qualidade de serviço ao se optar pelo modelo de compartilhamento completo da rede *core*, que é uma dificuldade também mencionada em [19], que comenta o risco de redução do nível de competitividade dos parceiros, de diminuição do estímulo a novos investimentos e de limitação da avidez por soluções inovadoras. Não à toa, em diversos países o compartilhamento de infraestrutura ativa tem regulações específicas e alguns tipos de modelos são até proibidos [20].

De forma a mitigar os riscos que foram expostos até aqui, as entidades regulatórias agem de diferentes maneiras nos locais em que o compartilhamento é uma prática usual. Existem países em que o compartilhamento é totalmente livre, sendo sempre fruto de um acordo entre os parceiros envolvidos. Em locais como esse, o regulador pode atuar como entidade mediadora, caso haja algum conflito decorrente das negociações.

Um caso intermediário é aquele em que a entidade regulatória recomenda o compartilhamento, mas não tem o poder de obrigar duas operadoras a praticá-lo, e, por fim, existe o caso mais extremo, em que o compartilhamento de infraestrutura pode ser obrigatório, a depender do propósito da adoção dessa estratégia.

No caso brasileiro, cenário em estudo nesse trabalho, existem regras explícitas para o compartilhamento de infraestrutura passiva, existindo inclusive modelos de parcerias com o município, como é o caso do uso de infraestrutura civil de distribuidoras de energia ou de gás [13]. Por outro lado, o compartilhamento de infraestrutura ativa costuma ser originado pelas próprias operadoras, sendo avaliado caso a caso.

No contexto do 5G, já é possível notar um crescimento dos acordos para compartilhamento de infraestrutura [26] no Brasil. A VIVO e a TIM, por exemplo, anunciaram recentemente a construção de uma rede comum [27], o que reforça que o interesse em contratos de compartilhamento é esperado no contexto da próxima geração e se justifica pelo crescimento relativo da necessidade de infraestrutura em relação ao 4G.

Trabalhos mais recentes a respeito do tema apresentam opiniões dentro do escopo na nova geração de telecomunicações. A ITU expõe em [24] a preocupação da Dinamarca, um país com um passado de sucesso em relação ao compartilhamento de infraestrutura, que no âmbito do 5G demonstra preocupações com o ajuste do nível aceitável de compartilhamento, devido a quantidade numerosa de antenas e *small cells*, levantando-se novamente a questão da preservação da competitividade entre operadoras.

A GSMA em [10] comenta até mesmo a possibilidade de surgimento de novos modelos de compartilhamento de infraestrutura, que ainda não foram praticados, e aponta para a necessidade de atenção dos órgãos reguladores em relação ao tema.

Na Ásia, houve uma ação do governo para promover o compartilhamento de infraestrutura desde o início do *roll out* [12]. Na Coreia do Sul, essa ação ficou sob responsabilidade do Ministério de Ciência e ICT (infraestrutura de telecomunicação e informação), que estimu-

lou as três maiores operadoras do país a compartilharem infraestrutura. Na China, houve a obrigatoriedade do uso de infra compartilhada e por fim, no Japão, houve um encorajamento por parte do Ministério de Assuntos Internos e Comunicação [28].

Nota-se que, enquanto a Dinamarca está sendo cautelosa a respeito do compartilhamento no âmbito do 5G, os países asiáticos que estão mais a frente do desenvolvimento da tecnologia estão considerando essa estratégia fundamental [17].

Essa diferença pode se justificar por diversos fatores, tais como o nível de consolidação dos mercados de comunicação nos dois cenários, ou mesmo pela cultura das duas regiões.

A próxima seção traz um resumo do que é visto a respeito do aspecto econômico do compartilhamento de infraestrutura, outro ponto de entendimento fundamental para se desejar optar por essa estratégia.

2.4.3 Aspecto Econômico

Sob a perspectiva econômica, o compartilhamento de infraestrutura tem diversas origens. Em [20] e [23], a estratégia é aplicada pela necessidade de atendimento a requisitos de cobertura impostos pelas entidades regulatórias, em que essa obrigação costuma estar atrelada a locais isolados, com baixa densidade populacional, nos quais nem sempre há retorno do investimento feito pelas operadoras [19].

Compartilhar infraestrutura otimiza o uso de recursos e dispensa uma operadora de investir sozinha na construção de uma infraestrutura até regiões mais distantes. Isso reduz os custos de instalação, mas também os de manutenção e operação. Dessa forma, a receita necessária para atender a esses locais de baixa demanda relativa acaba se tornando menor o que torna viável sem a cobrir essas regiões [15].

Outra origem para os acordos de compartilhamento pela óptica econômica aparece também em [20]. Trata-se dos mercados altamente competitivos e em saturação, cujas operadoras têm a necessidade de se diferenciar quanto a qualidade da prestação de serviços, podendo ser possível o envolvimento de terceiros nos acordos de uso mútuo de infraestrutura. Nesse contexto, o compartilhamento surge como uma possibilidade de desonerar as empresas com custos de infraestrutura, e convertê-los em investimentos em novas tecnologias e na melhoria de qualidade, ajudando-as a se diferenciar perante às demais.

Nesses mercados, a demanda por tráfego tende a ser crescente e [23] apresenta o compartilhamento de infraestrutura como uma forma de reduzir o "custo/bit" da infraestrutura, ou seja, se a capacidade precisar crescer 10 vezes, a rede não precisa ser ampliada na mesma proporção se houver compartilhamento.

Uma outro cenário interessante do ponto de vista econômico é o *roll out* de novas tecnologias. Com o avanço das gerações de comunicações, a atualização das redes existentes pode

ser tornar muito custosa, deixando de ser viável para as operadoras o investimento nesse tipo de inovação [29]. O compartilhamento de infraestrutura pode desonerar esse tipo de implantação, e em um trabalho realizado pela [24], é possível ter um exemplo disso. Trata-se do que ocorreu na Índia, em que o compartilhamento impactou de forma relevante a aceleração da penetração dos serviços de telecomunicação no país.

No contexto do 5G, o relatório das entidades regulatórias europeias [17] aponta para uma alta expectativa pelo compartilhamento de infraestrutura em diversos países europeus. O cenário envolve os casos de aplicação mencionados até aqui, mas aponta para um contexto diferente também.

Espera-se no 5G, como citado, inclusive o surgimento de novos modelos de compartilhamento, incluindo a participação da indústria, de provedores de conectividade específicos e a formação de parcerias público-privadas entre os municípios e as operadoras [17], [10].

A experiência com as gerações de telefonia anteriores traz diferentes perspectivas para os agentes envolvidos nos acordos de compartilhamento de infraestrutura. A figura da empresa terceira, é bastante popular, aparecendo em [11] como *Neutral Host*. Em [18], os autores são enfáticos quanto ao tema, opinando que a provisão de infraestrutura nem mesmo deveria ser um serviço das operadoras.

Um modelo possível é a criação de *Joint Ventures* [18] para gerir o compartilhamento de infraestrutura. Esse tipo de parceria permite que as operadoras envolvidas forneçam o serviço de infraestrutura em conjunto, mas afirma-se em [23] que o modelo que maximiza os benefícios é o parceiro neutro que tem como função implantar e operar a rede compartilhada.

Também em [23], é dito que o potencial de benefício econômico pode ser estendido ainda mais no caso da terceirização de serviços. Frisanco apoia em [20] que a terceirização seja aplicada a qualquer modelo de compartilhamento. Em [30], a estratégia é aprovada também no contexto das *small cells*.

Meddour [18] comenta que, para o caso de compartilhamento de infraestrutura passiva, a terceirização ampliaria a redução de custos, mas não seria fundamental, enquanto no compartilhamento ativo seria absolutamente crucial para atingir economias de escala, utilizar a força de trabalho de forma mais eficiente e reduzir os custos de coordenação com as outras operadoras parceiras.

Os efeitos de um modelo de parceria são diferentes a depender do modelo de compartilhamento, devido a característica de cada um deles. O compartilhamento de sites, por exemplo, resulta em 20-30% de redução de custos de CAPEX, em acordo com [11], [15] e [10].

Se as operadoras optam pelo compartilhamento também da infraestrutura ativa, pode haver ganhos extras, chegando ao nível de 45% do CAPEX de implantação [18]. Em relação

ao OPEX, [15] demonstra que o potencial é ainda maior, haja vista a redução dos custos de operação e manutenção da rede decorrente da implantação de uma infraestrutura única.

Por outro lado, [17] e [20] apontam para os riscos atrelados a alguns modelos específicos de compartilhamento de infraestrutura ativa. Frisanco comenta [20] que, quando o *pool* está disponível, o nível de competitividade entre os parceiros poderia ser prejudicado, à medida que não seria possível diferenciar entre a qualidade dos serviços prestados por cada uma. No relatório das agências europeias [17], cita-se o exemplo da França, que proibiu esse tipo de compartilhamento em áreas urbanas densas, cenário em que a competitividade é essencial.

De forma geral, como demonstrado na seção que descreve o aspecto regulatório do compartilhamento, manter a competitividade é sempre uma preocupação. Porém, se por algum momento esse risco já impediu que o compartilhamento de infraestrutura se disseminasse, hoje as vantagens da adoção desse tipo de estratégia já se mostraram muito superiores a ele.

O compartilhamento de infraestrutura é um excelente mecanismo para redução de custos, que resulta em ampliação da região de cobertura, melhora a qualidade de serviço e reduz os custos do serviço de telecomunicação para os clientes finais [10],[17].

A otimização da alocação de recursos permite que as operadoras invistam em novas tecnologias, beneficiando, mais uma vez, o consumidor final de forma direta [15], [19].

Do ponto de vista ambiental, o compartilhamento reduz ainda o impacto visual da infraestrutura, além de mitigar as preocupações dos usuários com a radiação das estações de rádio [17].

E por fim, a ITU em [24] mostra que a competitividade, na verdade, pode ser estimulada pelo compartilhamento, desde que haja as condições corretas, geralmente estipuladas pelas entidades regulatórias, nos acordos estabelecidos entre as operadoras para esta finalidade.

3 PANORAMA REGULATÓRIO BRASILEIRO: 5G NO BRASIL E COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA

Este capítulo traz uma visão do ambiente regulatório brasileiro à respeito do 5G, do compartilhamento de infraestrutura e da competitividade entre operadoras. Estes temas se relacionam de maneira profunda neste trabalho, tendo em vista que a necessidade de expansão de infraestrutura para atendimento aos requisitos de desempenho do 5G pode se tornar algo inviável economicamente, caso as operadoras implementem toda a sua rede de maneira individual. Neste contexto, surge a possibilidade de criação de acordos de compartilhamento entre estas empresas, o que, por sua vez, pode gerar impactos em relação a competitividade entre os parceiros. Neste sentido, faz-se um panorama do ponto de situação atual destes temas no Brasil, de forma a direcionar o problema de compartilhamento de infraestrutura de maneira adequada.

3.1 PANORAMA 5G NO BRASIL

A importância do acesso universal aos serviços de comunicação ganhou uma evidência única no contexto da pandemia da Covid-19. Devido às redes de banda larga, foi possível manter parte da rotina de trabalho a distância, as aulas em modo remoto, e o comércio online em funcionamento, e contribuir, desta forma, com as políticas de distanciamento social que evitaram um maior espalhamento da doença [31].

Quando o foco é o cenário brasileiro, porém, tem-se uma situação em que nem toda a população tem acesso a este recurso. A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) reconhece a necessidade de disseminação de tecnologias móveis de banda larga em regiões que hoje não são atendidas, não pela falta de demanda, mas devido à indisponibilidade de infraestrutura [11] e, com o objetivo de reduzir as disparidades entre as diversas regiões do país, propõe medidas que incentivam as operadoras a estenderem suas redes a essas localidades.

Em fevereiro de 2020, por exemplo, foi aprovada a consulta pública que propõe as faixas de frequência que serão leiloadas entre empresas que desejem serviços em tecnologia 5G [5]. As faixas consultadas e seus respectivos compromissos são descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Proposta de Faixas de Frequência para Leilão 5G [5]

Faixa de Frequência	Largura de Banda	Tipo de concessão	Compromisso
700 MHz (1ª rodada)	10 + 10 MHz	nacional	localidades sem 4G e estradas
700 MHz (2ª rodada)	2 × (5 + 5) MHz	nacional	localidades sem 4G e estradas
3.5 GHz (1ª rodada)	60 MHz	regional (exclusivo PPPs)	municípios de até 30 mil habitantes
3.5 GHz (2ª rodada)	2 × 100 MHz + 1 x 80	nacional (exclusivo PPPs)	<i>Backhaul</i> em municípios não atendidos
3.5 GHz (3ª rodada)	60 MHz	regional	<i>Backhaul</i> em municípios não atendidos
3.5 GHz (4ª rodada)	20 e 40 MHz	regional não vendidos	<i>Backhaul</i> em municípios não atendidos
2.3 GHz (1ª rodada)	50 e 40 MHz	regional	localidades e municípios sem 4G
26 GHz (1ª rodada)	400 MHz	5 nacionais e 3 regionais	Sem compromissos
26 GHz (2ª rodada)	200 MHz	até 10 nacionais e 6 regionais	Sem compromissos

Na Tabela 3.1, $n \times$ (frequência) indica o número n de blocos de determinada largura de faixa que serão leiloados por faixa de frequência.

Observa-se que foram estabelecidos compromissos para as faixas de frequência em sub-6 GHz, que visam justamente à disseminação de tecnologias de comunicação móvel 4G, ou muitas vezes até 3G, em regiões hoje não atendidas no país.

Esta medida é essencial para o desenvolvimento brasileiro, mas, por outro lado, representa um grande desafio em termos da sustentabilidade econômica do projeto. As regiões que hoje não possuem 4G são regiões de baixa densidade populacional, que por muitas vezes não representam atratividade para as operadoras do ponto de vista financeiro.

De acordo com [32], 620 municípios brasileiros ainda não possuem a tecnologia de 4ª geração. Sendo assim, reverter esse quadro consiste em atender a uma necessidade de cobertura de 797.771 km², o que demonstra a dimensão do desafio mencionado precedentemente. O custo de implantar infraestrutura nessas localidades é alto, principalmente devido à baixa densidade populacional relativa nessas regiões, que acabam por não gerar receita o suficiente para justificar um alto investimento [33].

Essa situação estimula o emprego de estratégias de compartilhamento de infraestrutura como forma de reduzir os custos de implantação de redes móveis e a própria Anatel reconhece essa necessidade [32].

Mas, não apenas um meio de reduzir custos, o compartilhamento é uma forma de facilitar a entrada de novos agentes de mercado, como pequenas operadoras ou operadores de infraestrutura (*neutral hosts*). Em relação ao último caso, a agência reguladora sugere, por exemplo, a possibilidade de criação de um agente deste tipo para operar a infraestrutura de comunicação compartilhada com postes de energia elétrica [34].

Em [8], o Ministério de Comunicações (MCOM) sugere que futuras licitações de espectro com foco no 5G poderão considerar o compartilhamento de infraestrutura passiva e ativa, inclusive como meio viabilizador da implantação de Estações Rádio Base (ERB) em larga escala, que por sua vez exigirá investimentos complementares em capacidade de *backhaul* e *backbone* induzindo ao compartilhamento de torres e de *backhaul*.

Hoje, a agência reguladora normatiza de forma expressa apenas o compartilhamento de infraestrutura passiva de telecomunicação. Na seção a seguir, abordam-se as regras para este tipo de acordo e traz-se uma visão geral a respeito da postura da agência em relação a outros tipos de compartilhamento de infraestrutura.

3.2 ANATEL E O COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA

Para a Anatel, o termo compartilhamento de infraestrutura se refere ao uso compartilhado da infraestrutura passiva de suporte às redes de comunicação (postes, torres, mastros, armários, dutos, condutos, estruturas de superfície e estruturas suspensas) e é regulamentado pela Resolução n.o 683, de 05 de outubro de 2017 [35] .

Nesta norma [35], estabelece-se a obrigatoriedade do compartilhamento da capacidade excedente da infraestrutura por parte de uma detentora deste recurso com outra prestadora de serviços de telecomunicações, cuja solicitação só poderá ser negada se houver justificativas técnicas para tanto.

O rol de casos em que o compartilhamento é facultativo é apresentado na lista a seguir, retirada da Resolução 683 [35]:

- o limite de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos é excedido, nos termos de regulamentação específica [36];
- interferência prejudicial entre sistemas de telecomunicações regularmente instalados;
- comprometimento da abrangência, da capacidade e/ou da qualidade da prestação de serviço de interesse coletivo;
- a capacidade para suportar novos equipamentos é excedida, a segurança e/ou a estabilidade da infraestrutura de suporte é comprometida;
- o funcionamento de radio enlace ponto-a-ponto entre estações de telecomunicações regularmente instaladas é comprometido;
- o compartilhamento envolve estações reforçadoras utilizadas especificamente para o atendimento de áreas de sombra ou de cobertura deficitária;
- o compartilhamento envolve exclusivamente estações de serviços de interesse restrito;
- o compartilhamento envolve exclusivamente infraestrutura de suporte temporária ou de uso sazonal;
- o compartilhamento envolve impossibilitar funcionalidade essencial do sistema de telecomunicações ou é incompatível com a tecnologia empregada;

- presença de obstáculos jurídicos ou fáticos impostos por terceiros, devidamente fundamentados, que possam inviabilizar o compartilhamento, prejudicando a cobertura de serviço ou a qualidade na sua prestação; e
- outras situações que acarretem a inviabilidade do compartilhamento, devidamente fundamentadas.

Para o caso específico do compartilhamento de torres, dispensa ocorre, ainda, para as situações a seguir [35]:

- antenas fixadas sobre estruturas prediais;
- harmonização à paisagem;
- torre instalada até 5 de maio de 2009.

De forma mais específica, as agências regulatórias ANEEL, Anatel e ANP estabelecem as normas para o compartilhamento de infraestrutura entre os Setores de Energia Elétrica, Telecomunicações e Petróleo, por meio da Resolução Conjunta no 1, de 24 de novembro de 1999.

Os itens passíveis de compartilhamento dentro desta norma são divididos em três classes, conforme a seguir [37]:

- Classe 1: serviços administrativos;
- Classe 2: dutos, condutos, postes e torres;
- Classe 3: cabos metálicos, coaxiais e fibras ópticas não ativados.

A resolução estabelece que devem fazer parte destas classes somente infraestruturas que não forem controladas por agentes prestadores de telecomunicação [37].

Assim como na Resolução no 683, a capacidade excedente será compartilhada sempre em acordo com as regras definidas pelo detentor da infraestrutura. O acesso a esse recurso deve ser o mais democrático possível, sendo o proprietário da infraestrutura obrigado a dar publicidade sobre a infra-estrutura e as condições de compartilhamento, de forma que qualquer parte possa manifestar o seu interesse pelo compartilhamento [35].

Novamente, o compartilhamento só poderá ser negado por razões de limitação na capacidade, segurança, estabilidade, confiabilidade, violação de requisitos de engenharia ou de cláusulas e condições emanadas do Poder Concedente (a agência reguladora a que "pertence" a detentora da infraestrutura) [37].

Por fim, os preços cobrados e demais condições comerciais para celebração do acordo, podem ser negociados livremente pelos agentes, observados os princípios da isonomia e da livre competição.

Ainda no âmbito dos acordos intersetoriais, existem outras três resoluções conjuntas: Resolução Conjunta nº 2, de 27 de março de 2001 (Aneel, Anatel e ANP), Resolução Conjunta n.º 3, de 24 de novembro de 2020 (Aneel, Anatel e ANP) e Resolução Conjunta n.º 4, de 16 de dezembro de 2014 (Aneel e Anatel).

As resoluções conjuntas número 1 e 2 foram criadas para instituir comissões de resoluções de conflito entre entidades que negociem um acordo de compartilhamento. A Resolução Conjunta n.º 4, por sua vez, trata de temas exclusivos a ANEEL e Anatel e estabelece regras para uso e ocupação dos pontos de fixação de cabos nos postes de energia.

Por fim, um último instrumento legal que deve ser considerado no compartilhamento de infraestruturas é a lei n.º 13.116, de 20 de abril de 2015, também conhecida como Lei Geral das Antenas.

Esta lei estabelece normas gerais aplicáveis ao processo de licenciamento, instalação e compartilhamento de infraestrutura de telecomunicações, com o propósito de torná-lo compatível com o desenvolvimento socioeconômico do Brasil [36].

Em geral, os aspectos aplicáveis ao compartilhamento de infraestrutura são os mesmos observados na Resolução n.º 683, de 05 de outubro de 2017.

Vale ressaltar que a lei n.º 13.116 foi regulamentada pelo decreto Nº 10.480, de 1º de setembro de 2020, que objetiva estimular o desenvolvimento da infraestrutura de redes de telecomunicações no contexto do 5G e da Internet das coisas [38].

Em relação ao compartilhamento da infraestrutura ativa, observa-se que a agência tem autorizado desde gerações de telefonia anteriores acordos entre operadoras para uso dos ativos da rede de telecomunicação [39] e alguns acordos mais recentes parecem ser uma fase de preparo para a demanda do 5G [40]. Apesar da necessidade de autorização pelo regulador, chama-se atenção para o fato de não haver normas expressas para o compartilhamento ativo, como é o caso do compartilhamento de infraestrutura civil. A exceção é o uso compartilhado do espectro, que é regulamentado pela Resolução nº 671, de 3 de novembro de 2016 [41].

O *framework* a ser desenvolvido neste trabalho terá restrição a penas em relação aos modelos de compartilhamento do core (MOCN) que envolve, também o compartilhamento de espectro, conforme apresentados no Capítulo II.

Na próxima seção, traz-se um panorama dos modelos de mercado de comunicações móveis aplicados pela entidade regulatória brasileira.

3.3 COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA E COMPETIÇÃO

Em 2012 a Anatel publicou o Plano Geral de Metas de Competição (PGMC), atualizado em 2018, que dispõe sobre o incentivo e a promoção da competição livre, ampla e justa no setor de telecomunicações nas hipóteses em que a probabilidade de exercício de poder de mercado por parte de Grupo com Poder de Mercado Significativo em determinado mercado relevante exige a adoção de medidas regulatórias assimétricas [42].

No âmbito desta resolução, da Lei Geral de Telecomunicações e da resolução da Anatel, a competição é regida pelos princípios a seguir [42]:

- função social das redes de telecomunicações;
- livre concorrência;
- defesa do consumidor;
- repressão de práticas anticompetitivas;
- sustentabilidade econômico-financeira do setor;
- vedação de subsídios cruzados;
- acesso não discriminatório, a preços e condições justos e razoáveis, às redes de telecomunicações e às infraestruturas de suporte à prestação de serviço de telecomunicações;
- diversificação na oferta dos serviços de telecomunicações;
- redução das barreiras à entrada de novas operadoras;
- uso eficiente do espectro de radiofrequências;
- boa-fé e transparência;
- redução das desigualdades regionais e sociais.

Com base nestes princípios, a Anatel poderá classificar os mercados que analisa conforme as seguintes categorias [42]:

- Categoria 1: municípios competitivos;
- Categoria 2: municípios potencialmente competitivos;
- Categoria 3: municípios pouco competitivos;

- Categoria 4: municípios não competitivos.

O anexo IV do PGMC indica a classificação dos municípios brasileiros para diferentes tipos de serviços de telecomunicações.

Para classificar o município conforme as categorias citadas, a Anatel observa os aspectos referentes à concentração de mercado, ao potencial de demanda, à infraestrutura e à penetração dos serviços [42].

Em relação a participação de mercado, será considerado um detentor de poder de mercado significativo (PMS) um grupo que tiver mais de 20% de participação, considerando-se, ainda, que esta participação seja estável, ou seja, perdure por um tempo determinado, e que haja diferença considerável entre a participação de um detentor de PMS e de um não detentor deste poder [42].

Avalia-se também o comportamento dos custos marginais, isto é, o custo de prover uma unidade de um novo serviço, ao longo do tempo. Caso um detentor de PMS tenha custos totais decrescentes haja vista que o rateio destes custos entre uma base muito grande de usuários, este grupo possuirá vantagens diante de outros grupos com menor capacidade de explorar economias de escala. Este cenário pode favorecer o exercício do PMS, podendo levar à adoção de medidas assimétricas pela Anatel, descritas no Anexo I de [42].

Outro parâmetro de análise é a oferta de diferentes serviços sobre uma mesma infraestrutura. Este cenário torna um grupo detentor de PMS por este conseguir obter custos unitários decrescentes a medida que faz uma oferta integrada de serviços de telecomunicações, ou seja, a proporção de economia de escopo reduz os custos médios da produção conjunta de bens distintos como mostra o Anexo I de [42].

O próprio domínio de infraestrutura também pode fazer de um grupo detentor de PMS, dado que esta é insumo fundamental para ofertar produtos e serviços no mercado [42].

Por fim, se um grupo atua ao mesmo tempo nos mercados de atacado e varejo, ou seja, oferece serviços e produtos que servem de insumos para outras prestadoras (por exemplo infraestrutura), e por isto obtém custos muito inferiores em relação aos demais concorrentes, ele poderá se tornar um detentor de PMS [42].

Neste trabalho, no âmbito do compartilhamento de infraestrutura, sempre que, por consequência de um acordo de compartilhamento, um grupo se tornar um detentor de PMS, este acordo não será considerado benéfico para o mercado, devendo ser reformulado e o *framework* fará esta sinalização de forma justificada, para orientar a melhor estratégia ao avaliador.

3.4 PARTICIPAÇÃO DO OPERADOR NEUTRO NO MERCADO 5G

O operador neutro é um modelo de negócios (MN) que consiste em um grupo atuando como proprietário, operador e mantenedor de uma rede de infraestrutura, construída para atender às necessidades de múltiplas operadoras. Esse MN geralmente é adotado para resolver o desafio de baixa cobertura ou capacidade em locais de grandes dimensões ou em localidades bastante ocupadas, por exemplo no contexto das redes ultra-densas [10].

A maior vantagem de um operador neutro é o fato de o seu serviço principal ser a infraestrutura por si mesma, o que significa que seu único objetivo deve ser a distribuição dos custos de instalação entre o maior número possível de operadoras, em contraste com as operadoras, que fazem uso da infraestrutura que detem para criar vantagem competitiva em relação às suas concorrentes [20]. Ainda, quando uma rede única é construída, evita-se o desperdício de recursos e o espaço é utilizado de forma otimizada, motivo pelo qual o modelo do operador neutro é mais utilizado para as UDNs.

Apesar dos benefícios, os modelos de operador neutro podem ser bastante desafiadores, especialmente quando recursos ativos de rede também são compartilhados. Neste caso, preocupações com o uso do espectro são levantadas e a própria regulação pode se apresentar como um obstáculo para permitir a implementação destes modelos [10].

Em fevereiro de 2021 a Telefonica, grupo detentor da Vivo, anunciou fato relevante para comunicar a intenção de criação de uma nova empresa para oferta de fibra ótica neutra e independente. Segundo o próprio comunicado, tem-se por objetivo "a aceleração da expansão da rede de fibra para novas localidades, através de um modelo de menor investimento para a Telefônica Brasil, e que captura valor pela penetração de terceiros" [43].

O movimento da vivo com certeza não será único e já levantou preocupações [44], principalmente no que tange aos efeitos do modelo na competitividade dos mercado em que se inserir.

Este contexto só reforça a importância do desenvolvimento de ferramentas que permitam tanto às operadoras quanto à entidade regulatória uma análise dos efeitos do compartilhamento de infraestrutura, lacuna com a qual este trabalho busca contribuir.

4

MODELAGEM DO PROBLEMA

O tema de estudo deste trabalho é a otimização de acordos de compartilhamento de infraestrutura, que foi brevemente descrito no Capítulo I. Define-se o problema como um sistema de otimização multiobjetivo, que busca tanto a maximização do lucro individual mínimo dentre as operadoras, quanto a maximização da qualidade de serviço global, tratada aqui como a taxa de transmissão média dos usuários destas operadoras em Mbps/km^2 . Fez-se a opção por estes objetivos tendo em vista que 1) maximizar o lucro mínimo garante que o acordo oferece as melhores condições mesmo para a operadora que obtém menor rentabilidade. Isto ajuda o órgão regulador a ter certeza de que não se trata de um acordo prejudicial ao mercado, e 2) pensar em amplificar a capacidade faz com que o acordo de otimização tenha como foco não apenas operadoras, mas também os consumidores, tornando este tipo de modelo de negócios ainda mais atrativo [29].

Além da otimização de acordo entre operadoras, este trabalho propõe uma forma de analisar a viabilidade de um operador neutro como alternativa às parcerias entre operadoras, mantendo-se a mesma qualidade de serviço encontrada no acordo convencional. Maiores detalhes serão dados nas próximas seções.

4.1 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE ACORDOS DE COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA

Para começar a modelar o problema serão necessárias algumas definições. Considere uma área A em que três operadoras têm o mesmo interesse de cobertura, como ilustrado pela Figura 4.1.

Seja ϑ o conjunto de K operadoras que fazem parte de um mercado em que a opção pelo compartilhamento de infraestrutura está sob análise. Para dar início a formação dos acordos de compartilhamento entre as operadoras pertencentes a ϑ em A , cria-se um conjunto S , composto por estratégias de compartilhamento - as chamadas coalizões - tal que o tamanho de S ($|S|$) seja $2 \times (2^{K-1} - 1)$, representando todas as coalizões possíveis entre operadoras, tanto para implantação de macrocélulas quanto de microcélulas, inclusive a opção delas por realizar o investimento de forma individual.

Entende-se por estratégia de compartilhamento o número de estações rádio base implementadas de forma compartilhada entre operadoras que realizem uma coalizão. A Figura 4.2 ilustra S para o caso de três operadoras e a equação 4.1 o representa na forma de um vetor, sendo $N_{ERB_{macro}}$ o número de ERBs que criam células do tipo macro e $N_{ERB_{micro}}$ o número

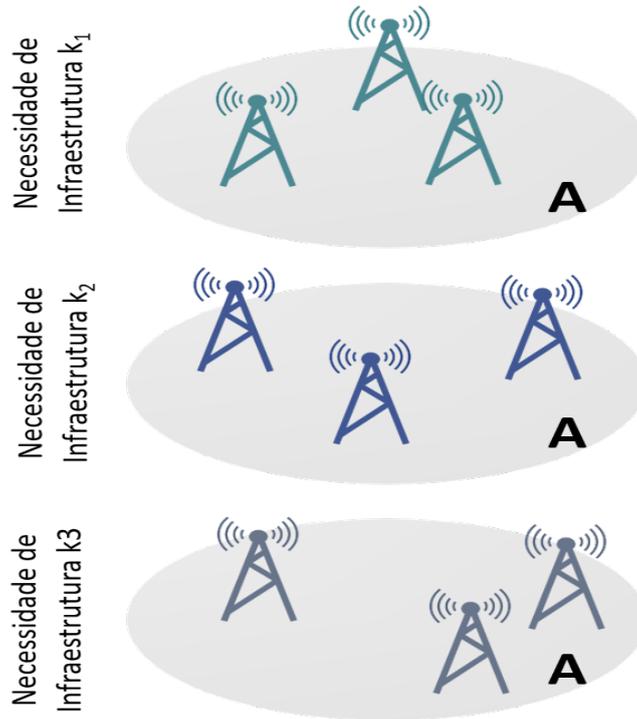


Figura 4.1 – Ilustração do Cenário de Interesse de Cobertura entre Operadoras

de ERBs que criam células do tipo micro.

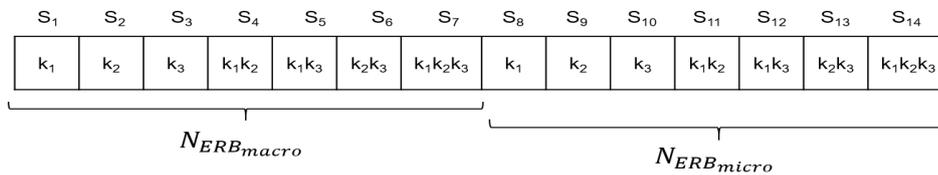


Figura 4.2 – Representação do conjunto S de combinações possíveis de acordos de compartilhamento entre duas operadoras

$$S = [S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10} S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}] \quad (4.1)$$

Observa-se que os primeiros sete elementos do conjunto 4.1 dizem respeito às ERBs do tipo macro e os 7 últimos, às do tipo micro. A partir deste momento, faz-se necessário o estabelecimento de alguns limites para as estratégias de coalizão. Isto será feito de maneira separada para cada tipo de estação, mas o conjunto S é otimizado de forma conjunta, como será visto adiante.

Relembrando, o problema de otimização consiste em propor a melhor quantidade de estações que deve ser implantada por cada coalizão $S_i \in S$. E por melhor se entende aquela que maximiza a capacidade oferecida pelas operadoras aos seus usuários e que ao mesmo tempo garante lucro máximo para a operadora que tem o menor lucro dentre as empresas que

fazem parte de um acordo.

Em relação à capacidade, esta depende de fatores tais como frequência de operação da rede de comunicação, largura de banda disponível, características da região de implementação etc.

Levando-se em consideração os efeitos da perda de percurso, conforme modelos propostos em [45], aplica-se para o cálculo de capacidade, o sistema apresentado em [4], que faz uso de geometria estocástica, criando objetos aleatórios no espaço, para fornecer um valor médio representando a eficiência espectral (bps/Hz) para um percentual de uso da rede e para uma condição de interferência [4]. São geradas 7 células hexagonais, 1 transmissora e outras 6 interferentes de acordo com uma distância entre sites (ISD) determinada pelo usuário do sistema (ex.: uma entidade regulatória que busca dimensionar a rede, ou uma operadora) e, por meio de simulação Monte Carlo, um conjunto de receptores em ambientes do tipo interno e externo (proporção entre eles definida pelo usuário) são criados e distribuídos de maneira aleatória no espaço que contém as células hexagonais, como mostra a Figura 4.3. A distância entre esses receptores e as estações transmissora e interferentes são calculadas e com isto se estima a perda de percurso a qual cada receptor está suscetível. De posse desta perda, bem como de uma tabela que relaciona SINR a eficiência espectral, é possível calcular a eficiência espectral por unidade de área, em Mbps/km^2 [4].



Figura 4.3 – Cenário de Simulação para Cálculo de Eficiência Espectral

Para fins deste trabalho, o processo de cálculo da taxa de transmissão é realizado de maneira prévia para diversas ISDs distintas e o resultado é armazenado na forma de uma tabela, que contém a correspondência entre distância e taxa de transmissão. No momento de realização da otimização dos acordos de compartilhamento, esta tabela é utilizada para criar uma função que relaciona ISD a capacidade por meio de interpolação, função esta que será utilizada para estimar a $capacidade_k$ para os diferentes números de estações rádio base

sugeridos pelo módulo de otimização.

Faz-se esta opção pois simular a capacidade a cada sugestão de conjunto S realizado pelo módulo de otimização tornaria o tempo de simulação impeditivo. Todo este processo será detalhado no Capítulo 6, mas já se estabelece de antemão limites para a distância entre as células (ISD) de cada tipo, de forma a ser possível a utilização de da função de ISD ($f(ISD)$) conforme os limites estabelecidos nas equações 4.3 e 4.4. Os limites máximos foram escolhidos para preservar o nível de capacidade oferecido pelas ERBs para a frequência central escolhida para análise de resultados deste trabalho, que faz uso de três frequências distintas, conforme abaixo. O limite mínimo é uma pré-definição do simulador proposto por [4].

Frequência de 700 MHz:

$$500 \leq ISD_{macro} \leq 4000, \quad (4.2)$$

Frequência de 3,5 GHz:

$$500 \leq ISD_{macro} \leq 3500, \quad (4.3)$$

em que ISD_{macro} é a distância entre as células macro e os limites são dados em metros.

Frequência de 26 GHz:

$$80 \leq ISD_{micro} \leq 400 \quad (4.4)$$

em que ISD_{micro} é a distância entre as células micro e os limites são dados em metros.

De posse da ISD, o próximo passo é definir o número de ERBs correspondente à cada distância inter-site em cada elemento de S. Desta forma, é necessário estabelecer uma relação entre a quantidade de estações e a ISD, de forma a ser possível calcular a capacidade que cada operadora vai oferecer, para posteriormente ser possível maximizar a taxa média de transmissão, um dos objetivos do problema em estudo.

Considera-se neste trabalho que a ISD seja igual ao dobro do raio da célula, seja esta do tipo macro ou do tipo micro. Adota-se como premissa que o conjunto S gerado pelo otimizador permita que todas as operadoras k_i sejam capazes de cobrir a área de interesse de cobertura A em sua totalidade, tanto com estações que compõem células macro, quanto células micro. Neste sentido, relaciona-se primeiro a $Area_{ERB_k}$ a A , para estabelecer o raio $Raio_{ERB_k}$ e só então a ISD, como mostram as equações (4.5)-(4.9) a seguir.

$$N_{ERB_{kmacro}} = \sum_k Ind_k S_{1-7}, \quad (4.5)$$

em que Ind_k é um vetor auxiliar de dimensão $|Ind| = 2^{|K|} - 1$ para cada operadora $k \in$, tal que $Ind_{k,i} = 1$ se a operadora k faz parte da coalizão S_i (mesmo que a coalizão não tenha nenhuma ERB, ou seja, mesmo quando $S_i = 0$). S_{1-7} é um vetor de 7 componentes (os sete primeiros elementos do conjunto S), correspondentes às coalizões para implantação de células macro. A equação (4.6) exemplifica Ind em que cada linha corresponde a $Ind_k, k = 0, 1, 2$ para 3 operadoras. Ao comparar os três vetores à Figura 4.2, fica claro que $Ind_{k,i} = 1$ sempre que k_j puder fazer parte de uma coalizão S_i .

$$Ind = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

De posse de $N_{ERB_{kmacro}}$, calcula-se a área de cada célula macro, conforme a equação (4.7).

$$A_{ERB_{kmacro}} = \frac{A}{N_{ERB_{kmacro}}} \quad (4.7)$$

Neste trabalho, considera-se que as células são hexagonais. Assim, o raio $Raio_{ERB_k}$ é dado pela equação 4.8.

$$Raio_{ERB_k} = \sqrt{\frac{2A_{ERB_{kmacro}}}{3\sqrt{3}}} \quad (4.8)$$

Finalmente, é possível calcular a ISD resultante para cada operadora. O resultado é dado pela equação 4.9.

$$ISD_{macro_k} = 2Raio_{ERB_k} \quad (4.9)$$

Como foi dito, ISD_{macro_k} precisará estar dentro dos limites do modelo de cálculo. Com este valor em mãos, é possível calcular qual a capacidade/ km^2 ($capacidade_{macro_k}$) que as operadoras conseguem oferecer ao seus usuários por meio das suas estações macro a partir da função $f(ISD)$. A taxa média percebida pelos usuários se relaciona à capacidade em acordo com a equação 4.10.

$$\rho_{macro_{k,t}} = \frac{capacidade_{macro_k}}{\beta\psi_{k,t}} \quad (4.10)$$

em que β é a taxa de uso da rede, ou seja, o percentual de utilização em relação a capacidade total, e $\psi_{k,t}$ a densidade de usuários/ km^2 /ano. O motivo pelo qual $\psi_{k,t}$ e $\psi_{k,t}$ são dados em t (por ano) será explicado mais adiante neste capítulo.

A capacidade total da rede depende, ainda, das microcélulas. Desta forma, também é necessário calcular ISD_{micro_k} , processo este que se dá da mesma maneira que para o cômputo de ISD_{macro_k} , feitas as devidas substituições de macro para micro nas equações de (4.5) a (4.9). Especificamente na equação (4.5), deve-se substituir o vetor S_{1-7} pelo vetor S_{8-14} , composto pelos últimos elementos do conjunto S, que se referem ao número de estações que compõem as células do tipo micro. A taxa final percebida pelo usuário será, então, dada pela soma das taxas percebidas pela oferta de capacidade das células do tipo micro e macro, o que é visto na equação 4.11, sendo a média destas o primeiro objetivo de maximização como mostra a equação 4.13 .

$$\rho_{k,t} = \rho_{macro_{k,t}} + \rho_{micro_{k,t}} \quad (4.11)$$

$$\rho_k = media_T(\rho_{macro_{k,t}} + \rho_{micro_{k,t}}) \quad (4.12)$$

$$ObjetivoI = maxmedia(\rho_k) \quad (4.13)$$

A próxima etapa é a maximização do menor lucro dentre as operadoras que participam do compartilhamento, que será detalhada a seguir.

Seja μ_k o *market share* (MS) de cada operadora $k \in \vartheta$, que é definido como a proporção de usuários de k em relação ao número total de usuários das operadoras na região de análise A. Nesse trabalho, será considerado que os custos totais/ km^2 da operadora k (c_k) com infraestrutura serão dados pela equação 4.14, em que os custos da infraestrutura compartilhada são divididos entre as operadoras de forma proporcional à suas participações de mercado, conforme feito em [29], em cada coalizão $\mu_{k,i}$.

$$c_k = (1/A) * 1 * (g_{compartilhavel} \sum_{i|k \in S_i}^{2^{|K|-1}} \mu_{k,i} S_i + (1/A) * g_{nao-compartilhavel} \sum_{i|k \in S_i}^{2^{|K|-1}} S_i) + (1/A) * 0.7 * (g_{compartilhavel} \sum_{i|k \in S_{i+7}}^{2 * (2^{|K|-1})} \mu_{k,i} S_i + (1/A) * g_{nao-compartilhavel} \sum_{i|k \in S_{i+7}}^{2 * (2^{|K|-1})} S_i), \quad (4.14)$$

A equação 4.14 merece uma explicação detalhada. Nela, $g_{compartilhavel}$ é a parcela de custos de uma estação que pode ser compartilhada com outro parceiro, a depender da modalidade de compartilhamento escolhida; $g_{nao-compartilhavel}$, por sua vez, é composto pelo custo dos elementos de uma estação que não podem ser compartilhados. Para traduzir o significado disto, considere um cenário de compartilhamento de sites entre duas operadoras. Nesta modalidade de compartilhamento, para cada ERB que faça parte da coalizão, vai haver

1 site e os custos deste site serão divididos entre as operadoras de maneira proporcional a participação de mercado de cada uma delas; entretanto, para que a rede destas empresas esteja completa, ela precisa, ainda, dos elementos da rede ativa (antena, roteador) e dos elementos de *backhaul*, os quais, por sua vez, são implementados de maneira individual por cada uma delas, e, obviamente, pagos somente pela operadora que os utiliza. Assim, $g_{compartilhavel}$ seria o custo do site e $g_{nao-compartilhavel}$ o custo dos elementos da rede ativa e do *backhaul*.

Observam-se duas parcelas distintas na equação (4.14). A primeira se refere a infraestrutura de macrocélulas e a segunda de microcélulas, que em acordo com [46] custa 30% menos que as macrocélulas. Ambos os custos g são compostos por uma parcela relativa ao CAPEX e outra ao OPEX, como mostram as equações 4.15 e 4.16.

$$g_{compartilhavel} = g_{CAPEX_{compartilhavel}} + g_{OPEX_{compartilhavel}} \quad (4.15)$$

$$g_{nao-compartilhavel} = g_{CAPEX_{nao-compartilhavel}} + g_{OPEX_{nao-compartilhavel}} \quad (4.16)$$

Considera-se que os usuários de cada operadora estão distribuídos de maneira uniforme em A . Desta maneira, $\mu_{k,i}$ será constante e igual a μ_k para qualquer coalizão. Assim, a participação de mercado por coalizão $\mu_{k,i}$, considerando uma densidade de usuários constante em A de $\psi_{k,t}$ usuários/ km^2 /ano será dada por:

$$\mu_{k,i,t} = \frac{\psi_{k,t} A}{\sum_{i|i \in S_i} \psi_{i,t} A}, \quad i = 1, 2, \dots, 2^{|K|} - 1 \quad (4.17)$$

Como foi visto, ρ_k é a taxa de transmissão/ km^2 que os usuários da operadora k vão usufruir. Neste trabalho estabelece-se que a receita da operadora k por km^2 será dada por r_k , conforme a seguir [29]:

$$r_k = \sum_{t=0}^T \rho_k \psi_{k,t} \delta_k, \quad (4.18)$$

em que δ_k é o preço anual por Mbps (R\$/Mbps) cobrado pela operadora k e T o período em anos em que se considera a análise de investimento na rede de comunicação em estudo. Considera-se apenas a receita arrecadada dos usuários 5G, cujo quantitativo em relação ao 4G hoje foi retirado de [47].

De posse destas informações calcula-se o lucro por km^2 da operadora k , l_k , conforme a

equação 4.19.

$$l_k = r_k - vpl_k \quad (4.19)$$

em que vpl_k é o valor presente líquido por km^2 dos custos de infraestrutura, ou seja, o valor presente dos pagamentos futuros pela infraestrutura (OPEX anual) descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial (CAPEX no ano de implementação), calculado para um período de T anos e considerando como estes juros uma taxa de depreciação r de 3,5 % [46]. A equação 4.20 apresenta o cálculo [46]. Vale ressaltar que o custo é calculado em valor presente líquido pois se espera que durante um intervalo de tempo T, a infraestrutura compense o investimento realizado. Esta referência temporal T deve assumir um período suficiente para a depreciação total da rede ou um prazo suficiente para que esta seja substituída, por exemplo pela chegada de uma nova geração.

$$vpl_k = CAPEX_k + \sum_{t=0}^T \frac{OPEX_{k,t}}{(1+r)^t} \quad (4.20)$$

Idealmente, l_k nunca poderá ser inferior ao lucro que as operadoras observariam se não houvesse acordo. Isto não será imposto como uma restrição ao algoritmo, mas como um resultado almejado, visto em 4.21. Esta opção é feita para que o algoritmo não se restrinja para garantir o lucro de uma operadora em detrimento da perda de benefícios de uma outra.

$$l_k \geq l_{k,0} = r_{k,0} - c_{k,0} \quad (4.21)$$

em que $l_{k,0}$ é o lucro, $r_{k,0}$, a receita e $c_{k,0}$ o custo por km^2 de k , quando faz a opção de não adotar qualquer acordo de compartilhamento.

Por fim, um acordo de compartilhamento não deveria tornar um mercado não competitivo. Neste sentido, seguindo o que a Anatel propõe no PGMC [42], visto no Capítulo 3, nenhuma operadora que possua uma participação de mercado (μ_k) maior ou igual a 20 % poderá ser levada a um patamar inferior a este por consequência do compartilhamento. Por outro lado, quando a participação de mercado de uma operadora já for inferior a 20% mesmo antes do acordo de compartilhamento, este acordo só será considerado prejudicial caso leve a eliminação de desta operadora do mercado em estudo. Isto é visto nas equações 4.22 e 4.23.

Se $\mu_{k,0} \geq 20\%$

$$\mu_k \geq 20\% \quad (4.22)$$

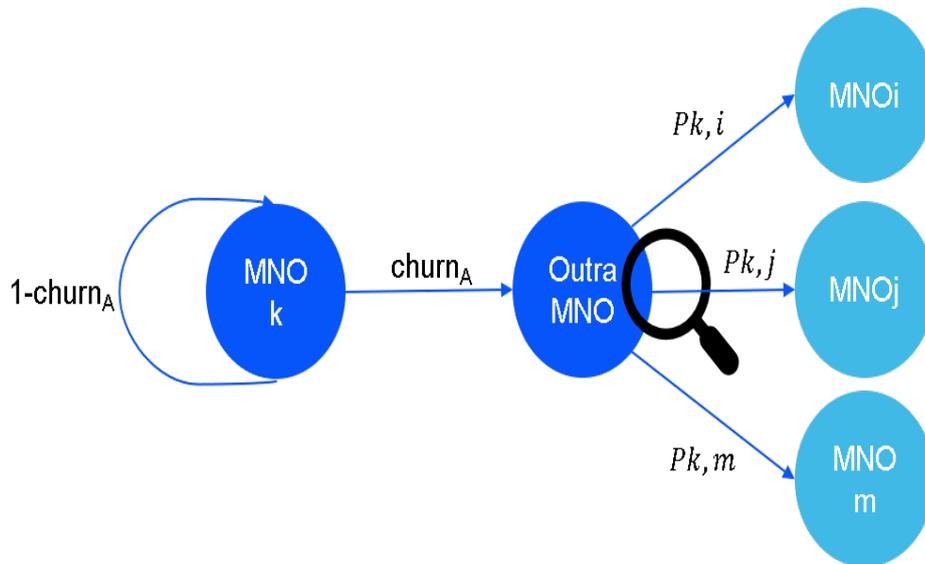


Figura 4.4 – Probabilidade de Transição entre operadoras

caso contrário

$$\mu_k \geq 0, \quad (4.23)$$

Novamente, a variação de mercado não será imposta como uma restrição, mas os impactos na participação de mercado serão levados em consideração para qualificar o benefício de um acordo de compartilhamento.

No modelo atual, a receita das operadoras é dada exclusivamente pela relação entre a densidade de usuários e a taxa de transmissão que eles observam. É por isto que na equação (4.10) considera-se uma densidade de usuários anual. Tanto por movimentos naturais quanto pela opção de uma operadora de reduzir os preços cobrados pelos seus serviços, já que reduziram seus custos com infraestrutura, pode haver uma movimentação de usuários entre empresas diferentes.

Para calcular os efeitos do preço na movimentação de usuários entre operadoras, propõe-se analisar este processo como uma cadeia de Markov. Faz-se a esta proposta pelo fato de não ter sido possível encontrar um modelo simplificado para esta movimentação na literatura.

O estado inicial deverá ser dado pelo *market share* das operadoras antes do início do período de análise T e o estado final é dado pelo *market share* ao final. Para que seja possível calcular estes estados, é necessário definir a probabilidade de um cliente migrar de uma operadora k para uma operadora j após um ano. Para isto, será utilizada a taxa de rotatividade de usuários (*churn*) [7] das operadoras, conforme a Figura 4.4.

Observa-se na Figura 4.4 que a soma das probabilidades $P_{k,i}, i = i, j, m$ deverá ser igual ao *churn*, ou seja, à probabilidade de um usuário sair de sua operadora de origem. Propõe-

se então que haja uma probabilidade base P que seja afetada pelos preços das operadoras conforme 4.24.

$$P_{k,i} = P \frac{\delta_k}{\delta_i}, \quad (4.24)$$

em que

$$\sum_i P_{k,i} = churn_k \quad (4.25)$$

$$P_k = \frac{churn_k}{(\sum_i \frac{\delta_k}{\delta_i})} \quad (4.26)$$

e $\delta_k \leq \infty$ é o preço cobrado pela operadora k por 1 Mbps.

Considere um cenário com 3 operadoras k, j, m . A matriz de transição P da cadeia de *Markov* correspondente às movimentações de usuários entre estas três operadoras será dada pela equação 4.27.

$$\begin{bmatrix} P_{k,k} & P_{k,j} & P_{k,m} \\ P_{j,k} & P_{j,j} & P_{j,m} \\ P_{m,k} & P_{m,j} & P_{m,m} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

em que $P_{x,x}$ é a probabilidade de o usuário permanecer onde está e $P_{x,y}$ a de migrar da operadora x para a operadora y .

Para calcular a variação de *market share* ocasionada pela diferença de preços, basta fazer uma análise da cadeia de Markov por meio da equação 4.28, que considera que todas as operadoras fazem seus investimentos de maneira simultânea, considerando o contexto de mudança de tecnologia para o 5G.

$$\mu_{t=n} = s_n = s_1 P^{(n-1)}. \quad (4.28)$$

em que $\mu = s_n$ é *market share* das operadoras no ano n e s_1 é o *market share* no ano de instalação da infraestrutura.

Os preços de duas operadoras distintas pode ser diferente por diversos motivos, inclusive como consequência do compartilhamento de infraestrutura. Se uma operadora decidir repassar aos seus usuários o benefício obtido com o compartilhamento, o modelo de Bertrand e Cournot [48] de um mercado de bens substitutos pode ser utilizado para definir o novo preço que deverá ser ofertado pela empresa.

Neste modelo, o preço de equilíbrio dos produtos, ou seja o preço em que há convergência entre a oferta e a demanda dos produtos, é o custo marginal (cm_k) de produção destes bens, que, no caso deste trabalho, é o custo marginal de oferecer uma quantidade x de Mbps a um usuário. Supondo que o custo marginal de cada operadora seja constante ao longo do tempo, é razoável assumir que a redução dos custos totais obtida com o compartilhamento de infraestrutura será transmitida ao custo marginal e, portanto, ao preço final oferecido ao consumidor [48].

Então, supondo-se que o preço inicial δ_0 e o custo marginal cm_0 de uma operadora quando da implementação individual de infraestrutura, se esta operadora ao participar de um acordo de compartilhamento reduz seus custos totais em $|\Delta| = 20\%$, então, ela também reduz seus custos marginais a esta mesma taxa e $cm = (1 - 0.2)cm_0 = \delta$ ($\delta = \text{preço/Mbps}$). Neste sentido, se as operadoras resolverem transferir a redução de custos aos seus consumidores, os preços deverão ser atualizados a cada ano, atualizando a equação (4.24) para cálculo de $P_{k,i}$.

Independentemente da transferência do benefício aos consumidores, o *market share* μ_k das operadoras será impactado a cada ano conforme 4.28. Esta variação reflete na densidade de usuários de cada operadora $\psi_{k,t=n}$, afetando também a receita 4.18 de cada empresa. A relação entre a densidade e o *market share* é dada por 4.29.

$$\psi_{k,t=n} = \mu_{t=n}\psi \quad (4.29)$$

em que ψ é a de densidade de usuários total, independente da operadora, na região em estudo A .

De forma a propor um modelo mais realista para a transição de usuários, propõe-se um complementação, que além dos preços, também considera a reputação das operadoras. Neste modelo, a equação 4.24 seria substituída pela equação 4.30, mantendo-se as demais.

$$P_{k,i} = P \frac{\delta_k \text{rep}_i}{\delta_i \text{rep}_k}, \quad (4.30)$$

em que rep_j é a reputação da operadora j . Os resultados apresentados no Capítulo 7 demonstram o impacto de se considerar a reputação, além do preço como fator para migração de usuários. Em acordo com [49], tanto o preço quanto o atendimento ao consumidor (aqui medido pela reputação) são importantes fatores para um usuário decidir migrar para outra operadora.

Com o modelo de cálculo para a variação de usuários em mãos, é finalmente possível calcular o segundo objetivo: maximizar o lucro mínimo das operadoras, ou seja, garantir que a operadora que obtém menos lucros, obtenha o maior valor possível, dado pela equação

4.31.

$$\max \min(l_k) \quad (4.31)$$

4.2 COMPARTILHAMENTO DE INFRAESTRUTURA COM OPERADOR NEUTRO

Na seção anterior, foi apresentado problema de otimização de acordos de compartilhamento com o operador neutro (*neutral host* - NH).

Um operador neutro é um modelo de negócios (BM) que consiste em um terceiro atuando como dono, operador e mantenedor de uma infraestrutura de rede única, projetada para atender às necessidades de múltiplas operadoras. Esse modelo geralmente é adotado para resolver problemas de má cobertura e capacidade em locais com grandes multidões ou redes ultra-densas (UDN) [10].

A grande vantagem de um operador neutro é o fato de o seu serviço principal ser a infraestrutura em si, o que significa que o único objetivo do NH é distribuir os custos fixos de instalação entre o maior número possível de operadoras, em contraste com as operadoras, que utilizam este recurso para buscar vantagem competitiva entre si [20].

Ainda, quando uma rede única é construída, o desperdício de recursos é evitado e o espaço é utilizado de maneira ótima, motivo pelo qual o NH é um modelo que tende a se tornar popular com as UDNs.

Dado este contexto, o problema de otimização do compartilhamento de infraestrutura consiste em o operador neutro oferecer às operadoras um custo menor do que elas teriam implementando a infraestrutura por conta própria ou mesmo realizando parcerias otimizadas com outras operadoras. Em [50] esse processo é incluído como uma etapa adicional no *framework* de otimização, em que será necessário verificar apenas se o preço cobrado pelo operador neutro p_{NH} é menor ou igual a npv_k , como mostra a equação 4.32.

Se

$$p_{NH} \leq npv_k, \quad (4.32)$$

então fazer acordo com o operador neutro é vantajoso para a operadora $k \in \vartheta$.

Nota-se que mesmo que os custos sejam os mesmos, ainda se considera que a operadora deva optar pelo operador neutro. Isto porque considera-se que a gestão do compartilhamento de infraestrutura é muito mais simples no caso NH do que com múltiplas parcerias entre operadoras [50].

Além disto, a infraestrutura oferecida pelo operador neutro deverá oferecer os mesmos resultados para a taxa de transmissão global obtida pelas operadoras quando compartilham infraestrutura, de forma que elas mantenham todas as vantagens obtidas, caso optem por desistir de compartilhar infraestrutura entre si e passar a contratar este serviço de um operador neutro.

Desta maneira, sempre que o operador neutro for capaz de oferecer um preço menor que os custos das operadora mantendo a qualidade de serviço alcançável pela rede, ele será a melhor alternativa [50]. Esta análise será a última etapa do *framework*, como será visto no Capítulo 6.

A seguir, uma tabela resumo de variáveis é apresentada.

Tabela 4.1 – Tabela de Variáveis

Variável	Descrição
ϑ	Conjunto de operadoras
K	Quantidade de operadoras em ϑ
A_{macro_k}	Área de interesse de cobertura da operadora "k"
A_{macro}	Área total de interesse de cobertura (união de A_{macro_k})
$N_{ERB_{macro_k}}$	Número de ERBs macro implementadas pela operadora "k"
A_{micro_k}	Área de interesse de capacidade da operadora "k"
$N_{ERB_{micro_k}}$	Número de ERBs macro implementadas pela operadora "k"
A_{micro}	Área total de interesse de capacidade (união de A_{micro_k})
U_k	Usuários da operadora k
μ_k	<i>Market Share</i> da operadora k
v_k	Vetor binário fixo que indica a possibilidade de presença da operadora k em um acordo de compartilhamento S_k ou Z_k .
S	Conjunto de estratégias de compartilhamento de macrocélulas
$ S $	Número de elementos da coalizão S
S_i	Elemento de S (coalizão i em S)
Z	Conjunto de estratégias de compartilhamento de microcélulas
$ Z $	Número de elementos da coalizão Z
Z_i	Elemento de Z (coalizão i em Z)
β	Taxa de uso da rede pelo usuário
$\mu_{k,i}$	<i>Market Share</i> da operadora k na coalizão S_i
ψ_k	Densidade de usuários/ km^2 da operadora "k"
ρ_k	Taxa de transmissão por km^2 da operadora "k"
p_k	preço do Mbps (R\$/Mbps)
c_k	Custo com infraestrutura da operadora "k"
$CAPEX_k$	Custo de CAPEX com infraestrutura da operadora "k"
$OPEX_k$	Custo de OPEX anual com infraestrutura da operadora "k"
$OPEX_{k,t}$	Custo de OPEX com infraestrutura da operadora "k" no ano "t"
npv_k	Valor presente líquido de c_k
r_k	Receita da operadora "k"
r_{NH}	Receita do <i>neutral host</i>
p_{NH}	Preço cobrado pelo <i>neutral host</i> pelo aluguel de infraestrutura
c_{NH}	Custo com infraestrutura da operadora "k"
g_{CAPEX}	Custo de CAPEX/ km^2
g_{OPEX}	Custo de OPEX/ km^2
$g_{compartilhavel}$	Custo de CAPEX + Custo de OPEX compartilhável/ km^2
$g_{CAPEX_{compartilhavel}}$	Custo de CAPEX/ km^2 compartilhável
$g_{OPEX_{compartilhavel}}$	Custo de OPEX/ km^2 compartilhável
$g_{nao-compartilhavel}$	Custo de CAPEX + Custo de OPEX não-compartilhável/ km^2
$g_{CAPEX_{nao-compartilhavel}}$	Custo de CAPEX/ km^2 não compartilhável
$g_{OPEX_{nao-compartilhavel}}$	Custo de OPEX/ km^2 não compartilhável
$cb_{k,j}$	Preço da operadora k em relação a operadora j
$P_{k,j}$	Indica a intenção de um usuário migrar de k para j
$P_k = P_{k,k}$	Indica a intenção de um usuário permanecer na operadora em que se encontra

5 OTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS MULTI-OBJETIVO

Este capítulo traz uma visão geral da otimização de problemas multi-objetivo, incluindo conceitos básicos que o caracterizam e uma revisão bibliográfica que exemplifica a sua aplicação em diversos contextos.

5.1 CONCEITOS BÁSICOS

5.1.1 Problemas multi-objetivo

Problemas multi-objetivo são sistemas complexos, muitas vezes caracterizados por agentes dentro de ambientes que operam com um conjunto variado de motivações [51]. Em muitos casos, os objetivos destes agentes são conflitantes e otimizá-los costuma envolver *trade-offs*. Matematicamente, este tipo de problema é escrito conforme as equações de 5.1 em [52].

$$\begin{aligned} f(x) &:= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \\ \text{sujeito a} & \\ g_i(x) &\leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) &= 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \tag{5.1}$$

em que $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ é o vetor de variáveis de decisão, $f_i, i = 1, \dots, k$ são as funções objetivo e $g_i, i = 1, 2, \dots, m$ e $h_j, j = 1, 2, \dots, p$ são as funções de restrição.

No caso particular deste trabalho, procura-se otimizar a formação de coalizões determinando-se a quantidade ideal de estações rádio-base que deve ser implementada por cada uma delas em uma região de análise. Neste caso, ao problema descrito por 5.1, deve-se acrescentar a restrição de que o vetor de variáveis de decisão x deverá ser composto por números inteiros, apenas.

Ainda, trata-se de um problema MOO composto por dois objetivos: a maximização do menor lucro individual de operadoras que buscam um acordo de compartilhamento, e maximização da taxa de transmissão global dos usuários da região em que ocorrem as coalizões. Minimizar a quantidade de ERBs por coalizão e criar parcerias entre a maior quantidade

possível de operadoras pode reduzir os custos da rede de comunicações, o que, desde que mantida ou ampliada a receita, aumenta o lucro das empresas.

Pode-se, então, considerar que neste problema há um *trade-off* e que, portanto, não será possível encontrar uma solução única que maximize as duas metas simultaneamente. Neste caso, a busca deve ser por soluções de compromisso, em que os objetivos são estudados em uma região chamada *fronteira de Pareto* [53]. A fronteira de Pareto é composta de soluções não dominadas, conceito que será explicado na próxima subseção deste capítulo. Navegar nessa fronteira permite que se otimize o sistema em estudo, o que consiste na otimização multi-objetivo (MOO) [54].

5.1.2 Fronteira de Pareto e Espaço de Soluções

Para dar início a descrição da fronteira de Pareto, é necessário detalhar o que são soluções não dominadas. Uma solução não dominada é aquela que fornece um compromisso adequado entre todos os objetivos. Formalmente, este conceito é apresentado a [55].

1. Definição (Dominância Pareto): Dadas duas soluções arbitrárias factíveis $x, y \in X$, diz-se que x domina y ou ainda que y é dominado por x (representado como $y < x$, se as seguintes condições forem satisfeitas:

- (a) Parte I

$$f_m(x) < f_m(y), \forall m \in 1, 2, \dots, n_{obj}, \quad (5.2)$$

ou seja, a solução x é melhor ou igual a y em todas as funções objetivo.

- (b) Parte II

$$\exists m \in 1, 2, \dots, n_{obj} | f_m(x) < f_m(y) \quad (5.3)$$

ou seja, a solução x é estritamente melhor que y em pelo menos um dos objetivos

- (c) Definição (Solução Pareto-ótima). Uma solução arbitrária factível x^* é Pareto ótima se, e somente se:

$$\nexists x \in X | x < x^* \quad (5.4)$$

A representação gráfica destas soluções é denominada Fronteira ou Conjunto de Pareto e pode ser ilustrada para um problema de maximização pelas bolas azuis na Figura 5.1, que são não dominadas se comparadas às bolas vermelhas (o conceito de não dominância é naturalmente relativo).

Como foi explicado na seção anterior, as soluções de um problema MOO costumam envolver uma relação de troca (os *trade-offs*), que, se ocorrerem na fronteira, por definição,

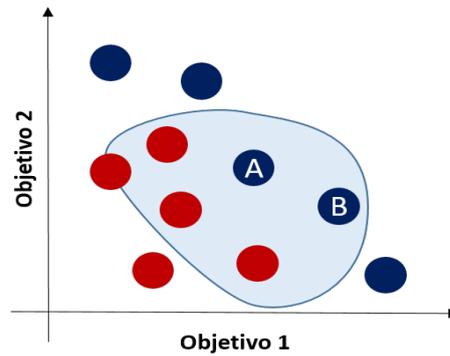


Figura 5.1 – Representação de uma Fronteira de Pareto de Objetivos de Maximização Conflitantes

serão as melhores soluções possíveis sem que haja degradação de objetivos individuais. Para que um objetivo na fronteira de Pareto seja viável, é necessário que ele faça parte do chamado espaço de soluções. Este espaço é delimitado pelas restrições que aparecem na equação (5.1) e é ilustrado pela região em azul claro na Figura 5.1, em que só seriam consideradas soluções os pontos A e B da fronteira de Pareto.

De posse dos conceitos de Fronteira de Pareto e Espaço de soluções, é possível dar seguimento a análise técnica de soluções para problemas MOO.

5.2 ANÁLISE DAS TÉCNICAS DE SOLUÇÃO MOO

Existem diversas soluções na literatura que são aplicadas a problemas MOO. Observa-se em [56] e [57], por exemplo, o uso de métodos de programação linear para otimização de coalizões. Esta foi a primeira opção considerada para aplicação neste estudo, entretanto, os objetivos almejados neste trabalho possuem um comportamento não linear em relação a quantidade de ERBs implementadas por cada coalizão. Isto tornou a opção pela abordagem da modelagem por meio de métodos de programação linear pouco estratégica, por se tornar um processo bastante complexo [58].

Dado este contexto, buscou-se encontrar métodos alternativos de solução, surgindo como opção a teoria dos jogos e as metaheurísticas. Avaliou-se cada uma delas e chegou-se à seleção das metaheurísticas como escolha ideal. Esta avaliação é apresentada a seguir.

5.2.1 Teoria dos Jogos

A primeira técnica analisada nesta seção é a teoria dos jogos. Observou-se que esta é uma escolha recorrente para otimização de coalizões [59], [60], sendo aplicada, inclusive em alguns trabalhos que foram utilizados como referência para o compartilhamento de infraes-

trutura nesta dissertação [29], [61].

A Teoria dos Jogos é utilizada para problemas em que dois objetivos distintos devem ser otimizados de forma simultânea. O que a diferencia de outros métodos é o fato de que, nesta abordagem, a função objetivo de cada jogador é controlada por um agente diferente, e é papel das variáveis de decisão a maximização do desempenho neste controle [53].

Aplicando-se este tipo de modelagem a um problema de otimização de coalizões, é possível garantir uma associação estável entre parceiros, o chamado equilíbrio de Nash (NE), em que qualquer alternativa a este equilíbrio não poderá ser vantajosa, simultaneamente a dois ou mais jogadores [62].

A teoria dos jogos nem sempre garante que o equilíbrio de Nash seja uma solução pareto-ótima [60], podendo haver outras soluções que se apresentem mais vantajosas dado o contexto de *trade-off*.

No presente estudo deseja-se criar um modelo de parceria para compartilhamento de infraestrutura entre operadoras assegurando-se um ganho nos lucros individuais das empresas envolvidas em relação a um cenário sem compartilhamento, e, devido a isto, não atingir um pareto-ótimo classificou a teoria dos jogos como uma opção de risco.

Por outro lado, identificaram-se na literatura duas abordagens que possibilitam a identificação de um equilíbrio de Nash que seja também pareto-ótimo: a teoria dos jogos cooperativos (*cooperative game theory* - CG) e a teoria dos leilões (*auction theory* - AT), porém, constatou-se que estas metodologias funcionam melhor para sistemas centralizados [58], por exemplo àqueles em que exista uma figura que faça o controle das coalizões.

Em acordo com a [42], a Anatel exerce o seu controle somente em cenários em que a competitividade seja posta em risco. Como existe uma restrição na definição do problema para que isto não ocorra, neste trabalho as operadoras estão sendo tratadas como agentes livres. Desta forma, o problema em estudo é um sistema distribuído, em que o uso da Teoria dos Jogos é considerada uma abordagem que pode não se mostrar a mais adequada, restando como alternativa para a otimização multi-objetivo o uso das metaheurísticas.

5.2.2 Otimização por Metaheurísticas

Seguindo a convenção adotada em [63], são classificados como algoritmos metaheurísticos todos os algoritmos modernos inspirados na natureza. Os autores de [64] definem heurística simplesmente como um meio de experimentação, cujo método é a tentativa e erro. Neste sentido, a metaheurística é uma estratégia que modifica outras heurísticas para produzir soluções além daquelas que são normalmente geradas em uma busca por ótimos locais [65].

Para tanto, diferentemente da programação linear e da teoria dos jogos, os algoritmos

metaheurísticos são métodos iterativos, que testam diferentes soluções, geradas com certa aleatoriedade, selecionando os melhores resultados e armazenando-os como possíveis pontos ótimos.

Neste processo, deve-se preocupar em balancear o que se chamada de exploração e exploração [66]. No primeiro caso, o agente testa soluções de maneira aleatória, ainda que a probabilidade de que elas sejam ótimas sejam baixas. No segundo, com informações já conhecidas do ambiente em que se insere o problema, o agente opta pelas soluções com mais chances de maximizarem (ou minimizarem) as funções objetivo do problema em estudo. Um bom equilíbrio entre exploração e exploração aumenta a velocidade com a qual o algoritmo converge e em geral leva a um ótimo global [64].

Os algoritmos metaheurísticos ou bio-inspirados [53] vêm sendo aplicados em diferentes problemas de otimização multi-objetivo. A seguir, apresentam-se os mais conhecidos e alguns casos de estudo.

5.2.2.1 Otimização por Nuvem de Partículas - *Particle Swarm Optimization Method* (PMSO)

A otimização por Nuvem de Partículas (PMSO) surgiu da intenção de se simular o comportamento de um conjunto de pássaros em vôo com seu movimento localmente aleatório, mas globalmente determinado. Esta técnica tem sido muito utilizada na resolução de problemas contínuos não lineares [67].

O algoritmo funciona da seguinte maneira: partículas são formuladas no espaço de parâmetros de um problema e cada uma calibra o seu valor de função objetivo na localidade em que se encontra. Depois, cada partícula toma a decisão de realizar um movimento dentro do espaço usando o seu valor de função objetivo e também o valor das outras partículas, sempre em direção à sua melhor posição prévia e também à melhor posição global da nuvem [68]. Após este movimento, a partícula pode ser avaliada pelos estados e pelos valores das outras partículas [69].

Este tipo de algoritmo possui um vasto domínio de aplicação, tendo-se exemplos nas engenharias elétrica, civil, mecânica e automação [[70]-[71]], em teoria de comunicações [[72]-[73]], pesquisas de operação e biomédica [68].

Por outro lado, para problemas de otimização discretos, como é o caso da análise do presente estudo, o método não pode ser usado diretamente. Em geral, mapeia-se o domínio discreto em um domínio contínuo e, quando o resultado final é atingido, faz-se o movimento contrário, mapeando-se o espaço contínuo no discreto. Isto gera complexidade e reduz a eficiência do processamento [68], motivo pelo qual o algoritmo foi descartado como ferramenta de otimização neste trabalho.

5.2.2.2 Recozimento Simulado - *Simulated Annealing* (SA)

O recozimento é um processo de fundição de um metal em temperatura elevada, seguida por um período lento de resfriamento, que gera como resultado uma massa homogênea [74]. O algoritmo recozimento simulado (SA) é inspirado nisto e foi desenvolvido por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi em 1983 [75] e Cerny em 1985 [76] de forma independente.

O SA é um algoritmo de otimização combinatória, que maximiza (ou minimiza) uma função no espaço S finito de números reais \mathbb{R} . São criados vários níveis, de forma análoga aos níveis de temperatura do processo de resfriamento, e, em cada um destes níveis, considerando um ponto $\mathbf{c} \in S$, uma nuvem de pontos é gerada em torno de \mathbf{c} e para cada ponto dentro desta nuvem são calculados os valores f da função objetivo do problema em análise. A depender do valor de f , estes pontos são rejeitados ou aprovados, com probabilidade p_a . Quanto mais próximo o nível estiver do nível final (da temperatura final de resfriamento), maior será p_a [74].

Tomando-se como base pesquisas bibliográficas como [53], observa-se que o recozimento simulado também tem vários domínios de aplicação distintos, tendo-se exemplo do uso deste tipo de algoritmo em [77] para otimização de alocação de tarefas. A maior vantagem de sua aplicação é a capacidade do SA em atingir o ponto ótimo global. Por outro lado, este processo pode ocorrer a altos custos computacionais e, além disto, a metodologia é mais adequada quando se trata de um problema de otimização combinatorial cujo espaço de soluções é fixo e conhecido, cenário distinto do que se observa na otimização do compartilhamento de infraestrutura [78], que possui um espaço de soluções variável. Neste sentido, fez-se a opção pela não utilização do SA nesta dissertação.

5.2.2.3 Algoritmos Evolucionário - *Evolutionary Algorithms* (EA)

Algoritmos evolucionários são uma classe de metaheurística baseada na teoria da evolução de Darwin, em que, ao longo da evolução de uma espécie, os indivíduos com características mais vantajosas a um determinado ambiente vão sendo selecionados, já que têm mais chances de sobrevivência [52].

Nesta teoria, dois indivíduos de uma espécie, os pais, realizam um processo de cruzamento, espalhando uma combinação de seus materiais genéticos para uma prole. Nesta prole, os indivíduos que tiverem os melhores genes têm mais chances de sobreviver e portanto de se reproduzir, criando uma nova geração, que portará estes genes mais vantajosos. Este processo se repete de forma sucessiva e assim vão sendo criadas novas gerações dessa espécie, prevalecendo sempre a composição do material genético que dá mais chances ao indivíduo de sobreviver no ambiente em que se insere.

Além da modificação genética devido ao cruzamento, no processo de evolução natural,

também acontecem mutações nos genes de um indivíduo, mutações estas que, se forem favoráveis à sobrevivência, também serão repassadas para as futuras gerações pelo processo reprodutivo [79].

Os algoritmos evolutivos utilizam esse passo a passo como um método de solucionar problemas de otimização. De forma simplificada, a partir de um espaço de soluções possíveis S , das quais sairão dois possíveis pais, cria-se por meio do processo de cruzamento e mutação uma população composta por diversas gerações. O cruzamento é análogo ao processo de exploração, que foi visto no algoritmo PMSO, e vai selecionando as soluções que mais se aproximam do objetivo de otimização. Por sua vez, a mutação é um paralelo ao processo de exploração, que permite que uma gama mais vasta de soluções seja testadas, reduzindo-se o risco de se selecionar como solução final uma solução que seria considerada apenas um ótimo local e não global.

Além do cruzamento, os indivíduos desta população de soluções também sofrem mutações, o que gera um efeito análogo ao método exploração que foi vista no algoritmo PMSO, ou seja, garantem que um espaço mais vasto de soluções sejam testadas, o que reduz as chances de o algoritmo convergir a um ponto ótimo que não seja o melhor valor global.

Este tipo de abordagem vem sendo bastante explorada na literatura e seu domínio de aplicação vai desde a engenharia às ciências sociais [52], sendo possível encontrar exemplos de uso para solução de problemas de objetivo único e também de multi-objetivo [79].

Uma explicação para a popularidade dos EAs é sua flexibilidade, sendo possível utilizá-los de forma efetiva mesmo quando não existem muitas informações à respeito da estrutura do problema [80]. Esta característica levou à opção pelos algoritmos evolutivos como instrumento de otimização dos acordos de compartilhamento de infraestrutura em estudo neste trabalho.

Entre as alternativas dentro do rol de possibilidades de algoritmos deste tipo, destaca-se o NSGA-II, uma opção promissora para o método a ser utilizado no framework de otimização. Esta conclusão tem em vista a aplicação prévia destes algoritmos em problemas de formação de coalizões [81] - objetivo deste trabalho - e de alocação ótima de recursos e tarefas [82] e [83], respectivamente, o que é análogo à alocação de estações entre operadoras para maximização da taxa de transmissão dos usuários.

Assim, o NSGA-II foi selecionado como algoritmo de otimização e é apresentado na próxima seção.

5.3 NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM (NSGA) - II

A ideia por trás do processo de ordenação não dominada é utilizar o método de classificação para enfatizar pontos que são considerados bons, ou seja, que se aproximam do objetivo do problema, junto a um método de nicho, que mantém subpopulações de bons pontos unidas em um mesmo conjunto. Esta é a base do *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) [84].

O algoritmo NSGA-II é uma derivação do NSGA. A versão mais antiga recebeu diversas críticas por sua complexidade, $O(mN^3)$, em que N é o tamanho da população e m o número de objetivos, falta de elitismo [85] e necessidade de especificação do parâmetro de compartilhamento δ_{share} [84]. Dentre outros recursos, fazendo uso do recurso de elitismo, que acelera significativamente o desempenho de algoritmos genéticos [86], o NSGA-II é capaz de resolver problemas reais de maneira mais rápida e eficiente que o seu antecessor [87]. O algoritmo é descrito a seguir.

5.3.1 Ordenação rápida de soluções não dominadas

Para ordenar uma população N em acordo com o nível de não dominância de forma rápida, faz-se [3]:

1. Para cada solução, calcular duas entidades: (1) n_p - o número de soluções que dominam a solução p e (2) T_p , um conjunto de soluções dominadas por i (Complexidade $O(mN^2)$). Todas as soluções na primeira fronteira de dominância terão o primeiro contador de dominância = 0.
2. Para cada solução i com $n_i = 0$, visitar todos os membros q do conjunto T_i e reduzir o contador de dominância para 1 (um).
3. Se algum membro q no contador de dominância se tornar zero, ele será colocado em uma lista separada Q e pertencerá à segunda fronteira não dominada.
4. O processo anterior é continuado com cada membro de Q e uma terceira fronteira é identificada.

Para cada solução a partir da segunda fronteira, o contador de dominância n_i pode ser, no máximo, $N - 1$, então cada solução i vai ser visitada pelo menos $N-1$ vezes antes de seu contador de dominância se tornar nulo, quando a solução recebe um nível de dominância e nunca mais é visitada. A existência de $N-1$ leva a uma complexidade $O(N^2)$, resultando em um total $O(MN^2)$.

Pseudo código de ordenação rápida de soluções não dominadas Adaptado de [87]

```
para cada  $p \in P$ 
   $T_p = \emptyset$ 
   $n_p = 0$ 
  para cada  $q \in P$ 
    se  $(p < q)$ , então
       $T_p = T_p \cup \{q\}$ 
    se  $(q < p)$ , então
       $n_p = n_p + 1$ 
  se  $n_p = 0$ , então
     $F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
 $i = 1$ 
Enquanto  $F_i \neq \emptyset$ 
   $Q = \emptyset$ 
  para cada  $p \in F_i$ 
    para cada  $q \in T_p$ 
       $n_q = n_q - 1$ 
      se  $n_q = 0$ , então
         $q_{rank} = i + 1$ 
       $Q = Q \cup \{q\}$ 
   $i = i + 1$ 
 $F_i = Q$ 
```

5.3.2 Preservação da Diversidade

Como foi visto anteriormente neste capítulo, testar diversas soluções distintas é uma forma de aumentar a probabilidade de obter melhores resultados, tendo em vista que diversificar reduz as chances de o algoritmo ficar preso em um ponto ótimo local. O NSGA-II propõe o uso de dois recursos com o objetivo de preservar a diversidade: a estimativa de densidade e o operador de comparação de multidão (*crowded-comparison operator*).

5.3.2.1 Estimativa de densidade

Para estimar a densidade de soluções em torno de um ponto em particular da população, toma-se a distância média de dois pontos (duas soluções), um em cada lado deste ponto de referência em cada um dos objetivos [87].

Essa distância $i_{distance}$ é chamada distância de multidão (*crowding distance*) e serve como uma estimativa do tamanho do maior cubóide que cerca um ponto i sem incluir nenhum outro ponto da população (*crowding distance*) [87], como visto na Figura 5.2.

O cálculo de $i_{distance}$ requer ordenar a população em ordem ascendente de acordo com cada função objetivo. Depois disto, é atribuído o valor ∞ às soluções extremas (soluções com função objetivo de maior e menor valor). As soluções intermediárias recebem um valor de distância igual à diferença entre o valor normalizado da funções de duas soluções adjacentes

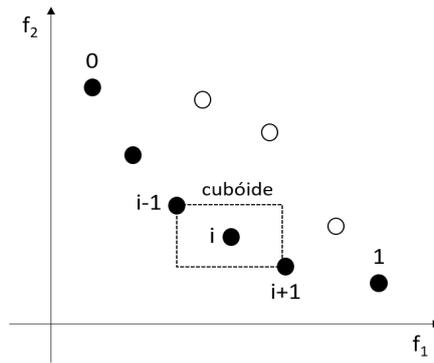


Figura 5.2 – Ilustração da distância de multidão. Adaptado de [3]

a elas e o processo é repetido para todos os objetivos [3].

O valor global da distância de multidão é calculado como uma soma dos valores individuais correspondentes a cada objetivo e cada objetivo é normalizado antes que o cálculo seja realizado. O pseudo-código apresentado abaixo mostra como se calcular $i_{distance}$.

Pseudo-código *crowding distance* adaptado de [87]

$I = \Pi$

para cada i , faça $I[i] = 0$

para objetivo m

$I = \text{ordenar}(I, m)$

$I[1]_{distância} = I[l]_{distância} = \infty$

para $i = 2$ a $(l-1)$

$I[i]_{distância} = I[1]_{distância} + (I[i+1]_m - I[i-1]_m)$

Em que $I[i]_m$ se refere ao m -ésimo valor da função objetivo do i -ésimo indivíduo no conjunto I . No pior caso, ou seja, quando todas as soluções estão na mesma fronteira, esta ordenação requer $O(MN \log N)$ etapas de cálculo.

Após a atribuição de distância a todos os membros da população, é possível comparar duas soluções a partir do quanto elas se aproximam de outras. Quem tiver menor valor tem mais soluções por perto [3]. Essa comparação é feita pelo operador de comparação de multidão, apresentado a seguir.

5.3.2.2 Operador de Comparação de Multidão

O operador de comparação de multidão é o recurso utilizado para levar os estágios do algoritmo à fronteira de Pareto. Supondo que cada indivíduo i da população tenha dois atributos 1) rank de não dominância (i_{rank}) e 2) distância de multidão ($i_{distância}$) é possível

definir uma ordem parcial $<_n$ como [3]:

$$\begin{aligned}
 i <_n j & \text{ se } (i_{rank} < j_{rank}) \\
 & \text{ou } ((i_{rank} = j_{rank}) \\
 & \text{e } ((i_{distância} > j_{distância}))
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Isto significa que, entre duas soluções com diferentes ranks de não dominância, a solução com menor rank deve ser a escolhida. Por outro lado, se as duas soluções estão na mesma fonteira, então, dá-se preferência a uma que esteja localizada em uma região de maior distância de aglomeração [3]. Isto encerra os recursos utilizados no NSGA-II, sendo possível apresentar o laço principal do NSGA-II.

5.3.3 Laço Principal do NSGA-II

O laço principal do NSGA-II é ilustrado pela Figura 5.3 e começa com a criação de uma população aleatória P_0 . A solução de cada função objetivo é calculada para cada indivíduo, processo este que é seguido pela atribuição do nível de dominância às soluções (1 é o melhor nível, 2 o próximo e assim por diante [3] quando se trata de um objetivo de minimização). Essa população gera uma prole Q_0 de tamanho N por meio dos processos tradicionais de recombinação e mutação, seguindo pelas fases de elitismo introduzido pelo NSGA-II e destacadas em azul na Figura 5.3.

Primeiro, uma população $R_t = P_t \cup Q_t$ é formada, em que R_t possui $2N$ indivíduos. Esta população é ordenada em acordo com a não-dominância de seus membros e, já que tanto os membros atuais quanto os passados da população estão presentes em R_t , o elitismo é garantido [3].

Depois deste processo, as soluções que pertencem ao conjunto de soluções não dominadas F_1 são as principais soluções dentre os membros da população combinada. Se $F_1 < N$, todos os seus membros são selecionados para a nova população P_{t+1} , por outro lado, outros membros vão sendo selecionados das fronteiras inferiores até que P_{t+1} também tenha N indivíduos [3].

A população P_{t+1} passa pelo processo de seleção (com base na distância de multidão), recombinação e mutação, gerando a prole P_{t+1} de tamanho N . O processo se repete até que a geração máxima seja alcançada [3]. Este limite pode ser dado por uma quantidade pré-definida de iterações ou por critérios de convergência.

O pseudo-código do laço principal pode ser visto a seguir, concluindo a apresentação do algoritmo.

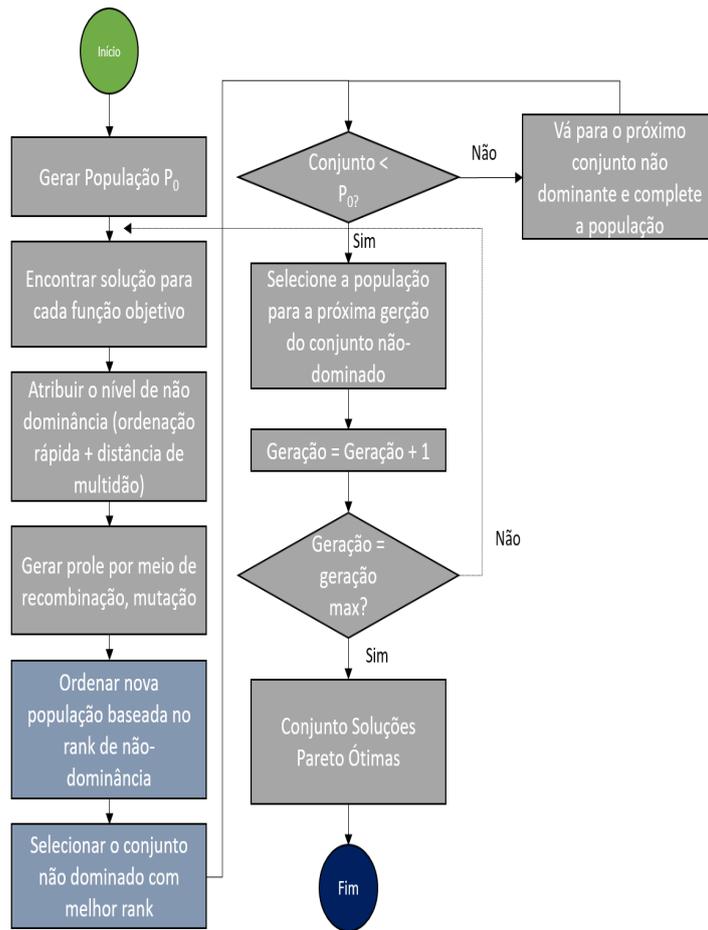


Figura 5.3 – Ilustração do Laço Principal do NSGA-II

Pseudo-código laço principal NSGA-II adaptado de [3]

$$R_t = R_t \cup Q_t$$

F = Ordenação Rápida de Soluções Não Dominadas (R_t)

$$P_{t+1} = \emptyset \text{ e } i = 1$$

Enquanto $|P_{t+1}| + |F_i| \geq N$

$crowding\ distance(F_i)$

$$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$$

$$i = i + 1$$

Ordene($F_i, <_n$)

$$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - |P_{t+1}|)] \quad Q_{t+1} = novaPopulacao(P_{t+1})$$

6 PROPOSTA DE *FRAMEWORK* PARA OTIMIZAÇÃO DE ACORDOS DE COMPARTILHAMENTO

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o *framework* de otimização de acordos de compartilhamento, realizado por meio do algoritmo evolucionário (EA) NSGA-II. O processo de otimização envolve três etapas principais: 1) o dimensionamento da rede - traduzido na relação entre distância inter-sites (ISD) e taxa de transmissão, 2) a formação de coalizões ótimas entre operadoras e 3) a análise dos impactos, à luz da Anatel, do compartilhamento de infraestrutura na competitividade do mercado em que se inserem e no desempenho financeiro das operadoras.

A estratégia de compartilhamento deve maximizar a utilização da infraestrutura disponível, de forma a reduzir os custos das operadoras que fazem uso deste recurso. Caso a operadora opte por transferir esta redução aos seus consumidores, isto pode torná-la mais atrativa a médio e longo prazos [21], criando um impacto positivo na captação de receita. Por outro lado, por questões técnicas, tais como a distribuição de usuários e área de cobertura, nem sempre é possível envolver todas as operadoras em um mesmo acordo de compartilhamento. Além disto, um acordo nem sempre é vantajoso para todos os parceiros, ainda que estes estejam na mesma localização geográfica, haja vista os efeitos na competitividade que podem ser ocasionados. Em um cenário ou no outro, em um mercado em que há o compartilhamento, mas não há equilíbrio na distribuição dos benefícios por este acordo, uma ou mais operadoras poderão perder o seu *market share* ao longo do tempo [17]. Este cenário desfavorece a competitividade, o que, por sua vez, reduz o incentivo às operadoras remanescentes a investirem em melhorias nos seus serviços, sendo esta uma condição indesejável e que deve ser evitada e é deste risco que surge a ideia de criação de uma ferramenta para otimização deste tipo de acordo.

Atualmente já existem métodos e ferramentas de otimização de acordos de compartilhamento [4],[29],[57] porém observa-se que um maior foco é dado às implicações técnicas, como o impacto na qualidade de serviço. Quando existe uma preocupação com o viés econômico, ainda se observa a ausência de uma metodologia para avaliar a questão da competitividade. Desta forma, propõe-se neste trabalho a inclusão deste aspecto em uma modelagem fim a fim do problema de otimização dos acordos de compartilhamento de infraestrutura.

O capítulo é dividido da seguinte maneira: inicia-se a apresentação a partir de uma revisão bibliográfica dos modelos de otimização que foram propostos até o momento. Em seguida, apresentam-se as fases envolvidas em um processo de otimização, começando-se pelo dimensionamento da rede, passando-se pela formação de coalizões e finalizando-se com a análise dos impactos de mercado (competitividade e desempenho econômico das operadoras). Por fim, descreve-se o *framework* de otimização dos acordos de compartilhamento completo, realizado por meio de algoritmos genéticos, uma das contribuições deste capítulo.

6.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O compartilhamento de infraestrutura e seus diferentes aspectos vêm sendo avaliados por diversos autores, especialmente no âmbito do 5G, como foi visto no Capítulo 2. A seguir, apresentam-se alguns exemplos de estudos a respeito de *frameworks* e ferramentas que auxiliam operadoras, entidades regulatórias e outros *stakeholders* a avaliarem possíveis acordos de compartilhamento de infraestrutura, observando suas vantagens e desvantagens.

Em [88] propõe-se um *framework* para o compartilhamento de recursos tendo-se como parâmetro acordos de nível de serviço (SLAs) pré-estabelecidos. A abordagem trazida por este trabalho torna-se bastante interessante no contexto do 5G, já que se espera uma especialização de serviços ainda maior no âmbito desta tecnologia em relação às suas predecessoras.

Ainda em relação à otimização do uso de recursos de rede, em [89] sugere-se a criação de algoritmos de alocação ótima desses recursos entre operadoras, visando ao melhor custo benefício. Com um viés diferente, mas também pensando em eficiência, [90] propõe mecanismos de otimização do uso de energia, à medida em que o algoritmo proposto permite a desativação de estações rádio base durante o período de baixo tráfego de dados, reduzindo-se, desta forma, o consumo.

Especificamente para o caso do compartilhamento de espectro, em [56] desenvolve-se um *framework* para esta finalidade, baseado em teoria dos jogos. Os autores de [91], por sua vez, discutem modelos de negócios e normas regulatórias que possibilitem este tipo de acordo.

Modelos de negócios são um tema bastante explorado no âmbito do compartilhamento de infraestrutura. No 5G, propostas que envolvam parceiros além das operadoras têm ganhado força, principalmente no contexto de virtualização dos recursos de rede [92]. Em [61] propõe-se para formação de *joint ventures* e em [93], [94] e [95] são propostos modelos de parceria com *neutral hosts*, surgindo em [93] e [94] inclusive a figura da micro-operadora.

Trabalhos com foco em otimização do modelo de coalisão entre parceiros têm ganhado força desde a implementação do LTE. Propostas com o intuito de facilitar a transição para

a geração de telefonia móvel substituta ao 3G aparecem em [96], que demonstra, inclusive, a preocupação com a preservação da competitividade entre operadoras, e [57], que cria um algoritmo que retorna a melhor opção de compartilhamento de infraestrutura por operadora, com foco em expansão da infraestrutura existente.

Em [61], [56], [97] e [98], faz-se uso da teoria dos jogos para cobrir diferentes aspectos da otimização de modelos de coalisão, estando [61] e [56] já no contexto do 5G.

Os autores de [61] trazem a preocupação em criarem-se acordos de compartilhamento que priorizem não apenas o lucro das operadoras envolvidas, mas também os custos praticados para a prestação de serviços, de forma a beneficiar, também, os consumidores.

Em [56], faz-se uso de jogos cooperativos para endereçar tanto o compartilhamento para endereçar o compartilhamento tanto da rede de acesso de rádio (RAN) quanto do espectro, mas com foco na perspectiva técnico-econômica, tendo-se como resultado uma política de divisão de custos que garanta que o acordo firmado entre operadoras é estável, ou seja, que uma operadora não encontre um contexto mais vantajoso ao deixar este acordo sozinha. Foco que também aparece no trabalho de [97], que por outro lado utiliza modelos de jogo competitivos.

Ainda, nota-se que poucos trabalhos abordam os aspectos técnico, econômicos e regulatórios do compartilhamento de infraestrutura de forma conjunta, e que, ou estão focados em beneficiar às operadoras de maneira individual, ou o mercado de forma global, raramente os dois de forma simultânea.

Em [4], nota-se esta primeira lacuna e propõe-se uma ferramenta em código aberto que possibilite uma análise desde o momento do dimensionamento da rede a ser construída, até a criação de um modelo de negócios para implementação desta rede. Entretanto, o foco desse trabalho não é exatamente o compartilhamento de infraestrutura, sendo este apenas um exemplo de aplicação da ferramenta proposta.

Neste sentido, esta dissertação busca suprir os vãos identificados por meio desta revisão bibliográfica. Propõe-se um trabalho que abrace a tríade econômica, regulatória e técnica do compartilhamento, objetivando-se uma análise dos modelos de compartilhamento tanto de forma individual quanto global, incluindo, inclusive a análise de impactos na competitividade de mercado.

6.3 APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE *FRAMEWORK*

Nos capítulos 1 e 4 desta dissertação, apresentou-se a definição do problema de otimização, cujo *framework* que procura solucioná-lo será introduzido neste capítulo. Basicamente, o compartilhamento de infraestrutura envolve três fases: o dimensionamento da rede para

estabelecimento da relação entre a quantidade de estações e a capacidade oferecida pela infraestrutura implementada, a otimização dos acordos de compartilhamento e a avaliação dos efeitos destes acordos ótimos na competitividade e no desempenho econômico do mercado em estudo. Estas fases podem ser vistas na Figura 6.1, cujos blocos são descritos em detalhe nas próximas seções.

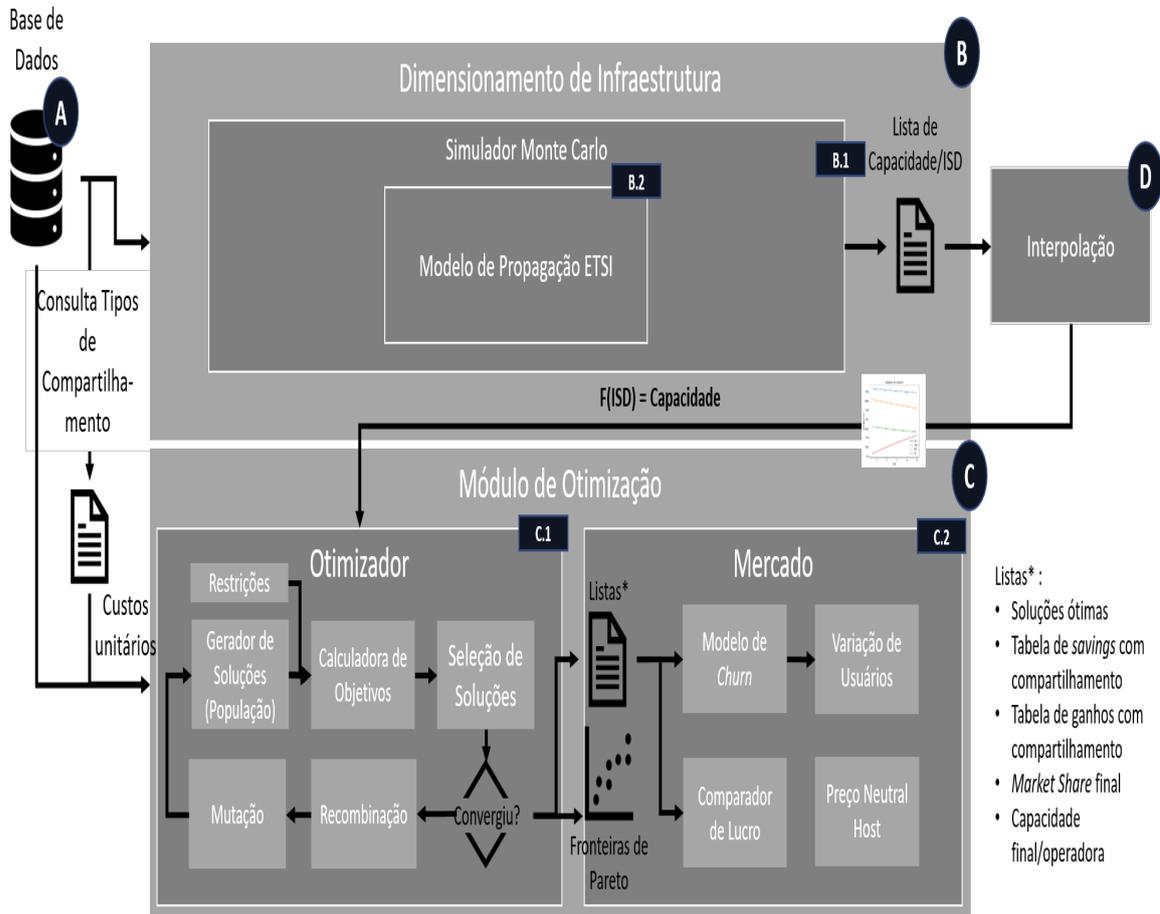


Figura 6.1 – Framework de Otimização de Acordos de Compartilhamento

6.3.1 Bloco A - Dados de Entrada

O Primeiro bloco que é necessário para utilização do *framework* é o Bloco A, que representa os dados de entrada. Ele aparece na Figura 6.1 externo aos módulos de dimensionamento e otimização.

Por meio deste bloco, são carregados nos módulos de otimização e dimensionamento, os dados do local (inclusive restrições), da infraestrutura e das operadoras, conforme Tabelas 6.1 a 6.4.

Tabela 6.1 – Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Altura dos edifícios
Largura das ruas
Antenas acima dos edifícios (S/N)
"break-point" de linha de visada
Restrições de espaço

Tabela 6.2 – Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Percentual de usuários <i>indoor</i>
Altura das antenas de transmissão
Potência de transmissão
Ganho das antenas de transmissão
Perda das antenas de transmissão
Altura das antenas de recepção
Potência de recepção
Ganho das antenas de recepção
Perda das antenas de recepção
Frequência de operação
Número de setores das antenas
% de uso da rede (β)
Largura de Banda (BW)
Custo dos componentes da infraestrutura e dos componentes de rede

Tabela 6.3 – Dados do Tipo de Compartilhamento

Tipo de Compartilhamento

Tabela 6.4 – Dados das Operadoras

Número de Usuários
<i>Market Share</i>
Preço dos Serviços (R\$/Mbps)
<i>Churn</i> Máximo
Área de interesse (cobertura ou capacidade)
Meta de Capacidade (se houver)

6.3.2 Blocos B e D - Dimensionamento de Infraestrutura e Interpolação

No Capítulo 4 foi descrita a necessidade de estabelecimentos da relação entre ISD e capacidade/ km^2 , que define, inclusive, o limite máximo para o número de ERBs. Neste trabalho, a relação é calculada conforme o processo de simulação estocástico proposto em [4], que foi mencionado no Capítulo 4 e é visto em mais detalhes na Figura 6.2.

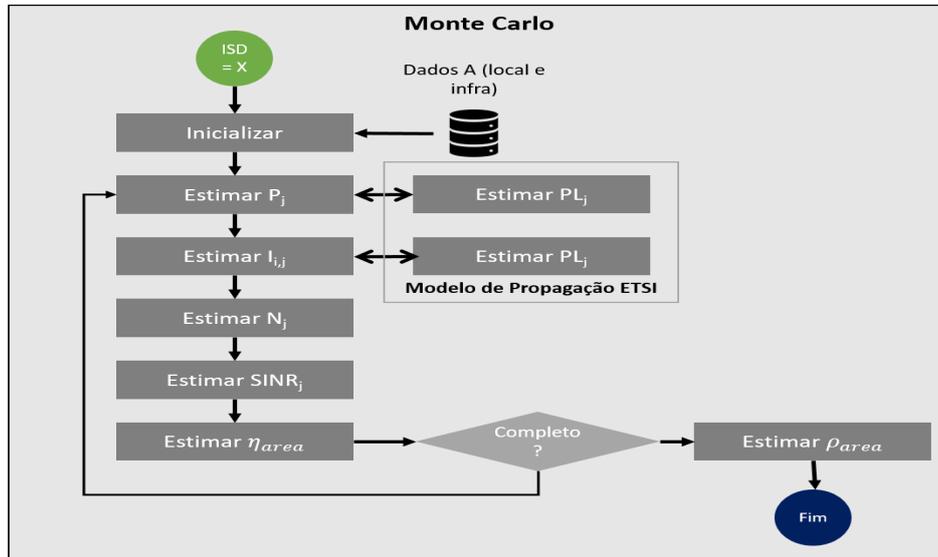


Figura 6.2 – Ilustração do Simulador de Monte Carlo, Adaptado de [4]

Este simulador cria 6 células hexagonais de estações rádio-base a uma distância $ISD=x$ uma da outra em uma área unitária pre-definida, considerando um fator 1 de reuso de frequências. Uma destas estações é considerada a estação transmissora, chamada aqui de *estacao_j* e as outras 5 são as estações interferentes (*estacao_i*).

Na área de cobertura das estações, são distribuídos usuários na área de cobertura seguindo-se uma distribuição uniforme, para os quais serão calculadas as potências de cada tipo de estação (transmissora e interferente), bem como o Ruído Aditivo Gaussiano Branco (AWGN), e posteriormente as SINRs, conforme a equação 6.3.2.

$$SINR = \frac{P_j}{\sum_i I_{i,j} + N_j} \quad (6.1)$$

em que P_j é a potência do sinal da estação principal recebido pelo usuário, $\sum_i I_{i,j}$ é soma das potências interferentes na estação j e N_j é o ruído AWGN (Additive White Gaussian Noise).

A Figura 6.2 descreve o processo de simulação. Como se pode observar, o algoritmo tem início para uma distância $ISD = x$ entre as estações. Considerando este cenário, o simulador calcula para os usuários que foram gerados no espaço a potência P_j recebida da estação principal, bem como a interferência ($I_{i,j}$) das demais estações e o ruído AWGN. Para calcular

P_j e $I_{i,j}$, é necessária uma avaliação de PL para cada estação rádio base (i ou j).

Ainda na Figura 6.2, PL é o acrônimo na língua inglesa para a perda de percurso (*path loss*). O modelo utilizado para calcular PL é o desenvolvido pelo ETSI para o 5G, conduzido pelo 5GPP [2]. Esta escolha foi feita tendo em vista que o 5GPPP é uma iniciativa de parceria entre indústria e a comissão europeia justamente para desenvolvimento de padrões para o 5G. As equações propostas em [2] para o *downlink* são apresentadas a seguir, em que se empregou a Figura 6.3 para a definição dos parâmetros do modelo.

$$\begin{aligned}
 & \text{para } 10m < d_{2D} < d'_{BP} \\
 PL_{UMa-LOS} &= 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}f_c \\
 & \text{para } d'_{BP} < d_{2D} < 5km \\
 PL_{UMa-LOS} &= 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}f_c \\
 & \quad - 9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{para } 10m < d_{2D} < d'_{BP} \\
 PL_{UMa-NLOS} &= \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS}) \\
 PL'_{UMa-NLOS} &= 13.54 + 39.08\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}f_c \\
 & \quad - 0.6(h_{UT})
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Nas equações acima, para perda de percurso em linha de visada e para perda de percurso sem linha de visada, d_{3D} representa a distância entre a antena de transmissão e o usuário, como visto na Figura 6.3, d_{2D} é a distância linear entre o site e o usuário, também na Figura 6.3, f_c é a frequência central do sinal transmitido em Hertz (H), h_{UT} é a altura da antena do usuário, h_{BS} é a altura da antena do site e d'_{BP} é definido pela equação 6.4 [45].

$$d'_{BP} = 4h'_{ERB}h'_{UT}\frac{f_c}{c} \tag{6.4}$$

em que h'_{ERB} e h'_{UT} são as alturas efetivas da antena da estação rádio base e do terminal do usuário, respectivamente, dados pelas equações 6.5 e 6.6.

$$h'_{ERB} = h_{ERB} - h_E \tag{6.5}$$

$$h'_{UT} = h_{UT} - h_E \tag{6.6}$$

em que h_{ERB} e h_{UT} são as alturas reais da ERB e do terminal do usuário, respectivamente e h_E depende do modelo de canal e é a altura efetiva do ambiente [45].

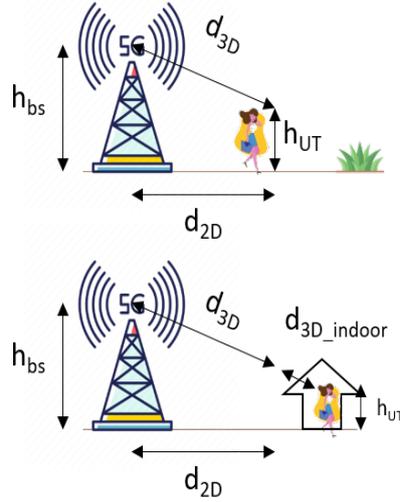


Figura 6.3 – Dimensões para estimar a perda de percurso

Na Figura 6.3, é possível ver dois cenários, um *outdoor* e outro *indoor*. A perda de percurso média é formada por estas duas componentes. A perda em ambiente externo é calculada como nas equações 6.2 e 6.3, enquanto para o interno, da forma que a equação 6.3.2 descreve.

$$PL_{indoor} = P_{L_b} + P_{L_{tw}} + P_{L_{in}} + N(0, \sigma_p^2) \quad (6.7)$$

Na equação 6.3.2, P_{L_b} é calculado com base nas inequações de perda de percurso com e sem linha de visada, a depender do cenário, substituindo-se d_{3D} por $(d_{3D} + d_{3D_{indoor}})$. Ainda, $P_{L_{tw}}$ é a perda de penetração em edifícios, enquanto $P_{L_{in}}$ é a perda interna, que depende da espessura das paredes, e σ_p^2 é o desvio padrão da perda por penetração [45].

A equação se relaciona com a equação a medida que P (potência do sinal recebido da estação principal) e I (potência recebida do sinal interferente) são dadas pela potência de transmissão das estações após os efeitos de perda de percurso.

Este processo de cômputo das potências, perdas de percurso e cálculo de AWGN são repetidos diversas vezes, por meio da criação de novos distribuídos por uma distribuição uniforme, até que se considere que a variação nas SINRs médias calculadas pelo sistema a cada iteração esteja dentro de um intervalo de confiança pré-determinado pelo usuário. Quando este ponto é atingido, considera-se a simulação completa, como mostra a etapa de decisão na Figura 6.2, e a capacidade pode ser calculada.

A partir da eficiência espectral (η_{area}) na área em estudo, a capacidade ρ_{area} é dada pela

equação 6.8.

$$\rho_{area} = \eta_{area} BW \quad (6.8)$$

em que η_{area} é dado pela equação 6.9 e BW é a largura de banda do sistema em estudo.

$$\eta_{area} = \eta_{célula} densidade_{celulas} \quad (6.9)$$

em que $\eta_{célula}$ é a eficiência espectral de cada célula e é um valor carregado no bloco A, que depende da tecnologia em uso (neste caso 5G), do tipo de modulação e da frequência escolhida.

O processo é feito para uma lista de ISDs definida pelo usuário conforme a sua preferência. O resultado da simulação é um arquivo em excel, que contém uma lista de distâncias inter-sites com as capacidades/ km^2 correspondentes. De posse desta lista, por meio de interpolação, cria-se uma função que relaciona a distância entre *sites* e a capacidade por unidade de área. Esta função é carregada no módulo de otimização para calcular a capacidade oferecida por diferentes quantidades sites, e, por consequência, ISDs propostas pelo módulo.

6.3.3 Otimização de compartilhamento de sites

Considerando as informações de entrada trazidas do bloco A e a relação ISD vs Capacidade/área resultante do dimensionamento de infraestrutura, é possível dar início ao processo de otimização dos acordos de compartilhamento. Este processo será realizado por meio de algoritmos evolucionários, que foram descritos no capítulo 5, conforme descrição a seguir.

O objeto a ser otimizado pelo algoritmo evolutivo é o conjunto S apresentado no Capítulo 4, que é composto pelo número de ERBs implementadas em diferentes coalizões possíveis entre as K operadoras pertencentes ao conjunto ϑ .

Existirão duas funções objetivo para o problema, uma que busca a maximização do do menor lucro entre as operadoras, e outra, que busca a maximização da taxa de transmissão oferecida por estas empresas aos seus usuários, conforme descrito no capítulo 4 e replicadas em 6.10

$$l_k = U_k \rho^k \delta_k - c_k, \quad (6.10)$$

em que δ_k é o preço/Mbps cobrado pela operadora k, $\rho^{k,a}$ é a taxa de transmissão média de k na área em estudo a e U_k é o número de usuários de $k \in \vartheta$ e ρ^k é calculado por meio de simulação, como foi apresentado no capítulo 4. Estas equações serão otimizadas respeitando-

se os limites para o número de ERBs conforme foi apresentado no Capítulo 4.

Como foi visto no Capítulo 2, podem existir diferentes tipos de acordo de compartilhamento. Neste trabalho, avaliam-se o compartilhamento de infraestrutura passiva de sites e o compartilhamento de rede ativa. Cada um implica uma divisão distinta de custos de componentes da rede, em que nem sempre os custos de todos componentes podem ser compartilhados, como mostra Tabela 2.1 no Capítulo 2. Já nas informações de entrada, o usuário pode indicar o tipo de compartilhamento que deseja avaliar. A partir desta indicação, o simulador consultará uma base de dados que faz a atribuição de custos de infraestrutura conforme à Tabela 2.1 e estabelecerá quais custos serão compartilháveis e quais não o serão para o tipo de compartilhamento escolhido, gerando as equações 4.15 e 4.16, vistas no Capítulo 4. Estes custos, por sua vez, serão utilizados como entrada para o cálculo dos custos totais (calculados em valor presente líquido de CAPEX e OPEX) de infraestrutura e dos lucros por operadora, dentro da calculadora de objetivos que aparece no bloco C.1 na Figura 6.1. Esta calculadora segue as equações 4.19 e 4.20 apresentadas no Capítulo 4.

Calculados os objetivos de maximização de lucro e de taxa de transmissão, o algoritmo de otimização NSGA-II segue os passos que foram descritos no Capítulo V (ver Figura 5.3) e que estão replicados de forma simplificada na Figura 6.1, no bloco C.1. Diversas soluções são testadas, de forma que as mais vantajosas de forma simultânea são armazenadas em uma lista e uma também em formato gráfico, formando uma fronteira de Pareto.

O Bloco C.1 também fornece os lucros, ganhos e economias obtidos por cada operadora ao assumir um acordo de compartilhamento, informação esta dada para cada solução ótima distinta encontrada pelo otimizador. Além disto, também são fornecidas informações à respeito da variação de usuários entre as operadoras ao longo de um período T após a formalização do acordo. De posse destas informações, é possível realizar a análise dos efeitos de mercado, o que deve ser feito por um usuário especialista, que terá a sua disposição a visualização gráfica deste dados, produzida pelos blocos "Variação de Usuários" e "Comparador de Lucro" em C.2 na Figura 6.1.

O último bloco de C.2 consiste no comparador dos acordos de compartilhamento com o operador neutro. Basicamente, a partir dos resultados de custos e capacidade para cada operadora, o bloco G faz a sugestão de preço oferecido pelo operador neutro para torná-lo uma opção viável no cenário de análise, como foi visto no Capítulo IV, na equação 4.32. A escolha pelo operador neutro em detrimento de um acordo entre múltiplas operadoras é subjetiva e deverá ser tomada por estas empresas.

O próximo capítulo apresenta os resultados de aplicação do *framework* para potenciais cenários brasileiros para o 5G.

7 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados de aplicação do *framework* a diferentes cenários possíveis para implementação do 5G. Primeiramente, apresentam-se resultados para o que será chamado de estudos de caso de referência, para os quais são geradas múltiplas combinações dos fatores que podem afetar o compartilhamento de infraestrutura, sendo eles: tipo de rede (ultra-densa (UDN) ou rural), situação da participação de mercado das operadoras (equilibrada - operadoras não alteram a posição de mercado em relação às demais | desequilibrada - há troca da posição de mercado ao longo do tempo) e opção de repasse da redução de custo em decorrência do compartilhamento aos usuários (preço livre).

Como foi visto no Capítulo 2 existem diversos tipos de compartilhamento distintos. Para os estudos de caso de referência, optou-se por apresentar o compartilhamento de *torres/mastros*. Esta escolha se justifica tendo-se em vista que esta modalidade envolve compartilhar tanto os custos de OPEX quanto de CAPEX, o que não ocorre para o compartilhamento de sites, por exemplo, e além disto, a proporção do total de custos com compartilhamento em relação ao total é intermediária quando comparada a das demais modalidades (relembrando, em acordo com o Capítulo 2: compartilhamento de sites → redução baixa, compartilhamento de RAN → redução muito alta, compartilhamento passivo de *backhaul* → redução intermediária, porém lista de componentes compartilhados mais restrita em relação ao compartilhamento de torres/mastros), permitindo a extrapolação dos resultados obtidos às demais modalidades. A lista de combinações possíveis é apresentada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Tabela de Estudos de Caso de Referência que Serão Analisados

N.o da Combinação	Tipo de Rede	Participação no Mercado	Repasse de Preço
1	UDN	Equilibrado	Livre
2	Rural	Equilibrado	Livre
3	UDN	Desbalanceado	Livre
4	Rural	Desbalanceado	Livre

Como o objetivo dos estudos de caso de referência é permitir a extrapolação dos resultados a outros cenários, faz-se uso do modelo de migração de usuários por reputação e preço de forma direta (apresentado no Capítulo 4 (equação 4.30)), já que os resultados finais serão feitos a partir deste mesmo modelo. É importante destacar que, pelo desconhecimento de opções mais apropriadas na literatura, optou-se pela proposição de um modelo de migração sendo a intenção de utilizá-lo muito mais de demonstrar as possibilidades da ferramenta e os possíveis efeitos de mercado, do que de afirmar que o comportamento retratado por ele reflete a realidade do mercado de comunicações móveis. De todo modo, o modelo pode ser

substituído por um que seja considerado mais adequado pelo usuário do *framework*.

Uma vez obtidos e analisados, os resultados dos estudos de caso de referência serão utilizados como insumo para uma segunda etapa: a aplicação do *framework* a cenários reais brasileiros em que acordos de compartilhamento de infraestrutura poderiam ser uma alternativa às operadoras. Esta fase será chamada de estudos de caso de mercado e para ela foram escolhidas três regiões brasileiras com o potencial de se tornarem redes 5G nas categorias de rede urbana densa, rede urbana comum e rede rural, sendo elas o bairro Vila Olímpia na cidade de São Paulo, a região da Asa Sul em Brasília e a cidade de Rio Verde, em Goiás, respectivamente.

Optou-se por gerar resultados do estudo de caso de referência primeiro para que fosse possível extrapolar os resultados de aplicação do *framework* aos casos reais, simplificando-se, assim, a análise deles. Por sua vez, a justificativa para os estudos de caso de mercado que foram selecionados é a seguinte: a Vila Olímpia é um dos grandes centros financeiros da cidade de São Paulo, com uma densidade de habitantes próxima dos 10.000 habitantes/ km^2 e, portanto, será utilizada como exemplo de uma rede urbana densa. A região da asa sul na cidade de Brasília está próxima do centro administrativo da cidade, que já aparece como local pioneiro para implantação da tecnologia de nova geração [99], sendo um interessante exemplo de rede urbana. Por fim, também por já despontar como um local de aplicação da tecnologia 5G, porém com foco na produção agrícola [100], a cidade de Rio Verde em Goiás aparece como terceiro cenário, sendo o retrato de uma rede rural.

A seção a seguir apresenta os dados de infraestrutura que serão utilizados em todos os cenários de avaliação.

7.1 DADOS COMUNS A TODAS AS SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentadas duas tabelas de dados as quais serão utilizadas tanto nos resultados do estudo de caso de referência, quanto nos resultados do estudo de caso de mercado. A Tabela 7.2 apresenta os custos utilizados para cada componente, retirados de [101]. A Tabela 7.3 indica quais deles são compartilhados e quais não são, em acordo com o tipo de compartilhamento escolhido [21], e, por fim, a Tabela 7.4 apresenta os dados que serão utilizados para as operadoras no estudo de caso de referência. Detalhes a respeito da participação de mercado das empresas serão vistos nas seções específicas por região, tendo em vista que este parâmetro varia a depender do local de análise.

Tabela 7.2 – Custos de Infraestrutura [4]

Tipo	Componente	CAPEX (US\$)	OPEX Anual (US\$)
RAN	Antena (1 setor)	1.500,00	150,00
RAN	Unidade de rádio remota	4.000,00	400,00
RAN	Unidade de rádio banda base	10.000,00	1.000,00
Site	Torre	10.000,00	-
Site	Materiais	5.000,00	-
Site	Transporte	10.000,00	-
Site	Instalação	5.000,00	-
Site	Aluguel	-	9.600,00
Alimentação	Alimentação AC/Gerador/Bateria	5000,00	500,00
Backhaul	Hub de alta velocidade	15.000,00	1.500,00
Backhaul	Roteador	2.000,00	200,00

Tabela 7.3 – Tabela Indicativa de Custos Compartilhados por Modalidade de Acordo

Componente	CAPEX	OPEX	Site	Mastro/Torre	Backhaul	RAN
Antena (1 setor)	S	S	N	N	N	S
Unidade de rádio remota	S	S	N	N	N	S
Unidade de rádio banda base	S	S	N	N	N	S
Torre	S	N	N	S	N	S
Materiais	N	S	S	S	N	S
Transporte	N	S	S	S	N	S
Instalação	S	N	S	S	N	S
Aluguel	N	S	S	S	S	S
Alimentação AC/Gerador/Bateria	S	S	S	S	S	S
Hub de alta velocidade	S	S	N	N	S	S
Roteador	S	S	N	N	S	S

Na tabela 7.3, S significa sim e indica os custos que são compartilhados na modalidade de compartilhamento descrita pela coluna, enquanto N significa não e indica os custos não compartilhados em cada modalidade. Como foi visto no Capítulo 4, as operadoras sempre implementam a totalidade da infraestrutura necessária aos *sites*, compartilhando apenas alguns dos componentes que compõem esta infraestrutura, a depender da modalidade de acordo selecionada.

Tabela 7.4 – Dados de Preço (R\$/Mbps) e Reputação das Operadoras [6], [7]

Operadora	Preço/Mbps	Reputação (Max = 1)	Teto de <i>Churn</i> mensal
A	$1.86 \times \text{Valor Arbitrário}$	0,66	5,0 %
B	$1.02 \times \text{Valor Arbitrário}$	0,6	5,0 %
C	$1.95 \times \text{Valor Arbitrário}$	0,48	5,0 %
D	$1.62 \times \text{Valor Arbitrário}$	0,65	5,0 %

Na Tabela 7.4, considerou-se que reputação é dada por $(1 - \text{Índice de Reclamação})$, quem que o dado Índice de Reclamação foi obtido por meio do relatório da Anatel de desempenho das operadoras em 2020 [6]. O teto de [7] em 5% foi assim escolhido de forma a contemplar todos os piores casos de *churn* observando-se o desempenho das operadoras neste quesito até o primeiro trimestre de 2021 [7]. Ainda, por não ser possível encontrar um valor de Preço/Mbps na literatura para o mercado brasileiro, tomou-se a ARPU das operadoras conforme o relatório da Anatel, [6], normalizou-se cada uma delas em relação ao valor médio, e definiu-se um valor arbitrário único para todos os cenários dos estudos de caso de referência, levando a $Preço = ARPU_{normalizada} \times \text{Valor de Referência}$ de tal forma que o preço garantisse lucro ≥ 0 para pelo menos uma operadora em todos os cenários do estudo de caso de referência, ou seja, para garantir que nenhum dos estudos de caso de referência resultassem em prejuízo para todas as operadoras.

7.2 RESULTADOS PARA ESTUDO DE CASO DE REFERÊNCIA

7.2.1 Dados para as Redes Urbanas Ultra-densas

Para as redes urbanas ultra-densas, faz-se a proposição de alocação de uma infraestrutura composta por células do tipo macro com antenas MIMO (8x8) e células do tipo micro com antenas SISO.

De posse dos dados observados na Tabela 7.5 e 7.6, baseados na região da Vila Olímpia, utiliza-se o simulador de Monte Carlo proposto em [4] para cálculo da relação distância entre sites (ISD) (m) vs Capacidade/ km^2 .

Tabela 7.5 – Dados da Infraestrutura para Simulação da Relação ISD vs Capacidade de Redes Ultradensas [4]

Percentual de usuários <i>indoor</i>	50%
Altura das antenas de transmissão macro	85 m
Potência das antenas de transmissão macro	40 dBW
Ganho das antenas de transmissão macro	16 dBi
Perda das antenas de transmissão macro	1 dB
Altura das antenas de transmissão micro	30 m
Potência das antenas de transmissão micro	24 dBW
Ganho das antenas de transmissão micro	4 dBi
Perda das antenas de transmissão micro	1 dB
Altura das antenas de recepção	1,5 m
Ganho das antenas de recepção	4 dBi
Perda das antenas de recepção	4 dB
Outras perdas de recepção	4 dB
Frequência de operação	3,5 GHz e 26 GHz
Largura de Faixa	p/3,5 GHz: 40 MHz, p/26 GHz: 100 MHz
Número de setores das células	3
Fator de contenção da rede (<i>contention/sharing rate</i>)	1 %

Tabela 7.6 – Dados do Local Utilizados para Simulação das Redes Ultradensas

Altura dos edifícios	85 m
Largura das ruas	20 m
Antenas em edifícios	Sim
Distância limite (linha de visada)	250 m

Os resultados obtidos por meio da simulação podem ser vistos nas Figuras 7.1 e 7.2.

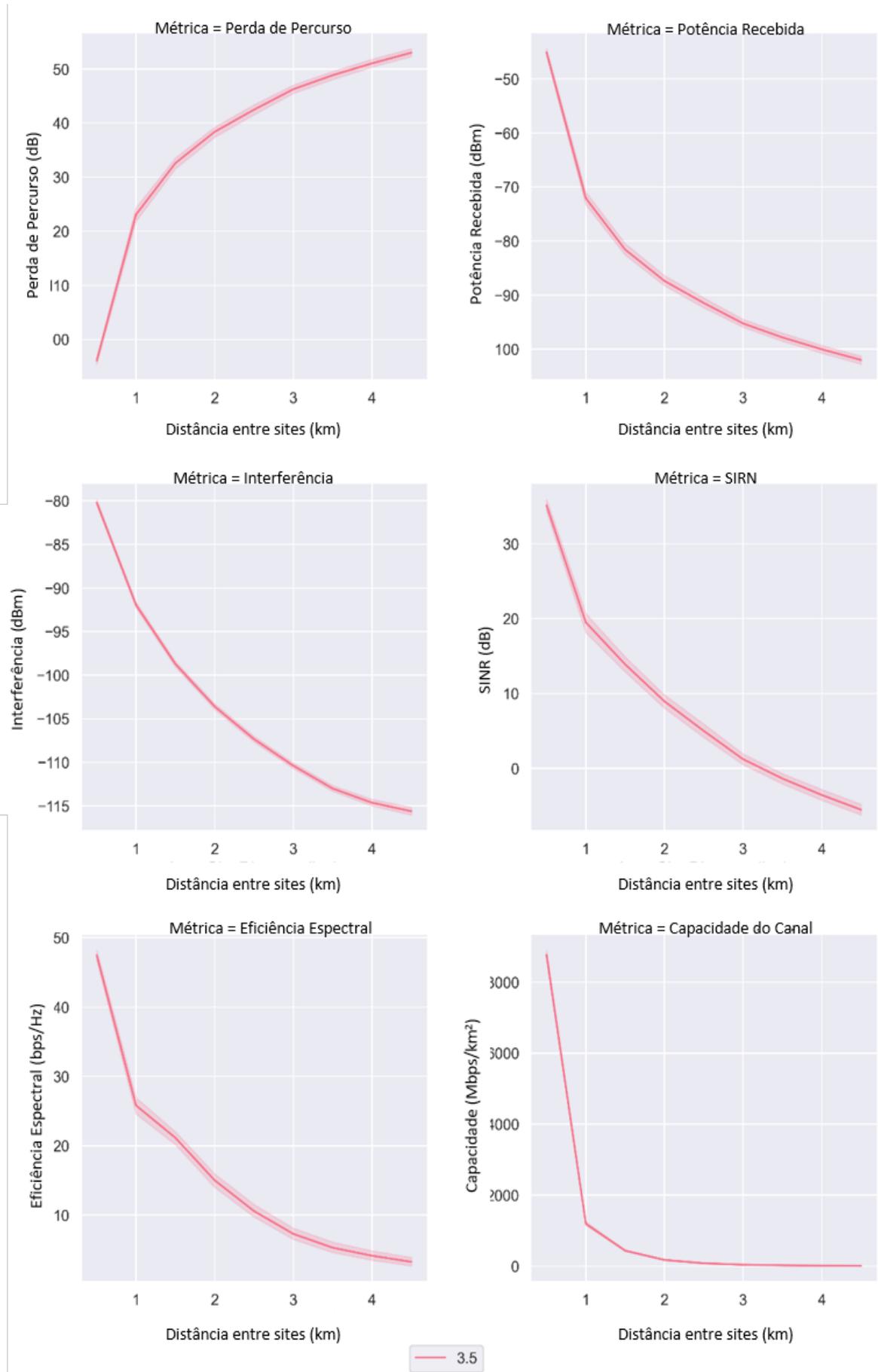


Figura 7.1 – Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes 3.5 GHz MIMO

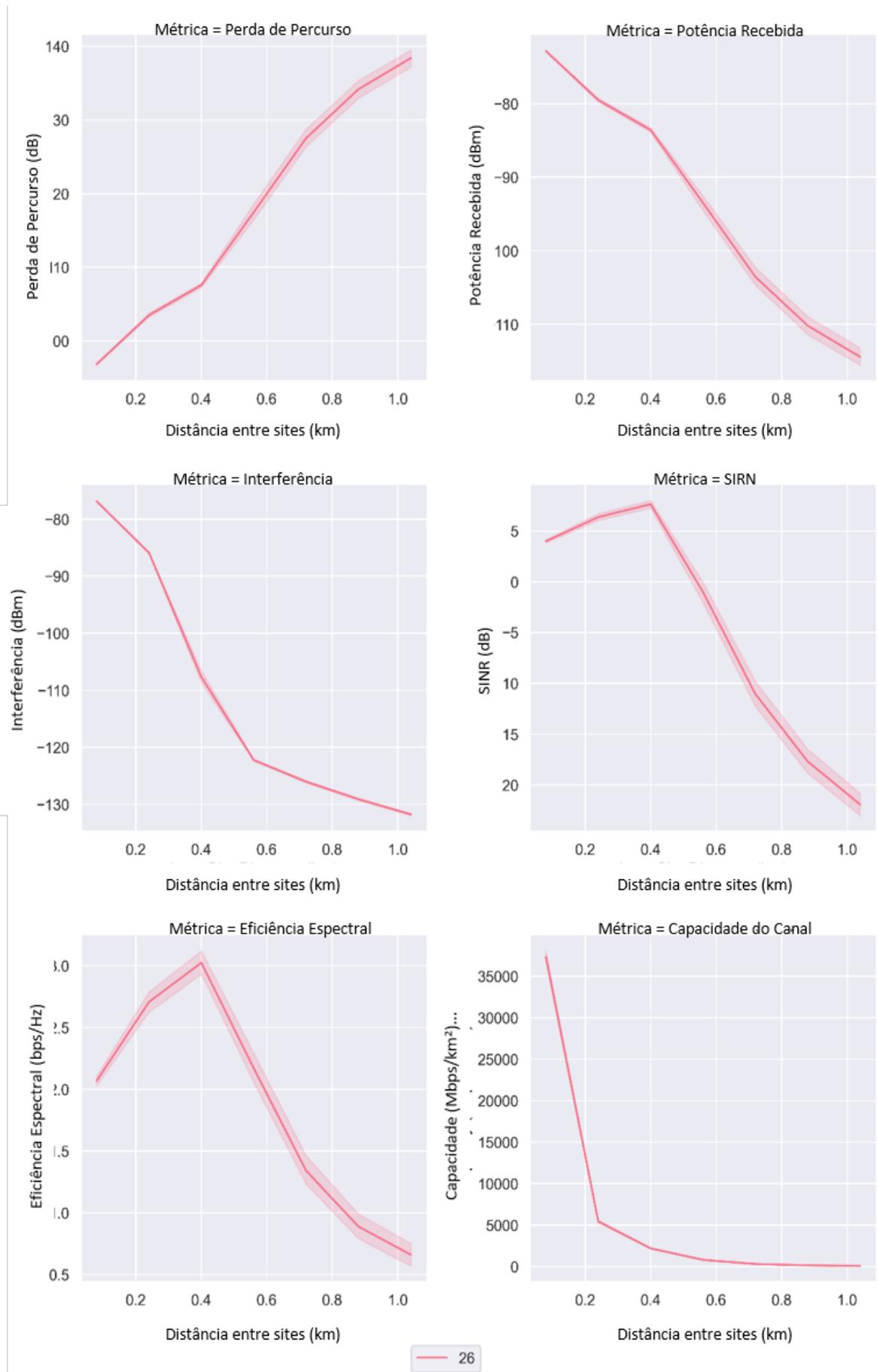


Figura 7.2 – Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes 26 GHz SISO

Nas Figuras 7.1 e 7.2, os resultados foram obtidos como a média de desempenho dos usuários distribuídos em uma célula. Nestas figuras, mostra-se igualmente o intervalo de confiança obtido para o nível de confiança de 95 %, considerando uma distribuição Gaussiana [4]. Na Figura 7.2, a quebra observada em 0,4 km ocorre em decorrência do modelo de canal, que calcula a perda de percurso por meio de uma equação até a distância de *breakpoint* (d_{bp}). Observa-se para 7.1 uma mesma quebra, agora em 1km, ocasionada pela mesma razão, conforme equações apresentadas no Capítulo 6.

7.2.2 Dados para as Redes Rurais

Para as redes rurais, faz-se a proposição de alocação de uma infraestrutura composta por células do tipo macro com antenas SISO (1x1) em 700 MHz.

De posse dos dados observados nas Tabelas 7.7 e 7.8, baseados na cidade de Rio Verde, utiliza-se o simulador de Monte Carlo proposto em [4] para cálculo da relação ISD(m) vs Capacidade/ km^2 .

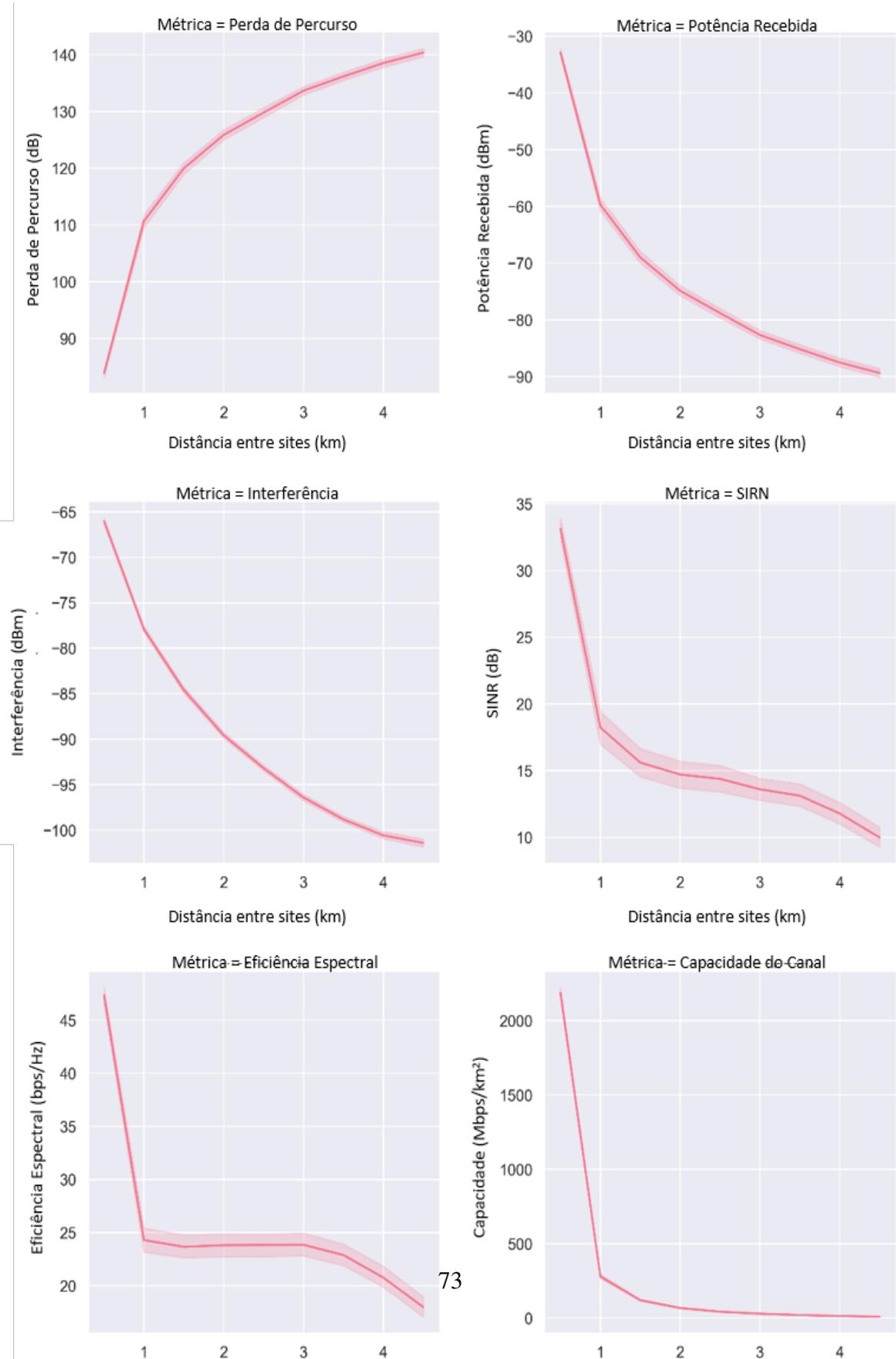
Tabela 7.7 – Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Percentual de usuários <i>indoor</i>	50%
Altura das antenas de transmissão macro	35 m
Potência das antenas de transmissão macro	40 dBW
Ganho das antenas de transmissão macro	16 dBi
Perda das antenas de transmissão macro	1 dB
Altura das antenas de transmissão micro	30 m
Potência das antenas de transmissão micro	24 dBW
Ganho das antenas de transmissão micro	4 dBi
Perda das antenas de transmissão micro	1 dB
Altura das antenas de recepção	1,5 m
Ganho das antenas de recepção	4 dBi
Perda das antenas de recepção	4 dB
Outras perdas de recepção	4 dB
Frequência de operação	700 MHz
Largura de Faixa	p/ 700 MHz: 10 MHz
Número de setores das antenas	3
Fator de contenção da rede (<i>contention/sharing rate</i>)	1 %

Os resultados obtidos por meio da simulação para 700 MHz podem ser vistos na Figura 7.3.

Tabela 7.8 – Dados do Local Utilizados para Simulação das Redes Ultradensas

Altura dos edifícios	5 m
Largura das ruas	30 m
Antenas em edifícios	Não
Distância limite (linha de visada)	250 m



Na Figura 7.3, os resultados foram obtidos como a média de desempenho dos usuários distribuídos em uma célula, considerando o *downlink*. A quebra observada em 0,7 km ocorre em decorrência do modelo de canal, que calcula a perda de percurso por meio de uma equação até a distância de *breakpoint* (d_{bp}), e uma nova após esta distância, conforme apresentado no Capítulo 6. Nestas figuras, mostra-se igualmente o intervalo de confiança obtido para o nível de confiança de 95 %, considerando uma distribuição Gaussiana [4].

7.2.3 Resultados para o Estudo de Caso de Referência

7.2.3.1 Caso 1: Compartilhamento de Torres/Mastros - Redes Ultradensas Equilibradas e Preço Livre

Dando início a apresentação dos estudos de caso de referência, apresentam-se os resultados da aplicação do *framework* a uma rede ultradensa em um mercado equilibrado no qual as operadoras avaliam o compartilhamento de torres. A fronteira de Pareto isolada, a fronteira com a presença dos resultados de todas as operadoras e o comportamento da migração de usuários podem ser vistos nas Figuras 7.4, 7.5 e 7.6, respectivamente.

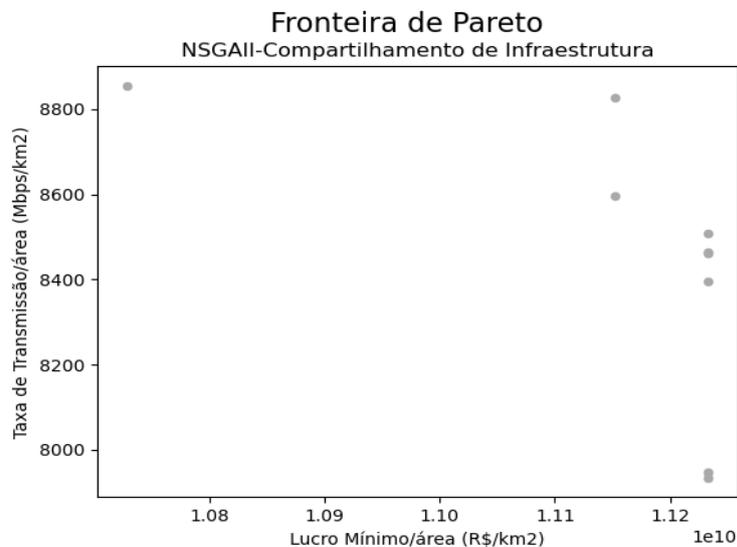


Figura 7.4 – Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio

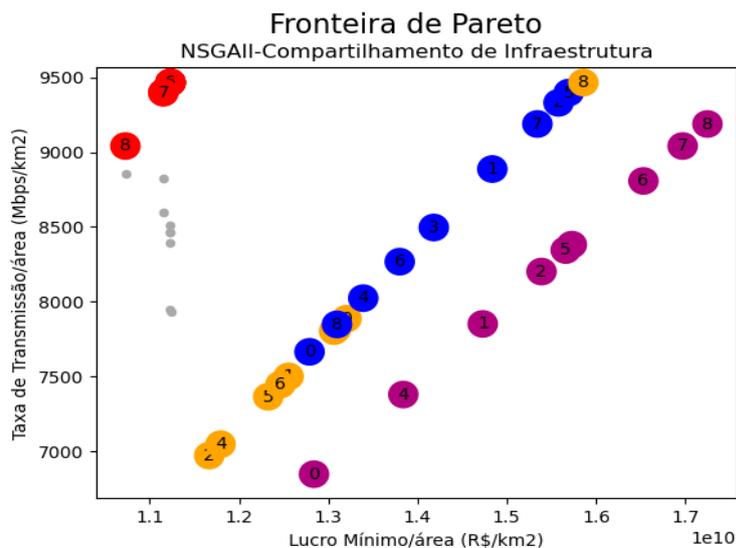


Figura 7.5 – Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A | Vermelho:Operadora B | Azul: Operadora C | Laranja: Operadora D | Cinza: Fronteira de Pareto

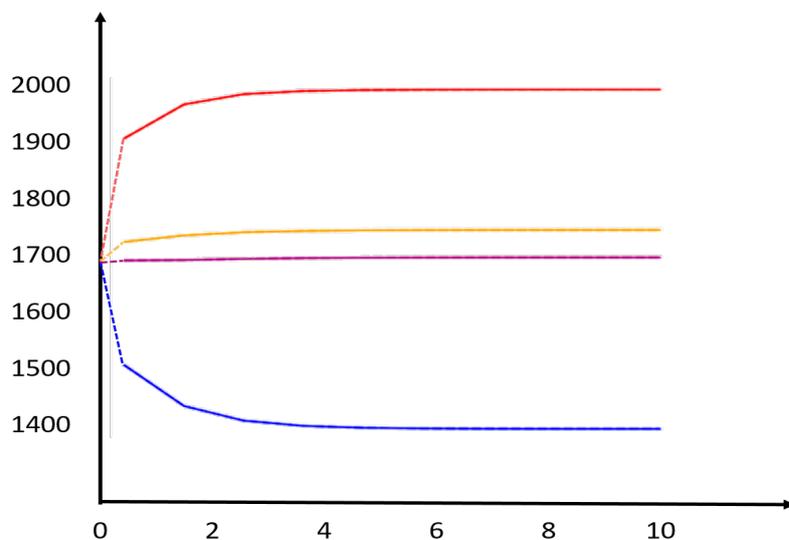


Figura 7.6 – Comportamento da Migração de Usuários para o Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A | Vermelho:Operadora B | Azul: Operadora C | Laranja: Operadora D | Cinza: Fronteira de Pareto

A fronteira de Pareto é construída a partir dos conjuntos S que foram selecionados pelo algoritmo de otimização como soluções ótimas. A Tabela 7.9 apresenta a porção desses conjuntos correspondente as ERBs do tipo micro para as 9 soluções encontradas e apresentadas em 7.4 e 7.5.

Tabela 7.9 – Lista do Número de ERBs/SOLução para ERBs do tipo micro

Solução	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
0	3	15	27	24	18	12	16	9	5	0	1	5	1	18	5
1	30	37	18	33	2	9	2	2	2	10	10	7	3	16	0
2	31	39	16	32	5	17	4	1	2	8	10	1	4	14	4
3	30	40	18	33	4	9	3	2	2	14	10	3	3	15	0
4	30	36	18	32	4	9	3	1	1	8	10	7	2	17	0
5	31	39	19	30	3	14	3	2	3	9	11	2	5	15	0
6	33	40	16	33	4	9	4	1	2	10	11	0	3	15	3
7	31	40	16	31	3	9	4	2	3	9	10	2	11	15	0
8	30	40	18	33	4	9	4	0	2	10	10	2	13	12	0

A explicação para o comportamento dos usuários em 7.6 tem respaldo na Tabela 7.4. Como foi visto no Capítulo 4, os usuários tendem a migrar por uma combinação entre preço e reputação das empresas. A operadora B é a que possui a melhor relação reputação/preço, cobrando menos que as demais, enquanto mantém uma boa reputação relativa às outras. A operadora C, por sua vez, além de ser a que cobra mais caro é a que possui a pior reputação, motivo pelo qual perde assinantes ao longo do tempo. A e D aparecem em posições intermediárias, com reputações muito próximas (0,66 e 0,65, respectivamente), mas cuja diferença de preço é um pouco maior (1,86 e 1,62, respectivamente), o que justifica, inclusive, um maior ganho de usuários por parte de D.

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de torres é parte dos resultados fornecidos pelo *framework*, em arquivos .txt, seguindo as equações vistas no Capítulo 4. Eles são apresentados nas Tabelas 7.10 e 7.11, respectivamente, considerando a média dos resultados das soluções na Fronteira de Pareto (ver Figura 7.5).

Tabela 7.10 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio

Operadora	Lucro Antes (R\$Bn)	Lucro Depois (R\$Bn)	Variação (%)	Receita Antes (R\$Bn)	Receita Depois (R\$Bn)	Variação (%)
A	15,78	15,81	0,16	15,83	15,83	0
B	11,07	11,10	0,24	11,12	11,12	0
C	14,77	14,80	0,19	14,82	14,82	0
D	15,95	14,98	0,16	15,05	15,05	0

Tabela 7.11 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio

Operadora	CAPEX Antes (Mln R%)	CAPEX Depois (Mln R%)	Variação (%)	OPEX Antes (Mln R%)	OPEX Depois (Mln R%)	Variação (%)
A	18,69	8,77	-53,09	26,61	13,89	-53,10
B	20,25	9,84	-51,42	32,08	15,55	-51,52
C	18,90	7,99	-57,68	29,93	12,71	-57,55
D	19,60	10,24	-47,81	31,06	16,20	-47,83

1.2.3.2.A. Análise de Resultados

Para dar início a análise de resultados, apresentam-se as Figuras 7.7, para a maximização de lucro mínimo e as Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 para a maximização da taxa média, que ilustram como o problema de otimização multiobjetivo é atacado pelo algoritmo NSGA-II. O princípio básico por trás destas imagens servirá de base para a análise de resultados de todos os casos de estudo que são apresentados neste capítulo.

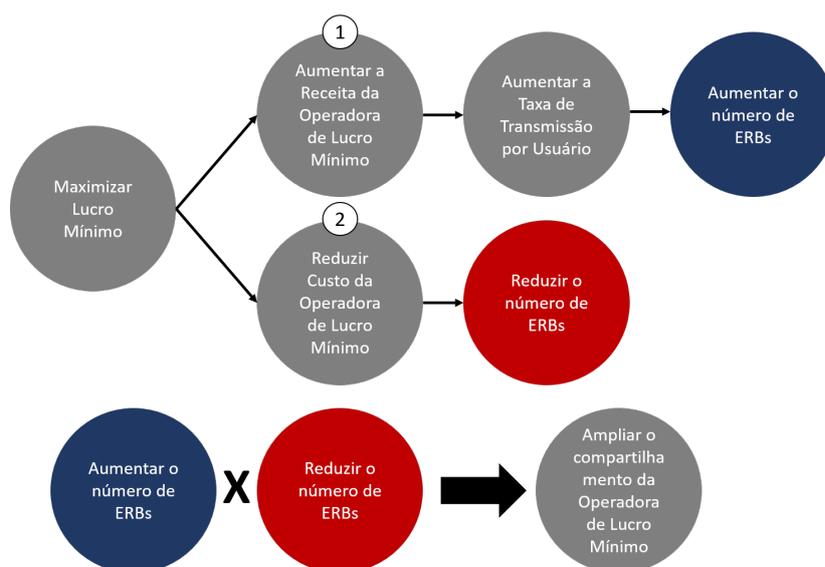


Figura 7.7 – Descrição do Problema de Maximização do Lucro Mínimo

A Figura 7.7 mostra que o problema de otimização do lucro mínimo pode ser atacado por duas frentes: 1) aumentando-se a receita da operadora de lucro mínimo ou 2) reduzindo os custos desta operadora. Para a opção 1), lembrando-se que $\text{Receita} = \text{Usuários} \times \text{Taxa de Transmissão}$, da forma como o problema foi definido, só é possível aumentar a taxa de transmissão. Este objetivo é alcançado por meio da implementação de um número maior de ERBs, especialmente do tipo que compõe as microcélulas. Em relação à alternativa 2), reduzir custos significa reduzir o quanto se gasta com as estações. De maneira simples, poderia se pensar em reduzir o número de ERBs; por outro lado, isto entraria em conflito com o objetivo 1) de aumento da taxa de transmissão. A solução encontrada para resolver esta situação

é a de ampliar o compartilhamento de ERBs da operadora de menor lucro, reduzindo-se, assim, pelo menos o custo/estação e, portanto, o valor final pago pela operadora por sua infraestrutura.

Em relação a maximização da taxa de transmissão, apresentam-se as Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 .

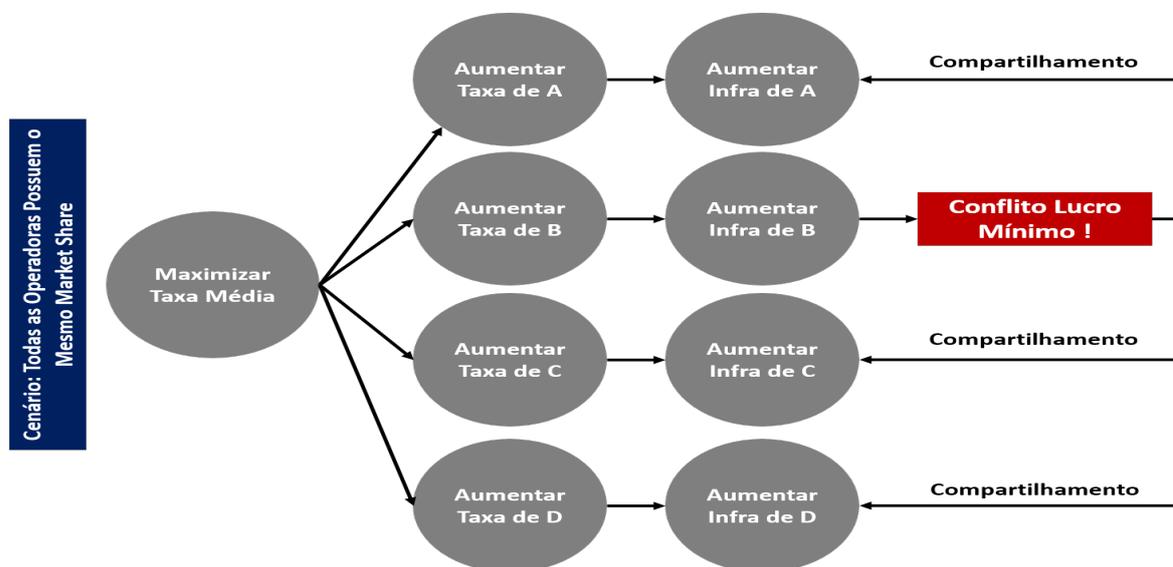


Figura 7.8 – Descrição do Cenário de Maximização da Taxa de Transmissão para *Market Share* Idêntico entre Operadoras

Na Figura 7.8, considera-se um cenário em que a participação de mercado de todas as operadoras seja idêntica. Para maximizar a taxa de transmissão média do sistema, deve-se maximizar a taxa média de transmissão de todas as operadora, haja vista que elas possuem o mesmo número de usuários, contribuindo de maneira igual para a média geral. Como foi visto para o caso de maximização de lucro mínimo, quando se deseja aumentar a taxa média das operadoras, é necessário ampliar a infraestrutura. Por outro lado, quando se avalia este objetivo para a operadora B, existirá a restrição de custo gerada pelo outro problema de otimização de lucro mínimo que a afeta, o que a levará a compartilhar infraestrutura para ampliar o seu total de estações.

Em um cenário em que todas as operadoras possuem o mesmo *market share*, não fará diferença para a operadora B a parceria escolhida em termos de redução de custo, já que para coalizões entre 2 empresas, as duas parceira arcariam com 50 % dos custos compartilháveis, para coalizões entre três operadoras, 1/3 dos custos compartilháveis e por fim, para quatro coalizões, 1/4 dos custos compartilháveis. Ainda neste cenário, provavelmente as parcerias entre um número maior de operadoras seria prevalecente, levando a um tamanho de infraestrutura/operadora praticamente idêntico e, por consequência, levando à mesma taxa de transmissão/empresa, haja vista o mesmo *market share*.

Para o caso de participações de mercado diferentes, o comportamento do algoritmo muda, como mostram as Figuras 7.9 e 7.10.

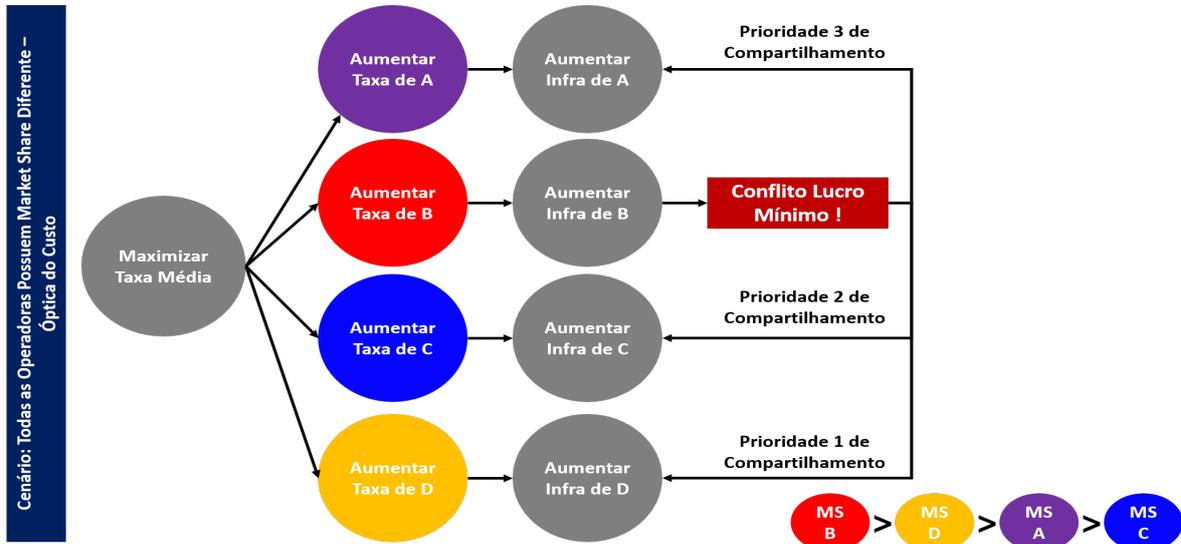


Figura 7.9 – Descrição do Problema de Maximização de Taxa de Transmissão Média pela Óptica do Custo da Infraestrutura

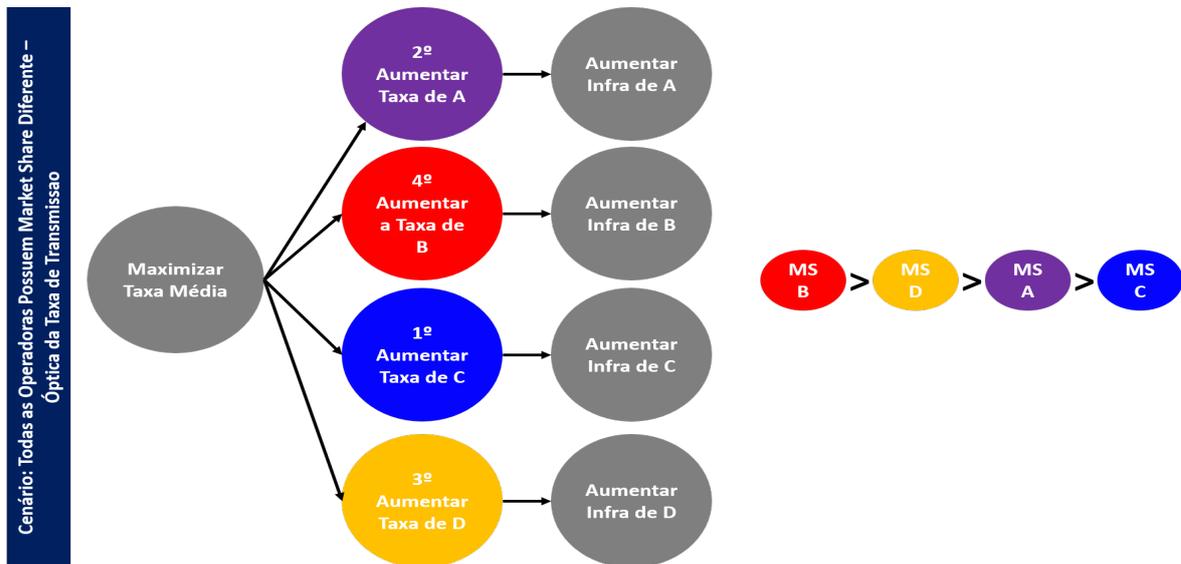


Figura 7.10 – Descrição do Problema de Maximização de Taxa de Transmissão Média pela Óptica da Taxa de Transmissão

Observa-se que para o caso de *market share* diferente, o problema passa a ter duas ópticas. a primeira delas, vista em 7.9, é orientada apenas pela restrição de custo imposta pelo objetivo de maximização do lucro mínimo. Neste cenário, B compartilharia infraestrutura com as demais operadoras seguindo o ranking de prioridades que a figura mostra, considerando a situação de *market share* também ilustrada ($MS B > MS D > MS A > MS C$).

Pela óptica da taxa de transmissão, o objetivo é maximizar a taxa de transmissão média observada no mercado em análise. Com isto, idealmente, o algoritmo vai tentar fazer com que todas as operadoras tenham a maior taxa possível para si, seguindo uma ordem de prioridade, tendo em vista a operadora que, ao adicionar 1 ERB, traz mais impacto para o resultado global de taxa de transmissão. Para o mercado das redes ultradensas, o ranking pode ser visto na Figura 7.10.

O resultado final para cenários em em que o *marketshare* varia entre as operadoras, é uma combinação do que é visto nas Figuras 7.7, 7.9 e 7.10, que para o caso de uso de redes ultradensas em mercados equilibradas, levou aos resultados observados na Tabela 7.9, que mostra as soluções para a alocação de ERBs para microcélulas e 7.11 que apresenta o resultado de tráfego resultante desta infraestrutura.

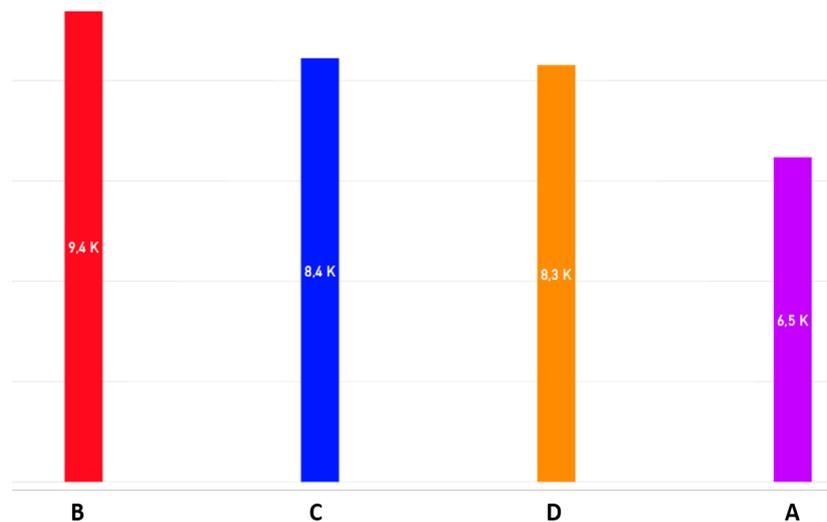


Figura 7.11 – Taxa de Transmissão Média/Operadora para o Cenário do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Equilíbrio

Na Tabela 7.9, observa-se que a operadora B é a que aparece em um maior número de acordos de compartilhamento, alocando uma quantidade de estações de maior número naqueles que contemplam a operadora D e logo em seguida a operadora A, dado que são as que lhe oferecem melhores condições de custos. Considerando o que foi explicado para o ranking de maximização de taxa de transmissão, que prioriza a operadora C, observa-se que ela toma vantagem dos acordos de B com A e C, sendo as coalizões BCD e ABC as que alocam a maior quantidade de estações.

Feita esta análise, parte-se para a avaliação dos efeitos do compartilhamento no desempenho financeiro e em termos de custos para o mercado em questão. Observa-se ao se comparar as Tabelas 7.10 e 7.11, que os custos representam um baixo percentual do lucro, sendo a receita o fator de maior impacto no resultado. Com isto, conclui-se que, para maximizar o lucro da operadora B, maximizar a sua receita agrega mais valor que minimizar seu lucro.

Por fim, faz-se a análise de custos. Observa-se uma redução percentual que varia entre 40 % e 50 %. Isto ocorre devido às múltiplas parcerias formadas entre três ou mais empresas, como mostrou a Tabela 7.9. Para entender o custo/operadora, a lista a seguir resume o que foi explicado anteriormente/operadora, de forma a facilitar o entendimento.

1. Operadora B: Como foi visto, o tráfego de dados está orientando as soluções muito mais que os custos. Neste sentido, para alcançar o objetivo de maximização do lucro mínimo, o algoritmo busca aumentar a receita da operadora B por meio da taxa de transmissão ofertada por esta operadora. Este objetivo é alcançado por meio da alocação de mais infraestrutura de ERBs micro, que ampliam a capacidade, levando a um aumento de custos. Por outro lado, ainda que de forma secundária, os custos também afetam o lucro. Desta maneira, B compartilha uma parcela relevante de infraestrutura, principalmente com as operadoras A e D (ver ABC e BCD na Tabela 7.9). O custo de B é maior que o das demais haja vista o compartilhamento de despesas proporcional a participação de mercado.
2. Operadora C: Foi visto no item 1 que as operadoras B e C estão juntas em muitas parcerias. Isto ocorre porque C também é incluída as parcerias entre B-A e B-D, de forma a aumentar a sua taxa média de transmissão. Devido à divisão de custos proporcional à participação de mercado, C tem a menor despesa em relação às demais.
3. Operadoras A e D: Estas operadoras tem participação de mercado em um patamar próximo, sendo ambas escolhidas por B como parceiros principais para o compartilhamento. A infraestrutura das duas empresas, devida a isto, acaba tendo tamanho similar, sendo o custo da operadora D um pouco maior, assim como o seu *market share*.

Destaca-se novamente, que o custo teve apenas uma influência secundária no comportamento das soluções, devido, como foi dito, a sua baixa representatividade percentualmente em relação ao lucro. Isto leva a crer que em um cenário de compartilhamento com preço linear, ou seja, com repasse das economias ao preço cobrado aos consumidores, as operadoras acabariam perdendo parte do lucro frente a opção sem compartilhar.

7.2.3.2 Caso 2 - Compartilhamento de Mastro/Torres - Redes Rurais Equilibradas Preço Livre

Para fazer o contraponto com as redes ultradensas, traz-se o cenário das redes rurais. Será observado que para este contexto, o custo tem uma relevância muito maior que para o caso anterior, o que vai ocasionar, ainda que o algoritmo siga o mesmo método para otimizar às soluções, resultados diferentes do que foi visto no caso 1.

Para dar início às análises, apresentam-se os resultados da fronteira de Pareto sem e com operadoras e o comportamento dos usuários ao longo do tempo.

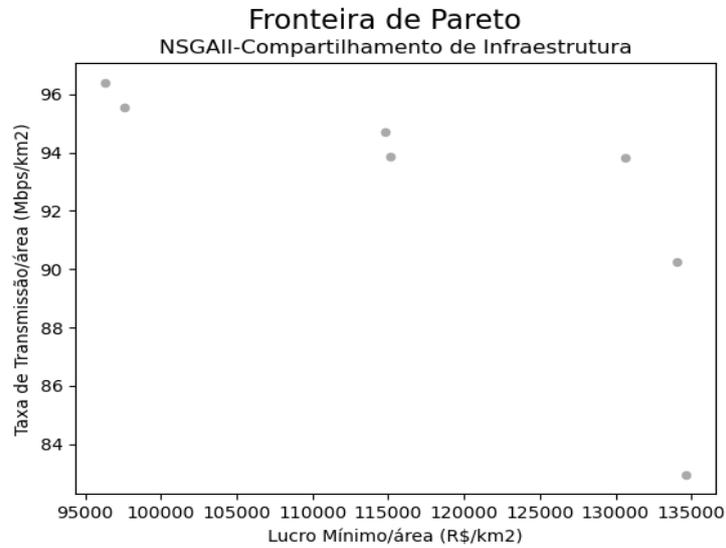


Figura 7.12 – Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio

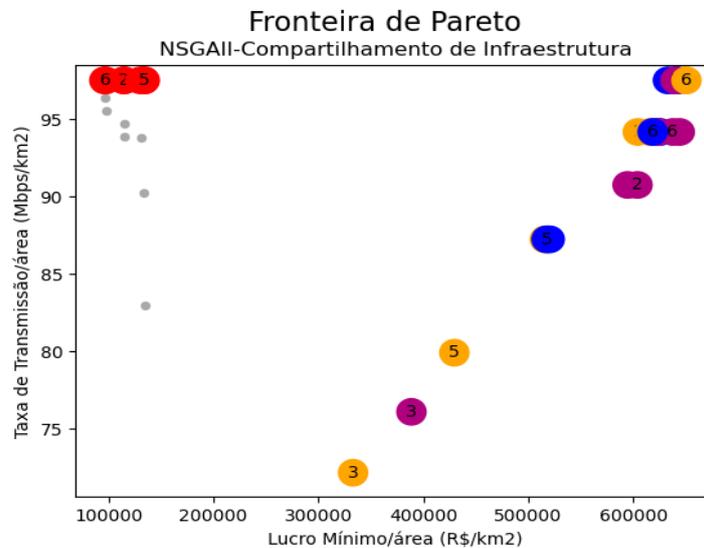


Figura 7.13 – Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio. Legenda. Roxo:Operadora A | Vermelho:Operadora B | Azul: Operadora C | Laranja: Operadora D | Cinza: Fronteira de Pareto

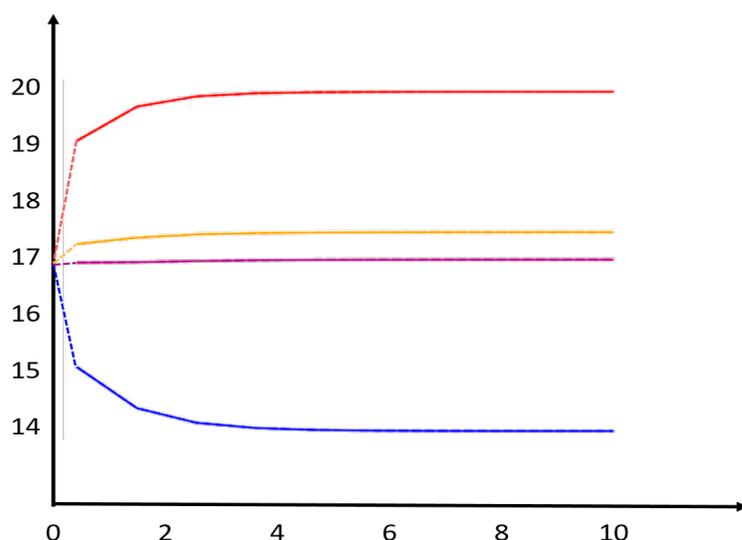


Figura 7.14 – Variação de Usuários para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de torres/mastros é apresentado nas Tabelas 7.12 e 7.13, respectivamente, para média das soluções que aparece na fronteira de Pareto (ver 7.13).

Tabela 7.12 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio

Operadora	Lucro Antes (R\$K)	Lucro Depois (R\$K)	Variação (%)	Receita Antes (R\$K)	Receita Depois (R\$K)	Variação (%)
A	139	590	323	1.711	1.711	0
B	-465	117	125	1.158	1.158	0
C	-26	599	2325	1.564	1.564	0
D	-64	542	943	1.491	1.491	0

Tabela 7.13 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio

Operadora	CAPEX Antes (k R%)	CAPEX Depois (k R%)	Variação (%)	OPEX Antes (k R%)	OPEX Depois (k R%)	Variação (%)
A	617	482	-21,9	978	643	-34,3
B	628	467	-25,6	995	595	-40,22
C	628	445	-28,1	995	542	-45,52
D	628	445	-29,1	995	540	-45,67

1.2.3.3.A. Análise de Resultados

A análise de resultados para o cenário rural segue a mesma linha do que foi feito para o cenário das redes ultra-densas.

Para este cenário, é possível demonstrar o grande valor que o compartilhamento pode ter. Na Tabela 7.12, é possível perceber que a operadora B, C e D saem de um contexto sem compartilhamento, em que teriam prejuízos, para um com compartilhamento em que conseguiriam obter lucros com a oferta de seus serviços.

Desta vez, a diferença é que o custo tem muito mais impacto em relação a receita, e, desta forma, não apenas a taxa de transmissão vai orientar a maximização dos objetivos, mas também o valor pago pela infraestrutura.

A operadora de menor lucro continua sendo a empresa B e, por isto, com o intuito de maximizar o seu lucro, o algoritmo tentará aumentar ao máximo a capacidade que a rede desta operadora oferece aos usuários finais. Porém, desta vez, deverá haver um maior controle do número de ERBs alocadas para aumento de capacidade, haja vista a maior contribuição do custo para o lucro final.

No caso das redes ultradensas, já havia uma concentração de coalizões entre três empresas, devido ao interesse mútuo de B e C que favorecia esta situação. Agora que o custo se torna uma variável de mais impacto, amplia-se, também, a quantidade de estações alocadas na coalizão entre as 4 operadoras, já que, quanto mais parceiros, menor o custo/empresa, estando a operadora B presente na maioria dos acordos que são possíveis e implementando, em geral, menos infraestrutura de forma individual diante das operadoras A e C, como mostra a Tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Lista do Número de ERBs/Solução para ERBs do tipo micro

Solução	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
0	14	4	4	0	0	7	0	0	7	1	7	11	10	21	8
1	14	2	2	1	0	8	0	1	7	0	7	10	8	22	9
2	13	2	5	0	3	7	0	0	6	1	5	10	8	22	10
3	14	0	3	0	3	6	0	1	5	6	9	10	0	20	10
4	15	0	3	0	3	8	1	1	6	5	8	10	3	21	9
5	18	0	4	1	2	8	0	0	7	1	8	10	3	22	9
6	15	4	3	0	0	6	0	0	7	1	7	10	10	21	9

É interessante observar que, agora que o custo tem tanta importância quanto a taxa de transmissão, houve algumas mudanças. Além de implementar uma quantidade menor de estações sozinha, a empresa B passou a ter menos interesse em parcerias com a operadora A (ver AB na Tabela 7.14). Por outro lado, a operadora C continuou obtendo vantagens devido a sua posição no ranking (ver Figura 7.10) de objetivo de maximização da taxa de transmissão média, alcançando, desta vez a segunda melhor taxa diante das demais, como mostra a Figura 7.15.

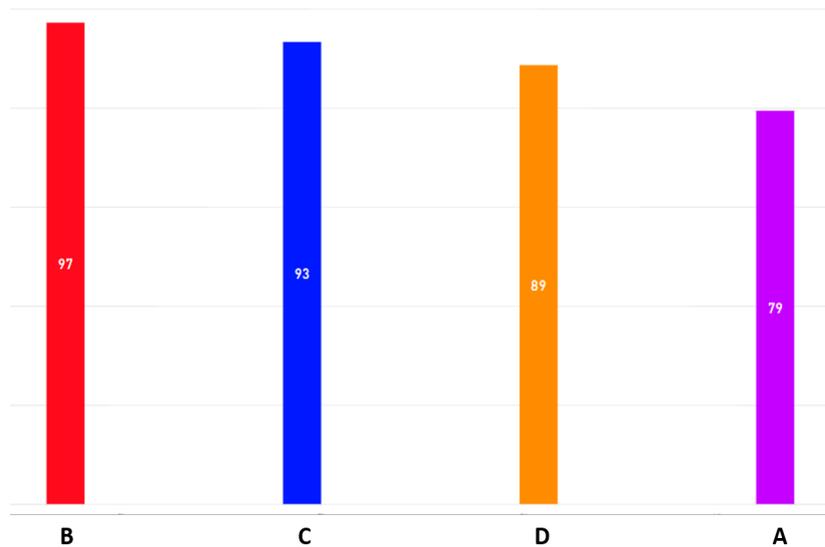


Figura 7.15 – Taxa de Transmissão Média para o Estudo de Caso de Referência de Rede Rural Equilibrada

Por fim, diferentemente do que foi apontado para as redes ultra-densas, é possível que repassar a redução de custos obtida pelo compartilhamento ao preço cobrado pelos serviços oferecidos aos usuários possa trazer um impacto nos lucros, já que a redução de custos poderá ter mais impacto na receita advinda na migração de usuários devido a redução do preço/Mbps. Esta hipótese será testada após apresentação dos casos de estudo de referência, em um comparativo.

7.2.3.3 Caso 3: Compartilhamento de Sites - Redes Ultradensas Mercado Desbalanceado

Para o compartilhamento de sites em redes ultra-densas em um cenário no qual o mercado está desbalanceado, observam-se os resultados vistos nas Figuras 7.16, 7.17 e 7.18.

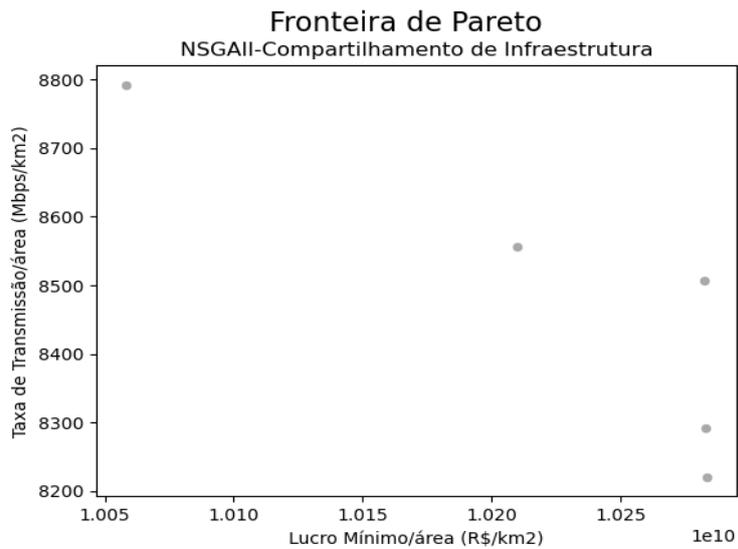


Figura 7.16 – Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço

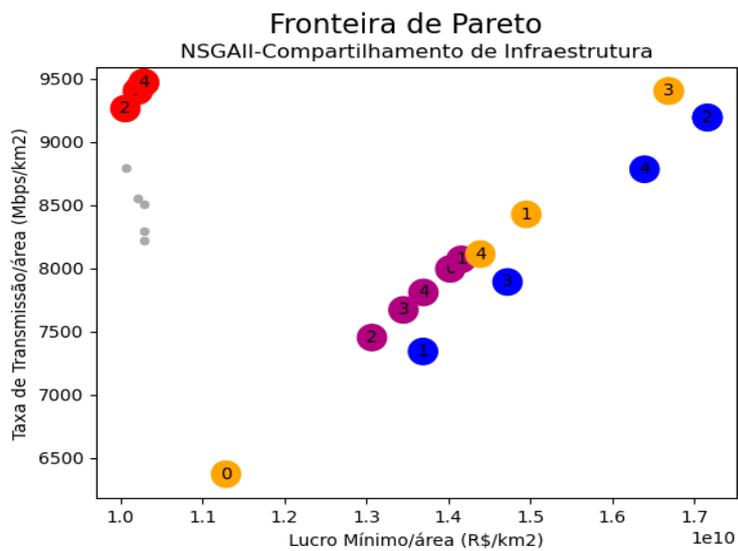


Figura 7.17 – Fronteira de Pareto com Operadoras para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalanço. Legenda. Roxo:Operadora A | Vermelho:Operadora B | Azul: Operadora C | Laranja: Operadora D | Cinza: Fronteira de Pareto

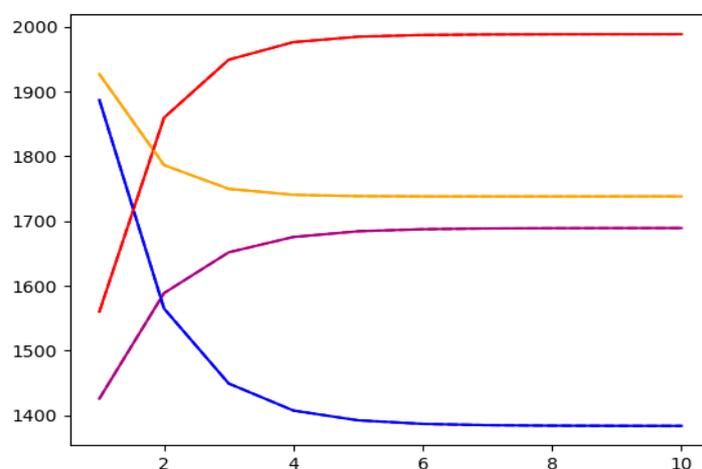


Figura 7.18 – Variação de Usuários para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalço

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de *sites* é apresentado nas Tabelas 7.15 e 7.16 para a média das soluções.

Tabela 7.15 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalço

Operadora	Lucro Antes (R\$Bln)	Lucro Depois (R\$Bln)	Variação (%)	Receita Antes (R\$Bln)	Receita Depois (R\$Bln)	Variação (%)
A	13,67	13,68	0,02	13,69	13,69	0
B	10,22	10,223	0,03	10,23	10,23	0
C	15,82	15,83	0,02	15,64	15,64	0
D	14,80	14,80	0,02	14,81	14,81	0

Tabela 7.16 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalço

Operadora	CAPEX Antes (R\$Bln)	CAPEX Depois (R\$Bln)	Variação (%)	OPEX Antes (R\$Bln)	OPEX Depois (R\$Bln)	Variação (%)
A	4,49	3,72	-17	7,8	5,7	-27
B	4,93	4,1	-17	7,3	5,13	-30
C	4,63	3,7	-19	7,11	5,21	-27
D	4,41	3,5	-20	6,99	4,79	-31

1.2.3.5.A Análise de Resultados

A análise dos resultados apresentados para as redes ultradensas desbalanceadas deve ser feita em comparação ao cenário em que há equilíbrio.

Pontos em comum:

1. Todas as operadoras implementam microcélulas de maneira individual
2. A redução de custos não causa impacto relevante no lucro das operadoras.

Pontos de diferença:

1. As parceiras bilaterais são maioria para o cenário desbalanceado, enquanto no cenário de equilíbrio há mais acordos entre 3 e 4 operadoras (ver Figuras 7.9 e 7.14)
2. A economia observada para o cenário equilibrado é maior que para o cenário em desequilíbrio
3. A taxa média de transmissão é maior no cenário em equilíbrio que no cenário em desbalanço

Para entender as diferenças, é interessante avaliar a Figura 7.18. Observa-se que, no início, a operadora D detinha a maior parcela do mercado (ou seja, a maior densidade de usuários), seguida por C, B e A nesta ordem.

Aplicando-se o modelo de *churn* por preço e reputação apresentado no capítulo 4, as posições foram invertidas ao longo do tempo, levando ao mesmo resultado final visto no cenário de redes ultradensas no mercado equilibrado: B com maior *market share*, seguida pelas operadora D, A e C, nesta ordem. A operadora B continua sendo a empresa que obtém o lucro mínimo, assim como a operadora C continua sendo a empresa com o menor número de usuários considerando todo o período de análise, mantendo-se a mesma priorização vista nas Figuras 7.9 e 7.10.

Ao se observar a Figura 7.17, nota-se que as coalizões entre duas operadoras passaram a superar as coalizões entre três e quatro empresas em número de ERBs alocadas, o que pode ser explicado pela variação de *market share* ao longo do tempo. As coalizões que alocam mais recursos são àquelas que contemplam as operadoras B e C, ainda pelo mesmo princípio observado no estudo de caso de referência das redes ultradensas em equilíbrio.

Tabela 7.17 – Lista do Número de ERBs/Solução para ERBs do tipo micro

Solução	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
0	37	17	25	2	1	4	0	14	6	1	6	18	8	14	0
1	9	26	12	0	17	11	16	4	3	21	4	8	8	13	1
2	13	33	17	18	12	17	17	12	15	15	1	0	10	0	0
3	37	20	19	20	12	10	2	7	18	19	5	2	3	9	2
4	38	27	16	15	11	10	0	13	15	22	3	3	7	1	3

Desta vez, diferentemente do que foi visto no cenário de equilíbrio, a taxa média de transmissão agora segue a ordem: B → C → D → A, como mostra a Figura 7.19.

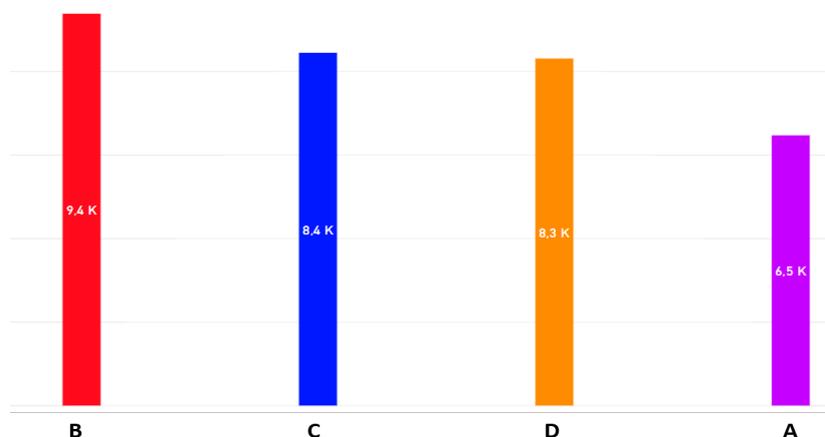


Figura 7.19 – Taxa de Transmissão para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado em Desbalço

Agora que foram apresentados os dois cenários previstos para as redes ultra-densas, propõe-se uma comparação entre o impacto do compartilhamento nos dois cenários. As Figuras 7.20 e 7.21 apresentam o comparativo de lucro e custos, respectivamente.

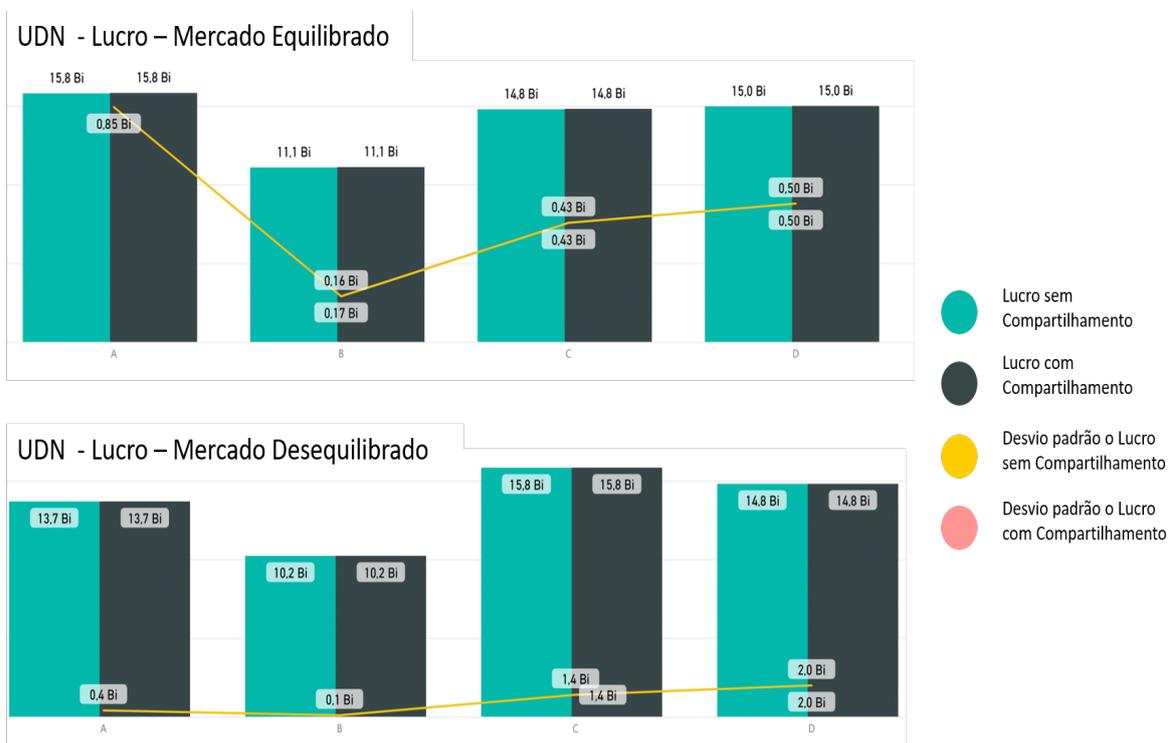


Figura 7.20 – Comparativo de Lucro entre os cenários UDN Equilibrado e em Desbalço. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o lucro após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em roda é o desvio padrão com compartilhamento

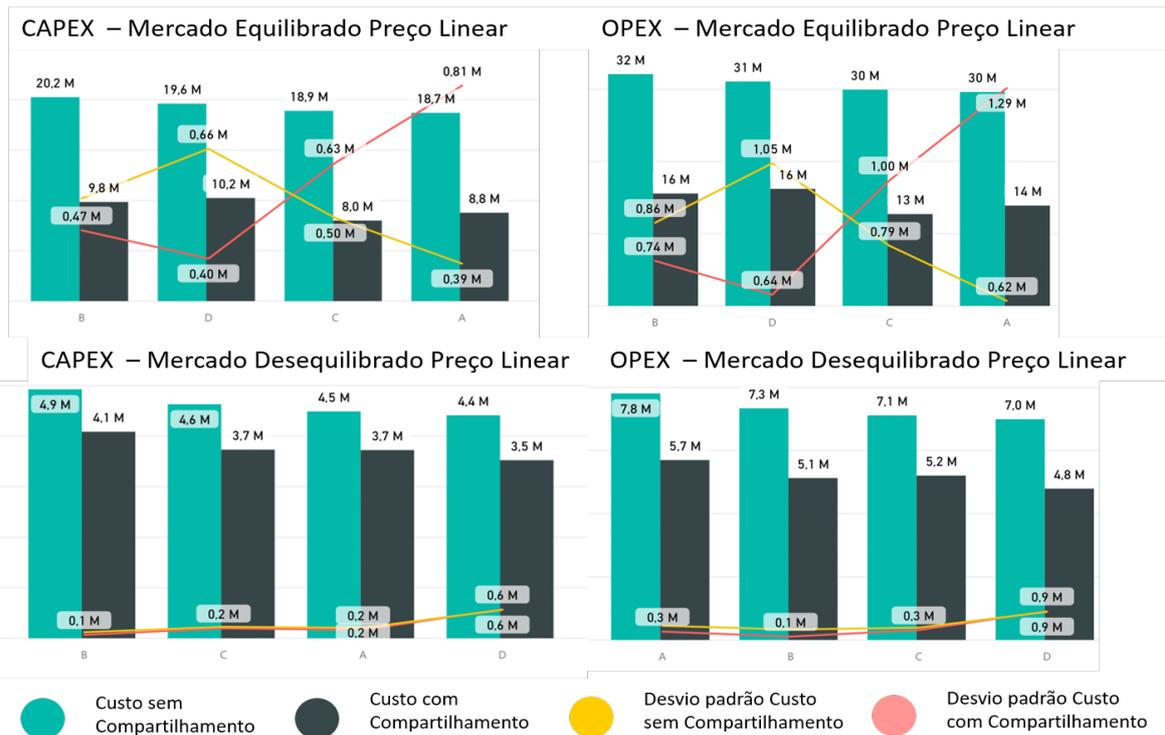


Figura 7.21 – Comparativo de Custos entre os cenários UDN Equilibrado e em Desbalanço. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o custo (CAPEX ou OPEX) após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento

Em relação a Figura 7.20, dada a baixa representatividade percentual do custo em relação à receita, o comparativo leva a perceber que o compartilhamento não gera diferentes efeitos no desempenho financeiro das operadoras, seja em um cenário em equilíbrio, seja em desequilíbrio. Por outro lado, ao se observar o cenário de custos, é possível perceber que a redução de custos é muito maior no cenário em equilíbrio que no cenário desequilibrado. Este comparativo será reavaliado para a rede rural.

7.2.3.4 Compartilhamento de Torres/Mastros - Redes Rurais Mercado Desbalanceado

Caso 4: Compartilhamento de Torres/Mastros - Redes Rurais Mercado Desbalanceado Preço Livre

Para o compartilhamento de sites, tem-se como resultado para a fronteira de Pareto as Figuras 7.22 e 7.23, e o comportamento de migração natural do usuários pode ser visto na Figura 7.24.

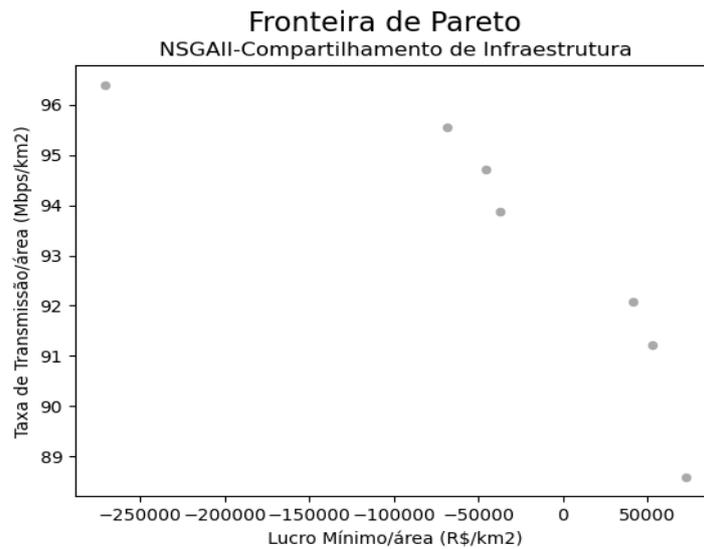


Figura 7.22 – Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Ultradensas em um Mercado Desbalanceado

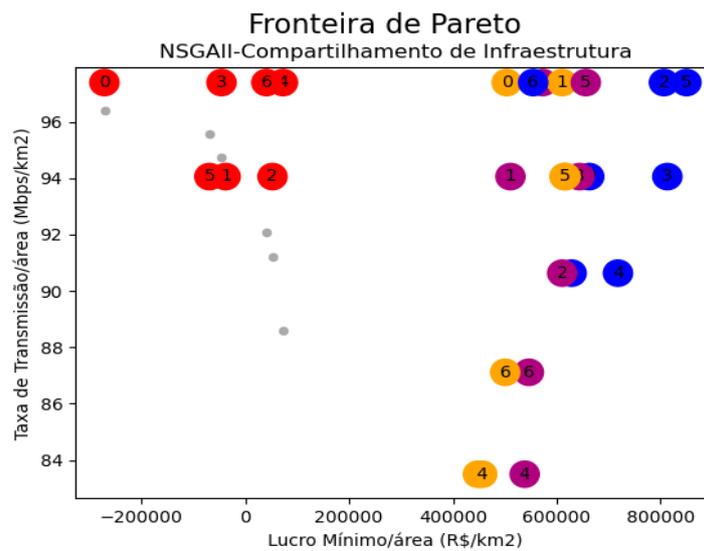


Figura 7.23 – Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado Desbalanceado. Legenda: Roxo: Operadora A Vermelho: Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D

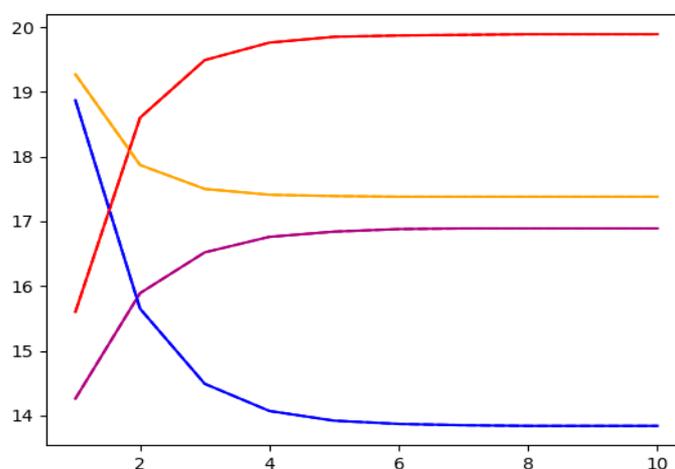


Figura 7.24 – Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo: Operadora A Vermelho: Operadora B Azul: Operadora C Laranja: Operadora D

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de *sites* é apresentado nas Tabelas 7.18 e 7.19.

Tabela 7.18 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Desbalanço

Operadora	Lucro Antes (k R\$)	Lucro Depois (k R\$)	Variação (%)	Receita Antes (k R\$)	Receita Depois (k R\$)	Variação (%)
A	59	752	1.158	1.655	1.655	0
B	-571	438	177	1.024	1.024	0
C	164	842	411	1.760	1.760	0
D	109	949	765	1.733	1.733	0

Tabela 7.19 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência de Redes Rurais em um Mercado em Equilíbrio

Operadora	CAPEX Antes (k R\$)	CAPEX Depois (k R\$)	Variação (%)	OPEX Antes (k R\$)	OPEX Depois (k R\$)	Variação (%)
A	615	330	-46,3	974	522	-46,4
B	626	233	-62,7	992	364	-63,25
C	617	337	-45,3	978	538	-44,92
D	619	283	-54,27	981	451	-53,97

O comportamento da migração de usuários na rede rural desbalanceada, quando comparado a rede equilibrada teve as mesmas mudanças constatadas para as redes ultra-densas.

Observou-se que a taxa de transmissão média (ver Traffic sofreu uma alternância entre as operadoras D e C. Neste caso, C passou a oferecer menos tráfego que no cenário de equilíbrio, tendo em vista que no início do período de análise, D era a operadora mais atrativa para o compartilhamento, o que levou a diversos cenários de compartilhamento com esta operadora, ampliando o seu tráfego. Este cenário foi revertido ao longo do tempo, tanto que a taxa da operadora C está muito próxima do valor ofertado por D. A constatação da participação de D nas coalizões pode ser feita observando-se as colunas em que D aparece na Tabela 7.20.

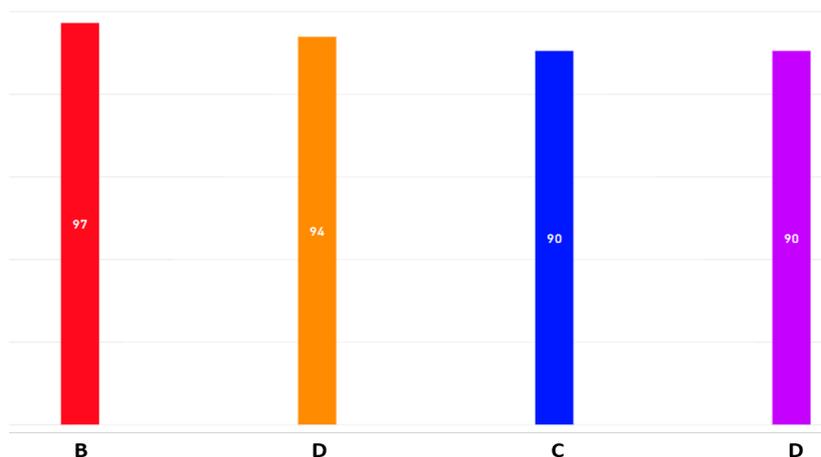


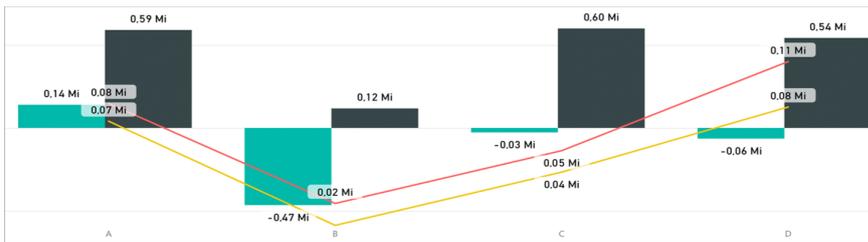
Figura 7.25 – Taxa de Transmissão Média para Redes Rurais em Desbalanço com Preço Livre

Tabela 7.20 – Coalizões para Redes Rurais com Mercado em Desbalanço

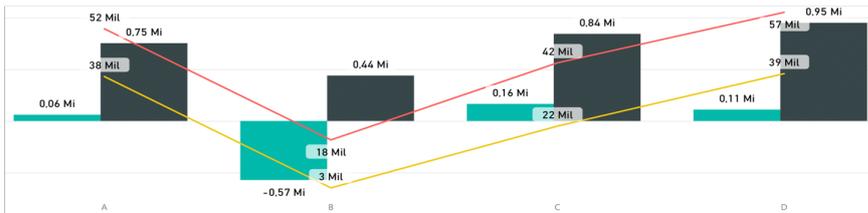
Solução	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
0	22	1	19	8	1	0	0	8	9	4	2	13	0	6	18
1	23	0	21	11	1	0	0	9	8	2	2	14	0	6	17
2	20	0	19	9	1	0	0	7	7	1	5	14	0	6	18
3	21	2	18	11	2	0	0	8	7	2	3	12	2	6	18
4	17	2	20	6	1	0	0	4	7	2	2	12	0	7	23

Assim como foi feito para as redes ultradensas, compara-se agora o cenário de equilíbrio ao cenário em desbalanço, ambos com preços livres. Os resultados para o lucro são vistos na Figura 7.28 e para os custos em 7.30

Rural - Lucro – Mercado Equilibrado – Preço Livre



Rural - Lucro – Mercado Desequilibrado – Preço Livre



- Lucro sem Compartilhamento
- Lucro com Compartilhamento
- Desvio padrão o Lucro sem Compartilhamento
- Desvio padrão o Lucro com Compartilhamento

Figura 7.26 – Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Livre. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o lucro após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento

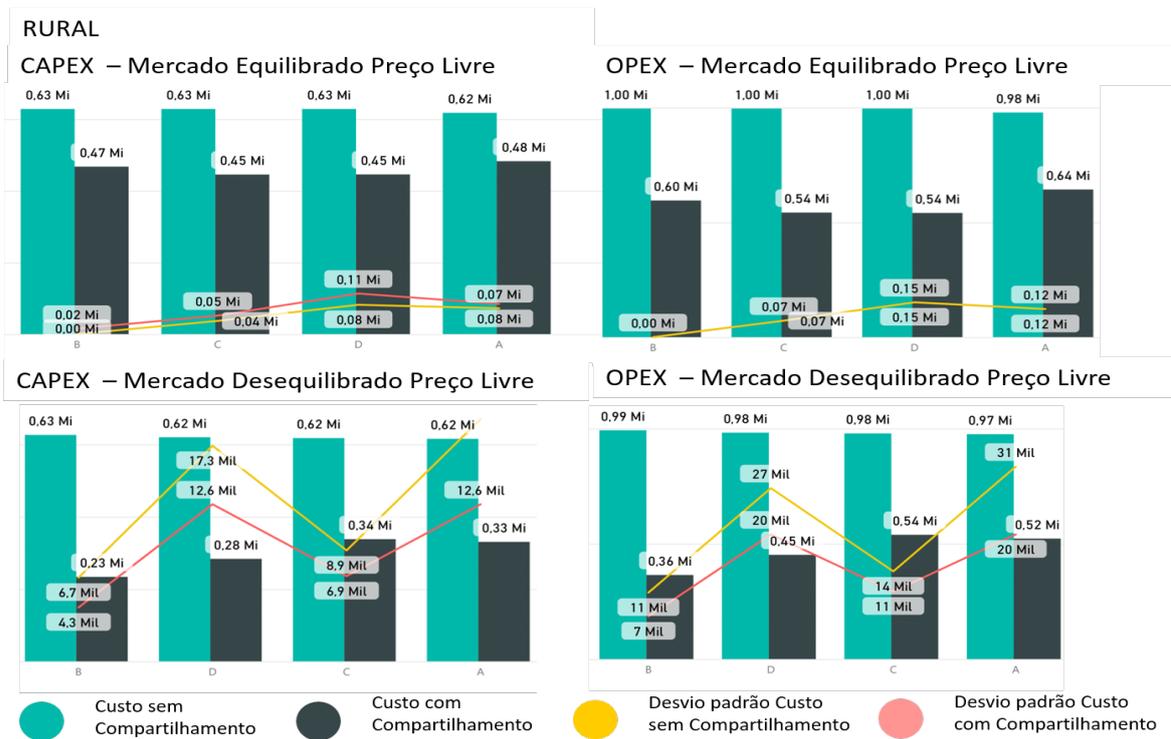


Figura 7.27 – Comparativo de Custos entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Livre. Em verde, o lucro antes do compartilhamento e em azul o custo (CAPEX ou OPEX) após o compartilhamento para as operadoras A, B, C e D, nesta ordem. As linhas em amarelo é o desvio com compartilhamento e a linha em rosa é o desvio padrão com compartilhamento

Diferentemente do que foi observado para as UDNs, no caso rural, o mercado em desbalanço leva a um maior nível de economia para algumas operadoras, o que leva a um lucro mais expressivo. As operadoras favorecidas são aquelas que possuem maior *marketshare*, diferentemente do que era intuitivo. Isto porque, como foi visto, elas acabam sendo procuradas por múltiplas operadoras de poder de mercado menor e acabam participando de múltiplas coalizões.

Na próxima seção, tendo em vista o impacto do custo no compartilhamento das redes rurais, faz-se a análise dos efeitos da cobrança de preço linear feita pelas operadoras aos seus usuários.

Caso Extra: Compartilhamento de Sites - Redes Rurais Mercado Equilibrado vs Desbalanceado Preço Linear

O impacto dos custos no cenário rural levantou a hipótese de que o repasse das economias obtidas com o compartilhamento aos consumidores poderia trazer algum impacto relevante no mercado das redes rurais.

Com o intuito de constatar estes efeitos, apresentam-se o comparativo de lucro, receita e custos, analisando-se: a) Mercado em equilíbrio, preço livre vs preço linear, b) Mercado em Desbalanço, preço livre vs preço linear e c) Preço linear, mercado em equilíbrio vs mercado em desbalanço.

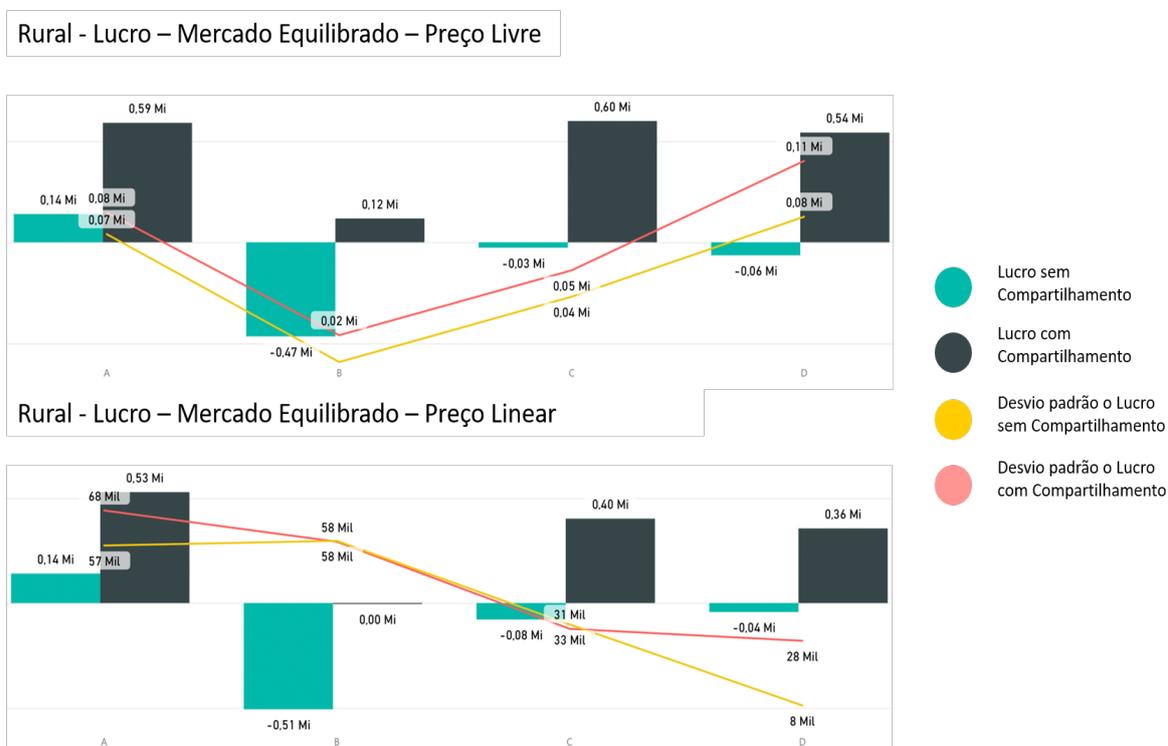


Figura 7.28 – Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Equilíbrio para Preço Livre e para Preço Linear

Ao se compararem os cenários em equilíbrio com preço linear e preço livre, observa-se que o cenário de preço linear não é vantajoso para nenhuma operadora, levando, inclusive, B ao risco de prejuízo.

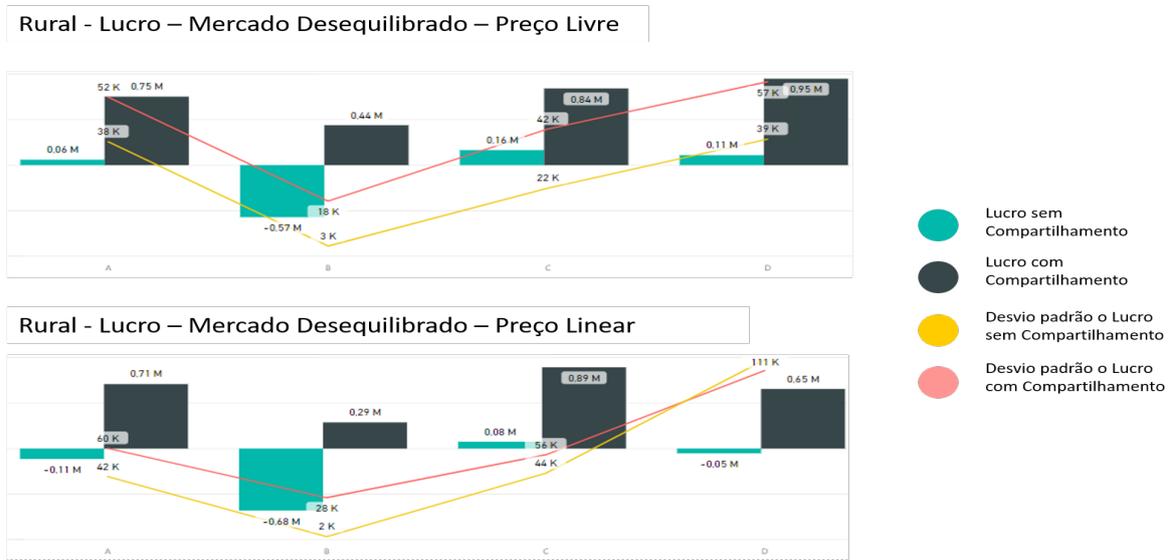


Figura 7.29 – Comparativo de Lucro entre Cenário Rural em Desbalanço para Preço Livre e para Preço Linear

Avaliando-se os cenários em desbalanço com preço linear e preço livre, observa-se que o cenário de preço linear pode ser vantajoso para as operadoras de menor participação de mercado, tendo-se em vista o desempenho de A e C. Isto é um resultado interessante, que poderia sugerir o compartilhamento destas duas operadoras exclusivamente, com repasse de custos, com o objetivo de torná-las mais competitivas diante de B e D.

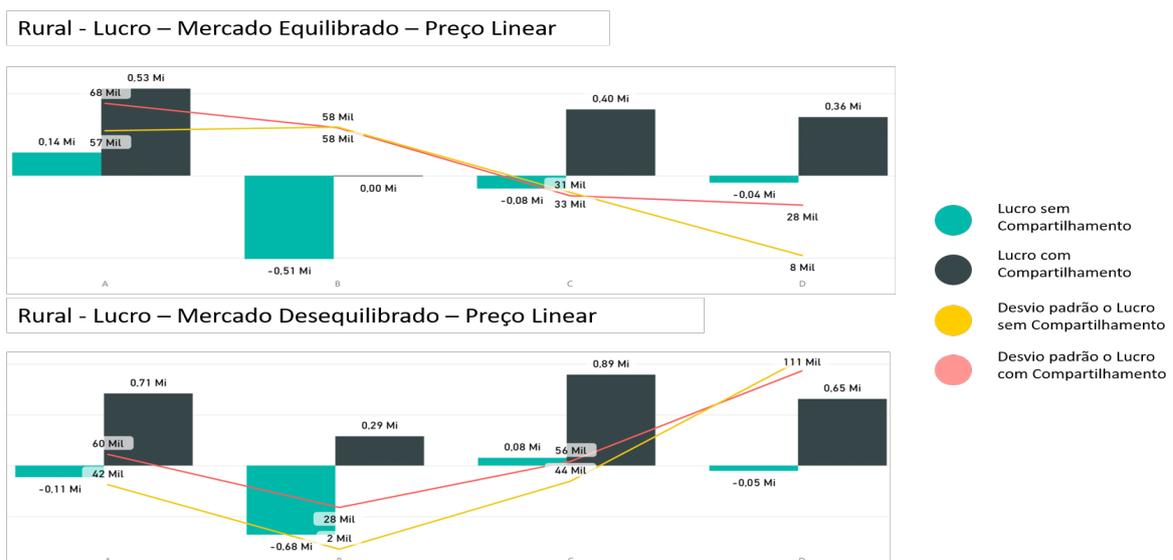


Figura 7.30 – Comparativo de Custos entre Cenário Rural em Equilíbrio e Cenário Rural em Desbalanço para Custo Linear

Observa-se que o preço linear é mais vantajoso em um mercado desequilibrado, mas apenas para as operadoras que detêm menor participação de mercado.

Com este resultado, encerra-se o estudo dos casos de referência, e se propõem os seguintes modelos de compartilhamento para os estudos de caso de mercado, conforme o que foi visto aqui e as recomendações vistas em [18], que foram apresentadas no Capítulo 2.

1. Cenário Vila Olímpia São Paulo: Em acordo com [18], seria interessante o compartilhamento de rede passiva. Entretanto, os resultados do estudo de caso de referência para uma rede ultra-densa, de potencial de lucro alto, demonstra o baixo impacto do compartilhamento de sites (a modalidade de compartilhamento passivo que mais reduz custos), sugerindo-se, portanto, o compartilhamento do tipo RAN, que traz uma redução mais expressiva de custos em relação a todos os demais.
2. Cenário Asa Sul, Brasília: Tendo em vista ser uma urbana, menos densa que São Paulo e por isso de menor receita, sugere-se a aplicação do compartilhamento passivo, conforme [18], selecionando-se a modalidade de compartilhamento de torres e mastros.
3. Cenário Rio Verde, Goiás: Sugere-se o compartilhamento de RAN, também conforme [18].

7.3 CASOS DE ESTUDO DE MERCADO

7.3.1 Resultados - Vila Olímpia São Paulo

Nesta seção são apresentados os resultados para o primeiro caso de estudo de mercado, a Vila Olímpia em São Paulo. Trata-se de um mercado desbalanceado cujo *market share* é dado pela Tabela 7.21.

Tabela 7.21 – Tabela de *MarketShare* no Estudo de Caso de Mercado da Vila Olímpia, São Paulo

Operadora	Participação no Mercado (%)
VIVO	35
CLARO	31
TIM	21
OI	11

Em acordo com o que foi visto no caso de estudo de referência para o compartilhamento de *sites* em redes ultradensas em mercados desbalanceados, espera-se que o custo seja um fator de impacto secundário na formação de coalizões ótimas.

Como foi visto no Capítulo 3, o compartilhamento da rede ativa é o que tem o potencial de trazer mais economias para as operadoras que optem por realizá-lo (ainda que as custas de perda de autonomia quanto aos dispositivos de rede). Neste sentido, propõe-se aqui um modelo de compartilhamento com maior potencial de impacto, como é o caso do RAN *Sharing*.

Os resultados de aplicação do *framework* podem ser vistos Figuras 7.31 e 7.32, considerando um comportamento de migração natural (com custo livre) do usuários, conforme o capítulo 4 e cujo comportamento pode ser visto na Figura 7.33.

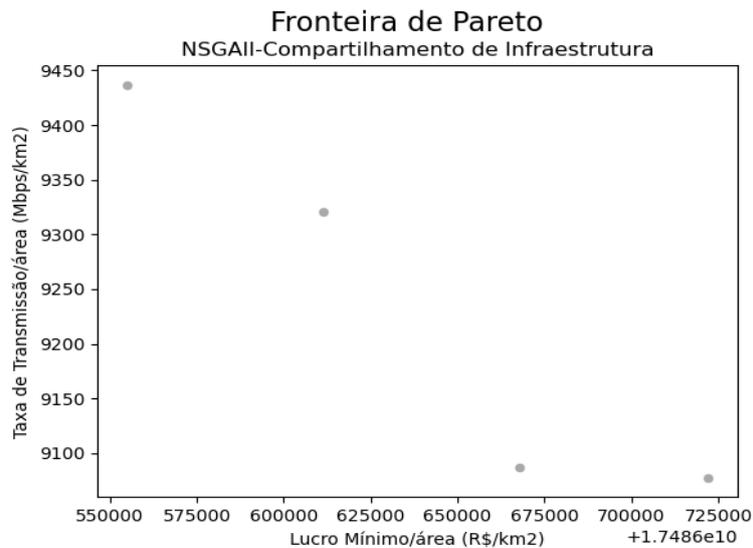


Figura 7.31 – Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Região da Vila Olímpia em São Paulo

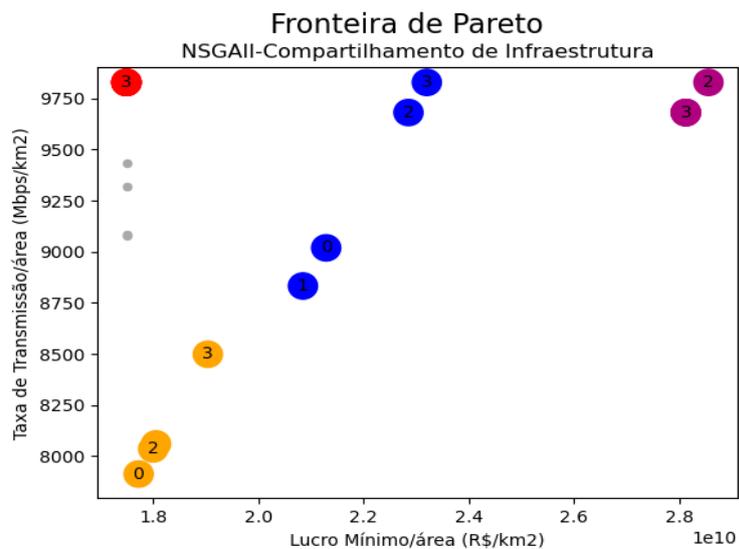


Figura 7.32 – Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Cenário Base do Caso de Estudo de Referência Rural em um Mercado Desbalanceado com Preço Linear. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho: Operadora Claro Azul: TIM Laranja: Oi

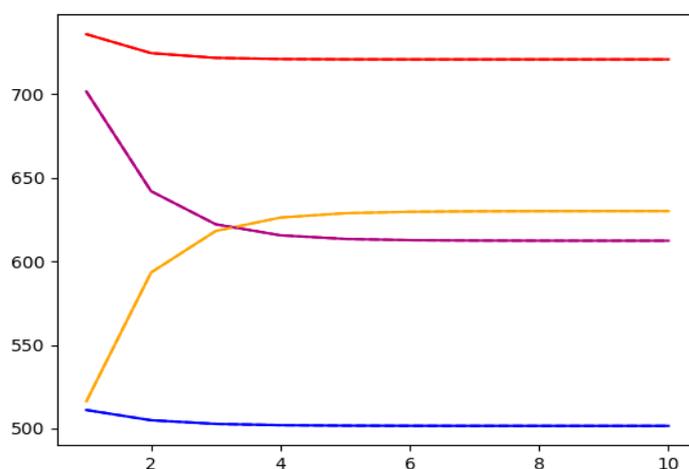


Figura 7.33 – Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo: Vivo Vermelho: Claro Azul: Tim Laranja: Oi

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de RAN é apresentado nas Tabelas 7.22 e 7.23.

Tabela 7.22 – Desempenho Financeiro para o do Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Vila Olímpia, São Paulo

Operadora	Lucro Antes (R\$Bln)	Lucro Depois (R\$Bln)	Variação (%)	Receita Antes (R\$Bln)	Receita Depois (R\$Bln)	Variação (%)
VIVO	28,12	28,13	0,015	28,14	28,14	0
CLARO	17,48	17,49	0,03	17,5	17,5	0
TIM	20,84	20,85	0,02	20,9	20,9	0
OI	18,0	18,1	0,02	18,1	18,1	0

Tabela 7.23 – Custos de CAPEX e OPEX para o do Caso de Estudo de Mercado de Redes Ultradensas na Vila Olímpia, São Paulo

Operadora	CAPEX Antes (R\$Bln)	CAPEX Depois (R\$Bln)	Variação (%)	OPEX Antes (R\$Bln)	OPEX Depois (R\$Bln)	Variação (%)
VIVO	4,9	3,71	-24	7,8	4,8	-38
CLARO	5	3,75	-26	8,0	4,8	-40
TIM	4,4	3,14	-29	7,0	3,8	-45
OI	4,6	3,6	-21	7,2	4,8	-33,1

7.3.1.1 Análise de Resultados

Observa-se um comportamento bastante similar ao que foi visto para os resultados do cenário de compartilhamento de *sites* de redes ultra-densas em um mercado desbalanceado, exceto pelo nível de lucro, receita e custos, que no caso de mercado é superior ao cenário de referência (comparar com as Tabelas 7.15 e 7.16).

Como era de se esperar, o nível de economia em relação aos custos de CAPEX e OPEX é superior ao caso do compartilhamento de sites, haja vista uma maior quantidade de componentes compartilhada, como mostra a Tabela 7.3, como foi visto no Capítulo 2.

Nota-se por outro lado, que os custos aportados pelas operadoras é maior no cenário atual do que no estudo de caso de referência. Isto ocorre devido a maior quantidade de usuários do estudo de caso de mercado, exigindo a implementação de uma infraestrutura mais ampla.

Tendo em vista o baixo impacto financeiro da opção por compartilhar, um argumento que levaria às operadoras a dividirem a mesma infraestrutura em um cenário como a UDN da Vila Olímpia seria devido a falta de espaço para alocação de nova infraestrutura, ou mesmo por questões ambientais, evitando a criação de redes subutilizadas, que desperdiçaria bastante material. Considerando-se o mesmo tamanho de infraestrutura/operadora, o compartilhamento de infraestrutura levou a uma redução de quase 20% dos *macrosites* e 60 % dos *microsites*.

Feita esta análise, parte-se para o cenário de Brasília. Uma rede urbana comum, na qual também será aplicado o compartilhamento RAN.

7.3.2 Resultados - Asa Sul Brasília

Para o cenário de Brasília, é necessário apresentar os resultados da simulação de Monte Carlo para cálculo da relação de capacidade vs ISD. Neste cenário, dada a menor densidade de usuários em relação à Vila Olímpia em São Paulo, optou-se pela combinação de macrocélulas em 3,5 GHz, arranjo SISO (devido a menor capacidade necessária) e para as microcélulas também a frequência de 26 GHz. A próxima seção faz esta introdução.

7.3.2.1 Dados Redes Urbanas

Para as redes urbanas, faz-se a proposição de alocação de uma infraestrutura composta por células do tipo macro com antenas SISO e células do tipo micro também com antenas SISO.

De posse dos dados observados na Tabela 7.24, baseados na região da Asa Sul utiliza-se o simulador de Monte Carlo proposto em [4] para cálculo da relação ISD(m) vs Capacidade/ km^2 .

Tabela 7.24 – Dados da Infraestrutura que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Percentual de usuários <i>indoor</i>	50%
Altura das antenas de transmissão macro	45 m
Potência das antenas de transmissão macro	40 dBW
Ganho das antenas de transmissão macro	16 dBi
Perda das antenas de transmissão macro	1 dBi
Altura das antenas de transmissão micro	30 m
Potência das antenas de transmissão micro	24 dBW
Ganho das antenas de transmissão micro	4 dBi
Perda das antenas de transmissão micro	1 dB
Altura das antenas de recepção	1.5 m
Ganho das antenas de recepção	4 dBi
Perda das antenas de recepção	4 dB
Outras perdas de recepção	4 dB
Frequência de operação	3,5 GHz e 26 GHz
Largura de Faixa	p/ 3,5 GHz: 40 MHz e p/ 26 GHz: 100 MHz
Número de setores das antenas	3
Uso da rede	1 %

Os resultados obtidos por meio da simulação para 3.5 GHz podem ser vistos nas Figuras 7.34 e 7.35. Os resultados foram obtidos como a média de desempenho dos usuários distribuídos em uma célula transmissora. Nestas figuras, mostra-se igualmente o intervalo de confiança obtido para o nível de confiança de 95 %, considerando uma distribuição Gaussiana [4]. Na Figura 7.35, a quebra observada em 0,4 km ocorre em decorrência do modelo de canal, que calcula a perda de percurso por meio de uma equação até a distância de *breakpoint* (dbp). Observa-se que também a Figura 7.34 apresenta uma, agora em 1km, ocasionada pela mesma razão, conforme equações apresentadas no Capítulo 6.

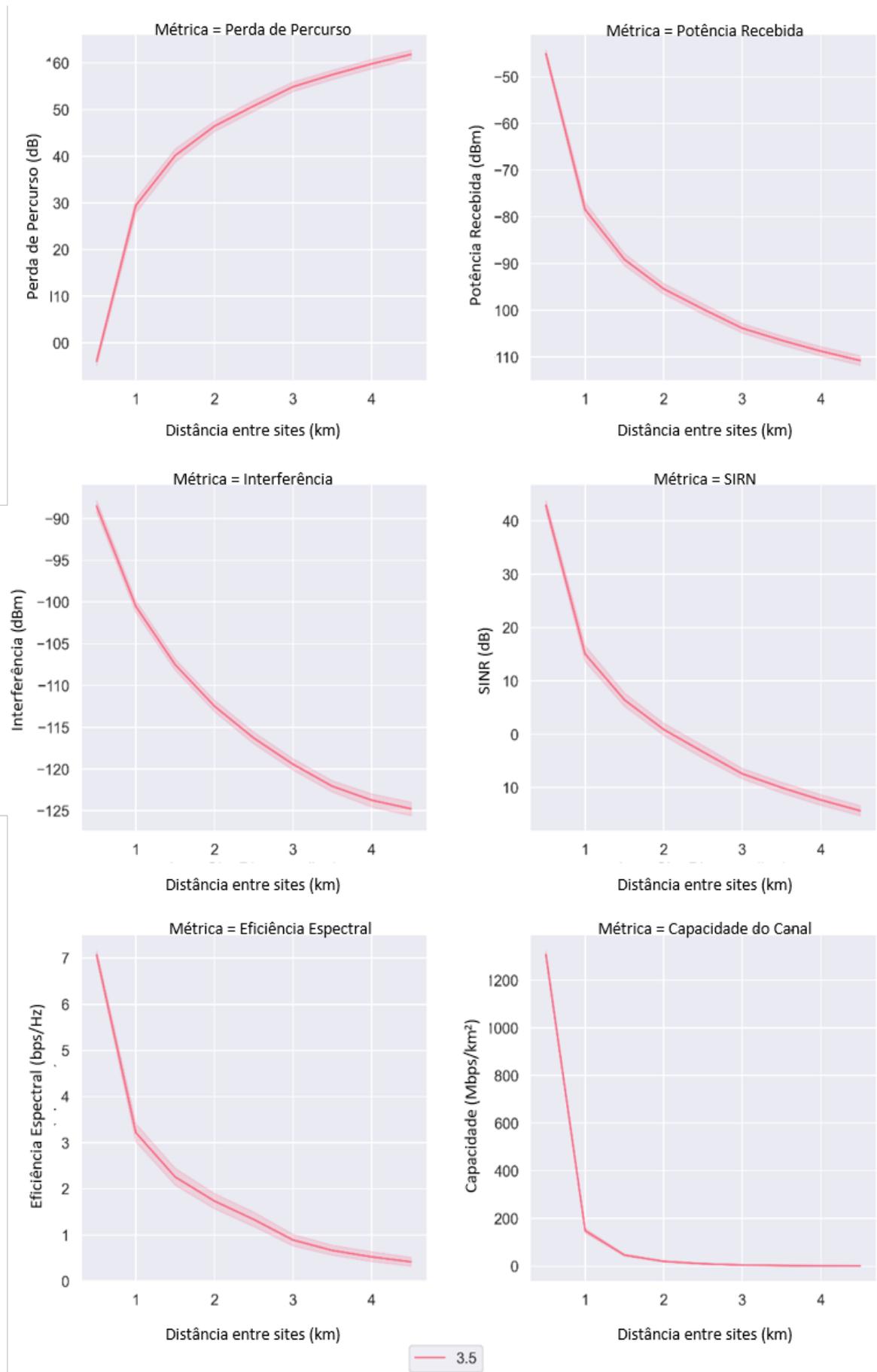


Figura 7.34 – Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes Urbanas em 3.5 GHz SISO

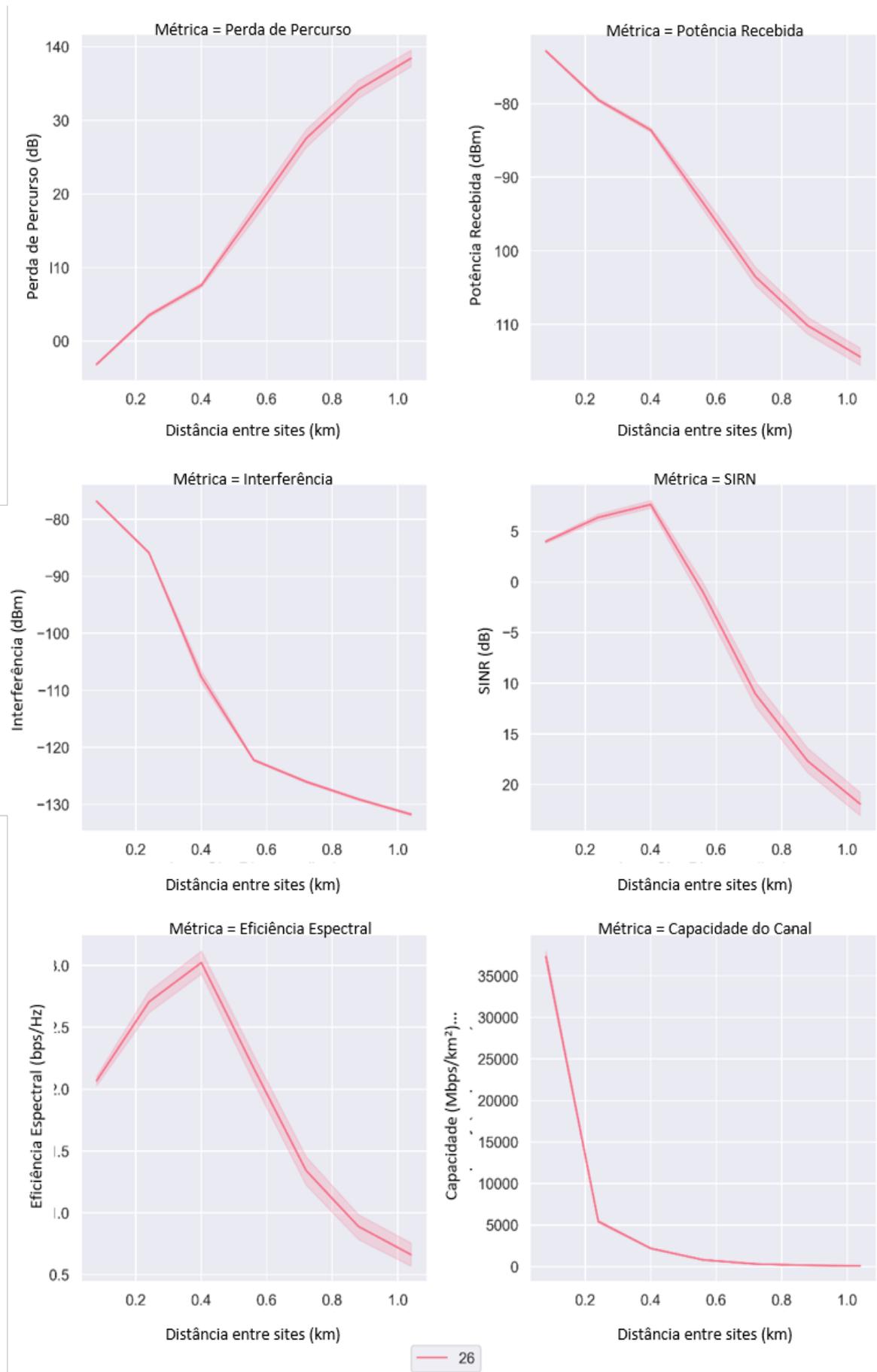


Figura 7.35 – Resultados da Simulação de Monte Carlo de Redes Urbanas em 26 GHz

7.3.2.2 Resultados para o Compartilhamento de Torres/Mastros

Além das informações a respeito da modelagem do canal 5G urbano que foram apresentadas, é importante introduzir os dados utilizados específicos para Brasília.

De posse das informações da Tabela 7.20, é necessário, ainda, conhecer características do local em que será implementada a rede de comunicação. Os dados são apresentados nas Tabelas 7.25 e informações das operadoras no mercado em análise, como mostra a Tabela 7.26.

Tabela 7.25 – Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Altura dos edifícios	35 m
Largura das ruas	30 m
Antenas em edifícios	Sim
Distância limite (linha de visada)	250 m

Tabela 7.26 – Dados da Operadora que Devem ser Informados pelo Usuário do *Framework*

Operadora A	Vivo
Densidade de Usuários	42,33
<i>Market Share</i>	28 %
Área de Interesse de Cobertura	7,84 km ²
Operadora B	Claro
Densidade de Usuários	61,99
<i>Market Share</i>	41 %
Área de Interesse de Cobertura	7,84 km ²
Operadora C	TIM
Densidade de Usuários	28,72
<i>Market Share</i>	19 %
Área de Interesse de Cobertura	7,84 km ²
Operadora D	OI
Densidade de Usuários	18,14
<i>Market Share</i>	12 %
Área de Interesse de Cobertura	7,84 km ²

De posse destas informações, é possível trazer os resultados da aplicação do *framework* de otimização, como mostram as Figuras 7.36 e 7.37, considerando um comportamento de migração natural (com custo livre) dos usuários, conforme o capítulo 4, e cujo comportamento pode ser visto na Figura 7.38.

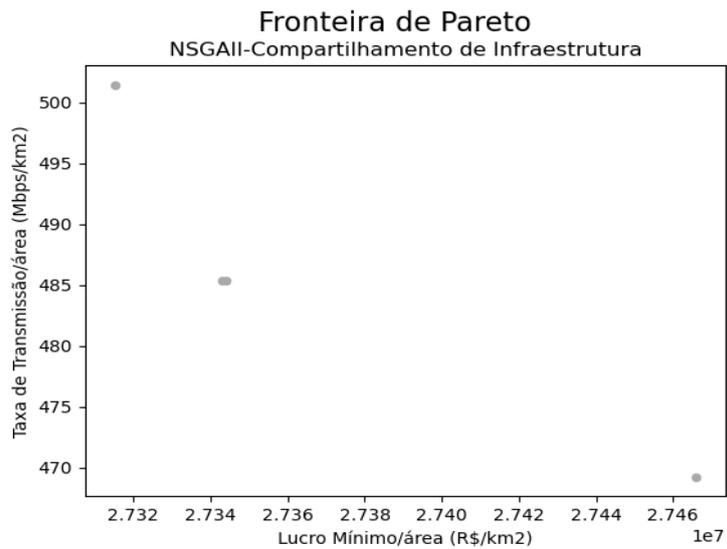


Figura 7.36 – Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas na Asa Sul em Brasília

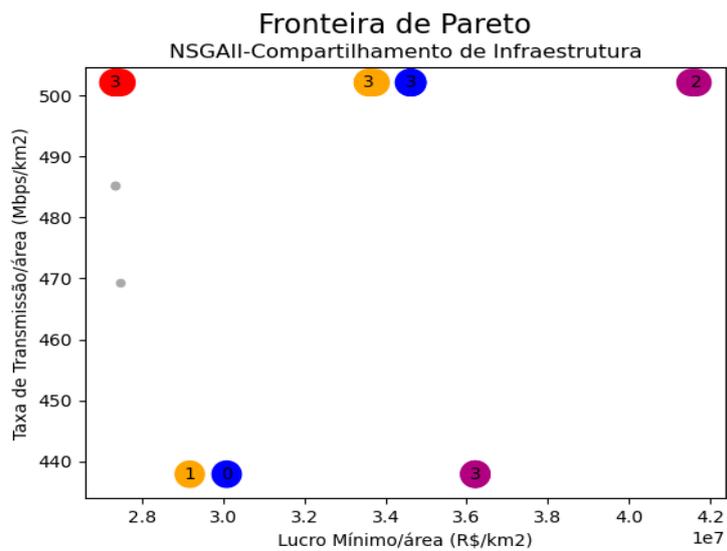


Figura 7.37 – Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas na Asa Sul em Brasília. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho: Operadora Claro Azul: TIM Laranja: Oi

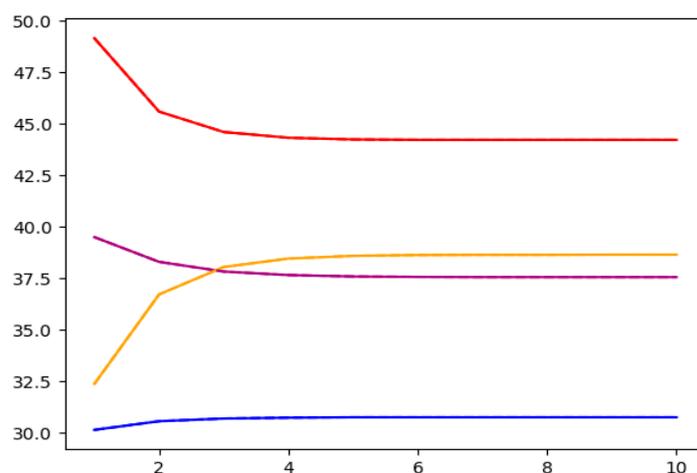


Figura 7.38 – Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo:Vivo Vermelho: Claro Azul: Tim Laranja: Oi

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de sites é apresentado nas Tabelas 7.27 e 7.28.

Tabela 7.27 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas em um Mercado em Desbalanço com Preço Linear

Operadora	Lucro Antes (R\$Mln)	Lucro Depois (R\$Mln)	Variação (%)	Receita Antes (R\$Mln)	Receita Depois (R\$Mln)	Variação (%)
VIVO	38,5	38,9	1,04	40,16	40,16	0
CLARO	26,9	27,36	1,71	28,65	28,65	0
TIM	32,9	33,48	1,73	34,60	34,60	0
OI	31,9	35,52	1,11	33,67	33,67	0

Tabela 7.28 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas - Asa Sul Brasília

Operadora	CAPEX Antes (R\$Mln)	CAPEX Depois (R\$Mln)	Variação (%)	OPEX Antes (R\$Mln)	OPEX Depois (R\$Mln)	Variação (%)
VIVO	0,6	0,53	-18,1	1,02	0,73	-28,4
CLARO	0,7	0,54	-18,9	1,05	0,74	-29,4
TIM	0,7	0,49	-25,2	1,03	0,63	-39,4
OI	0,7	0,5	-23,4	1,03	0,65	-36,9

Análise de Resultados

Observa-se que o impacto do compartilhamento no resultado de lucro foi maior que para o caso das UDNs, mas ainda assim com baixo impacto relativo em relação aos resultados finais.

Seguindo o que foi visto para os estudos de caso de referência, é possível supor que a distribuição de infraestrutura entre as operadoras foi realizada de modo a ampliar a capacidade daquelas que gerariam maior impacto para a média de tráfego do mercado como um todo, sendo a Claro a maior beneficiada, devido a menor receita e as demais assumindo uma prioridade em acordo com a participação de mercado.

Novamente, o compartilhamento seria um benefício com foco muito maior em sustentabilidade, uso eficiente de espaço e recursos, etc, como uma forma de melhorar o desempenho financeiro das operadoras.

Na próxima seção, apresentam-se os resultados para Goiás.

7.3.3 Resultados - Rio Verde Goiás

O último caso de estudo de mercado é o cenário de uma rede rural em Rio Verde, Goiás. Para esta região, foram utilizados os dados a seguir.

Tabela 7.29 – Dados do Local que Devem ser Ajustados pelo Usuário do *Framework*

Altura dos edifícios	15 m
Largura das ruas	30 m
Antenas em edifícios	Não
Distância limite (linha de visada)	250 m

De posse destas informações, é possível aplicar o *framework* a este caso de estudo de mercado. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 7.39, 7.40 e 7.41.

Tabela 7.30 – Dados da Operadora que Devem ser Informados pelo Usuário do *Framework*

Operadora A	Vivo
Densidade de Usuários	1,57
Market Share	21 %
Área de Interesse de Cobertura	10 km ²
Operadora B	Claro
Densidade de Usuários	3,72
Market Share	52 %
Preço dos Serviços	R\$ 29,90
Área de Interesse de Cobertura	10 km ²
Operadora C	TIM
Densidade de Usuários	0,64
Market Share	9 %
Preço dos Serviços	R\$ 29,90
Área de Interesse de Cobertura	10 km ²
Operadora D	OI
Densidade de Usuários	1,21
Market Share	17 %
Área de Interesse de Cobertura	10 km ²

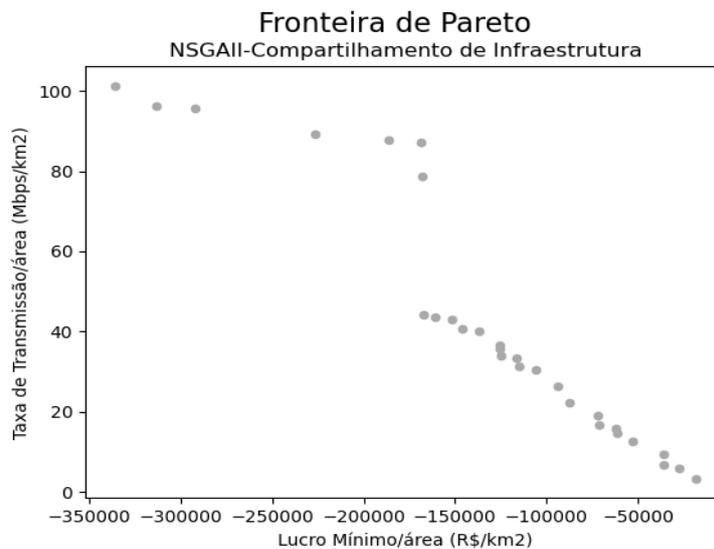


Figura 7.39 – Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Rurais na cidade de Rio Verde em Goiás

Observa-se na Figura 7.39 uma quantidade muito maior de soluções. Isto porque, com o objetivo de maximizar o lucro da operadora de menor rentabilidade, o algoritmo alterna diferentes operadoras implementando apenas uma estação rádio base e as demais estações sendo implementadas em coalizões, o que gera diversas soluções ótimas, por levarem ao mesmo custo para B e capacidade média global.

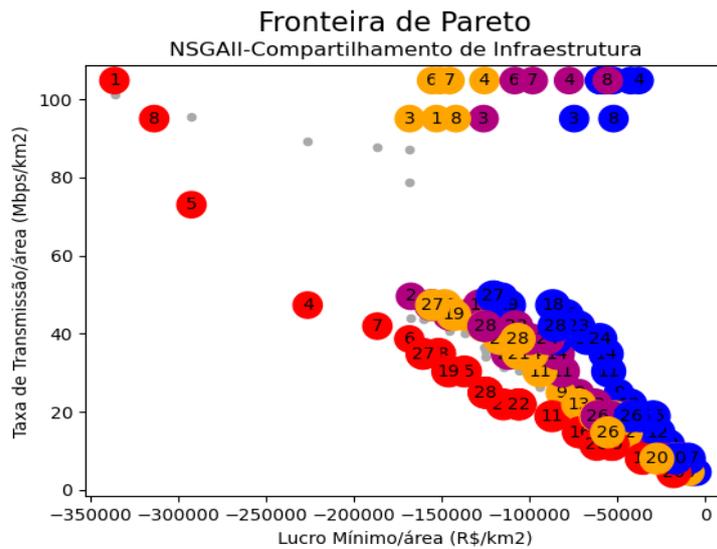


Figura 7.40 – Posição das Operadoras em Relação a Fronteira de Pareto para o Caso de Estudo de Mercado de Redes Rurais na cidade de Rio Verde em Goiás. Legenda: Roxo: Operadora Vivo Vermelho; Operadora Claro Azul; TIM Laranja; Oi

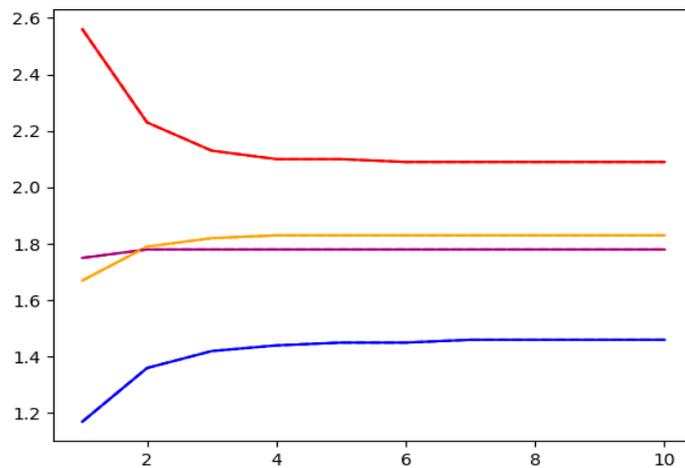


Figura 7.41 – Migração de Usuários Ocasionalada pela Relação de Reputação vs Preços das Operadoras sem Impacto do Compartilhamento. Legenda: Roxo: Vivo Vermelho; Claro Azul; Tim Laranja; Oi

O desempenho econômico das operadoras e os efeitos observados no custo da infraestrutura quando da opção pelo acordo de compartilhamento de RAN é apresentado nas Tabelas 7.27 e 7.28.

Tabela 7.31 – Desempenho Financeiro para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas em um Mercado em Desbalanço com Preço Linear

Operadora	Lucro Antes (R\$Mln)	Lucro Depois (R\$Mln)	Variação (%)	Antes (R\$Mln)	Receita Depois (R\$Mln)	Variação (%)
VIVO	-0,72	-0,08	87	0,18	0,18	0
CLARO	-0,54	-0,13	76	0,08	0,08	0
TIM	-0,76	-0,06	92	0,14	0,14	0
OI	-0,73	-0,10	85	0,15	0,15	0

Tabela 7.32 – Custos de CAPEX e OPEX para o Cenário Base do Caso de Estudo de Mercado de Redes Urbanas - Asa Sul Brasília

Operadora	CAPEX Antes (k R%)	CAPEX Depois (k R%)	Variação (%)	OPEX Antes (k R%)	OPEX Depois (k R%)	Variação (%)
VIVO	32,5	7,97	-75,5	51	13	75,5
CLARO	32,5	10,54	67,6	51	17	67,1
TIM	32,5	6,05	-81,4	51	9	-81,2
OI	32,5	7,94	-75,6	51	12	-75,8

7.3.3.1 Análise de Resultados

Repara-se que nem mesmo o compartilhamento de RAN foi capaz de reverter a situação de prejuízo da maioria das operadoras. Devido a baixa densidade de usuários/ km^2 , que respeita a expectativa de crescimento do 5G nos próximos anos, os custos acabaram sendo maiores do que a receita.

Ainda assim, observa-se que o ganho em termos de lucro foi bastante expressivo (70%-80%), indicando que com o passar dos anos e o ingresso de novos usuários, ou mesmo com a cobrança de um preço mais adequado pelo serviço, o cenário rural poderia vir a se tornar um mercado rentável com a contribuição do compartilhamento de infraestrutura.

Observa-se, ainda, que esta modalidade foi de fato uma escolha interessante, pois a situação do desempenho econômico seria ainda mais crítica com os tipos de compartilhamento passivos, que trazem uma menor redução de custos.

8

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs a criação de um *framework* para avaliação de acordos de compartilhamento de infraestrutura embasado em algoritmo evolucionário.

Por meio de uma revisão bibliográfica, foi possível ter uma visão do tipo de trabalho sendo realizado no âmbito do compartilhamento de infraestrutura e das lacunas que poderiam ser preenchidas neste escopo, justificando a escolha pelo desenvolvimento do *framework* como objetivo. De posse deste arcabouço teórico, da modelagem do problema e da proposta de *framework* desenvolvidos no trabalho, são gerados os resultados da aplicação do *framework*.

Destes resultados, primeiramente, foi possível perceber que em mercados cujo o custo é muito menor frente à receita, como pode ser o caso das redes ultra-densas, o compartilhamento de infraestrutura vai gerar pouco impacto no desempenho econômico das operadoras e, da maneira como o problema foi definido neste trabalho, a distribuição de infraestrutura entre as operadoras será direcionada pelo objetivo de maximização da taxa de transmissão média das operadoras. Destaca-se que mesmo nesses cenários compartilhar apresenta suas vantagens, haja vista a redução de infraestrutura redundante, algo relevante em cenários com pouco espaço e condizente com o movimento atual de incentivo à sustentabilidade.

Por outro lado, para redes em que os custos são mais representativos, ter o objetivo de maximização de lucro mínimo reorientou o funcionamento do algoritmo, que passou a pesar não só a capacidade, mas também custos para gerar uma solução ótima, o que levou a diferenças mais expressivas entre um cenário de equilíbrio diante de um cenário de desbalanço de mercado.

Em um mercado em que há desequilíbrio entre o *market share* das operadoras, vale destacar que existe a possibilidade de, se a redução de custos com o compartilhamento de infraestrutura for repassada aos consumidores, as operadoras com menor participação de mercado se tornarem mais atrativas para os usuários de suas concorrentes de maior participação. Este resultado não pode ser afirmado como uma verdade universal, haja vista que foi obtido baseado em um modelo de migração de usuários simplificado proposto neste trabalho. Entretanto, aponta para uma consideração importante a captar mais usuários de suas concorrentes, a depender das configurações de preço, reputação e participação no mercado, o que pode ampliar a competitividade a longo prazo.

Finalizando as conclusões em relação ao compartilhamento entre operadoras, percebe-se que em um cenário de equilíbrio em que os custos são pouco representativos, o compartilhamento se demonstra mais vantajoso, isto é, reduz mais custos, em um mercado equilibrado,

enquanto para um mercado em que o custo é um percentual relevante da receita, ele traz efeitos mais expressivos nos mercados em desbalanço.

8.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou o potencial da aplicação de um *framework* para a análise de acordos de compartilhamento. Diversos aspectos e frentes de trabalho ainda podem ser identificados e aprofundados, sendo alguns deles sugeridos a seguir:

- Novo problema multi-objetivo: lucro individual das operadoras vs taxa de transmissão individual
- Otimização híbrida de acordos: operador neutro e operadoras comuns dentro do mesmo conjunto em otimização
- Dimensionamento dinâmico da rede: a cada nova solução proposta pelo algoritmo, redimensionar a rede para melhorar a alocação das estações.
- Alocação assimétrica de microcélulas: neste trabalho, considerou-se estações uniformemente espaçadas, como se a necessidade por mais capacidade fosse igual em toda a extensão da área de interesse de cobertura das operadoras. No futuro, seria interessante poder restringir a área que vai demandar mais capacidade, tendo em vista ser um cenário mais realista.
- Acrescentar novos modelos de migração de usuários entre operadoras
- Acrescentar novos modelos de cálculo de receita (ex: modelos oficiais da Anatel)
- Acrescentar novos modelos de cálculo de custos (ex: modelos oficiais da Anatel)
- Uso de teoria dos jogos para obter o preço de equilíbrio do sistema

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 EITC. Three 5G Key Features and Use Cases . Disponível em: <{<http://www.eitc.org/research-opportunities/5g-and-beyond-mobile-wireless-technology/5g-and-beyond-technology-roadmap/three-5g-key-features-and-use-case>}.>
- 2 METIS. METIS Channel Models. *ICT-317669-METIS/D1.4 ver 3*, 2015. Disponível em: <https://metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS{_}D1.4{_}v1>
- 3 DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197.
- 4 OUGHTON, E. J.; KATSAROS, K. An Open-Source Techno-Economic Assessment Framework for 5G Deployment. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 155930–155940, 2019.
- 5 PASQUALI, N. *Licitação de Direito de Uso de Radiofrequências*. [S.l.], 2020.
- 6 ANATEL. *Relatório de Acompanhamento do Setor de Telecomunicações*. 2021.
- 7 TELECO. *Operadoras de Celular*. 2021. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/opcelular.asp>>.
- 8 MCTIC. Estratégia brasileira de redes de quinta geração (5g). p. 1–36, 2019.
- 9 ITU. Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges. p. 1—56, 2018.
- 10 GSMA. Infrastructure Sharing: An Overview. 2019. Disponível em: <<https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/infrastructure-sharing-an-overview/>>.
- 11 C., S. G. B. SHARED NETWORKS : MAKING WIRELESS COMMUNICATION AFFORDABLE. n. April, 2005.
- 12 BLACKMAN, C.; FORGE, S. 5G Deployment State of Play in Europe , USA and Asia. n. April, 2019.
- 13 ANATEL. Compartilhamento de Infraestrutura. 2015. Disponível em: <{<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/telefoniamovel-outorga/compartilhamento-de-infraestrutur>}.>
- 14 ANATEL. Conecta Brasil 2019. 2019. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/component/content/article/223-manchetes/398-conecta-brasi>>.
- 15 GSMA. White Paper: Mobile Infrastructure Sharing. 2012.
- 16 CISCO, T.; INTERNET, A. Cisco Annual Internet Report. 2020.
- 17 BEREC. BEREC Report on infrastructure sharing. 2018.
- 18 MEDDOUR, D.-e.; RASHEED, T.; GOURHANT, Y. On the role of infrastructure sharing for mobile network operators in emerging markets. *Computer Networks*, Elsevier B.V., v. 55, n. 7, p. 1576–1591, 2011. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2011.01.023>>.

- 19 LI, T.; BAI, L.; TTRENDS, B. G. Model of Wireless Telecommunications Network Infrastructure Sharing & Benefit-Cost Analysis. *2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, IEEE, v. 2, p. 102–105, 2015.
- 20 FRISANCO, T. et al. Infrastructure Sharing and Shared Operations for Mobile Network Operators. p. 129–136, 2008.
- 21 GSMA. Mobile Infrastructure Sharing. 2019. Disponível em: <<https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2014/10/Mobile-Infrastructure-sharing.pdf>>.
- 22 SAMDANIS, K.; COSTA-PEREZ, X.; SCIANCALEPORE, V. From Network Sharing to Multi-Tenancy: The 5G Network Slice Broker. IEEE, n. July, p. 32–39, 2016.
- 23 NOKIA. Network Sharing: Delivering mobile broadband more efficiently and at lower cost. p. 1–15, 2014.
- 24 CLARK, M. Sharing networks, driving growth. 2017.
- 25 BEREC. *BEREC report on pricing for access to infrastructure and civil works according to the BCRD*. [S.l.], 2018.
- 26 TIMES, M. Vivo e TIM avançam em compartilhamento de infraestrutura. 2019. Disponível em: <<https://www.moneytimes.com.br/telefonica-brasil-e-tim-avancam-em-compartilhamento-de-infraestrutura/>>.
- 27 Minha Operadora. *Vivo e TIM confirmam oficialmente que vão compartilhar redes*. 2020. Disponível em: <<https://www.minhaoperadora.com.br/2020/06/vivo-e-tim-confirmam-oficialmente-que-va-compartilhar-redes.html>>.
- 28 WIRE, B. Joint Construction and Sharing of 5G Telecom Infrastructure in Asia, 2019. 2019. Disponível em: <<https://www.businesswire.com/news/home/20191216005605/en/Joint-Construction-Sharing-5G-Telecom-Infrastructure-Asia>>.
- 29 CANO, L. et al. On Optimal Infrastructure Sharing Strategies in Mobile Radio Networks. IEEE, v. 16, n. 5, p. 3003–3016, 2017.
- 30 MARKENDAHL, J.; GHANBARI, A. Shared Smallcell Networks. *2013 11th International Symposium and Workshops on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, IEEE, p. 41–48, 2013.
- 31 DIGITAL, C. A Covid-19 torna o acesso à Internet um direito fundamental. 2021. Disponível em: <<https://sis-publique.convergenciadigital.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inoid=53517&sid=15.Acessadoem13/06/2021>>.
- 32 ANATEL. *Municípios Atendidos*. [S.l.], 2018.
- 33 ITU-D. ICT infrastructure business planning toolkit 2019. 2019.
- 34 TELESINTESE. ANATEL PREVÊ OPERADORA DE INFRAESTRUTURA PARA ATUAR APÓS LEILÃO DA 5G. 2020. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/anatel-preve-operadora-de-infraestrutura-para-atuar-apos-leilao-da-5g/>>.

- 35 MCTIC,Anatel. Resolução nº 683, de 05 de outubro de 2017. 2017. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19342453/do1-2017-10-09-resolucao-n-683-de-5-de-outubro-de-2017-19342323>.
- 36 Presidência da República. LEI Nº 13.116, DE 20 DE ABRIL DE 2015. 2015. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13116.ht>.
- 37 ANEEL,Anatel, ANP. Resolução Conjunta nº 1, de 24 de novembro de 1999. 1999. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/resolucoes-conjuntas/resolucoes/33-resolucoes-conjuntas/84-resolucao-conjunta->>.
- 38 Ministério das Comunicações. Lei Geral das Antenas. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcom/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/lei-geral-das-antenas>>.
- 39 TECHNOBLOG. *Vivo e Claro compartilharão infraestrutura para redes 3G e 4G*. 2013. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/126195/vivo-claro-compartilhamento-rede/>>.
- 40 TELESINTESE. *TIM e OI Defendem Compartilhamento para Disseminação do 5G*. 2020. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/tim-e-oi-defendem-compartilhamento-para-disseminacao-do-5g/>>.
- 41 ANATEL. RESOLUÇÃO Nº 671, DE 3 DE NOVEMBRO DE 2016. 2016. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/22067851/do1-2016-11-07-resolucao-n-671-de-3-de-novembro-de-2016-2206769>.
- 42 ANATEL. Resolução nº 600, de 8 de novembro de 2012. 2012. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/342012/425resolu>>.
- 43 TELEFONICA. *Fato Relevante - FiBrasil*. 2021. Disponível em: <<https://www.rad.cvm.gov.br/ENET/frmExibirArquivoIPEEexterno.aspx?ID=837821>>.
- 44 TELESINTESE. *TIM PEDE À ANATEL REGRA PARA OPERADORES NEUTROS*. 2020. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/tim-pede-a-anatel-regra-para-operadores-neutros/>>.
- 45 3GPP. TR 138 901 - V14.0.0 - 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14). v. 0, 2017. Disponível em: <<http://www.etsi.org/standards-search>>.
- 46 OUGHTON, E. J.; FRIAS, Z. The cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain. *Telecommunications Policy*, Elsevier Ltd, v. 42, n. 8, p. 636–652, 2018. ISSN 0308-5961.
- 47 ERICSSON. Ericsson Mobility Report 2016. *Ericsson*, n. February, 2016. ISSN 0005-1055.
- 48 SINGH, N.; VIVES, X. Price and Quantity Competition in a Differentiated Duopoly with Network Compatibility Effects. 1984.
- 49 HUNG, S.-Y.; YEN, D. C.; WANG, H.-Y. Applying data mining to telecom churn management. *Expert Systems with Applications*, v. 31, n. 3, p. 515–524, 2006. ISSN 0957-4174.

- 50 VASCONCELLOS VANESSA ; DE CARVALHO, P. H. P. A Framework for Evaluating 5G Infrastructure Sharing with a Neutral Host. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*, 2021.
- 51 R MARLER;J, A. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim* 26, 2004.
- 52 PONSICH, A.; JAIMES, A. L.; COELLO, C. A. A survey on multiobjective evolutionary algorithms for the solution of the portfolio optimization problem and other finance and economics applications. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 17, n. 3, p. 321–344, 2013. ISSN 1089778X.
- 53 CHO, J. H. et al. A Survey on Modeling and Optimizing Multi-Objective Systems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 19, n. 3, p. 1867–1901, 2017. ISSN 1553877X.
- 54 COELLO, C. A. An updated survey of ga-based multiobjective optimization techniques. *ACM Comput. Surv.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 32, n. 2, p. 109–143, jun. 2000. ISSN 0360-0300. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/358923.358929>>.
- 55 SOARES, C. A. d. O. Uma Formulação Multiobjetivo para o Cálculo de Equilíbrios de Nash não Pareto-dominados. p. 94, 2014.
- 56 CANO ANTONIO CAPONE, G. C. M. C. M. P. L. Cooperative Infrastructure and Spectrum Sharing in Heterogeneous Mobile Networks. 2016.
- 57 CANO A. CAPONE, G. C. L.; CESANA, M. Evaluating the Performance of Infrastructure Sharing in Mobile Radio Networks. 2015.
- 58 Rui,Meng ;Ye Ye ;Neng-gang Xie. Multi-objective optimization design methods based on game theory. *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, p. 2220–2227, 2010.
- 59 CHANG, K.-H. *Design theory and methods using CAD/CAE: The computer aided engineering design series*. [S.l.]: Academic Press, 2014.
- 60 RAO, S. S. Game theory approach for multiobjective structural optimization. *Computers & Structures*, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 119–127, 1987.
- 61 DENG, J. W. X.; WANG, J. How to Design a Common Telecom Infrastructure for Competitors to be Individually Rational and Collectively Optimal. 2017.
- 62 MYERSON, R. B. *Game theory*. [S.l.]: Harvard university press, 2013.
- 63 GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. v. 57.
- 64 YANG, X.-S. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. [S.l.]: Luniver press, 2010.
- 65 GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu search. Springer, p. 2093–2229, 1998.

- 66 GUPTA, A. K.; SMITH, K. G.; SHALLEY, C. E. The interplay between exploration and exploitation. *Academy of management journal*, Academy of Management Briarcliff Manor, NY 10510, v. 49, n. 4, p. 693–706, 2006.
- 67 OLIVEIRA, M.; SILVA, T. L.; ALOISE, D. J. Otimização por nuvem de partículas: diferença entre aplicações a problemas contínuos e discretos. 2004.
- 68 ZHANG, Y.; WANG, S.; JI, G. A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, v. 2015, 2015.
- 69 KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. v. 4, p. 1942–1948, 1995.
- 70 GANGULY, S.; SAHOO, N.; DAS, D. Multi-objective particle swarm optimization based on fuzzy-pareto-dominance for possibilistic planning of electrical distribution systems incorporating distributed generation. *Fuzzy Sets and Systems*, Elsevier, v. 213, p. 47–73, 2013.
- 71 FENG, J. et al. Improving the performance of electronic nose for wound infection detection using orthogonal signal correction and particle swarm optimization. *Sensor Review*, Emerald Group Publishing Limited, 2014.
- 72 COLLADO, C.; GRAU, A.; FLAVIIS, F. D. Dual-band planar quadrature hybrid with enhanced bandwidth response. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, IEEE, v. 54, n. 1, p. 180–188, 2006.
- 73 YONGQIANG, H.; WENTAO, L.; XIAOHUI, L. Particle swarm optimization for antenna selection in mimo system. *Wireless personal communications*, Springer, v. 68, n. 3, p. 1013–1029, 2013.
- 74 HAESER, G.; RUGGIERO, M. G. Aspectos teóricos de simulated annealing e um algoritmo duas fases em otimização global. *TEMA-Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, v. 9, n. 3, p. 395–404, 2008.
- 75 KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *science*, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.
- 76 ČERNÝ, V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, v. 45, n. 1, p. 41–51, 1985.
- 77 ZHU, Q. et al. Optimization of task allocation and priority assignment in hard real-time distributed systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, v. 11, n. 4, p. 1–30, 2013.
- 78 RUTENBAR, R. A. Simulated annealing algorithms: An overview. *IEEE Circuits and Devices magazine*, IEEE, v. 5, n. 1, p. 19–26, 1989.
- 79 COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. An introduction to multi-objective evolutionary algorithms and their applications. World Scientific, p. 1–28, 2004.
- 80 CASE, B.; LEHRE, P. K. Self-adaptation in nonelitist evolutionary algorithms on discrete problems with unknown structure. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 24, n. 4, p. 650–663, 2020.

- 81 AGARWAL, M.; VIG, L.; KUMAR, N. Multi-objective robot coalition formation for non-additive environments. p. 346–355, 2011.
- 82 RACHEDI, A.; BENSLIMANE, A. Multi-objective optimization for security and QoS adaptation in wireless sensor networks. p. 1–7, 2016.
- 83 VIDYARTHI, D.; KHANBARY, L. Multi-objective optimization for channel allocation in mobile computing using nsga-ii. *International Journal of Network Management*, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 247–266, 2011.
- 84 SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994.
- 85 RUDOLPH, G. *Evolutionary search under partially ordered sets*, Department of Computer Science/LS11, University of Dortmund, Dortmund. [S.l.], 1999.
- 86 ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 8, n. 2, p. 173–195, 2000.
- 87 DEB, K. et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 1917, p. 849–858, 2000.
- 88 HULTELL KLAS JOHANSSON, J. M. J. Business Models and Resource Management for Shared Wireless Networks. 2004.
- 89 K. Johansson,. LTE mobile network virtualization: Exploiting multiplexing and multi-user diversity gain. 2007.
- 90 BOUSIA, A. et al. Game-Theoretic Infrastructure Sharing in Multioperator Cellular Networks. *IEEE*, v. 65, n. 5, p. 3326–3341, 2016.
- 91 Rafał Pisz, Krzysztof Przybylski. Business Models, Cost Analysis and Advises for Spectrum Policy and Regulation for Scenario III.
- 92 Zaki, Yasir ; Zhao, Liang ; Goerg, Carmelita ; Timm - Giel, Andreas. Cost effective deployment strategies for heterogenous wireless networks. 2011.
- 93 5GAMERICAS. Multi-operator and Neutral Host Small Cells. 2016.
- 94 WALIA HEIKKI HÄMMÄINEN, M. M. J. S. "5G Micro-operators for the Future Campus: A Techno-economic Study" . 2017.
- 95 KIBRIA, M. G. et al. Shared spectrum access communications: A neutral host micro operator approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 8, p. 1741–1753, 2017.
- 96 FRANCESCO, P. D. et al. A sharing-and competition-aware framework for cellular network evolution planning. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, IEEE, v. 1, n. 2, p. 230–243, 2015.
- 97 SPIEKSMÄ, F. Cooperation among competitors.

- 98 HEW, S.-L.; WHITE, L. B. Cooperative resource allocation games in shared networks: Symmetric and asymmetric fair bargaining models. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 7, n. 11, p. 4166–4175, 2008.
- 99 Agência Brasil. Leilão do 5G prevê criação de rede privativa para o governo federal. 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-01/leilao-do-5g-preve-criacao-de-rede-privativa-para-o-governo-federal>>.
- 100 FAPEG. Governo de Goiás inaugura Ceagre e lança internet 5G em Rio Verde. 2020. Disponível em: <<http://www.fapeg.go.gov.br/governo-de-goias-inaugura-ceagre-e-lanca-internet-5g-em-rio-verde/>>.
- 101 OUGHTON, E. J. et al. Telematics and Informatics Assessing the capacity , coverage and cost of 5G infrastructure strategies : Analysis of the Netherlands. *Telematics and Informatics*, Elsevier, v. 37, n. July 2018, p. 50–69, 2019.