



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Talia Rafaela Klegin

**PROJETO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM CASOS DE
USO OPEN RAN**

Blumenau
2025

Talia Rafaela Klegin

**PROJETO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM CASOS DE
USO OPEN RAN**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Adão Boava

Blumenau

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Klegin, Talia Rafaela
PROJETO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM CASOS DE
USO OPEN RAN / Talia Rafaela Klegin ; orientador, Adão
Boava, 2025.
85 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Open RAN,
análise econômica. I. Boava, Adão. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e
Automação. III. Título.

Talia Rafaela Klegin

PROJETO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM CASOS DE USO OPEN RAN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 17 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adão Boava
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ciro André Pitz
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dra. Janaina Gonçalves Guimarães
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho, aos meus pais, pelo apoio constante, pelo amor inabalável e por cada gesto de dedicação que tornou possível a minha trajetória acadêmica e ao meu namorado, cujo apoio, compreensão e incentivo contínuo foram fundamentais para que eu mantivesse a força e a determinação ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela presença constante em minha vida, pelas bênçãos que iluminam meu caminho, pelo fortalecimento nos momentos de fraqueza e pelo amor que sustentou cada passo desta trajetória.

Aos meus pais, David e Isolete, pelo amor incondicional, pela educação que sempre foi meu alicerce e por acreditarem na minha capacidade mesmo quando os desafios pareciam maiores do que eu. Este trabalho também é fruto do esforço e dos valores que me transmitiram.

Ao meu namorado, Gabriel, pela parceria e apoio incansável, pela compreensão nos meus momentos de fraqueza e por me incentivar todos dias, principalmente naqueles em que a caminhada exigiu mais do que eu achava ter. Sua força, paciência e incentivo foram essenciais para que eu seguisse adiante.

Aos meus amigos, especialmente à Caroline Goetten, a irmã que a vida me deu, cujo carinho e amor me fortalecem diariamente, e à Beatriz Zaros, por cada palavra de incentivo, pelo apoio incansável e por todos os momentos, de alegria e de dificuldade, que compartilhamos juntas.

Ao meu cachorro, Scott, cuja presença afetuosa, ainda que silenciosa, trouxe conforto e serenidade aos dias emocionalmente mais duros. Sua chegada, em um momento de profunda dificuldade da minha vida, tornou-se um apoio genuíno e constante, renovando minhas forças e oferecendo luz quando eu mais precisava.

À Integre Júnior, que me proporcionou experiências acadêmicas únicas e inesquecíveis, crescimento profissional e amadurecimento pessoal, especialmente no que diz respeito ao autoconhecimento, trazendo maior propósito à minha trajetória. Levo sempre comigo cada aprendizado, cada desafio e cada conquista vivida nessa empresa.

Ao meu orientador, Adão Boava, pela orientação segura, pelo compromisso acadêmico e pela disponibilidade em compartilhar conhecimento com rigor e clareza. Sua contribuição foi indispensável para a realização deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, pela excelência no ensino, pela inspiração transmitida em sala de aula, pelo impacto em minha trajetória acadêmica e por todo o apoio prestado ao longo do curso.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se concretizasse, expresso minha sincera gratidão.

"A vida me ensinou que cair pode ser a melhor maneira de levantar." *Coco Chanel*

RESUMO

A adoção do 5G impulsionou o desenvolvimento de arquiteturas abertas e virtualizadas, entre elas a O-RAN (Rede de Acesso via Rádio Aberta), que propõe maior flexibilidade, interoperabilidade e potencial de redução de custos em relação ao modelo tradicional de RAN (Redes de Acesso via Rádio). Contudo, sua viabilidade econômica está condicionada a fatores como custos de transporte, densidade de usuários e grau de centralização da rede. Este trabalho investiga a viabilidade técnica e financeira da implantação de O-RAN e vRAN (Redes de Acesso via Rádio Virtualizada) em quatro cenários representativos, regiões rurais, grandes eventos urbanos, ambientes hospitalares e áreas comerciais de alta demanda. Para isso, é aplicado um modelo de TCO (Custo Total de Propriedade) que considera CAPEX (Despesas de Capital), OPEX (Despesas Operacionais) e parâmetros operacionais específicos de cada contexto. A análise demonstra que os ganhos econômicos associados à centralização variam conforme a infraestrutura disponível, enquanto cenários com restrições de transporte tendem a favorecer arquiteturas mais distribuídas. Dessa forma, o estudo integra aspectos técnicos e econômicos relevantes para o planejamento de redes 5G, identificando as condições em que a adoção da O-RAN se apresenta como uma alternativa mais vantajosa e oferecendo subsídios para decisões estratégicas de expansão, modernização e otimização das redes de acesso rádio.

Palavras-chave: Open RAN; vRAN; 5G; TCO; viabilidade econômica.

ABSTRACT

The adoption of 5G has fostered the development of open and virtualized architectures, among which O-RAN (Rede de Acesso via Rádio Aberta) stands out for providing greater flexibility, interoperability, and potential cost reductions compared to traditional RAN (Redes de Acesso via Rádio) models. However, its economic viability depends on factors such as transport costs, user density, and the degree of network centralization. This work investigates the technical and financial feasibility of deploying O-RAN and vRAN (Redes de Acesso via Rádio Virtualizada) across four representative scenarios, rural areas, large urban events, hospital environments, and high-demand commercial areas. To this end, a TCO (Custo Total de Propriedade) model is applied, incorporating CAPEX (Despesas de Capital), OPEX (Despesas Operacionais), and operational parameters specific to each context. The analysis shows that the economic benefits of centralization vary according to the available infrastructure, while scenarios with limited transport capacity tend to favor more distributed architectures. Overall, the study integrates relevant technical and economic aspects for 5G network planning by identifying the conditions under which O-RAN becomes a more advantageous alternative, providing support for strategic decisions related to the expansion, modernization, and optimization of radio access networks.

Keywords: Open RAN; vRAN; 5G; TCO; economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do padrão IMT-2020.	21
Figura 2 – Comparativo traditional RAN vs Open RAN.	27
Figura 3 – Cenário Macro Distribuído.	36
Figura 4 – Configuração RU-DU-CU e interfaces em um site rural.	38
Figura 5 – Cenário Macro Centralizado.	38
Figura 6 – Arquitetura Macro Centralizada com RU distribuída e DU/CU co- localizados em data center regional.	40
Figura 7 – Cenário Indoor.	41
Figura 8 – Configuração RU-DU-CU em um cenário indoor com múltiplos RUs distribuídos e DU centralizado.	42
Figura 9 – Cenário Small Cells.	43
Figura 10 – Configuração RU-DU-CU em um cenário outdoor de Small Cells, com DU integrado a cada RU e CU centralizado.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos CIF de referência utilizados na modelagem	49
Tabela 2 – Resumo Econômico do Cenário 1 – Macro Distribuído	65
Tabela 3 – Resumo Econômico do Cenário 2 - Macro Centralizado	67
Tabela 4 – Resumo Econômico do Cenário 3 - Indoor	68
Tabela 5 – Resumo Econômico do Cenário 4 – Outdoor Small Cell	69
Tabela 6 – Comparação consolidada dos resultados econômicos dos quatro cenários	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMF	Função de Gerenciamento de Acesso e Mobilidade
BBU	Unidade de Processamento Baseband
BSC	Controlador de Estações Base
CAPEX	Despesas de Capital
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CNF	Função de Rede Nativa da Nuvem
CoMP	Multiponto Coordenado
CPRI	Interface Pública Comum de Rádio
C-RAN	Redes de Acesso via Rádio em Nuvem
CU	Unidade Central
D-RAN	Redes de Acesso via Rádio Distribuída
DU	Unidade Distribuída
E1	E1 – Interface digital de transmissão europeia (2,048 Mbps)
eCPRI	Interface Pública Comum de Rádio Aprimorada
eMBB	Banda Larga Móvel Aprimorada
eNB	eNodeB – Estação Rádio Base do 4G
EPC	Núcleo de Pacotes Evoluído (4G)
gNB	gNodeB – Estação Rádio Base do 5G
GSM	Sistema Global de Comunicações Móveis
HD	Alta Definição
HTC	Alto Custo de Transporte
IoT	Internet das Coisas
IP	Protocolo de Internet
ITU	União Internacional de Telecomunicações
LTC	Baixo Custo de Transporte
LTE	Evolução de Longo Prazo
MAC	Controle de Acesso ao Meio
MEC	Computação de Borda Multiacesso
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
mMTC	Comunicações Massivas do Tipo Máquina
mmWave	Onda Milimétrica
OPEX	Despesas Operacionais
O-RAN	Rede de Acesso via Rádio Aberta
P2P	Ponto-a-Ponto
PDCP	Protocolo de Convergência de Dados de Pacote
PS-CN	Núcleo de Rede com Comutação de Pacotes
PTP	Protocolo de Tempo de Precisão

QoS	Qualidade de Serviço
RAN	Redes de Acesso via Rádio
RIC	Controlador Inteligente da RAN
RLC	Controle de Enlace de Rádio
RNC	Controlador de Rede de Rádio
RRC	Controle de Recursos de Rádio
RU	Unidade de Rádio
SDH	Hierarquia Digital Síncrona
SDN	Redes Definidas por Software
SON	Rede Auto-Organizável
SONET	Rede Óptica Síncrona
SyncE	Ethernet Síncrona
T1	T1 – Interface digital de transmissão norte-americana (1,544 Mbps)
TCO	Custo Total de Propriedade
TDM	Tecnologias de Multiplexação Temporal
TSN	Rede Sensível a Tempo
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicações Móveis
UPF	Função do Plano de Usuário
URLLC	Comunicações Ultra-Reliáveis e de Baixa Latência
UTI	Unidade de Terapia Intensiva
VNF	Funções de Rede Virtualizadas
vRAN	Redes de Acesso via Rádio Virtualizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	GERAÇÕES DAS REDES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL	19
2.1.1	Primeiras gerações	19
2.1.2	Geração 5G	20
2.2	ARQUITETURAS DE REDES 5G	21
2.2.1	Arquitetura Geral	21
2.2.1.1	<i>RAN (Redes de Acesso via Rádio)</i>	21
2.2.1.2	<i>Network Slicing</i>	22
2.3	ARQUITETURAS DE ACESSO RÁDIO NO 5G	22
2.3.1	Desagregação funcional: RU, DU e CU	23
2.3.2	D-RAN (Redes de Acesso via Rádio Distribuída)	24
2.3.3	Virtualização da RAN (vRAN)	25
2.3.3.1	<i>Arquitetura e Configurações da vRAN</i>	25
2.3.3.2	<i>Considerações Operacionais e Técnicas da vRAN</i>	26
2.3.4	O-RAN (Rede de Acesso via Rádio Aberta)	26
2.3.4.1	<i>Evolução do O-RAN</i>	27
2.3.5	C-RAN (Redes de Acesso via Rádio em Nuvem)	28
2.4	TECNOLOGIAS XHAUL	29
2.4.1	Arquitetura de Transporte: <i>Fronthaul, Midhaul e Backhaul</i>	29
2.5	ESTADO DA ARTE	31
2.5.1	Estudos recentes	31
2.5.2	Síntese dos estudos	33
3	CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO DE REDES OPEN RAN E VRAN	35
3.1	INTRODUÇÃO AOS CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO	35
3.2	CENÁRIO 1 – MACRO DISTRIBUÍDO	36
3.2.1	Caso de Uso: Cobertura para Comunidades Rurais e Estradas	36
3.2.2	Caso de Uso Aplicado – Cobertura para Comunidades Rurais e Estradas	37
3.3	CENÁRIO 2 – MACRO CENTRALIZADO	38

3.3.1	Caso de Uso: Cobertura para Grandes Eventos em Áreas Urbanas	38
3.3.2	Caso de Uso Aplicado – Oktoberfest Blumenau	40
3.4	CENÁRIO 3 – INDOOR	41
3.4.1	Caso de Uso: Conectividade para Hospitais e Centros Médicos	41
3.4.2	Caso de Uso Aplicado – Hospitais e Centros de Saúde	42
3.5	CENÁRIO 4 – OUTDOOR SMALL CELL	43
3.5.1	Caso de Uso: Cobertura em Áreas de Alta Demanda em Centros Comerciais e Parques	43
3.5.2	Aspectos de Desempenho, Econômicos e Operacionais	44
3.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO	45
4	PROJETO E ANÁLISE ECONÔMICA DE CASOS DE USO DA OPEN RAN	47
4.1	INTRODUÇÃO AO MODELO ECONÔMICO	47
4.2	CÁLCULOS DE VIABILIDADE E APLICAÇÃO AOS CENÁRIOS	49
4.3	FORMULAÇÕES DO MODELO ECONÔMICO	50
4.3.1	Estrutura geral do CAPEX	51
4.3.2	Estrutura geral do OPEX	52
4.4	ANÁLISE ECONÔMICA	53
4.4.1	Cenário 1	53
4.4.1.0.1	Custos CIF obrigatórios utilizados	53
4.4.1.1	<i>Percentuais e fatores operacionais</i>	<i>54</i>
4.4.1.2	<i>Cálculo do CAPEX</i>	<i>54</i>
4.4.1.2.1	CAPEX final	55
4.4.1.3	<i>Cálculo do OPEX anual</i>	<i>55</i>
4.4.1.3.1	OPEX total	55
4.4.1.4	<i>TCO em horizonte de 5 anos</i>	<i>56</i>
4.4.2	Cenário 2	56
4.4.2.0.1	Custos CIF obrigatórios utilizados	56
4.4.2.0.2	Parâmetros financeiros e operacionais	57
4.4.2.1	<i>Cálculo do CAPEX</i>	<i>57</i>
4.4.2.1.1	CAPEX final	58
4.4.2.2	<i>Cálculo do OPEX anual</i>	<i>58</i>
4.4.2.2.1	OPEX total anual	59
4.4.2.2.2	TCO em horizonte de 5 anos	59
4.4.3	Cenário 3	59
4.4.3.0.1	Custos CIF obrigatórios utilizados	59
4.4.3.0.2	Parâmetros financeiros e operacionais	60
4.4.3.1	<i>Cálculo do CAPEX</i>	<i>60</i>

4.4.3.1.1	CAPEX final	61
4.4.3.2	<i>Cálculo do OPEX anual</i>	61
4.4.3.2.1	OPEX anual total	61
4.4.3.3	<i>TCO em horizonte de 5 anos</i>	62
4.4.4	Cenário 4	62
4.4.4.0.1	Custos CIF obrigatórios utilizados	62
4.4.4.0.2	Parâmetros financeiros e operacionais	62
4.4.4.1	<i>Cálculo do CAPEX</i>	63
4.4.4.1.1	CAPEX final	63
4.4.4.2	<i>Cálculo do OPEX anual</i>	63
4.4.4.2.1	OPEX anual total	64
4.4.4.3	<i>TCO em horizonte de 5 anos</i>	64
5	RESULTADOS	65
5.1	CENÁRIO 1 – MACRO DISTRIBUÍDO	65
5.2	CENÁRIO 2 – MACRO CENTRALIZADO	66
5.3	CENÁRIO 3 – INDOOR	67
5.4	CENÁRIO 4 – OUTDOOR SMALL CELL	68
5.5	COMPARAÇÃO INTEGRADA DOS CENÁRIOS E DISCUSSÃO CRÍTICA	70
5.5.1	Comparação Econômica Geral	70
5.5.2	Discussão Crítica e Conexão com o Estado da Arte	70
5.5.2.1	<i>Centralização como principal vetor de economia</i>	70
5.5.2.2	<i>Análise geral dos resultados</i>	71
6	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A – Descrição	78

1 INTRODUÇÃO

A evolução das redes móveis nas últimas décadas tem sido marcada por um movimento contínuo de aumento de capacidade, redução de latência e incorporação de mecanismos de virtualização e automação. Com a expansão do 5G e das novas demandas impostas por aplicações massivas, sensíveis ao atraso e altamente distribuídas, tornou-se evidente que os modelos tradicionais de arquitetura de acesso rádio RAN (Redes de Acesso via Rádio) já não são suficientes para sustentar a complexidade e a escala das redes contemporâneas.

Nesse contexto, iniciativas como a vRAN (Redes de Acesso via Rádio Virtualizada) e, sobretudo, o modelo O-RAN (Rede de Acesso via Rádio Aberta), surgem como propostas capazes de transformar estruturalmente o sistema de telecomunicações. Ao introduzirem princípios de desagregação funcional, interfaces abertas e possibilidade de uso de componentes *multivendor*, essas arquiteturas ampliam a flexibilidade na implantação, permitem modelos de inovação mais dinâmicos e tornam os custos de rede mais transparentes e moduláveis. A adoção desse padrão, entretanto, exige uma compreensão aprofundada não apenas de seus aspectos técnicos, mas também de seus impactos econômicos, especialmente no que se refere ao investimento inicial, à operação contínua e ao ciclo de vida das infraestruturas.

A análise econômica torna-se elemento central nesse debate, uma vez que o processo de modernização e expansão das redes depende diretamente da viabilidade financeira de cada modelo arquitetônico. Operadoras em todo o mundo enfrentam um cenário de crescimento vertiginoso do tráfego, acompanhado de margens cada vez mais reduzidas. Assim, compreender o comportamento do TCO (Custo Total de Propriedade), do CAPEX (Despesas de Capital) e do OPEX (Despesas Operacionais) em diferentes configurações de rede torna-se fundamental para subsidiar decisões estratégicas, orientar investimentos e avaliar a atratividade de soluções como o O-RAN.

A literatura recente demonstra que os efeitos econômicos dessas arquiteturas não são uniformes. Eles variam conforme o ambiente de implantação, a densidade de usuários, o tipo de caso de uso, o grau de centralização da rede e a estrutura de custos associada a equipamentos como a RU (Unidade de Rádio), a DU (Unidade Distribuída) e a CU (Unidade Central). Dessa forma, estudos comparativos tornam-se essenciais para identificar quando e onde a adoção do O-RAN pode, de fato, oferecer vantagens competitivas — seja em cenários amplos e distribuídos, como regiões rurais e estradas; em ambientes densamente povoados, como grandes eventos; em espaços críticos, como hospitais; ou em zonas urbanas de alta demanda, como centros comerciais e parques.

Diante desse panorama, este trabalho propõe uma análise técnica e econômica aplicada a quatro cenários representativos do uso de O-RAN e vRAN. A partir de dados na literatura e de modelos de custos apresentados em estudos de referência, busca-se comparar

o comportamento das soluções em diferentes contextos, evidenciando suas implicações operacionais, seus padrões de investimento e sua viabilidade econômica ao longo do ciclo de vida da rede.

1.1 JUSTIFICATIVA

A adoção de arquiteturas abertas e virtualizadas tem avançado rapidamente no setor de telecomunicações, mas sua viabilidade varia consideravelmente conforme a realidade de cada operador e o tipo de implantação. Enquanto alguns cenários apresentam claras oportunidades de redução de custos e ganhos em flexibilidade, outros exigem investimentos iniciais significativos e apresentam desafios operacionais que precisam ser dimensionados com precisão.

Nesse sentido, ainda existe uma lacuna em estudos que realizem comparações estruturadas entre cenários distintos, utilizando parâmetros reais de custo e relacionando-os a aplicações específicas. A relevância deste trabalho está justamente em contribuir para essa discussão, oferecendo uma visão integrada entre a parte técnica e a modelagem econômica que permitirá avaliar, de maneira objetiva, o potencial de cada cenário.

Além disso, ao fundamentar o estudo em casos de uso reais e contextualizados (comunidades rurais, grandes eventos, hospitais e áreas urbanas de alta demanda), o trabalho aproxima a análise das necessidades práticas do setor, favorecendo sua aplicabilidade no planejamento e na tomada de decisão de operadores, integradores e entes regulatórios.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade econômica de diferentes cenários de implantação de redes O-RAN e vRAN, considerando a estrutura detalhada de custos associada a seus equipamentos e funções, bem como suas particularidades técnicas e operacionais.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o TCO de diferentes arquiteturas de implantação de O-RAN e vRAN, aplicadas a quatro cenários representativos de uso, de modo a identificar vantagens, limitações e oportunidades para cada modelo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar a composição dos custos de RU, DU e CU em arquiteturas desagregadas;
- Analisar o comportamento do CAPEX e do OPEX em cada um dos cenários estudados;

- Aplicar modelos de TCO amplamente utilizados na literatura e adaptá-los às características dos cenários propostos;
- Comparar o desempenho econômico entre as arquiteturas avaliadas, evidenciando o impacto da centralização, da densidade de usuários e do tipo de caso de uso;
- Identificar quais cenários apresentam maior viabilidade financeira.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está organizado de forma que o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que sustenta o estudo, detalhando os conceitos essenciais relacionados às arquiteturas RAN, vRAN, O-RAN e tecnologias de *X-Haul*. O Capítulo 3 discute os cenários de implantação selecionados, caracterizando suas particularidades técnicas e os respectivos casos de uso. No Capítulo 4 é desenvolvido o modelo econômico que servirá de base para a análise financeira, definindo métricas, parâmetros e metodologias de cálculo. O Capítulo 5 apresenta os resultados da análise, com a comparação entre os cenários. Por fim, o Capítulo 6 expõe as conclusões e considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GERAÇÕES DAS REDES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

2.1.1 Primeiras gerações

A evolução das redes móveis tem suas origens na década de 1980, quando surgiu a necessidade de uma rede de comunicação que permitisse maior mobilidade e flexibilidade para os usuários, ao mesmo tempo em que mantivesse a qualidade e a eficiência das comunicações. Naquele período, as redes de telefonia existentes eram predominantemente fixas, o que limitava a liberdade de locomoção. Dessa forma, a demanda por uma conectividade sem fio, que possibilitasse a comunicação em movimento, tornou-se um dos principais impulsionadores da inovação tecnológica na área das telecomunicações.

A combinação de avanços em diferentes campos tecnológicos, como a miniaturização de dispositivos eletrônicos e o desenvolvimento de novas tecnologias de rádio, tiveram importância significativa no processo, já que com a redução no tamanho dos componentes e a capacidade de transmitir sinais de forma mais eficiente, tornou-se possível o surgimento das primeiras redes móveis, capazes de operar sem a necessidade de conexões físicas e cabos, oferecendo aos usuários maior liberdade e conveniência.

A partir deste contexto, a primeira geração de redes móveis (1G) foi lançada no final da década de 1980. Embora limitada em termos de capacidade e qualidade de serviço, a 1G foi um acontecimento de grande impacto, pois inaugurou o conceito de telefonia móvel, utilizando tecnologia analógica para a transmissão de voz. Com a crescente demanda por mais recursos e maior capacidade, as gerações seguintes passaram a adotar tecnologias digitais, impulsionando a evolução das redes móveis (GAWAS, 2015).

Ao longo das décadas seguintes, diferentes gerações de redes móveis foram sendo desenvolvidas, cada uma delas trazendo inovações significativas em termos de velocidade, capacidade, qualidade de serviço e diversidade de aplicações. As gerações que precedem o 5G incluem:

- **Primeira geração (1G):** A primeira rede de telecomunicação móvel, como mencionado acima, surgiu na década de 80 e utilizava tecnologia analógica, com um único nó centralizado. Essa rede possuía limitação de usuários simultâneos e se destinava apenas a transmissão de voz.
- **Segunda geração (2G):** Já no início da década de 90, com o surgimento da segunda geração, a rede de telecomunicação deu um grande avanço no que se refere aos recursos tecnológicos, pois além da mudança para a transmissão digital de voz, passou a ser possível também o envio de mensagens de texto. Além disso, foi introduzida a arquitetura GSM.
- **Terceira geração (3G):** No começo dos anos 2000, surgiu a terceira geração, que se destacou principalmente por entregar maior velocidade de processamento

de dados, tornando possível a utilização de internet móvel e outros serviços mais avançados, como o compartilhamento de mídia. Essa geração teve a introdução da arquitetura UMTS (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis) e a adição do PS-CN (Núcleo de Rede com Comutação de Pacotes).

- **Quarta geração (4G):** A última geração que precedeu o 5G, foi a quarta geração que surgiu na década passada, com mudanças significativas nos recursos que se utilizam atualmente, como aplicativos e serviços mais avançados, como streaming de vídeo em HD (Alta Definição) e jogos online. Foi na quarta geração também que a arquitetura LTE (Evolução de Longo Prazo) foi totalmente introduzida e ainda de uma estrutura padronizada, o EPC (Núcleo de Pacotes Evoluído (4G)) para fornecer a transmissão de dados de voz em alta velocidade.

2.1.2 Geração 5G

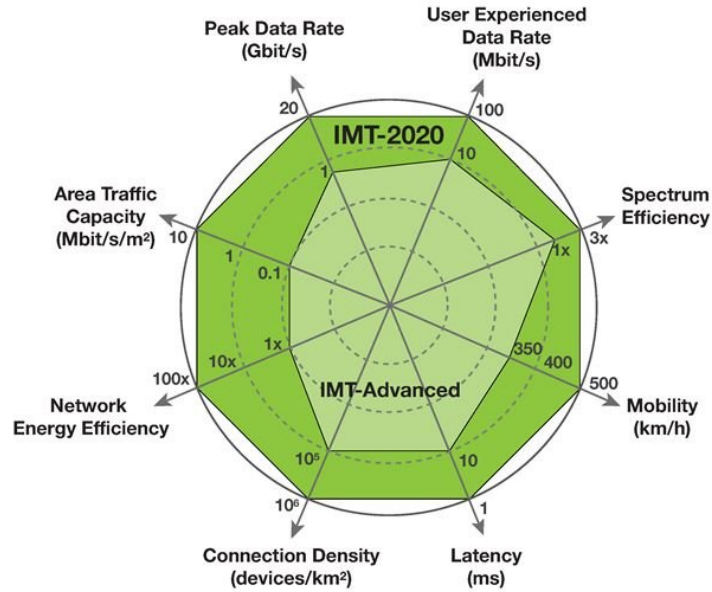
A quinta geração de redes móveis, conhecida como 5G, começou a ser estudada na última década para atender à crescente demanda por maior velocidade, menor latência e maior capacidade de conexões simultâneas. Mais do que aprimorar a comunicação existente, o 5G viabiliza novas aplicações, como IoT (Internet das Coisas), veículos autônomos, telemedicina e realidade aumentada, que exigem redes mais robustas e flexíveis (GAWAS, 2015).

O 5G introduz conceitos como mMTC (Comunicações Massivas do Tipo Máquina), permitindo a conexão eficiente de um grande número de dispositivos simultaneamente, e *network slicing*, que possibilita segmentar a rede de acordo com diferentes tipos de tráfego e aplicações (HE *et al.*, 2018). Tecnologias como *Massive* MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas) aumentam a capacidade de transmissão e a cobertura (RAMESH; PRIYA; ANANTHAKIRUPA, 2017), enquanto a arquitetura virtualizada da rede favorece flexibilidade e escalabilidade.

Para padronizar o 5G, a ITU (União Internacional de Telecomunicações) definiu requisitos fundamentais, conforme Figura 1, que incluem alta taxa de dados de pico e de experiência do usuário, baixa latência, suporte à mobilidade, elevada densidade de conexões, eficiência energética e espectral, e capacidade de tráfego em áreas densamente povoadas (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2017). Esses parâmetros asseguram que a rede 5G seja capaz de atender às demandas de performance e confiabilidade da sociedade digital, servindo como base para a implementação de arquiteturas virtualizadas de RAN, incluindo C-RAN e vRAN.

Na figura abaixo é possível visualizar os valores numéricos dos requisitos recomendados pela ITU:

Figura 1 – Ilustração do padrão IMT-2020.



Fonte: ITU-R M.2083-0

2.2 ARQUITETURAS DE REDES 5G

2.2.1 Arquitetura Geral

A arquitetura das redes 5G foi projetada para oferecer maior capacidade, flexibilidade e eficiência operacional (GUPTA; JHA, 2015) em comparação às gerações anteriores. Seu desenvolvimento foi orientado pela necessidade de suportar diferentes perfis de tráfego, desde aplicações de banda larga móvel até comunicações críticas de baixa latência e cenários com milhões de dispositivos conectados simultaneamente. Para isso, a rede 5G adota uma divisão modular e escalável entre seus principais domínios, permitindo maior adaptabilidade e evolução tecnológica ao longo do ciclo de vida da rede (GAWAS, 2015).

De forma geral, a infraestrutura é composta pela RAN, responsável pelo acesso sem fio, pelo domínio de transporte, que abrange os enlaces de *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*, e pelos sistemas de gerenciamento e orquestração. Essa estrutura fornece a base para a virtualização, a automação e o uso de arquiteturas desagregadas, elementos essenciais para os conceitos de vRAN e O-RAN, que serão aprofundados nas seções seguintes.

2.2.1.1 RAN (Redes de Acesso via Rádio)

A RAN é responsável pela conexão entre os dispositivos dos usuários e o restante da infraestrutura da operadora. No 5G, essa rede adota uma abordagem desagregada e flexível, permitindo a separação das funções tradicionais da estação rádio-base. Essa estação, denominada gNB (gNodeB – Estação Rádio Base do 5G), pode ser dividida em

três componentes funcionais principais:

- **CU** – concentra funções de controle, coordenação e gerenciamento.
- **DU** – executa funções de processamento de dados e operações com requisitos intermediários de latência.
- **RU** – responsável pela transmissão e recepção dos sinais de rádio.

Essa divisão funcional permite que diferentes partes da RAN sejam distribuídas ou centralizadas conforme as necessidades de desempenho e de arquitetura. Além disso, constitui o fundamento para modelos mais recentes, como C-RAN, vRAN e O-RAN, nos quais as funções da rede são executadas de forma virtualizada ou com equipamentos de múltiplos fornecedores.

As interfaces que conectam a RU, DU e CU, conhecidas como *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*, são elementos críticos para o funcionamento da rede, pois determinam requisitos de capacidade, latência e confiabilidade. A discussão aprofundada dessas interfaces será apresentada nos capítulos seguintes.

2.2.1.2 Network Slicing

O *Network Slicing* é um mecanismo que permite criar múltiplas redes lógicas sobre a mesma infraestrutura física (AFOLABI *et al.*, 2018). Cada “fatia” pode ser configurada com requisitos específicos de desempenho, segurança e disponibilidade, possibilitando suportar diferentes tipos de aplicações de forma isolada e eficiente. Entre os tipos mais comuns estão (BARRETO *et al.*, 2022):

- **eMBB (Banda Larga Móvel Aprimorada)** – banda larga móvel aprimorada, voltada para altas taxas de dados;
- **URLLC (Comunicações Ultra-Reliáveis e de Baixa Latência)** – comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência;
- **mMTC (Comunicações Massivas do Tipo Máquina)** – conexões massivas de dispositivos IoT.

Embora não seja o foco central deste trabalho, o conceito de *slicing* é fundamental para compreender a importância da arquitetura desagregada e do transporte eficiente, pois cada fatia pode impor requisitos distintos ao *fronthaul*, ao *midhaul* e ao *backhaul*.

2.3 ARQUITETURAS DE ACESSO RÁDIO NO 5G

As redes de acesso rádio constituem um dos elementos mais críticos na infraestrutura das telecomunicações móveis, pois representam a interface direta entre os dispositivos dos usuários e o restante da rede. Historicamente, a RAN evoluiu em paralelo com as gerações de comunicação móvel, passando de estruturas altamente integradas e rígidas nas primeiras gerações para arquiteturas desagregadas, virtualizadas e abertas no contexto do 5G.

No modelo tradicional, conhecido como D-RAN (Redes de Acesso via Rádio Distribuída), cada estação rádio base integra todos os elementos de processamento e de transmissão, desde a interface rádio até o controle de chamadas. Essa abordagem, predominante no 2G e 3G, apresenta simplicidade de operação, mas limita a escalabilidade e dificulta a otimização de recursos, uma vez que cada célula funciona de maneira praticamente isolada.

Com a expansão do 4G e a crescente demanda por eficiência espectral, surgiu a C-RAN. Nesse modelo, parte das funções da camada de rádio é centralizada em data centers regionais, permitindo a coordenação entre múltiplas células e reduzindo custos operacionais e de energia (WU *et al.*, 2015). Apesar dos avanços, o C-RAN ainda dependia de enlaces de transporte de altíssima capacidade e baixa latência entre as antenas e os módulos centrais, o que limitava sua implantação em cenários heterogêneos.

No 5G, o avanço das tecnologias de virtualização permitiu o surgimento da vRAN, que representa um passo decisivo em direção à flexibilidade. Nesse modelo, funções tradicionalmente implementadas em hardware proprietário são executadas como software em servidores padrão. Essa transição abre caminho para maior escalabilidade, customização sob demanda e redução do TCO (LEE, S.; KI; EDGE, 2017).

Complementarmente, iniciativas como a O-RAN buscam padronizar interfaces abertas e interoperáveis entre os diferentes elementos da rede, reduzindo a dependência de fornecedores únicos e promovendo um ecossistema mais competitivo e inovador.

2.3.1 Desagregação funcional: RU, DU e CU

Um dos princípios estruturantes da arquitetura de acesso rádio no 5G é a desagregação funcional da RAN, que consiste em dividir o processamento do sinal em diferentes unidades (BONATI *et al.*, 2021), cada uma com responsabilidades bem definidas, visando otimizar desempenho, flexibilidade e eficiência de recursos. Essa abordagem permite que funções críticas de tempo real sejam executadas próximas à borda da rede, enquanto funções menos sensíveis à latência podem ser centralizadas, gerando ganhos significativos em escalabilidade, manutenção e custo operacional.

A RU é a unidade mais próxima da antena, responsável pela transmissão e recepção dos sinais de rádio. Sua função principal é converter fluxos digitais em sinais eletromagnéticos e vice-versa, garantindo a interface direta com o espectro radioelétrico. Por operar na borda da rede, a RU demanda alta resiliência, confiabilidade e capacidade de processamento em tempo real, além de tolerância a variações ambientais, como temperatura e interferência eletromagnética. Essa proximidade com o usuário final é fundamental para reduzir a latência de rádio e viabilizar aplicações sensíveis ao tempo de resposta, como realidade aumentada, veículos autônomos e controle industrial remoto (BONATI *et al.*, 2021).

A DU concentra funções das camadas inferiores da pilha de protocolos, incluindo

principalmente o MAC (Controle de Acesso ao Meio) e a RLC (Controle de Enlace de Rádio). Posicionada em locais intermediários da rede, a DU atua como um elo entre a RU e a camada central, gerenciando o tráfego com restrições de latência mais rigorosas e realizando funções de multiplexação, *scheduling* e retransmissão. Essa localização estratégica permite que a DU processe o tráfego de forma eficiente, equilibrando a proximidade física dos usuários com a capacidade de processamento necessário, garantindo qualidade de serviço em cenários com alta densidade de usuários e mobilidade intensa (BONATI *et al.*, 2021).

Já a CU concentra funções de controle de sessão e gerenciamento da rede, operando nas camadas superiores da pilha de protocolos, como PDCP (Protocolo de Convergência de Dados de Pacote) e RRC (Controle de Recursos de Rádio). A CU pode ser implementada em data centers regionais ou em nuvens privadas, dependendo da capacidade de transporte e da densidade de tráfego da região atendida. Ao centralizar funções de controle e de decisão da rede, a CU permite maior eficiência na coordenação de múltiplas DUs, simplifica a atualização de software e possibilita estratégias avançadas de otimização de recursos, como balanceamento dinâmico de carga e orquestração de espectro (BONATI *et al.*, 2021).

A separação em RU, DU e CU traz, portanto, uma flexibilidade significativa no planejamento da rede. Permite-se, por exemplo, posicionar a DU próxima aos usuários em áreas urbanas densas para minimizar a latência, enquanto em regiões rurais a maior parte das funções pode ser concentrada na CU, reduzindo custos com infraestrutura distribuída. Essa arquitetura modular também facilita a implementação de soluções híbridas, como edge computing e redes abertas (O-RAN), oferecendo caminhos claros para evolução futura da rede, integração de novos serviços e adaptação a diferentes requisitos de desempenho, custo e escalabilidade.

2.3.2 D-RAN (Redes de Acesso via Rádio Distribuída)

A D-RAN representa a arquitetura tradicional das redes de acesso rádio, desempenhando papel central na evolução das tecnologias móveis desde o 2G até o LTE (SARASÚA ZUBIMENDI, 2017). Nesse modelo, cada estação rádio-base integra localmente a BBU (Unidade de Processamento Baseband), responsável pelo processamento digital de sinais, e a RU, que contém amplificadores, filtros, conversores e antenas. Essa configuração garante autonomia a cada célula, configurando uma rede descentralizada, em que processamento e transmissão ocorrem localmente.

O modelo acompanhou a evolução das redes móveis no 2G GSM, as BTS mantinham processamento local, apoiadas por BSC (Controlador de Estações Base), no 3G UMTS, o NodeB expandiu suporte a dados, ainda dependente do RNC, no 4G LTE, o eNB (eNodeB – Estação Rádio Base do 4G) integrou funções do RNC (Controlador de Rede de Rádio), conferindo maior autonomia e eficiência no tráfego de pacotes. Apesar desses avanços, a manutenção de BBU e RU no mesmo local evidenciou limitações, especialmente

diante do aumento do tráfego e da densificação de células.

A necessidade de infraestrutura completa em cada site, incluindo energia, climatização e manutenção, que elevava significativamente CAPEX e OPEX. A autonomia excessiva das células dificultava a coordenação de recursos, comprometendo eficiência espectral e técnicas avançadas de gerenciamento de interferência, como o CoMP (Multiponto Coordenado). Além disso, a falta de padronização nas interfaces BBU-RU reforçava dependência de soluções proprietárias, reduzindo flexibilidade e escalabilidade (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

Assim, a D-RAN consolidou-se como base conceitual e técnica para o 2G, 3G e LTE, mas suas limitações em termos de custo, coordenação e flexibilidade criaram o cenário para o surgimento de arquiteturas centralizadas, que evoluíram posteriormente para modelos virtualizados como o C-RAN.

2.3.3 Virtualização da RAN (vRAN)

A virtualização da RAN, ou vRAN, é um dos pilares da evolução das redes 5G, propondo a substituição de equipamentos de rádio proprietários por VNF executadas em servidores genéricos. Essa abordagem permite desacoplar o *software* da infraestrutura física, proporcionando flexibilidade, automação, escalabilidade e eficiência operacional, ao mesmo tempo em que habilita a integração com conceitos emergentes, como O-RAN e MEC (O-RAN ALLIANCE, 2018).

2.3.3.1 Arquitetura e Configurações da vRAN

Na vRAN, funções tradicionalmente distribuídas entre RU, DU e CU podem ser implementadas como VNF em servidores padronizados, com diferentes estratégias de alocação conforme requisitos de desempenho, latência, transporte e custo.

- vDU/vCU distribuídas: Nesse modelo, as funções de processamento da DU são executadas em servidores próximos às RUs, garantindo baixa latência para aplicações sensíveis ao tempo de resposta, enquanto a CU permanece centralizada em data centers regionais. Essa configuração é vantajosa em áreas urbanas densas, reduzindo congestionamentos e permitindo coordenação eficiente entre múltiplas DUs, aumentando o controle sobre a qualidade do serviço e a resposta a variações de tráfego (LEE, Y.; LEE, H.; LIM, 2020).
- Arquiteturas híbridas: Combinam centralização e distribuição de funções de forma estratégica, permitindo ajustes finos entre desempenho, custo de transporte e utilização de recursos computacionais. Funções críticas de latência podem permanecer próximas aos usuários, enquanto o processamento de controle e gerenciamento é centralizado, equilibrando investimentos em infraestrutura e eficiência operacional.

2.3.3.2 Considerações Operacionais e Técnicas da vRAN

A virtualização da RAN promove mudanças significativas na operação e gestão das redes móveis, ao deslocar funções tradicionalmente distribuídas entre RU, DU e CU para ambientes de computação padronizados. Essa reorganização funcional possibilita escalabilidade dinâmica, permitindo que recursos computacionais sejam alocados de forma elástica conforme a demanda real da rede, reduzindo a necessidade de superdimensionamento físico e favorecendo estratégias financeiras incrementais, como o modelo *pay-as-you-grow* (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

A centralização parcial ou total de funções também impacta diretamente a eficiência operacional. A manutenção de servidores padronizados em *data centers* reduz deslocamentos de pessoal técnico e visitas a sites distribuídos, simplifica atualizações e orquestração de *software*, e permite consolidação de recursos computacionais, resultando em menor consumo energético e melhor aproveitamento dos enlaces de transporte. Essa abordagem aumenta a confiabilidade da rede e contribui para a adoção ágil de novos serviços, incluindo aplicações sensíveis à latência, comunicações ultra-confiáveis e cenários massivos de IoT.

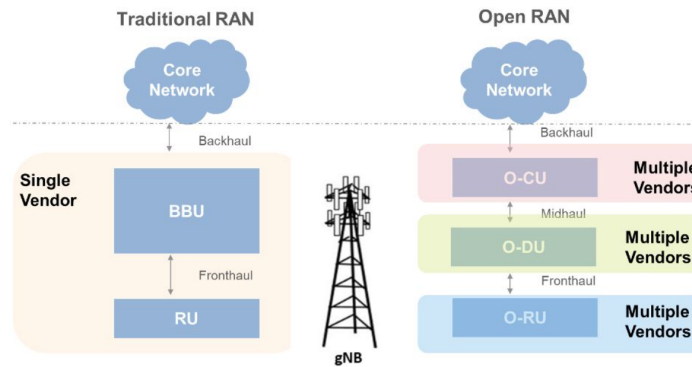
2.3.4 O-RAN (Rede de Acesso via Rádio Aberta)

O O-RAN representa uma mudança significativa na arquitetura das redes de acesso rádio RAN, propondo uma abordagem aberta, modular e baseada em padrões (O-RAN ALLIANCE, 2018). Diferentemente das redes tradicionais, em que *hardware* e *software* são integrados por um único fornecedor, o O-RAN permite que componentes de diferentes fabricantes interrompam por meio de interfaces padronizadas, possibilitando maior flexibilidade na composição e expansão da rede. Na Figura 2 é possível observar a diferença entre a arquitetura tradicional da RAN e a arquitetura Open RAN, evidenciando como, no segundo caso, há a possibilidade de integração entre diferentes fornecedores (*vendors*) de *hardware* e *software* por meio de interfaces abertas e padronizadas.

Essa modularidade não apenas facilita a virtualização de funções de rede e a aplicação de inteligência distribuída para otimização de desempenho, mas também influencia diretamente a gestão do transporte de dados, incluindo *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*, e a modelagem de custos associados à infraestrutura de rede. Ao permitir que os operadores escolham soluções competitivas para cada componente da RAN, o O-RAN oferece potencial de redução de CAPEX e OPEX, além de estimular a inovação e acelerar a introdução de novos serviços (PAOLINI, 2020).

Dessa forma, o O-RAN não se limita a uma evolução técnica, mas configura-se como um movimento estratégico para redes móveis 5G e futuras gerações, alinhando aspectos de flexibilidade, desempenho e viabilidade econômica. Nos itens a seguir, serão apresentados o histórico, a motivação e as bases técnicas que fundamentam essa abordagem.

Figura 2 – Comparativo traditional RAN vs Open RAN.



Fonte: Open RAN (O-RAN), MathWorks.

2.3.4.1 Evolução do O-RAN

O conceito de O-RAN surge como resposta a um problema histórico das redes móveis a forte dependência das operadoras em relação a poucos fornecedores de soluções integradas (BARRETO *et al.*, 2022). Até o 4G, a RAN era composta por equipamentos proprietários e fechados, em que *hardware* e *software* vinham de um mesmo fabricante e não havia possibilidade de interoperabilidade entre diferentes marcas. Esse modelo criava um cenário de alto custo, baixa flexibilidade e limitação da inovação, já que qualquer atualização ou expansão exigia investimentos em soluções específicas de um único fornecedor.

Com a chegada do 5G e a crescente complexidade das redes, tornou-se evidente a necessidade de uma infraestrutura mais aberta e modular. Foi nesse contexto que, em 2018, a O-RAN *Alliance* passou a consolidar os esforços da indústria, estabelecendo especificações que permitem separar *hardware* e *software*, criar interfaces padronizadas e viabilizar a integração entre diferentes fornecedores. O O-RAN, portanto, não é apenas uma evolução técnica, mas também um movimento estratégico que busca diversificar o ecossistema de telecomunicações, estimular a competição e reduzir custos de implantação e operação.

O O-RAN não se limita à padronização de interfaces, ele introduz mudanças profundas na forma como a RAN é projetada, operada e expandida. Um dos fundamentos é a adoção de *functional splits*, que permitem distribuir funções da pilha de protocolos entre RU, DU e CU (FERRO *et al.*, 2022), criando arquiteturas flexíveis e escaláveis. Essa modularidade possibilita que parte do processamento seja transferida para servidores genéricos ou virtualizados em nuvem, muitas vezes utilizando plataformas containerizadas como Kubernetes ou *OpenShift*. Essa abordagem reduz a dependência de *hardware* proprietário e facilita a implantação de atualizações ou novos serviços sem necessidade de substituição física de equipamentos.

Outro avanço significativo é o RIC, que opera em duas camadas complementares,

sendo o *Non-RT RIC*, responsável por análises estratégicas e aplicação de políticas de longo prazo, e o *Near-RT RIC*, que atua em janelas de milissegundos para otimizar espectro, reduzir interferências e ajustar parâmetros de rede de forma dinâmica. Essa inteligência distribuída permite que operadores melhorem o desempenho da rede em tempo quase real, garantindo melhor qualidade de serviço em cenários críticos, como URLLC e IoT massivo (BARRETO *et al.*, 2022).

Do ponto de vista operacional, o O-RAN facilita o provisionamento de serviços, acelera a implantação de novas funcionalidades e permite automação de manutenção e atualização. Ao integrar plataformas de análise de desempenho e orquestração de recursos, é possível reduzir custos de operação e otimizar o uso do espectro e de recursos computacionais. Além disso, a modularidade do O-RAN torna possível implementar modelos híbridos de RAN, combinando elementos físicos e virtualizados, e ajustar dinamicamente a alocação de recursos conforme o tráfego da rede, sem comprometer a qualidade do serviço.

Quando se considera a viabilidade econômica, essas inovações permitem aos operadores avaliar diferentes cenários de investimento em *xHaul* (conjunto *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*), comparando custos de implantação, manutenção e expansão de soluções tradicionais versus O-RAN. Por exemplo, ao adotar DU/CU virtualizadas em nuvem, é possível reduzir gastos com infraestrutura física, mas exige análise detalhada de custos de transporte de dados e latência, que podem impactar o dimensionamento de enlaces e a qualidade do serviço (PAOLINI, 2020)(KONDRASHOV *et al.*, 2023).

2.3.5 C-RAN (Redes de Acesso via Rádio em Nuvem)

A arquitetura C-RAN (Redes de Acesso via Rádio em Nuvem) representa um avanço na evolução das redes de acesso rádio, consolidando décadas de desenvolvimento desde as primeiras gerações móveis. Enquanto nas redes 2G e 3G predominava o modelo distribuído D-RAN, em que cada estação rádio-base integrava localmente todos os elementos de processamento e transmissão, o C-RAN propõe a centralização das funções de processamento em data centers regionais ou nacionais (CHEN; DUAN, 2011), mantendo apenas as RU no campo para transmissão e recepção do sinal. Essa reorganização otimiza o uso de recursos computacionais, facilita a coordenação entre células e reduz custos operacionais.

O modelo C-RAN adota diferentes *splits* funcionais da pilha de protocolos, permitindo equilibrar desempenho, capacidade de transporte e custo. *Splits* de baixo nível exigem *fronthaul* de alta capacidade e baixa latência, essenciais para técnicas como *Massive MIMO*, *CoMP* e aplicações sensíveis à latência. *Splits* mais altos reduzem a carga sobre os *enlaces*, permitindo arquiteturas híbridas adequadas a áreas suburbanas ou rurais. A escolha do *split* influencia diretamente CAPEX, OPEX e TCO da rede, sendo um elemento central em estratégias técnicas, econômicas e regulatórias (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

Além de eficiência e coordenação, o C-RAN estabelece a base para arquiteturas

vRAN e O-RAN, oferecendo flexibilidade, interoperabilidade e suporte a serviços avançados de baixa latência, URLLC e integração com *edge computing*.

2.4 TECNOLOGIAS XHAUL

O termo *x-haul* é utilizado para designar o conjunto dos enlaces de transporte que conectam as diferentes funções da RAN desagregada, *fronthaul* (entre RU e DU), *midhaul* (entre DU e CU) e *backhaul* (entre CU e o núcleo da rede). Cada uma dessas interfaces possui requisitos técnicos distintos de largura de banda, latência, confiabilidade e custo, de acordo com o tipo de função que conecta e o cenário em que será implantada.

No contexto do 5G, o papel do *x-haul* evoluiu de um simples canal de transporte para uma infraestrutura crítica e estratégica, que deve atender aplicações altamente sensíveis, como veículos autônomos, telemedicina, automação industrial e realidade aumentada. Isso significa que, além de garantir a conectividade básica, o *x-haul* precisa suportar requisitos extremos de baixa latência, sincronização temporal precisa, escalabilidade sob demanda e segmentação de tráfego (*network slicing*).

Historicamente, os enlaces de transporte das redes móveis eram fortemente baseados em tecnologias de TDM (Tecnologias de Multiplexação Temporal), como E1/T1 e SDH/SONET. Essas soluções garantiam previsibilidade e sincronização, mas apresentavam limitações severas de escalabilidade. Com o 4G, houve a migração para soluções baseadas em pacotes IP, como *Ethernet* e MPLS, que ampliaram a flexibilidade e eficiência, preparando o caminho para o 5G. Atualmente, o *x-haul* pode ser implementado de forma cabeada (principalmente via fibra óptica) ou sem fio (micro-ondas, enlaces em ondas milimétricas e até satélites). Cada alternativa apresenta vantagens e restrições, e a escolha depende não apenas dos requisitos técnicos, mas também de condições econômicas, topográficas e regulatórias.

2.4.1 Arquitetura de Transporte: *Fronthaul*, *Midhaul* e *Backhaul*

Com a evolução das redes móveis rumo às arquiteturas de quinta geração e além, observa-se uma crescente virtualização, desagregação funcional e reconfiguração lógica dos elementos da RAN. Essa transformação é impulsionada por paradigmas como C-RAN e o O-RAN, que redefinem não apenas a disposição dos elementos funcionais da rede, mas também as exigências e configurações do sistema de transporte de dados. Nesse contexto, a tradicional concepção monolítica da RAN cede espaço a uma arquitetura fracionada, que organiza o transporte em três segmentos funcionais principais, sendo o *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*. Cada um desses domínios apresenta requisitos específicos de desempenho, protocolos e infraestrutura, refletindo as particularidades da interface que conecta os blocos lógicos da rede (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

O *fronthaul* é o segmento da arquitetura 5G responsável por conectar a RU à DU,

constituindo o enlace mais crítico da RAN desagregada (PAOLINI, 2020). Por transportar sinais digitais em tempo real, requer latência ultrabaixa, *jitter* mínimo, sincronização precisa e alta largura de banda, o que o torna um dos principais fatores determinantes do desempenho e do custo total de propriedade nas arquiteturas O-RAN. A evolução do padrão tradicional CPRI para o eCPRI permitiu maior eficiência no transporte por pacotes e redução da demanda de banda em cenários de *Massive MIMO*, tornando o enlace mais compatível com arquiteturas virtualizadas (LEE, Y.; LEE, H.; LIM, 2020).

No contexto Open RAN, o *Open Fronthaul* padronizado pela (ALLIANCE, 2023) introduz interoperabilidade entre fornecedores, influenciando diretamente o CAPEX e o OPEX ao permitir maior flexibilidade de escolha e otimização da infraestrutura. Em termos de tecnologias de transporte, a fibra óptica dedicada oferece o melhor desempenho, mas apresenta custos elevados em áreas de baixa densidade populacional. Enlaces em ondas milimétricas podem ser utilizados como alternativa de menor custo e implantação mais rápida, embora sejam limitados por distância e condições climáticas (PAOLINI, 2020).

Em cenários urbanos, arquiteturas híbridas que combinam fibra e enlaces sem fio podem equilibrar desempenho e custo, tornando o fronthaul um ponto central nas análises de viabilidade econômica da Open RAN (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

Em relação ao *midhaul*, é responsável por conectar as DUs às CUs e possui requisitos menos rígidos que o fronthaul, mas desempenha papel estratégico na organização e no transporte do tráfego processado pelas DUs. Esse enlace permite diferentes níveis de centralização ou distribuição das funções de rede, influenciando diretamente custos de transporte, alocação de servidores e eficiência no uso dos recursos computacionais da RAN. Em arquiteturas Open RAN e vRAN, o *midhaul* utiliza transporte baseado em *IP/Ethernet*, permitindo o aproveitamento de infraestruturas existentes e reduzindo CAPEX em comparação a enlaces ópticos dedicados (LEE, Y.; LEE, H.; LIM, 2020).

A alocação geográfica das DUs, habilitada pela flexibilidade do midhaul, impacta o equilíbrio entre desempenho e custo: em áreas densas, manter DUs próximas às antenas pode reduzir latência e carga de transporte, enquanto em regiões rurais a centralização possibilita economia de escala e menor OPEX. A integração com tecnologias como SDN e VNF possibilita automação e orquestração dinâmicas, garantindo melhor utilização dos recursos e maior previsibilidade de custos operacionais, o que reforça a importância do *midhaul* nas análises de TCO (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

Por fim, o *backhaul* realiza a conexão entre a RAN e o núcleo da rede, transportando o tráfego agregado proveniente das DUs e CUs até os elementos centrais, como UPF e AMF. No 5G, esse enlace deve suportar altas taxas de transmissão, baixa latência e sincronização precisa, sendo decisivo tanto para a experiência do usuário quanto para o dimensionamento econômico da rede. Sua implementação pode utilizar fibra óptica, enlaces de micro-ondas, ondas milimétricas ou soluções híbridas, dependendo do custo, da disponibilidade de

infraestrutura e das necessidades do cenário analisado. Em ambientes urbanos, a fibra óptica continua sendo a solução preferida pela alta capacidade e confiabilidade, enquanto em áreas rurais ou de difícil acesso, enlaces sem fio oferecem melhor relação custo-benefício com implantação mais ágil (PAOLINI, 2020).

A evolução histórica do backhaul de redes baseadas em TDM para redes totalmente orientadas a pacotes ampliou a escalabilidade e favoreceu a virtualização, permitindo que o enlace suporte as interfaces F1 (DU–CU) e NG (CU–Core) em arquiteturas O-RAN. Assim, o backhaul representa no TCO, uma vez que combina custos de infraestrutura, operação, manutenção, energia e resiliência, influenciando diretamente a viabilidade econômica dos diferentes cenários de implantação (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

2.5 ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, diferentes trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos passaram a investigar não apenas os aspectos técnicos da virtualização e acesso por rádios abertas da RAN, mas também os impactos econômicos associados a essas mudanças. O foco recai sobre a avaliação do TCO, entendendo como arquiteturas baseadas em software, nuvem e interoperabilidade entre múltiplos fornecedores podem influenciar o equilíbrio entre CAPEX e o OPEX no médio e longo prazo.

2.5.1 Estudos recentes

O estudo de (LEE, Y.; LEE, H.; LIM, 2020) apresenta uma análise detalhada de modelagem do TCO em arquiteturas de vRAN, comparando-as com a RAN tradicional baseada em hardware proprietário. O objetivo central é quantificar o impacto econômico da virtualização das funções de rede, avaliando como a migração para servidores padronizados e funções em *software* altera o equilíbrio entre CAPEX e OPEX ao longo do ciclo de vida da rede.

O modelo desenvolvido considera múltiplas variáveis de custo, sendo a aquisição e substituição de *hardware*, consumo energético dos equipamentos, despesas de operação e manutenção, atualização de software, custos de transporte (*fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*), além de custos de pessoal e gerenciamento. A abordagem permite analisar cenários distintos de desagregação, variando do mais centralizado (maior *pooling* de recursos) ao mais distribuído (maior proximidade das funções com os sites).

Os resultados evidenciam que os ganhos mais expressivos ocorrem no OPEX, sobretudo devido à automação de processos e à maior eficiência energética. A substituição de *hardware* proprietário por servidores comerciais reduz significativamente o custo de manutenção e amplia a flexibilidade de atualização. Quanto ao CAPEX, o impacto é mais variável em cenários centralizados, o *pooling* de recursos leva a uma queda perceptível nos custos de infraestrutura, já em cenários distribuídos, há um aumento dos gastos com

transporte, que pode neutralizar parte das economias obtidas.

Outro ponto de destaque é a apresentação de modelos matemáticos e gráficos comparativos de TCO, que mostram em quais condições a vRAN se torna financeiramente superior à RAN tradicional e em quanto tempo o retorno sobre o investimento é alcançado. A análise aponta que, embora o CAPEX inicial da vRAN possa ser próximo ou até ligeiramente superior em alguns cenários, a economia acumulada em OPEX tende a compensar essa diferença no médio prazo.

O relatório de (RED HAT, 2023) amplia a perspectiva, analisando não apenas a vRAN, mas todo o ecossistema da *Telco Cloud*, incluindo núcleo de rede, *edge computing* e funções virtualizadas. O foco é compreender como a virtualização e a migração para plataformas baseadas em nuvem impactam a estrutura de custos das operadoras, tanto do ponto de vista financeiro quanto operacional.

O estudo utiliza dados de implementações reais combinados a simulações econômicas para avaliar cenários de adoção da *Telco Cloud*. São consideradas variáveis como custos de *hardware*, uso de VNF (Funções de Rede Virtualizadas) e CNF (Função de Rede Nativa da Nuvem), automação de orquestração, consumo energético, escala horizontal da infraestrutura e custos de integração com legados.

Os resultados projetam economias globais de 30% a 40% no TCO, destacando-se a expressiva redução de OPEX em função da automação, da simplificação operacional e do uso de containers. No caso da vRAN especificamente, o estudo indica uma redução superior a 40% no TCO em cinco anos, sendo o CAPEX até 50% menor e o OPEX cerca de 40% inferior em comparação com soluções tradicionais. Essa queda decorre da substituição de *hardware* proprietário por servidores padronizados, do uso de *containers* mais leves e escaláveis que VNF, e da consolidação de funções em uma infraestrutura horizontalizada.

Além da análise financeira direta, o relatório aborda benefícios complementares como sustentabilidade, devido à maior eficiência energética e redução de emissões de carbono, e agilidade operacional, que permite acelerar a introdução de novos serviços. No entanto, o texto enfatiza que esses ganhos não são automáticos, para alcançá-los, é necessária maturidade organizacional, diversidade de fornecedores, coexistência bem estruturada com sistemas legados e investimentos consistentes em automação avançada. Assim, o estudo reforça que a adoção da *Telco Cloud* deve ser acompanhada de uma estratégia operacional bem embasada para que os ganhos financeiros previstos se materializem.

Já o trabalho de (PAOLINI, 2020) apresenta uma abordagem específica sobre os *trade-offs* econômicos do O-RAN, com foco nos custos de transporte (*fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*). O objetivo é entender como a localização das funções de rede (RU, DU e CU) e a escolha da topologia de implantação impactam diretamente o CAPEX, OPEX e TCO das operadoras.

Três cenários principais são modelados:

1. Topologia distribuída: DUs no próprio site da célula, conectadas ao CUs por

midhaul;

2. Topologia parcialmente centralizada: DUs em locais remotos, conectadas às RUs por *fronthaul* e às CUs por *midhaul*;
3. Topologia centralizada: DU e CU consolidadas em *data centers* regionais, conectadas às RUs apenas via *fronthaul*.

O estudo realiza simulações considerando variáveis como densidade de sites, custo por quilômetro de fibra, custos de manutenção, eficiência do *pooling* de recursos e escalabilidade da rede. Os resultados demonstram que:

- Em cenários de HTC (Alto Custo de Transporte), a topologia distribuída se mostra mais viável, mesmo com maior CAPEX, pois reduz significativamente o OPEX ligado ao transporte.
- Em cenários de LTC (Baixo Custo de Transporte), a topologia centralizada é a mais eficiente, proporcionando até 30% de redução no TCO em comparação com a distribuída, devido à economia em manutenção e ao *pooling* de recursos.
- O trabalho ainda mostra que, em implantações de O-RAN, os custos de transporte podem chegar a representar até 90% do OPEX em topologias centralizadas, reforçando que a arquitetura de *x-haul* é um dos fatores determinantes no equilíbrio econômico das redes abertas.

A principal contribuição do estudo é explicitar que não existe uma solução universalmente mais barata ou eficiente, em verdade, a viabilidade depende do contexto de custos de transporte e da geografia da rede. Dessa forma, este é um estudo que fornece às operadoras uma ferramenta comparativa para tomar decisões de arquitetura mais alinhadas ao perfil econômico de cada implantação.

2.5.2 Síntese dos estudos

Em comparação entre os três trabalhos, todos apontam que a adoção de vRAN, O-RAN e *Telco Cloud* gera benefícios econômicos relevantes, sobretudo pela redução de OPEX em médio e longo prazo, ligada à automação e à virtualização. Também indicam que o CAPEX pode diminuir, mas essa redução depende do modelo de desagregação e da topologia escolhida.

Por outro lado, há também divergências e condicionantes, enquanto o estudo da Red Hat (RED HAT, 2023) projeta reduções significativas de TCO de forma mais ampla, o estudo de (PAOLINI, 2020) mostra que esses ganhos variam fortemente de acordo com o custo do transporte e a distribuição geográfica das funções da RAN. Já o relatório de vRAN de (LEE, Y.; LEE, H.; LIM, 2020) enfatiza a importância de modelagens matemáticas que permitam às operadoras avaliar o impacto financeiro antes de decidir pela migração.

Em conjunto, esses trabalhos mostram que a viabilidade econômica de arquiteturas abertas e virtualizadas não é universal, mas depende de fatores contextuais como custo e

disponibilidade de transporte, maturidade organizacional das operadoras, grau de automação implementado e coexistência com legados. Essa visão mais crítica é importante para compreender que, embora os ganhos projetados sejam expressivos, eles não se materializam automaticamente em todos os cenários, exigindo planejamento detalhado e modelagem de custos alinhada à realidade de cada mercado.

3 CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO DE REDES OPEN RAN E VRAN

A evolução da RAN para arquiteturas virtualizadas e abertas, como vRAN e O-RAN, trouxe uma ampla gama de possibilidades de configuração e distribuição de funções entre a DU, RU e CU. Essas novas arquiteturas permitem que os operadores de rede adotem diferentes estratégias de implantação, ajustando o grau de centralização e a alocação de recursos conforme as condições geográficas, a densidade de usuários, a capacidade de transporte e os requisitos de desempenho.

Nesse contexto, a escolha do cenário de implantação torna-se um ponto estratégico para esta pesquisa, pois interfere na forma como a infraestrutura é organizada, desde a disposição física dos componentes até o tipo de enlace utilizado em cada segmento da rede. Cada cenário representa um compromisso distinto entre custo, desempenho e complexidade operacional, influenciando diretamente o TCO e a eficiência energética da rede.

O estudo e a caracterização desses cenários permitem compreender como diferentes topologias podem atender de maneira mais eficaz às necessidades específicas de conectividade. Por exemplo, redes projetadas para cobrir áreas rurais extensas demandam soluções distribuídas com menor dependência de transporte de alta capacidade, enquanto ambientes urbanos densos ou eventos temporários de grande porte se beneficiam de arquiteturas mais centralizadas, capazes de explorar o compartilhamento de recursos e otimizar o controle de tráfego. Da mesma forma, instalações internas críticas, como hospitais e fábricas, exigem cenários com latência extremamente baixa e alta confiabilidade.

Assim, o presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os principais cenários de implantação de redes O-RAN e vRAN, destacando suas características técnicas, vantagens, limitações e adequações a diferentes casos de uso, permitindo compreender como as decisões de arquitetura influenciam o desempenho, a cobertura e os custos operacionais das redes móveis.

3.1 INTRODUÇÃO AOS CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO

A definição de cenários de implantação é a etapa para compreender o comportamento técnico e econômico das redes baseadas em O-RAN e vRAN. Cada cenário representa um arranjo arquitetônico distinto, resultante de diferentes combinações entre Unidades de RU, DU e CU, e de como essas funções são distribuídas ou centralizadas no ambiente de rede. A escolha do cenário ideal depende diretamente de fatores como densidade populacional, topografia, disponibilidade de infraestrutura de transporte (x-haul), requisitos de latência, confiabilidade e custos operacionais.

No contexto do 5G, essas decisões de arquitetura tornam-se ainda mais críticas, uma vez que os requisitos de desempenho e eficiência variam amplamente entre diferentes aplicações, de conexões massivas de IoT e automação industrial até serviços de banda

larga móvel e comunicação crítica em tempo real. Por esse motivo, compreender as particularidades de cada cenário de implantação é fundamental para avaliar a viabilidade técnica e o TCO de uma rede moderna.

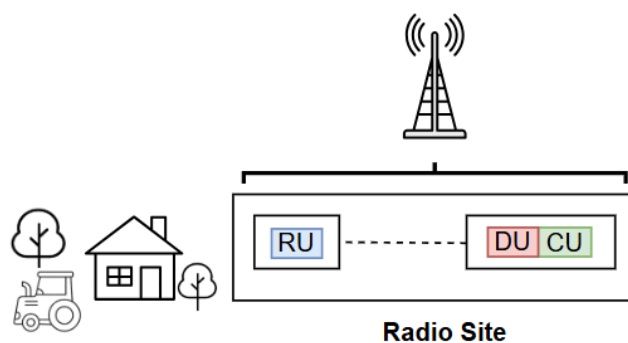
Os cenários apresentados a seguir foram definidos com base em modelos de referência amplamente utilizados na literatura técnica e na indústria de telecomunicações, incluindo os estudos sobre Open RAN Deployment Scenarios e vRAN Cost Modeling (SENZA FILI, 2020; RED HAT, 2022). Cada um deles foi adaptado ao contexto brasileiro, buscando refletir condições reais de operação e potenciais casos de uso. As quatro configurações exploradas ilustram diferentes estratégias de posicionamento das funções RAN e permitem analisar os compromissos entre custo, desempenho e cobertura.

3.2 CENÁRIO 1 – MACRO DISTRIBUÍDO

3.2.1 Caso de Uso: Cobertura para Comunidades Rurais e Estradas

O cenário Macro Distribuído é caracterizado pela implantação local de todos os principais elementos da rede de acesso RU, DU e CU localizados diretamente no *Radio Site*, conforme pode ser observado na figura 4. Nessa configuração, cada estação base opera de forma praticamente autônoma, com processamento e controle realizados localmente, o que reduz a dependência de conexões de alta capacidade com data centers regionais. Essa abordagem é semelhante ao modelo tradicional de D-RAN, mas pode incorporar elementos de virtualização, permitindo que parte das funções da DU e da CU sejam executadas em servidores locais ou *edge nodes*.

Figura 3 – Cenário Macro Distribuído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um ambiente macro distribuído, a rede prioriza cobertura ampla e robusta, ideal para regiões de baixa densidade populacional, como áreas rurais, rodovias, vilarejos e zonas agrícolas. O objetivo principal é garantir conectividade de longo alcance com custos controlados e infraestrutura simplificada.

Por concentrar o processamento no próprio local, o sistema reduz a dependência de enlaces de transporte de alta capacidade (*fronthaul* e *midhaul*), utilizando principalmente *backhaul*, que pode ser provido via fibra, micro-ondas ou até enlaces satelitais. Essa característica torna o modelo mais resiliente a falhas de conectividade e menos sensível à latência do transporte, um fator crítico em regiões onde a infraestrutura óptica é escassa.

A topologia típica adotada é P2P ou em árvore, conectando diretamente cada estação ao núcleo da rede ou a um nó regional de agregação. A simplicidade estrutural reduz a complexidade operacional, embora também limite a flexibilidade para escalabilidade e pooling de recursos. Em compensação, a manutenção local torna-se mais previsível, e o controle da rede é mais direto.

Do ponto de vista de desempenho, esse cenário busca otimizar alcance e disponibilidade, em vez de priorizar latência ultrabaixa ou alta densidade de usuários. As antenas macro oferecem ampla cobertura (dezenas de quilômetros), mas a capacidade por área tende a ser menor, devido à limitação de espectro e à distância entre os *sites*.

Por não depender de enlaces **fronthaul** de alta capacidade, o Cenário Macro Distribuído é menos caro em termos de infraestrutura de transporte. As DUs locais realizam todo o processamento das camadas de rádio e MAC, enviando apenas o tráfego agregado ao núcleo, o que simplifica o gerenciamento e reduz a necessidade de sincronização de alta precisão entre múltiplos *sites*.

Economicamente, esse tipo de implantação apresenta CAPEX inicial elevado, uma vez que cada site precisa de equipamentos completos de rádio, processamento e controle. No entanto, o OPEX tende a ser reduzido, devido à menor dependência de transporte e à ausência de custos associados à manutenção de grandes data centers regionais.

3.2.2 Caso de Uso Aplicado – Cobertura para Comunidades Rurais e Estradas

O caso de uso correspondente a esse cenário busca levar conectividade a regiões de baixa densidade populacional e grande extensão territorial, onde a viabilidade econômica de soluções totalmente centralizadas é limitada. Aplicações típicas incluem vilarejos isolados, rodovias federais e áreas agrícolas conectadas. A infraestrutura distribuída garante comunicação contínua, mesmo com falhas temporárias de *backhaul*, sendo ideal para telemetria agrícola, sistemas de monitoramento ambiental, conectividade veicular e serviços básicos de internet e telefonia. Além de favorecer a inclusão digital, esse tipo de arquitetura apoia o desenvolvimento regional e logístico, conectando setores como transporte, agronegócio e segurança pública.

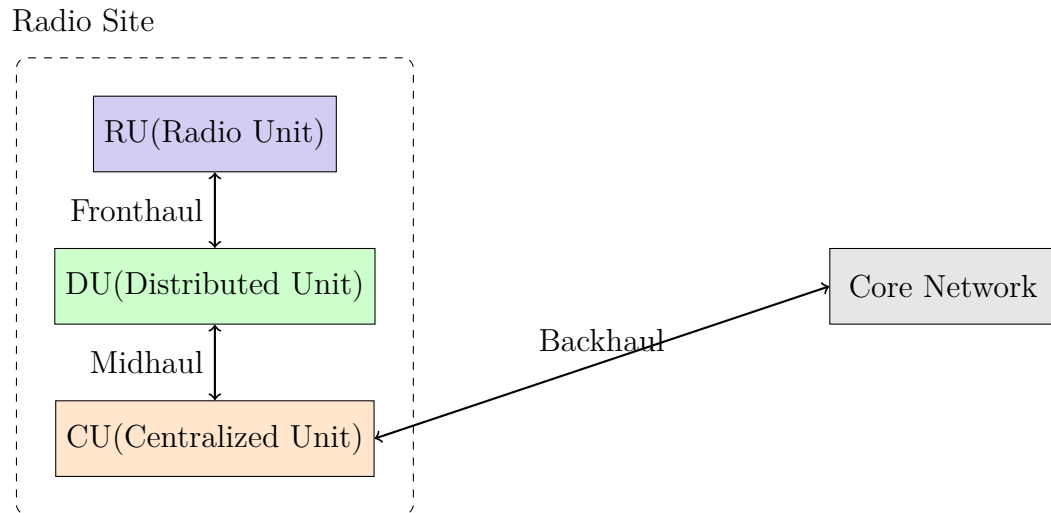


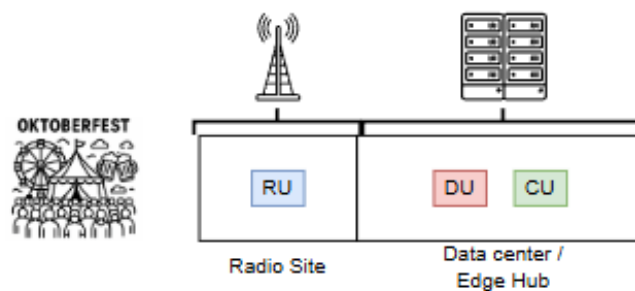
Figura 4 – Configuração RU-DU-CU e interfaces em um site rural.

3.3 CENÁRIO 2 – MACRO CENTRALIZADO

3.3.1 Caso de Uso: Cobertura para Grandes Eventos em Áreas Urbanas

O Cenário Macro Centralizado representa uma arquitetura em que o processamento e o controle da rede são concentrados em um ponto único, geralmente um *data center* regional ou um hub metropolitano, responsável por coordenar múltiplas RUs distribuídas geograficamente. Nesse modelo, as funções da DU e CU são co-localizadas ou integradas no mesmo ambiente físico, enquanto as RUs permanecem instaladas nos sites de rádio, próximas às antenas, conforme Figura 4. O transporte entre RU e DU é realizado através do *fronthaul*, que deve oferecer altíssima capacidade e latência ultrabaixa.

Figura 5 – Cenário Macro Centralizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Trata-se de uma configuração típica das arquiteturas C-RAN e vRAN, amplamente adotadas em ambientes urbanos densos, onde a demanda por capacidade, cobertura e coordenação entre células é elevada. Essa centralização permite o compartilhamento de recursos computacionais entre múltiplas células e favorece a implementação de mecanismos

avancados de otimização, como CoMP e *beamforming* dinâmico, essenciais para manter a qualidade de serviço em ambientes congestionados.

A arquitetura macro centralizada tem como objetivo maximizar a eficiência espectral e o controle central sobre os recursos da rede. Nesse arranjo, as RUs atuam apenas como interfaces de rádio, responsáveis pela transmissão e recepção de sinais, enquanto as funções de processamento de camada física, MAC e controle são executadas nas DUs e CUs localizadas no centro de processamento.

A centralização também facilita a aplicação de *Network Slicing* e de RICs, que permitem adaptar dinamicamente o comportamento da rede conforme o tipo de tráfego (eMBB, URLLC, mMTC). Essa capacidade de coordenação é especialmente útil em eventos de curta duração e alta densidade de usuários.

Em comparação ao cenário distribuído, o Cenário Macro Centralizado entrega desempenho superior em termos de capacidade e gerenciamento dinâmico de recursos, já que múltiplas RUs podem compartilhar os mesmos recursos de processamento centralizados. Essa flexibilidade permite escalar o sistema de forma mais eficiente durante picos de tráfego, reduzindo a ociosidade dos equipamentos em períodos de baixa demanda.

A latência fim a fim é otimizada pelo uso de enlaces ópticos dedicados e pela proximidade entre DUs e CUs, alcançando valores inferiores a 10 milissegundos, essenciais para aplicações em tempo real, como streaming de vídeo, realidade aumentada e sistemas de segurança pública. Além disso, a coordenação centralizada reduz interferências inter-celulares, melhora a cobertura homogênea e aumenta a taxa média de transferência por usuário.

Entretanto, a forte dependência do *fronthaul* torna o sistema mais sensível a falhas e gargalos de transporte. Qualquer degradação na qualidade do enlace pode afetar simultaneamente diversas RUs conectadas ao mesmo ponto central, exigindo mecanismos de redundância e *load balancing* eficientes.

Do ponto de vista econômico, a centralização tende a reduzir o CAPEX por célula, pois as funções de processamento são consolidadas em um conjunto menor de servidores e equipamentos centralizados, diminuindo o custo de *hardware* distribuído. Por outro lado, o CAPEX de transporte pode aumentar, uma vez que os enlaces *fronthaul* precisam ser de altíssima qualidade e grande capacidade.

O modelo centralizado se torna financeiramente mais vantajoso em cenários com baixo custo de transporte, podendo reduzir o TCO em até 30% em relação à topologia distribuída (PAOLINI, 2020). O OPEX também é otimizado pela centralização da manutenção e pela automação das funções virtualizadas, que permitem atualizações remotas, alocação dinâmica de recursos e balanceamento inteligente de carga.

No entanto, a viabilidade econômica depende da densidade de usuários e do volume de tráfego. Em áreas urbanas densas ou em eventos de grande escala, os benefícios de *pooling* de recursos e economia de escala superam o custo do transporte, tornando esse

modelo ideal para coberturas temporárias ou de alta demanda concentrada.

3.3.2 Caso de Uso Aplicado – Oktoberfest Blumenau

A Oktoberfest de Blumenau, um dos maiores eventos da América Latina, representa um exemplo emblemático da aplicação do cenário Macro Centralizado. Durante o evento, o número de usuários conectados simultaneamente cresce exponencialmente, sendo com visitantes, imprensa, serviços de segurança, transmissões ao vivo e sistemas de pagamento digital que dependem de conectividade estável e de alta capacidade, como por exemplo neste ano de 2025 a Oktoberfest Blumenau bateu seu recorde de 80 mil pessoas que visitaram a festa em um único dia.

A adoção de uma arquitetura C-RAN/vRAN centralizada permite que múltiplas RUs, distribuídas ao longo do Parque Vila Germânica e áreas adjacentes, sejam conectadas a um centro de processamento temporário. Dessa forma, é possível coordenar as células de forma unificada, evitando interferências, otimizando o espectro e garantindo experiência uniforme aos usuários.

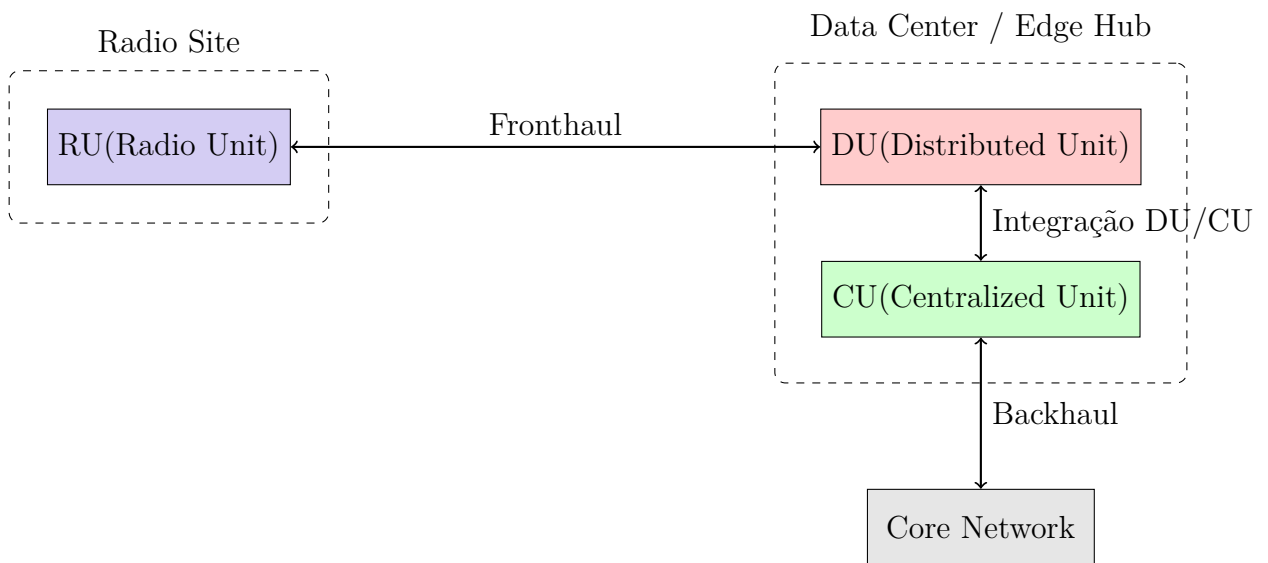


Figura 6 – Arquitetura Macro Centralizada com RU distribuída e DU/CU co-localizados em data center regional.

Além da melhoria de desempenho, a arquitetura reduz o custo de manutenção e reconfiguração, essencial para eventos de curta duração. Com o uso de virtualização, o provedor de rede pode ajustar a capacidade da infraestrutura sob demanda, ativando ou desativando funções conforme o volume de público, reduzindo custos após o término do evento.

Estudos de modelagem de custos demonstram que, em eventos de alta densidade urbana (RED HAT, 2023), o modelo centralizado permite redução de até 40% do OPEX quando comparado a implantações convencionais, graças à automação e à capacidade de reutilizar a infraestrutura para múltiplos eventos.

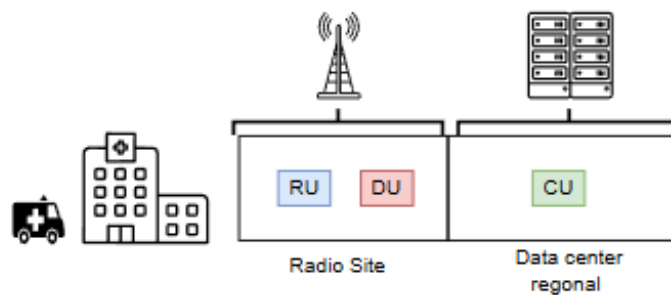
3.4 CENÁRIO 3 – INDOOR

3.4.1 Caso de Uso: Conectividade para Hospitais e Centros Médicos

O Cenário Indoor é projetado para atender ambientes fechados e altamente controlados, como hospitais, laboratórios, clínicas e centros de diagnóstico. Nessas aplicações, a confiabilidade da comunicação é crítica, pois falhas ou atrasos podem comprometer processos vitais, como monitoramento de pacientes, telecirurgias ou o envio de dados de equipamentos médicos sensíveis.

A implantação de redes vRAN ou O-RAN nesses locais segue o princípio da baixa latência e alta disponibilidade, priorizando a estabilidade do *fronthaul* e a coordenação eficiente das funções de rede. Normalmente, opta-se por uma arquitetura híbrida, com RUs distribuídas em diferentes áreas do edifício e DUs localizadas em um servidor local, dentro do próprio hospital, garantindo latência mínima. A CU, por sua vez, pode estar hospedada em um data center regional, onde ocorrem as funções de controle e gerenciamento centralizados. O esquema do cenário pode ser observado na Figura 5.

Figura 7 – Cenário Indoor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um ambiente hospitalar, a densidade de dispositivos conectados é elevada, monitores de sinais vitais, sistemas de imagens médicas, sensores de IoT, dispositivos móveis da equipe e aplicações de realidade aumentada para treinamento ou suporte cirúrgico. O tráfego gerado é majoritariamente URLLC, com exigência de latência inferior a 1 milissegundo e disponibilidade superior a 99,999%.

Por isso, a rede deve empregar fronthaul de altíssima confiabilidade, preferencialmente baseado em fibra óptica interna com eCPRI, e protocolos de sincronização como PTP e SyncE. Além disso, a segmentação lógica por *Network Slicing* é essencial, diferentes fatias da rede podem ser dedicadas, por exemplo, a sistemas críticos de telemedicina, IoT hospitalar e acesso público de visitantes, sem interferência entre os fluxos de tráfego.

A utilização de RICs permite ajustes automáticos de prioridade e largura de banda,

conforme a carga da rede, além de monitoramento contínuo da QoS para evitar congestionamentos e quedas de desempenho.

O desempenho em redes vRAN e O-RAN *indoor* é determinado principalmente pela necessidade de baixa latência e alta confiabilidade, típicas de ambientes críticos como hospitais. A proximidade entre as RUs e DUs, geralmente instaladas no mesmo edifício, garante latência inferior a 1 milissegundo, essencial para aplicações como monitoramento contínuo de pacientes e controle de equipamentos médicos.

A implantação de uma vRAN indoor envolve desafios e vantagens econômicas específicas. O CAPEX inicial pode ser relativamente baixo, já que o número de RUs necessárias para cobrir um prédio é limitado, e as funções virtualizadas permitem utilizar servidores padronizados em vez de equipamentos dedicados.

Por outro lado, o OPEX tende a ser reduzido devido à automação das operações, monitoramento remoto e atualizações de software via orquestradores VNF/SDN, que eliminam a necessidade de intervenções presenciais. De acordo com a Red Hat (2022), ambientes de telco cloud integrados podem alcançar reduções de até 40% do OPEX e 30% do CAPEX em comparação a redes móveis indoor tradicionais.

Em termos práticos, o retorno sobre investimento é obtido pela eficiência operacional, menor tempo de *downtime* e flexibilidade para expansão, à medida que novos equipamentos médicos e aplicações digitais são integrados à rede hospitalar.

3.4.2 Caso de Uso Aplicado – Hospitais e Centros de Saúde

Um exemplo concreto seria a implantação de uma rede vRAN *indoor* em um hospital universitário, onde coexistem aplicações de ensino, pesquisa e atendimento. A rede precisa suportar teleconsultas em vídeo, transmissão de imagens médicas de alta resolução e monitoramento contínuo de pacientes em UTI.

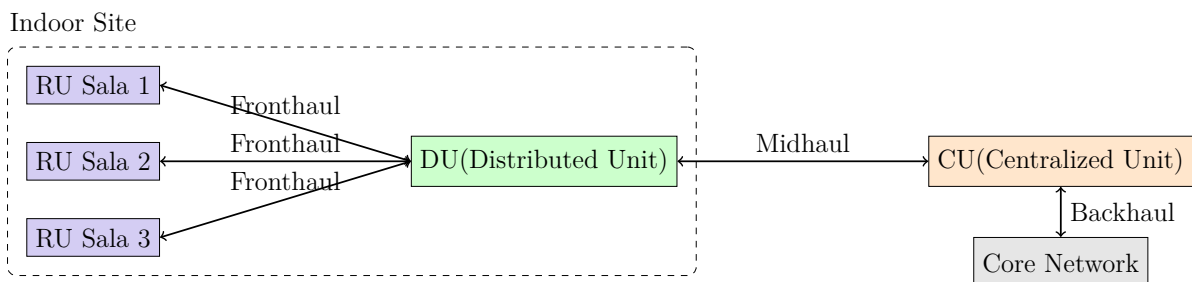


Figura 8 – Configuração RU-DU-CU em um cenário indoor com múltiplos RUs distribuídos e DU centralizado.

A arquitetura escolhida garante latência mínima para as funções críticas e isolamento de tráfego entre setores sensíveis. O sistema pode ainda integrar uma camada de *Edge Computing* local, processando dados de sensores e equipamentos médicos antes de enviá-los ao data center, reduzindo tráfego e tempo de resposta.

Essa configuração demonstra a função do Cenário Indoor como suporte a aplicações de missão crítica, nas quais a confiabilidade, a disponibilidade e o controle da rede são fatores determinantes de desempenho e segurança.

3.5 CENÁRIO 4 – OUTDOOR SMALL CELL

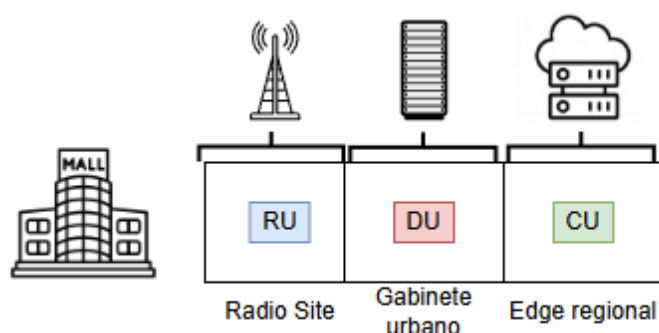
3.5.1 Caso de Uso: Cobertura em Áreas de Alta Demanda em Centros Comerciais e Parques

O Cenário Outdoor Small Cell é voltado para o atendimento de áreas externas de alta densidade de usuários, mas com cobertura geográfica limitada. Ele se aplica a centros comerciais, praças públicas, áreas de lazer, zonas turísticas e parques tecnológicos, onde há alto consumo de dados em pequenas regiões.

As small cells são estações rádio-base de baixa potência e curto alcance, instaladas de forma densa para reforçar a capacidade da rede e melhorar a experiência do usuário. A arquitetura ideal para esse tipo de cenário é O-RAN ou vRAN distribuída, pois oferece flexibilidade na alocação de funções e permite o uso de equipamentos *multivendor*, reduzindo custos e facilitando *upgrades* graduais.

O funcionamento de uma rede de *small cells* depende de sincronização precisa, baixa latência e coordenação entre múltiplas RUs próximas. Para isso, é comum que as DUs sejam instaladas em locais intermediários, como gabinetes urbanos, subestações ou armários de telecom, conectadas às RUs por *fronthaul* sem fio ou fibra óptica curta, e às CUs por sua vez em um edge regional, de acordo com a Figura 6.

Figura 9 – Cenário Small Cells.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A densidade de células exige coordenação centralizada por meio de RICs, responsáveis por gerenciar interferências, balancear carga e ajustar automaticamente os parâmetros de potência e frequência. Além disso, o uso de algoritmos SON reduz o custo operacional e facilita o provisionamento dinâmico.

O principal desafio técnico está na integração de backhaul eficiente. Como o tráfego agregado das *small cells* é alto, é essencial empregar tecnologias de transporte como TSN para garantir QoS e latência consistente.

3.5.2 Aspectos de Desempenho, Econômicos e Operacionais

As *small cells* otimizam o desempenho da rede por meio da densificação, a redução da distância entre usuários e antenas aumenta a eficiência espectral e a capacidade por área. Estudos mostram ganhos de até 4 vezes na capacidade de *throughput* por km², com latência média entre 3 e 5 milissegundos, ideais para aplicações como realidade aumentada e streaming em alta resolução.

A coordenação entre células vizinhas é feita por controladores RICs e algoritmos SON, que reduzem interferências e ajustam dinamicamente potência e canais. O principal desafio de desempenho está no transporte agregado, o tráfego intenso exige **backhaul** e *midhaul* com latência inferior a 10 ms, baseados em tecnologias como TSN e *Segment Routing*.

Com essas otimizações, o throughput médio por usuário varia entre 300 Mbps e 1 Gbps, proporcionando uma experiência de alta qualidade em locais de grande concentração de pessoas, como centros comerciais e parques urbanos.

As redes *small cell* O-RAN são uma solução de alto desempenho com custo otimizado para ambientes urbanos de alta densidade. O CAPEX por célula é relativamente baixo, já que cada estação cobre uma área pequena e usa *hardware* padronizado. No entanto, o número total de células necessárias aumenta o investimento total, exigindo planejamento cuidadoso para equilibrar custo e desempenho.

O OPEX tende a ser reduzido graças à automação e orquestração remota, mas o custo de transporte pode se tornar o fator dominante. Em cenários centralizados com *small cells*, o transporte pode representar até 90% do OPEX, evidenciando a importância de topologias híbridas e otimização do x-haul (PAOLINI, 2020).

Em contrapartida, os benefícios em eficiência espectral, capacidade por área e qualidade da experiência do usuário compensam o investimento, especialmente em regiões com alta movimentação e grande tráfego simultâneo.

Um caso ilustrativo é a implantação de uma rede O-RAN small cell em um shopping center ou parque urbano. Em locais como o Parque Ramiro Ruediger e Galeão ou o Shopping Neumarkt em Blumenau, há grande concentração de pessoas utilizando dispositivos móveis para navegação, streaming, chamadas de vídeo e pagamentos digitais.

As *small cells* podem ser integradas ao mobiliário urbano, postes de iluminação, câmeras de segurança ou totens de informação, e conectadas via *backhaul* óptico ou mmWave. O uso de O-RAN permite que diferentes fornecedores participem da solução, aumentando a competitividade e reduzindo custos de expansão.

A configuração também oferece suporte a serviços adicionais, como redes privadas

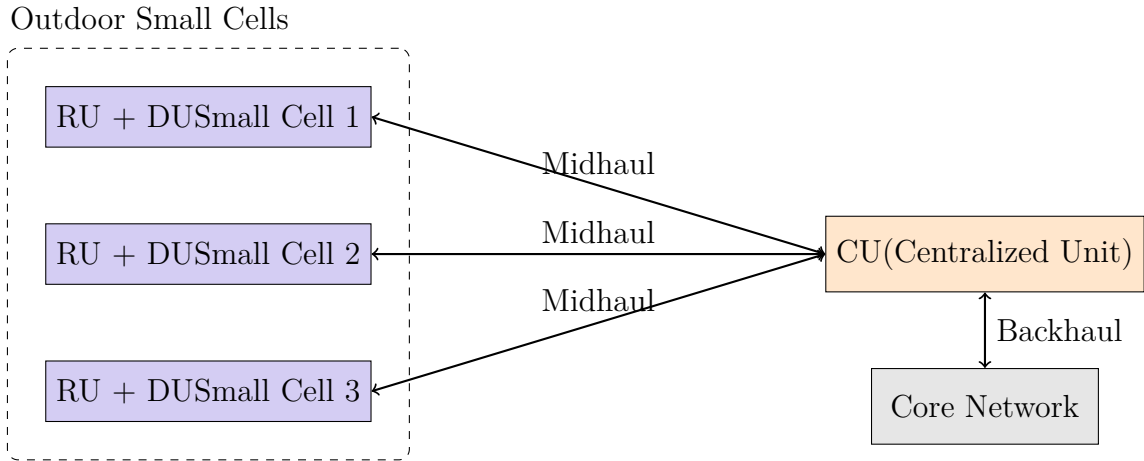


Figura 10 – Configuração RU-DU-CU em um cenário outdoor de Small Cells, com DU integrado a cada RU e CU centralizado.

para segurança e monitoramento ambiental, além de permitir experimentação com *edge computing* local para aplicações de realidade aumentada, publicidade inteligente e análise de fluxo de pessoas.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CENÁRIOS DE IMPLANTAÇÃO

A análise dos quatro cenários Macro Distribuído, Macro Centralizado, Indoor e Outdoor Small Cell, evidencia a diversidade de arquiteturas e estratégias possíveis na implantação de redes baseadas em vRAN e O-RAN. Cada cenário reflete um equilíbrio distinto entre latência, custo, eficiência espectral, capacidade e complexidade operacional, sendo a escolha do modelo diretamente condicionada ao tipo de ambiente, densidade de usuários e criticidade dos serviços oferecidos.

O Cenário Macro Distribuído apresenta-se como a melhor opção para áreas extensas e rurais, onde a cobertura ampla é prioridade e o custo de transporte é elevado. Nele, a presença local de DU e CU reduz a dependência de enlaces de alta capacidade, embora eleve o CAPEX por site. Já o Cenário Macro Centralizado se destaca em grandes áreas urbanas, oferecendo maior controle e eficiência operacional por meio da centralização das funções em data centers regionais. O *pooling* de recursos permite reduzir custos de manutenção e energia, mas impõe exigências rigorosas ao transporte de dados no *fronthaul* e *midhaul*.

O Cenário Indoor, por sua vez, atende ambientes controlados e críticos, como hospitais, fábricas ou instituições educacionais, que demandam baixa latência, alta confiabilidade e segmentação lógica por aplicação. Nesse modelo, o uso de vRAN híbrida, com virtualização local e gerenciamento centralizado, oferece a flexibilidade necessária para sustentar aplicações de missão crítica e garantir continuidade de serviço. Já o Cenário Outdoor Small Cell visa aumentar a capacidade em locais de alta densidade, como centros comerciais, parques e eventos urbanos, complementando a cobertura macro e pro-

porcionando melhor experiência ao usuário por meio de densificação da rede e integração *multivendor* via O-RAN.

Comparativamente, observa-se que os custos de transporte (x-haul), especialmente *fronthaul* e *midhaul*, são determinantes na viabilidade econômica de cada topologia. O transporte pode representar até 90% do OPEX em redes altamente centralizadas, tornando essencial o equilíbrio entre eficiência operacional e custo de conectividade. Por outro lado, a virtualização das funções (vRAN e O-RAN) reduz substancialmente os custos de *hardware* proprietário e facilita a automação, contribuindo para economias de até 40% no TCO em comparação a soluções tradicionais.

Em resumo, os cenários analisados demonstram que não existe uma arquitetura universalmente superior, mas sim configurações mais adequadas a contextos específicos de uso. A correta combinação entre topologia, arquitetura e caso de uso, como comunidades rurais, hospitais, grandes eventos ou centros urbanos densos, é o fator decisivo para maximizar desempenho e minimizar custos. Essa compreensão serve de base para o próximo capítulo, no qual serão desenvolvidos modelos de custo e análises comparativas de TCO, permitindo quantificar o impacto financeiro de cada cenário e orientar decisões de planejamento e investimento em redes vRAN e O-RAN.

4 PROJETO E ANÁLISE ECONÔMICA DE CASOS DE USO DA OPEN RAN

4.1 INTRODUÇÃO AO MODELO ECONÔMICO

O objetivo deste capítulo é avaliar, de forma estruturada e quantitativa, a viabilidade econômica de diferentes configurações de O-RAN e vRAN para casos de uso representativos. A análise concentra-se no cálculo do custo total de propriedade, o TCO, e na decomposição dos seus componentes principais, de modo a permitir comparações entre cenários com graus distintos de centralização, densificação de células e dependência de transporte. Além da apresentação dos números, será explicitado hipóteses, as relações causais entre arquitetura e custo, e os mecanismos pelos quais escolhas arquiteturais afetam a sustentabilidade financeira de uma implantação ao longo do tempo.

O conceito de TCO surge como resposta à necessidade prática de olhar além do investimento inicial. Originado na prática de gestão e finanças empresariais, o TCO representa um estudo que ganhou espaço na indústria de tecnologia e, posteriormente, nas telecomunicações, como ferramenta para comparar alternativas que trocam investimento de capital por custos operacionais, ou vice-versa. Em setores onde a tecnologia evolui rapidamente, e onde a operação contínua responde por parcela significativa dos gastos, o TCO oferece uma visão de ciclo de vida que revela *trade-offs* não evidentes em análises que consideram apenas o CAPEX. Na literatura e na prática setorial, o TCO é usado para fundamentar decisões de arquitetura, definir prioridades de investimento e mensurar o retorno esperado de estratégias que envolvem virtualização, automação e consolidação de recursos.

Metodologicamente, o TCO agrega em sua conta não apenas os gastos tangíveis com aquisição de equipamentos e obras civis, mas também custos recorrentes que, ao longo do horizonte de análise, podem superar o investimento inicial. Esses aspectos incluem energia, manutenção, atualizações de *software*, custos de pessoal, licenças e, em especial para redes móveis modernas, os custos de transporte que suportam o x-haul. A análise de TCO é, portanto, tanto uma ferramenta de mensuração quanto um instrumento de planejamento permite identificar quais componentes são alavancas de economia, onde existem riscos de custo e em que cenários uma determinada arquitetura se torna preferível. Em termos de indicadores financeiros, o TCO costuma ser complementado por métricas como custo por site, custo por megabit por segundo entregue, *payback* simples e descontado, e métricas de sensibilidade que mostram como variações em parâmetros-chave alteram a conclusão econômica.

Para que a modelagem tenha validade prática é necessário explicitar o horizonte temporal, as taxas de desconto e as hipóteses de depreciação e substituição. Na prática, horizontes de cinco a dez anos são usuais em estudos de telecomunicação, já que horizontes curtos podem favorecer decisões táticas, enquanto horizontes mais longos capturam

benefícios de amortização de CAPEX e ganhos acumulados de OPEX. A aplicação de taxa de desconto adequada e a realização de análise de sensibilidade sobre as variáveis mais incertas, entre elas o custo do transporte e a velocidade de adoção de automação, são passos importantes para evitar conclusões enviesadas por suposições pontuais.

O CAPEX representa os desembolsos de investimento necessários para colocar a solução em operação. No contexto de RANs, o CAPEX inclui itens de diversas naturezas como equipamentos de rádio (RUs), racks e servidores necessários para DU e CU, equipamentos de orquestração e RICs, infraestrutura de transporte (instalação de fibra, enlaces micro-ondas, site works), obras civis, aquisição de espectro quando aplicável e custos iniciais de integração e testes. A virtualização altera a composição do CAPEX, componentes proprietários caros podem ser substituídos por servidores comerciais, acelerators e software, mudando a estrutura dos custos iniciais e, frequentemente, permitindo maior modularidade na expansão. Entretanto, essa substituição pode exigir investimentos específicos em data centers regionais, equipamentos de sincronização, e enlaces fronthaul de alta capacidade.

Ao mensurar o CAPEX, é importante distinguir entre custos unitários e custos de escala. Enquanto o custo unitário de um RU ou de um servidor é relativamente direto, o custo total por área coberta depende fortemente de quantas unidades são necessárias, do desenho de topologia e da logística de implantação. Economias de escala aparecem quando o pooling de recursos reduz a necessidade de duplicação de **hardware**, mas essas economias só se materializam quando o custo de transporte não elimina o ganho. Por isso, estimativas de CAPEX para cada cenário devem explicitar a quantidade e o tipo de equipamentos, bem como o investimento em transporte necessário para conectar aquelas peças de rede.

Já o OPEX, é a captura da manutenção e operação ao longo do tempo, que no contexto desse estudo, as principais categorias de OPEX são consumo energético, custos de manutenção preventiva e corretiva, contratos de suporte e atualização de *software*, alocação de pessoal técnico e administrativo, custos de site, e os custos de transporte contínuo. A migração para vRAN e O-RAN tende a deslocar parte do custo para o OPEX inicial de orquestração e automação, porém também oferece potencial de redução substancial de despesas operacionais por meio de provisão remota, atualizações em *software* e monitoramento centralizado. Além disso, em arquiteturas centralizadas, o custo de transporte pode se tornar o principal componente do OPEX, especialmente quando o fronthaul exige enlaces de muito alta capacidade.

Adicionalmente, a modelagem econômica deve contemplar fatores indiretos que afetam a viabilidade do projeto, tais como a expectativa de crescimento de tráfego, a possibilidade de receitas adicionais, como por exemplo, serviços verticais, venda de fatias de rede, serviços de edge computing e externalidades operacionais. Embora estas variáveis possam ser mais difíceis de quantificar com precisão, sua inclusão como cenários alternati-

vos enriquece a análise e permite uma avaliação mais robusta da relação entre investimento e retorno.

Em resumo, esta seção introdutória estabelece o embasamento teórico e conceitual que orienta a metodologia da mensuração dos custos dos quatro cenários selecionados. A seguir será apresentada a metodologia de cálculo, com as fórmulas adotadas, o horizonte temporal, a taxa de desconto e as suposições para CAPEX e OPEX. Com essa base, os cálculos numéricos que compõem a análise de viabilidade serão transparentes, reproduzíveis e adequados à comparação entre arquiteturas distribuídas, centralizadas, indoor e small cell.

4.2 CÁLCULOS DE VIABILIDADE E APLICAÇÃO AOS CENÁRIOS

Esta seção apresenta a metodologia adotada para a avaliação econômica dos quatro cenários definidos no Capítulo 3. O objetivo é detalhar, de forma estruturada, as etapas necessárias para estimar o TCO de cada arquitetura, considerando seus componentes de CAPEX e OPEX.

A análise baseia-se em parâmetros técnicos modernos das arquiteturas Open RAN e vRAN, bem como nos custos típicos dos elementos de rede e transporte. Para garantir uniformidade entre os cenários, são utilizados valores de referência (CIF) (ILHA OPENRAN, 2025), apresentados na Tabela 1, os quais representam os custos médios dos principais equipamentos utilizados nos cálculos.

Tabela 1 – Custos CIF de referência utilizados na modelagem

Equipamento	Preço (R\$)
Servidor DU + CU	126.000
Servidor RIC + GPU	170.000
Servidor de Orquestração	214.200
Switch ToR + Grandmaster	166.000
Antena GNSS	9.350
Unidade de Rádio (RU) Indoor	83.300
Unidade de Rádio (RU) Outdoor	204.000

A metodologia considera que o CAPEX é composto pelos seguintes elementos principais:

- **Equipamentos:** RUs, servidores DU/CU, nós de controle, RIC, orquestração, *switches* e demais elementos descritos para cada cenário.
- **Infraestrutura:** custos associados a torres, gabinetes, energia, climatização e preparo do ambiente.
- **Instalação e Integração:** custos relacionados ao processo de implementação e ativação dos elementos de rede.

- **Transporte:** enlaces *fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*, de acordo com o tipo de arquitetura e grau de centralização.

Já para o caso do OPEX anual, inclui:

- **Consumo de energia:** calculado a partir da potência média dos equipamentos e da tarifa elétrica vigente, em que todos os cenários foi considerada a tarifa aproximada de R\$ 0,90 por kWh (considerando a tarifa vigente atual da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina)).
- **Manutenção:** estimada como fração do CAPEX, conforme práticas industriais.
- **Licenças e suporte:** valores associados a software, atualização e suporte técnico.
- **Operação do transporte:** custos relacionados ao uso de enlaces alugados ou mantidos pelo operador.
- **Custos de pessoal:** referentes às equipes responsáveis pela operação da rede.

Para cada cenário, as fórmulas de cálculo seguem a mesma estrutura geral:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^n OPEX_t$$

onde n representa o horizonte temporal de análise estabelecido para o estudo.

A aplicação do modelo aos quatro cenários consiste em:

1. Definir a quantidade de RUs, DUs e CUs necessárias para o cenário, considerando cobertura, centralização e *pooling*.
2. Dimensionar o transporte conforme o tipo de conexão predominante (*fronthaul*, *midhaul* ou *backhaul*).
3. Aplicar os custos CIF aos equipamentos e calcular o CAPEX total por categoria.
4. Estimar o consumo energético dos elementos ativos e calcular o OPEX anual.
5. Agregar os custos operacionais adicionais (manutenção, licenças, transporte e pessoal).
6. Calcular o TCO para o horizonte definido.

A metodologia aqui apresentada assegura coerência e comparabilidade entre os quatro cenários, permitindo avaliar como diferentes graus de virtualização, densidade de rede e requisitos de transporte influenciam o custo total das arquiteturas consideradas.

4.3 FORMULAÇÕES DO MODELO ECONÔMICO

A análise econômica dos cenários propostos exige uma formulação matemática capaz de representar, de forma estruturada e comparável, os custos envolvidos na implantação e operação de cada arquitetura. Para isso, adota-se um modelo baseado no cálculo do TCO,

que engloba os investimentos iniciais CAPEX e os custos recorrentes de operação OPEX ao longo do horizonte de análise.

4.3.1 Estrutura geral do CAPEX

CAPEX de cada cenário é composto por quatro grupos de despesas:

$$CAPEX = C_{equip} + C_{inst} + C_{transp_cap} + C_{infra} + C_{integ} \quad (1)$$

onde:

- C_{equip} : custo dos equipamentos principais, incluindo RU, DU, CU e servidores de virtualização;
- C_{inst} : despesas de instalação física, comissionamento e implantação local;
- C_{transp_cap} : custos de implantação do transporte (*fronthaul*, *midhaul* e *backhaul*), como fibra óptica e elementos de agregação;
- C_{infra} : itens de suporte, incluindo energia, *racks*, antenas, cabeamento e refrigeração;
- C_{integ} : custos de integração e interoperabilidade O-RAN, associados à validação entre múltiplos fornecedores.

O custo dos equipamentos principais varia conforme o grau de desagregação da arquitetura. Em arquiteturas O-RAN e vRAN, a capacidade de processamento pode ser compartilhada entre múltiplos sites por meio de *pooling*, o que reduz o número efetivo de unidades DU/CU ou servidores necessários. Para representar essa economia, adota-se o fator de agrupamento $\phi_{pool} \in (0, 1]$, que ajusta o custo efetivo dos elementos centralizáveis.

Assim, o custo dos equipamentos é dado por:

$$C_{equip} = N_{RU} \cdot P_{RU} + \phi_{pool} (N_{DU} \cdot P_{DU} + N_{CU} \cdot P_{CU} + N_{server} \cdot P_{server}) \quad (2)$$

em que:

- N_x representa a quantidade de unidades de cada elemento;
- P_x é o respectivo custo unitário;
- $\phi_{pool} = 1$ indica ausência de *pooling*, enquanto valores menores refletem maior nível de compartilhamento entre sites.

O custo de implantação do transporte é representado por:

$$C_{transp_cap} = \sum_{l \in L} (D_l \cdot c_{fibra_km} + C_{link,l}) + C_{agg} \quad (3)$$

onde:

- D_l é o comprimento do enlace l ;

- c_{fibra_km} é o custo médio por quilômetro de fibra (ou o equivalente em enlaces sem fio);
- $C_{link,l}$ corresponde aos equipamentos necessários para ativação de cada enlace;
- C_{agg} representa roteadores, *switches* e elementos de agregação.

Os custos de instalação, infraestrutura auxiliar, transporte inicial e integração multivendor foram modelados como percentuais do custo total de equipamentos, conforme práticas recomendadas por ETSI, GSMA e literatura especializada (SenzaFili, 2020; Calculation of TCO, 2019). Esses custos representam despesas indiretas proporcionais ao porte da implantação e, portanto, são tradicionalmente expressos como frações lineares do investimento em equipamentos, garantindo escalabilidade e consistência entre cenários com diferentes quantidades de RUs, DUs e CUs.

4.3.2 Estrutura geral do OPEX

Já o OPEX é composto por:

$$OPEX_t = C_{energia,t} + C_{manut,t} + C_{lic,t} + C_{transpOp,t} + C_{pessoal,t} \quad (4)$$

onde:

- $C_{energia,t}$: consumo energético anual das RUs, DUs, CUs e servidores;
- $C_{manut,t}$: manutenção preventiva e corretiva;
- $C_{lic,t}$: licenças, atualizações e subscrições de software;
- $C_{transpOp,t}$: despesas operacionais do transporte, como capacidade contratada ou manutenção dos enlaces;
- $C_{pessoal,t}$: custo anual de pessoal técnico e operacional.

O consumo energético anual é expresso por:

$$C_{energia,t} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot H_{ano} \cdot T_{kWh,t}) \quad (5)$$

com:

- P_i : potência média consumida por cada elemento i ;
- $H_{ano} = 8.760$ horas de operação anual;
- $T_{kWh,t}$: tarifa média de energia no ano t .

O custo de manutenção pode ser modelado como:

$$C_{manut,t} = \alpha_{manut} \cdot C_{equip} \quad (6)$$

onde α_{manut} é o percentual anual de manutenção.

Os custos de transporte operacional seguem:

$$C_{transpOp,t} = \sum_{l \in L} (c_{cap} \cdot Cap_l + c_{manut_link}) \quad (7)$$

em que Cap_l é a capacidade do enlace l e c_{cap} é o custo operacional por Gbps/ano. Por fim, os custos de pessoal são modelados por:

$$C_{pessoal,t} = N_{tech} \cdot S_{tech} + N_{ops} \cdot S_{ops} \quad (8)$$

onde N_{tech} e N_{ops} representam o número de profissionais técnicos e operacionais e S_{tech} e S_{ops} os respectivos custos anuais.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A seguir está apresentado o desenvolvimento dos cálculos de TCO para a aplicação dos 4 cenários utilizando a metodologia apresentada. Os cálculos estão sendo apresentados de forma detalhada, no entanto, no Apêndice A deste documento se encontra o código Python elaborado para conferencia dos resultados, o qual pode ser utilizado para a inserção de novos valores, alteração das quantidades de equipamentos ou atualização de parâmetros do modelo, possibilitando a reprodução dos cálculos e a análise de como tais modificações influenciam os resultados obtidos de TCO.

4.4.1 Cenário 1

Este cenário é composto por 30 sites, onde as funções RU, DU e CU permanecem localizadas no próprio radio site, sem centralização funcional. Trata-se de um modelo tradicional, no qual cada site possui sua própria cadeia de processamento RAN, exigindo um conjunto completo de equipamentos por estação.

4.4.1.0.1 Custos CIF obrigatórios utilizados

- Servidor de Alto Desempenho DU + CU: $P_{DU} = P_{CU} = \text{R\$ } 126.000$
- Unidade de rádio outdoor (RU): $P_{RU} = \text{R\$ } 204.000$
- Switch ToR + Grandmaster: $\text{R\$ } 166.000$
- Antena GNSS: $\text{R\$ } 9.350$

Como se trata de um cenário distribuído, não são utilizados:

- Servidor RIC + GPU
- Servidor de Orquestração
- Unidade de rádio indoor

Quantidades adotadas:

- Número de sites: $N_{sites} = 30$

- RUs por site: 1 (RU outdoor) $\Rightarrow N_{RU} = 30$
- DUs por site: 1 $\Rightarrow N_{DU} = 30$
- CUs por site: 1 $\Rightarrow N_{CU} = 30$

4.4.1.1 Percentuais e fatores operacionais

Os parâmetros seguem valores de referência utilizados em modelagens de TCO de redes RAN:

- Instalação: $f_{inst} = 10\%$
- Infraestrutura local: $f_{infra} = 8\%$
- Transporte (CAPEX): $f_{transp_cap} = 5\%$
- Integração (Open RAN multivendor): $f_{integ} = 6\%$
- Manutenção anual: $\alpha_{manut} = 5\%$
- Licenciamento anual: $f_{lic} = 2\%$
- Transporte operacional: $f_{transpOp} = 2\%$
- Pessoal dedicado: $N_{tech} = 10$ técnicos a $S_{tech} = \text{R\$ } 80.000$ anuais

Já para potência elétrica:

- Potência RU outdoor: $p_{RU} = 0,2 \text{ kW}$
- Potência DU: $p_{DU} = 0,5 \text{ kW}$
- Potência CU: $p_{CU} = 0,5 \text{ kW}$
- Horas anuais: $H_{ano} = 8.760$
- Tarifa de energia: $T_{kWh} = \text{R\$ } 0,90$

4.4.1.2 Cálculo do CAPEX

O CAPEX total é dado por:

$$CAPEX = C_{equip} + C_{inst} + C_{transp_cap} + C_{infra} + C_{integ}$$

Custo dos equipamentos:

$$\begin{aligned} C_{equip} &= N_{RU} \cdot P_{RU} + N_{DU} \cdot P_{DU} + N_{CU} \cdot P_{CU} \\ &= 30 \cdot 204.000 + 30 \cdot 126.000 + 30 \cdot 126.000 \\ &= 6.120.000 + 3.780.000 + 3.780.000 \\ &= \mathbf{13.680.000 \text{ R\$}} \end{aligned}$$

Demais componentes do CAPEX:

$$\begin{aligned}
C_{inst} &= 0,10 \cdot C_{equip} = 1.368.000 \\
C_{infra} &= 0,08 \cdot C_{equip} = 1.094.400 \\
C_{transp_cap} &= 0,05 \cdot C_{equip} = 684.000 \\
C_{integ} &= 0,06 \cdot C_{equip} = 820.800
\end{aligned}$$

4.4.1.2.1 CAPEX final

$$\begin{aligned}
CAPEX &= 13.680.000 + 1.368.000 + 1.094.400 + 684.000 + 820.800 \\
&= \mathbf{17.647.200 \text{ R\$}}
\end{aligned}$$

4.4.1.3 Cálculo do OPEX anual

A estrutura geral do OPEX anual é:

$$OPEX = C_{energia} + C_{manut} + C_{lic} + C_{transpOp} + C_{pessoal}$$

Para os cálculos de energia, manutenção, licenciamento e transporte operacional e pessoal:

$$P_{total} = 30 \cdot 0,2 + 30 \cdot 0,5 + 30 \cdot 0,5 = 36 \text{ kW}$$

$$E_{ano} = 36 \cdot 8.760 = 315.360 \text{ kWh}$$

$$C_{energia} = 315.360 \cdot 0,90 = \mathbf{R\$ 283.824}$$

$$C_{manut} = 0,05 \cdot C_{equip} = \mathbf{684.000 \text{ R\$}}$$

$$C_{lic} = 0,02 \cdot C_{equip} = \mathbf{273.600 \text{ R\$}}$$

$$C_{transpOp} = 0,02 \cdot C_{equip} = \mathbf{273.600 \text{ R\$}}$$

$$C_{pessoal} = 10 \cdot 80.000 = \mathbf{800.000 \text{ R\$}}$$

4.4.1.3.1 OPEX total

$$\begin{aligned}
OPEX &= 283.824 + 684.000 + 273.600 + 273.600 + 800.000 \\
&= \mathbf{2.315.024 \text{ R\$ / ano}}
\end{aligned}$$

4.4.1.4 TCO em horizonte de 5 anos

$$TCO_5 = CAPEX + 5 \cdot OPEX$$

$$TCO_5 = 17.647.200 + 5 \cdot 2.315.024$$

$$TCO_5 = \text{R\$29.222.320}$$

4.4.2 Cenário 2

Este cenário foca em representar ambientes urbanos ou grandes eventos, como o exemplo citado sendo a Oktoberfest na cidade de Blumenau, onde as funções de processamento (DU e CU) são concentradas em um ponto de processamento (data center/edge hub), enquanto as RUs permanecem distribuídas no perímetro. Nesta configuração é necessário alocar elementos de orquestração, RICs, equipamentos de agregação (ToR/Grandmaster) e sincronização (GNSS).

4.4.2.0.1 Custos CIF obrigatórios utilizados

- Servidor de Alto Desempenho DU + CU: $P_{DU} = P_{CU} = \text{R\$ 126.000}$
- Unidade de rádio outdoor (RU): $P_{RU} = \text{R\$ 204.000}$
- Servidor RIC + GPU: $P_{RIC} = \text{R\$ 170.000}$
- Servidor de Orquestração: $P_{orch} = \text{R\$ 214.200}$
- Switch ToR + Grandmaster: $\text{R\$ 166.000}$
- Antena GNSS: $\text{R\$ 9.350}$

Quantidades adotadas:

- RUs (outdoor): $N_{RU} = 8$
- DUs (centralizadas): $N_{DU} = 2$
- CUs (centralizadas): $N_{CU} = 1$
- RICs: $N_{RIC} = 1$
- Servidor de orquestração: $N_{orch} = 1$
- Switch ToR + GM: $N_{switch} = 1$
- Antena GNSS: $N_{gnss} = 1$
- Técnicos dedicados (evento): $N_{tech} = 5$, com salário anual $S_{tech} = \text{R\$ 80.000}$

4.4.2.0.2 Parâmetros financeiros e operacionais

- Instalação: $f_{inst} = 10\%$
- Infraestrutura local: $f_{infra} = 8\%$
- Transporte (CAPEX): $f_{transp_cap} = 5\%$
- Integração (Open RAN multivendor): $f_{integ} = 6\%$
- Manutenção anual: $\alpha_{manut} = 5\%$
- Licenciamento anual: $f_{lic} = 2\%$
- Transporte operacional: $f_{transpOp} = 2\%$
- Tarifa de energia: $T_{kWh} = \text{R\$ } 0,90$
- Horas anuais: $H_{ano} = 8.760$

Hipóteses adicionais para este caso de estudo são:

- **Pooling:** adotou-se fator de pooling $\phi_{pool} = 0,6$ para os elementos centralizáveis (DU e CU). Ou seja, o custo efetivo agregado desses servidores é reduzido para 60% do custo sumário dos mesmos, graças ao *pooling* e ao melhor aproveitamento de recursos em ambiente centralizado.
- **Consumo elétrico de servidores e equipamentos centrais:** assumiu-se consumo médio $p_{RU} = 0,2$ kW por RU, $p_{DU} = 0,5$ kW por DU, $p_{CU} = 0,5$ kW por CU; adicionalmente assumiu-se $p_{RIC} = 0,5$ kW, $p_{orch} = 0,5$ kW e $p_{switch} = 0,2$ kW. Antena GNSS: $p_{gnss} = 0,05$ kW.

4.4.2.1 Cálculo do CAPEX

Custo dos equipamentos:

Para o cenário centralizado aplicamos pooling aos elementos DU/CU:

$$C_{equip} = N_{RU} \cdot P_{RU} + \phi_{pool} (N_{DU} \cdot P_{DU} + N_{CU} \cdot P_{CU}) \\ + N_{RIC} \cdot P_{RIC} + N_{orch} \cdot P_{orch} + N_{switch} \cdot P_{switch} + N_{gnss} \cdot P_{gnss}$$

Substituindo os valores:

$$C_{equip} = 8 \cdot 204.000 + 0,6 (2 \cdot 126.000 + 1 \cdot 126.000) \\ + 1 \cdot 170.000 + 1 \cdot 214.200 + 1 \cdot 166.000 + 1 \cdot 9.350 \\ = 1.632.000 + 0,6 \cdot 378.000 \\ + 170.000 + 214.200 + 166.000 + 9.350 \\ = 1.632.000 + 226.800 + 559.550 \\ = \text{R\$2.418.350}$$

Demais componentes do CAPEX:

$$\begin{aligned}
 C_{inst} &= 0,10 \cdot C_{equip} = 241.835 \\
 C_{infra} &= 0,08 \cdot C_{equip} = 193.468 \\
 C_{transp_cap} &= 0,05 \cdot C_{equip} = 120.918 \\
 C_{integ} &= 0,06 \cdot C_{equip} = 145.101
 \end{aligned}$$

4.4.2.1.1 CAPEX final

$$\begin{aligned}
 CAPEX &= C_{equip} + C_{inst} + C_{infra} + C_{transp_cap} + C_{integ} \\
 &= 2.418.350 + 241.835 + 193.468 + 120.918 + 145.101 \\
 &= \mathbf{R\$3.119.672}
 \end{aligned}$$

4.4.2.2 Cálculo do OPEX anual

Para os cálculos de energia, manutenção, licenciamento e transporte operacional e pessoal:

Potência total considerada:

$$\begin{aligned}
 P_{total} &= N_{RU} \cdot p_{RU} + N_{DU} \cdot p_{DU} + N_{CU} \cdot p_{CU} \\
 &\quad + N_{RIC} \cdot p_{RIC} + N_{orch} \cdot p_{orch} + N_{switch} \cdot p_{switch} + N_{gnss} \cdot p_{gnss} \\
 &= 8 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,05 \\
 &= 4,35 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Energia anual:

$$E_{ano} = P_{total} \cdot H_{ano} = 4,35 \cdot 8.760 = 38.106 \text{ kWh}$$

Custo anual de energia:

$$C_{energia} = E_{ano} \cdot T_{kWh} = 38.106 \cdot 0,90 = \mathbf{R\$ 34.295,40}$$

$$C_{manut} = \alpha_{manut} \cdot C_{equip} = 0,05 \cdot 2.418.350 = \mathbf{R\$ 120.917,50}$$

$$C_{lic} = f_{lic} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 2.418.350 = \mathbf{R\$ 48.367,00}$$

$$C_{transpOp} = f_{transpOp} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 2.418.350 = \mathbf{R\$ 48.367,00}$$

$$C_{pessoal} = N_{tech} \cdot S_{tech} = 5 \cdot 80.000 = \mathbf{R\$ 400.000}$$

4.4.2.2.1 OPEX total anual

$$\begin{aligned}
OPEX &= C_{energia} + C_{manut} + C_{lic} + C_{transpOp} + C_{pessoal} \\
&= 34.295,40 + 120.917,50 + 48.367,00 + 48.367,00 + 400.000 \\
&= \mathbf{R\$ 651.946,90 / ano}
\end{aligned}$$

4.4.2.2.2 TCO em horizonte de 5 anos

$$\begin{aligned}
TCO_5 &= CAPEX + 5 \cdot OPEX \\
&= 3.119.672 + 5 \cdot 651.946,90 \\
&= \mathbf{R\$ 6.379.406}
\end{aligned}$$

A inclusão de RIC, orquestrador, *switch* ToR e GNSS é típica em arquiteturas centralizadas e foi adotada aqui para refletir a complexidade e os custos reais de um ambiente de evento. Para potências adotadas para RIC e orquestrador (0,5 kW) são aproximações com servidores de alto desempenho.

4.4.3 Cenário 3

O Cenário 3 descreve uma implantação típica para um hospital de médio porte, na qual a topologia busca baixa latência, alta disponibilidade e controle local através de um *edge node*. As funções de rádio são fornecidas por RUs indoor, as DUs são executadas em um servidor local e a CU é hospedada em um data center regional. Em função das necessidades de gerenciamento, inclui-se um orquestrador e um switch de agregação.

4.4.3.0.1 Custos CIF obrigatórios utilizados

- Unidade de rádio indoor (RU): $P_{RU} = \text{R\$ } 83.300$
- Servidor de Alto Desempenho DU: $P_{DU} = \text{R\$ } 126.000$
- Servidor de Alto Desempenho CU: $P_{CU} = \text{R\$ } 126.000$
- Servidor de Orquestração: $P_{orch} = \text{R\$ } 214.200$
- Switch ToR + Grandmaster: $P_{switch} = \text{R\$ } 166.000$

Quantidades adotadas:

- RUs (indoor): $N_{RU} = 5$
- DUs (locais/edge): $N_{DU} = 1$
- CUs (regional compartilhada): $N_{CU} = 1$
- Orquestrador: $N_{orch} = 1$

- Switch ToR/GM: $N_{switch} = 1$
- Técnicos dedicados: $N_{tech} = 2$ com $S_{tech} = \text{R\$ } 80.000/\text{ano}$

4.4.3.0.2 Parâmetros financeiros e operacionais

- Instalação: $f_{inst} = 10\%$
- Infraestrutura: $f_{infra} = 8\%$
- Transporte (CAPEX): $f_{transp_cap} = 5\%$
- Integração (multivendor): $f_{integ} = 6\%$
- Manutenção anual: $\alpha_{manut} = 5\%$
- Licenciamento anual: $f_{lic} = 2\%$
- Transporte operacional anual: $f_{transpOp} = 2\%$
- Tarifa de energia: $T_{kWh} = \text{R\$ } 0,90$
- Horas anuais: $H_{ano} = 8.760$

Consumo elétrico assumido:

- $p_{RU} = 0,2 \text{ kW}$
- $p_{DU} = 0,5 \text{ kW}$
- $p_{CU} = 0,5 \text{ kW}$
- $p_{orch} = 0,5 \text{ kW}$
- $p_{switch} = 0,2 \text{ kW}$

4.4.3.1 Cálculo do CAPEX

$$CAPEX = C_{equip} + C_{inst} + C_{transp_cap} + C_{infra} + C_{integ}$$

Custo dos equipamentos:

$$C_{equip} = N_{RU} \cdot P_{RU} + N_{DU} \cdot P_{DU} + N_{CU} \cdot P_{CU} \\ + N_{orch} \cdot P_{orch} + N_{switch} \cdot P_{switch}$$

Substituindo os valores:

$$C_{equip} = 5 \cdot 83.300 + 1 \cdot 126.000 + 1 \cdot 126.000 \\ + 1 \cdot 214.200 + 1 \cdot 166.000 \\ = 416.500 + 126.000 + 126.000 + 214.200 + 166.000 \\ = \text{R\$ } 1.048.700$$

Componentes do CAPEX:

$$C_{inst} = f_{inst} \cdot C_{equip} = 0,10 \cdot 1.048.700 = 104.870$$

$$C_{infra} = f_{infra} \cdot C_{equip} = 0,08 \cdot 1.048.700 = 83.896$$

$$C_{transp_cap} = f_{transp_cap} \cdot C_{equip} = 0,05 \cdot 1.048.700 = 52.435$$

$$C_{integ} = f_{integ} \cdot C_{equip} = 0,06 \cdot 1.048.700 = 62.922$$

4.4.3.1.1 CAPEX final

$$\begin{aligned} CAPEX &= 1.048.700 + 104.870 + 83.896 + 52.435 + 62.922 \\ &= \text{R\$1.352.823} \end{aligned}$$

4.4.3.2 Cálculo do OPEX anual

$$OPEX = C_{energia} + C_{manut} + C_{lic} + C_{transpOp} + C_{pessoal}$$

Para os cálculos de energia, manutenção, licenciamento e transporte operacional e pessoal:

$$\begin{aligned} P_{total} &= N_{RU} \cdot p_{RU} + N_{DU} \cdot p_{DU} + N_{CU} \cdot p_{CU} \\ &\quad + N_{orch} \cdot p_{orch} + N_{switch} \cdot p_{switch} \\ &= 5 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,2 \\ &= 2,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

Energia anual:

$$E_{ano} = P_{total} \cdot H_{ano} = 2,7 \cdot 8.760 = 23.652 \text{ kWh}$$

Custo anual de energia:

$$C_{energia} = E_{ano} \cdot T_{kWh} = 23.652 \cdot 0,90 = \text{R\$ 21.286,80}$$

$$C_{manut} = \alpha_{manut} \cdot C_{equip} = 0,05 \cdot 1.048.700 = \text{R\$ 52.435}$$

$$C_{lic} = f_{lic} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 1.048.700 = \text{R\$ 20.974}$$

$$C_{transpOp} = f_{transpOp} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 1.048.700 = \text{R\$ 20.974}$$

$$C_{pessoal} = N_{tech} \cdot S_{tech} = 2 \cdot 80.000 = \text{R\$ 160.000}$$

4.4.3.2.1 OPEX anual total

$$\begin{aligned} OPEX &= 21.286,80 + 52.435 + 20.974 + 20.974 + 160.000 \\ &= \text{R\$ 275.669,80 / ano} \end{aligned}$$

4.4.3.3 TCO em horizonte de 5 anos

Sem aplicação de desconto:

$$\begin{aligned} TCO_5 &= CAPEX + 5 \cdot OPEX \\ &= 1.352.823 + 5 \cdot 275.669,80 \\ &= \mathbf{R\$ 2.731.172} \end{aligned}$$

A inclusão do orquestrador e do switch foi adotada considerando práticas de gerenciamento e agregação em ambientes hospitalares integrados a data centers regionais. Além disso, o cenário favorece baixos tempos de latência por manter DU local, a CU regional permite centralizar políticas e reduzir custos de operação em escala.

4.4.4 Cenário 4

O Cenário 4 corresponde a uma implantação destinada a prover alta capacidade em áreas de cobertura limitada. O modelo considera RUs de baixa potência distribuídas, DUs de agregação em gabinetes urbanos e uma CU regional.

4.4.4.0.1 Custos CIF obrigatórios utilizados

- Unidade de rádio outdoor (RU): $P_{RU} = \text{R\$ } 204.000$
- Servidor de Alto Desempenho DU: $P_{DU} = \text{R\$ } 126.000$
- Servidor de Alto Desempenho CU: $P_{CU} = \text{R\$ } 126.000$

Quantidades adotadas:

- RUs (outdoor small cells): $N_{RU} = 10$
- DUs (agregação local): $N_{DU} = 2$
- CUs (regional compartilhada): $N_{CU} = 1$
- Técnicos dedicados: $N_{tech} = 6$ com salário anual $S_{tech} = \text{R\$ } 80.000$

4.4.4.0.2 Parâmetros financeiros e operacionais

- Instalação: $f_{inst} = 10\%$
- Infraestrutura local: $f_{infra} = 8\%$
- Transporte (CAPEX): $f_{transp_cap} = 5\%$
- Integração (Open RAN multivendor): $f_{integ} = 6\%$
- Manutenção anual: $\alpha_{manut} = 5\%$
- Licenciamento anual: $f_{lic} = 2\%$
- Transporte operacional anual: $f_{transpOp} = 2\%$

- Tarifa de energia: $T_{kWh} = \text{R\$ } 0,90$
- Horas anuais: $H_{ano} = 8.760$

Consumo elétrico assumido:

- Potência RU: $p_{RU} = 0,2 \text{ kW}$
- Potência DU: $p_{DU} = 0,5 \text{ kW}$
- Potência CU: $p_{CU} = 0,5 \text{ kW}$

4.4.4.1 Cálculo do CAPEX

$$CAPEX = C_{equip} + C_{inst} + C_{transp_cap} + C_{infra} + C_{integ}$$

Custo dos equipamentos:

$$\begin{aligned} C_{equip} &= N_{RU} \cdot P_{RU} + N_{DU} \cdot P_{DU} + N_{CU} \cdot P_{CU} \\ &= 10 \cdot 204.000 + 2 \cdot 126.000 + 1 \cdot 126.000 \\ &= 2.040.000 + 252.000 + 126.000 \\ &= \text{R\$} \mathbf{2.418.000} \end{aligned}$$

Demais componentes do CAPEX:

$$\begin{aligned} C_{inst} &= f_{inst} \cdot C_{equip} = 0,10 \cdot 2.418.000 = 241.800 \\ C_{infra} &= f_{infra} \cdot C_{equip} = 0,08 \cdot 2.418.000 = 193.440 \\ C_{transp_cap} &= f_{transp_cap} \cdot C_{equip} = 0,05 \cdot 2.418.000 = 120.900 \\ C_{integ} &= f_{integ} \cdot C_{equip} = 0,06 \cdot 2.418.000 = 145.080 \end{aligned}$$

4.4.4.1.1 CAPEX final

$$\begin{aligned} CAPEX &= 2.418.000 + 241.800 + 193.440 + 120.900 + 145.080 \\ &= \text{R\$} \mathbf{3.119.220} \end{aligned}$$

4.4.4.2 Cálculo do OPEX anual

$$OPEX = C_{energia} + C_{manut} + C_{lic} + C_{transpOp} + C_{pessoal}$$

Para os cálculos de energia, manutenção, licenciamento e transporte operacional e pessoal:

$$\begin{aligned} P_{total} &= N_{RU} \cdot p_{RU} + N_{DU} \cdot p_{DU} + N_{CU} \cdot p_{CU} \\ &= 10 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,5 \\ &= 2,0 + 1,0 + 0,5 = 3,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$E_{ano} = P_{total} \cdot H_{ano} = 3,5 \cdot 8.760 = 30.660 \text{ kWh}$$

$$C_{energia} = E_{ano} \cdot T_{kWh} = 30.660 \cdot 0,90 = \mathbf{R\$ 27.594}$$

$$C_{manut} = \alpha_{manut} \cdot C_{equip} = 0,05 \cdot 2.418.000 = \mathbf{R\$ 120.900}$$

$$C_{lic} = f_{lic} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 2.418.000 = \mathbf{R\$ 48.360}$$

$$C_{transpOp} = f_{transpOp} \cdot C_{equip} = 0,02 \cdot 2.418.000 = \mathbf{R\$ 48.360}$$

$$C_{pessoal} = N_{tech} \cdot S_{tech} = 6 \cdot 80.000 = \mathbf{R\$ 480.000}$$

4.4.4.2.1 OPEX anual total

$$\begin{aligned} OPEX &= 27.594 + 120.900 + 48.360 + 48.360 + 480.000 \\ &= \mathbf{R\$ 725.214 / ano} \end{aligned}$$

4.4.4.3 TCO em horizonte de 5 anos

$$\begin{aligned} TCO_5 &= CAPEX + 5 \cdot OPEX \\ &= 3.119.220 + 5 \cdot 725.214 \\ &= \mathbf{R\$ 6.745.290} \end{aligned}$$

Para este caso foi escolhido um cenário mais realista de pequena/média escala e não foi incluído um RIC dedicado nem um servidor de orquestração centra. Em projetos de maior escala ou quando se pretende aplicar otimização por RIC/AI, deve-se incluir estes elementos e recalcular (estes componentes impactam principalmente o CAPEX e o consumo elétrico).

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da modelagem econômico-financeira dos quatro cenários de implantação de redes RAN virtualizadas e abertas. Os valores de CAPEX, OPEX e TCO foram calculados com base nos parâmetros definidos na metodologia, considerando preços CIF padronizados, horizonte de cinco anos e a estrutura modular de custos adotada no Capítulo 4.

A análise foi conduzida individualmente em cada cenário, mas com interpretação integrada, de forma a evidenciar como escolhas arquiteturais, distribuição de funções, quantidade de RUs, presença de *edge nodes* e *pooling* computacional, impactam o comportamento econômico da solução. As tabelas apresentadas a seguir sintetizam os valores obtidos.

5.1 CENÁRIO 1 – MACRO DISTRIBUÍDO

O Cenário 1 representa a topologia mais tradicional e de maior dispersão geográfica, cada site possui sua RU, DU e CU instaladas localmente, o que implica replicação integral dos recursos computacionais. Essa característica tende a elevar de forma proporcional todos os componentes de CAPEX e OPEX, especialmente aqueles sensíveis a escala, como infraestrutura de suporte, manutenção e energia.

A Tabela 2 sintetiza os custos calculados.

Tabela 2 – Resumo Econômico do Cenário 1 – Macro Distribuído

Componente	Valor (R\$)
CAPEX	
Custo dos Equipamentos	13.680.000
Instalação	1.368.000
Infraestrutura	1.094.400
Transporte	684.000
Integração	820.800
CAPEX Total	17.647.200
OPEX Anual	
Energia	283.824
Manutenção	684.000
Licenciamento	273.600
Transporte	273.600
Pessoal	800.000
OPEX Total (anual)	2.315.024
TCO	
TCO₅ anos	29.222.320

Os resultados obtidos para o cenário Macro Distribuído evidenciam que esta topologia apresenta o maior entre os quatro modelos avaliados, refletindo diretamente o

impacto da ausência de centralização computacional. A necessidade de replicar funções de processamento em cada sítio implica menor eficiência energética, maior custo de hardware e perdas significativas de economia de escala, uma vez que não há pooling de recursos de DU ou CU. Além disso, esse arranjo exige maior atuação de equipes de campo para manutenção, atualizações e resolução de falhas, elevando o OPEX operacional. Tais achados são compatíveis com análises realizadas por (PAOLINI, 2020), que identificam a duplicação funcional e a baixa taxa de compartilhamento de recursos como fatores estruturais que aumentam o custo total de propriedade em redes distribuídas.

Apesar de seu maior custo absoluto, o cenário Macro Distribuído mantém relevância prática em contextos específicos. Sua independência em relação à infraestrutura de transporte de alta capacidade o torna particularmente adequado para regiões rurais, estradas e áreas de baixa densidade populacional, onde o custo de prover enlaces de fibra para centralização supera o benefício econômico do pooling computacional. Assim, ainda que economicamente menos eficiente em termos de escala, o modelo distribuído apresenta a melhor relação entre viabilidade operacional, autonomia e resiliência nesses ambientes. A análise confirma, portanto, que o Macro Distribuído não é competitivo em cenários urbanos ou densos, mas permanece a opção mais apropriada quando a restrição dominante é a indisponibilidade de transporte confiável, e não o custo energético ou computacional.

5.2 CENÁRIO 2 – MACRO CENTRALIZADO

O Cenário 2 avalia uma arquitetura centralizada para ambientes de alta concentração de usuários, como grandes eventos urbanos. Neste modelo, as funções DU e CU são agrupadas em um único *pool* computacional, permitindo ganhos substanciais de economia de escala e redução da quantidade de servidores físicos, o que impacta diretamente o CAPEX.

A Tabela 3 apresenta os resultados.

Em relação aos resultados do cenário Macro Centralizado, eles indicam que esta arquitetura apresenta o menor CAPEX entre os quatro modelos analisados. Essa redução decorre diretamente do efeito de pooling proporcionado pela centralização das funções de DU e CU, que elimina a necessidade de replicação de servidores e equipamentos auxiliares em cada sítio remoto. A agregação computacional permite que um número reduzido de unidades de processamento atenda simultaneamente múltiplas RUs, diminuindo o volume de hardware necessário e simplificando o processo de instalação e integração. Mesmo com custos operacionais de pessoal mais elevados, o impacto no TCO permanece limitado, resultando no segundo menor custo total entre os cenários estudados.

Esse comportamento confirma previsões amplamente discutidas em estudos como (KONDRASHOV *et al.*, 2023), (PAOLINI, 2020) e (RED HAT, 2023), que destacam que arquiteturas cloud-native, quando corretamente dimensionadas, produzem eficiência substancial ao aproveitar recursos compartilhados, automação e elasticidade da infraestrut-

Tabela 3 – Resumo Econômico do Cenário 2 - Macro Centralizado

Componente	Valor (R\$)
CAPEX	
Custo dos Equipamentos	2.418.350
Instalação	241.835
Infraestrutura	193.468
Transporte	120.918
Integração	145.101
CAPEX Total	3.119.672
OPEX Anual	
Energia	34.295,40
Manutenção	120.917,50
Licenciamento	48.367,00
Transporte	48.367,00
Pessoal	400.000
OPEX Total (anual)	651.946,90
TCO	
TCO₅ anos	6.379.406

tura virtualizada. A centralização, portanto, não apenas reduz equipamentos físicos como também melhora a utilização dos recursos computacionais, reduzindo significativamente OPEX associados à manutenção distribuída e ao consumo energético.

No contexto de grandes eventos urbanos, como o caso da Oktoberfest, o cenário Macro Centralizado destaca-se como uma solução particularmente vantajosa. Embora demande transporte de maior capacidade e mecanismos rigorosos de sincronização, a arquitetura oferece elevado desempenho, escalabilidade e rapidez na reconfiguração da rede para atender flutuações temporárias de demanda. Dessa forma, estabelece-se como a abordagem tecnicamente mais adequada para ambientes de alta densidade e curta duração, proporcionando significativa economia ao longo do ciclo de vida e garantindo que as operadoras atendam aos requisitos de tráfego intenso com previsibilidade e eficiência operacional.

5.3 CENÁRIO 3 – INDOOR

O Cenário 3 modela um ambiente indoor com requisitos de baixa latência e alta disponibilidade, característico de hospitais de médio porte. Embora a presença de um *edge node* local implique instalação de um servidor dedicado, a escala reduzida (apenas cinco RUs) mantém os custos controlados.

A seguir a Tabela 4 apresentando os resultados para o cenário Indoor.

Os resultados obtidos para o cenário Indoor evidenciam um comportamento econômico particularmente equilibrado. O CAPEX reduzido decorre diretamente do número limitado de RUs e da adoção de uma arquitetura híbrida, na qual as DUs permanecem

Tabela 4 – Resumo Econômico do Cenário 3 - Indoor

Componente	Valor (R\$)
CAPEX	
Custo dos Equipamentos	1.048.700
Instalação	104.870
Infraestrutura	83.896
Transporte	52.435
Integração	62.922
CAPEX Total	1.352.823
OPEX Anual	
Energia	21.286,80
Manutenção	52.435
Licenciamento	20.974
Transporte	20.974
Pessoal	160.000
OPEX Total (anual)	275.669,80
TCO	
TCO₅ anos	2.731.172

localizadas no edge para garantir baixa latência, enquanto as funções de CU são centralizadas em uma infraestrutura regional compartilhada. Essa combinação reduz custos de hardware, simplifica a instalação e diminui a necessidade de infraestrutura robusta de transporte, resultando em um impacto positivo sobre o TCO final, o segundo mais baixo entre os quatro cenários analisados.

Do ponto de vista operacional, o ambiente indoor controlado, típico de hospitais e instituições de saúde, contribui para a redução do OPEX, especialmente no que se refere à manutenção, transporte e consumo energético. A menor variabilidade ambiental e o tráfego mais previsível facilitam o planejamento de capacidade e reduzem a necessidade de intervenções de campo, diferentemente dos cenários outdoor, que apresentam maior exposição a condições climáticas e flutuações de demanda.

Assim, o cenário Indoor Hospitalar demonstra que a adoção de um modelo híbrido de vRAN e O-RAN é tecnicamente adequada e economicamente favorável. Com um investimento inicial moderado, custos operacionais bem controlados e elevada confiabilidade, esse tipo de implantação se firma como uma alternativa robusta para instituições de saúde que buscam digitalização segura, escalável e compatível com as demandas crescentes do ecossistema 5G e de IoT.

5.4 CENÁRIO 4 – OUTDOOR SMALL CELL

O Cenário 4 simula uma implantação urbana densificada com small cells, visando alta capacidade em ambientes com grande volume de usuários, como centros comerciais e parques. Pequenas células reduzem potência, infraestrutura pesada e custos de instalação,

mas a densidade maior de sites implica custos operacionais ampliados.

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 5 – Resumo Econômico do Cenário 4 – Outdoor Small Cell

Componente	Valor (R\$)
CAPEX	
Custo dos Equipamentos	2.418.000
Instalação	241.800
Infraestrutura	193.440
Transporte	120.900
Integração	145.080
CAPEX Total	3.119.220
OPEX Anual	
Energia	27.594
Manutenção	120.900
Licenciamento	48.360
Transporte	48.360
Pessoal	480.000
OPEX Total (anual)	725.214
TCO	
TCO₅ anos	6.745.290

Os resultados obtidos no Cenário 4 evidenciam o comportamento típico de arquiteturas baseadas em small cells implantadas em ambientes urbanos de alta densidade. O CAPEX moderado reflete tanto o menor custo unitário das unidades de rádio quanto a ausência de grandes estruturas físicas ou enlaces extensos, características comuns em topologias distribuídas de curto alcance. Por outro lado, o OPEX anual apresenta valores mais elevados em comparação com cenários indoor, principalmente devido ao aumento do número de unidades instaladas, da necessidade de monitoramento contínuo e do esforço operacional para garantir disponibilidade e manutenção em áreas públicas.

A análise do TCO mostra que, embora os custos de operação cresçam proporcionalmente à quantidade de small cells e à complexidade do ambiente urbano, a modularidade da solução permite que o investimento seja dimensionado de forma incremental. Isso reduz riscos, facilita a expansão conforme a demanda e permite um controle mais preciso sobre os recursos computacionais associados às funções DU e CU. Trata-se, portanto, de uma topologia com forte aderência a aplicações que exigem cobertura granular, capacidade elevada por área e suporte eficiente a mobilidade densa.

Por fim, o Cenário Outdoor Small Cell demonstra que a combinação entre arquitetura aberta, automação inteligente e modularidade de rede resulta em um sistema tecnicamente robusto e economicamente equilibrado. Ao harmonizar CAPEX, OPEX e escalabilidade, essa abordagem consolida-se como uma das alternativas mais viáveis para atender às demandas crescentes de conectividade em centros urbanos, redes de campus, áreas recreativas e corredores comerciais. O modelo oferece flexibilidade para expansão,

estabilidade operacional e significativa eficiência no uso dos recursos, atributos essenciais para o futuro das redes móveis em ambientes de alta concentração de usuários.

5.5 COMPARAÇÃO INTEGRADA DOS CENÁRIOS E DISCUSSÃO CRÍTICA

A comparação dos quatro cenários avaliados permite observar, de maneira clara, como diferentes arquiteturas de RAN resultam em comportamentos econômicos bastante distintos. Esta seção sintetiza essas diferenças e discute criticamente os resultados à luz do estado da arte e das referências técnicas analisadas, como em (PAOLINI, 2020) e (KONDRASHOV *et al.*, 2023).

5.5.1 Comparação Econômica Geral

A Tabela 6 resume os valores de CAPEX, OPEX anual e TCO para os quatro cenários modelados.

Tabela 6 – Comparação consolidada dos resultados econômicos dos quatro cenários

Cenário	CAPEX (R\$)	OPEX Anual (R\$)	TCO _{5 anos} (R\$)
Macro Distribuído (30 sites)	17.647.200	2.315.024	29.222.320
Macro Centralizado (8 RUs)	3.119.672	651.946,90	6.379.406
Indoor (5 RUs)	1.352.823	275.669,80	2.731.172
Outdoor Small Cell (10 RUs)	3.119.220	725.214	6.745.290

De forma geral, três conclusões principais podem ser destacadas:

1. O cenário **Macro Distribuído** apresenta, de longe, o maior TCO, refletindo a ineficiência econômica intrínseca de arquiteturas totalmente distribuídas.
2. O cenário **Macro Centralizado** demonstra o maior ganho de escala, obtendo o menor CAPEX e um TCO bastante reduzido mesmo considerando uma operação intensiva.
3. Os cenários **Indoor** e **Small Cell** ocupam posições intermediárias, com custos proporcionais à escala e ao propósito operacional.

5.5.2 Discussão Crítica e Conexão com o Estado da Arte

Ao confrontar os resultados obtidos com os principais estudos do setor, é possível identificar padrões consistentes e também particularidades relevantes para o contexto de implantação no Brasil.

5.5.2.1 Centralização como principal vetor de economia

Os relatórios de (PAOLINI, 2020) demonstram que a centralização de funções DU/CU reduz significativamente o custo total de propriedade, principalmente por três mecanismos:

- **Pooling computacional:** reduz número de servidores e aumenta o aproveitamento dos recursos.
- **Redução de infraestrutura local:** diminui climatização, espaço físico e equipamentos de suporte.
- **Operação simplificada:** menor necessidade de pessoal em campo e menor tempo de manutenção.

No presente trabalho, essa tendência aparece de forma clara o cenário Macro Centralizado apresenta CAPEX quase seis vezes menor que o cenário distribuído, e seu TCO representa apenas cerca de **21%** do valor obtido na arquitetura distribuída. Esse resultado confirma empiricamente o que a literatura de vRAN prediz sobre ambientes densos e centralizáveis.

5.5.2.2 *Análise geral dos resultados*

A análise dos quatro cenários de implantação evidencia a diversidade de contextos em que as arquiteturas O-RAN podem ser aplicadas, bem como as implicações técnicas, operacionais e econômicas associadas a cada configuração. Embora todas compartilhem os princípios de virtualização, desagregação funcional e automação, os resultados práticos variam em função do ambiente de operação, dos requisitos de desempenho e das limitações de infraestrutura disponíveis.

Nos cenários macro, verificou-se que a escolha entre arquiteturas distribuídas e centralizadas está fortemente condicionada ao custo e à disponibilidade do transporte (x-haul). Em regiões rurais ou extensas, a topologia distribuída mostra-se mais adequada por reduzir a dependência de enlaces de longa distância e permitir expansões progressivas, ainda que com maior custo unitário de hardware. Em contrapartida, em ambientes urbanos densos, o modelo centralizado oferece benefícios substanciais, como pooling computacional, simplificação da manutenção e economia operacional, sendo particularmente eficaz em situações de tráfego concentrado, como grandes eventos (a exemplo da Oktoberfest de Blumenau), em que a variabilidade de demanda exige elevado dinamismo de provisionamento.

Nos cenários indoor, o foco desloca-se para requisitos de confiabilidade e baixa latência, essenciais em ambientes hospitalares e aplicações de missão crítica. A arquitetura híbrida, com DUs locais e CUs regionalizadas, equilibra eficiência operacional e segurança de dados. Funcionalidades como *network slicing* e protocolos de sincronização (PTP, SyncE) asseguram previsibilidade temporal e estabilidade, enquanto a automação e a virtualização contribuem para a redução de OPEX, em consonância com os resultados apresentados por (RED HAT, 2023).

O cenário de small cells, voltado à alta densidade urbana, destaca-se pela modularidade e pela facilidade de integração com aplicações de cidades inteligentes. A utilização

de hardware padronizado e a capacidade de implantação granular tornam a O-RAN competitiva neste contexto, reduzindo barreiras de entrada e CAPEX inicial. Contudo, custos de transporte e sincronização continuam sendo desafios relevantes, exigindo estratégias de otimização de x-haul e a adoção de RICs para manter a eficiência operacional e energética.

De maneira geral, os resultados demonstram que nenhum modelo é universalmente superior, cada cenário apresenta vantagens específicas que devem ser avaliadas de acordo com a densidade de tráfego, o contexto geográfico e os objetivos estratégicos do operador. A análise baseada em TCO revelou que as maiores economias não advêm exclusivamente da substituição de hardware proprietário por soluções abertas, mas principalmente da redução contínua de OPEX proporcionada pela automação, virtualização e centralização, corroborando tendências amplamente discutidas no estado da arte.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar, sob uma perspectiva técnico-econômica, diferentes cenários de implantação de redes O-RAN e vRAN, considerando contextos de uso reais e heterogêneos. A partir da revisão bibliográfica, da definição metodológica baseada no cálculo do TCO e da modelagem quantitativa dos quatro cenários propostos, foi possível avaliar de forma estruturada o impacto da virtualização, da desagregação funcional e do grau de centralização da RAN na composição do CAPEX, do OPEX e, consequentemente, no custo total de propriedade ao longo de um horizonte de cinco anos.

A execução deste trabalho possibilitou a consolidação de conhecimentos relacionados às arquiteturas de acesso rádio, automação de redes móveis, modelagem econômica e engenharia de custos, além de evidenciar a complexidade técnica inerente à transição para redes abertas e virtualizadas. Durante o desenvolvimento do estudo, surgiram desafios associados à padronização de premissas, à normalização de custos entre cenários distintos e à interpretação de modelos de referência internacionais, especialmente aqueles propostos por (PAOLINI, 2020) e (KONDRASHOV *et al.*, 2023). Tais desafios exigiram ajustes metodológicos e culminaram na construção de um modelo unificado de cálculo, adaptado às particularidades técnicas e operacionais de cada ambiente de implantação.

Os resultados obtidos demonstraram que não há superioridade absoluta entre os cenários analisados, sendo a viabilidade econômica fortemente dependente do contexto de aplicação. Nos cenários macro, observou-se que a arquitetura distribuída tende a apresentar maior CAPEX, em função do volume de *hardware* instalado por site, enquanto a arquitetura centralizada possibilita redução de custos por meio do *pooling* de recursos computacionais e da simplificação operacional. Entretanto, essa centralização impõe maior dependência de enlaces de transporte de alta capacidade e sincronização rigorosa, o que pode inviabilizar sua adoção em regiões extensas ou com infraestrutura limitada. Sob a ótica do perfil de operadora, esses resultados indicam que arquiteturas macro centralizadas tendem a ser mais atrativas para operadoras de grande porte, que já dispõem de redes de transporte robustas e podem explorar ganhos de escala, enquanto modelos mais distribuídos mostram-se mais adequados a operadoras regionais ou entrantes, que podem se beneficiar do reaproveitamento de infraestrutura existente e da menor dependência de transporte avançado.

No cenário indoor hospitalar, verificou-se que a arquitetura híbrida, com DU local e CU regional, representa uma solução equilibrada entre baixa latência, confiabilidade e custo. Esse cenário apresentou um dos menores valores de TCO entre os quatro analisados, evidenciando que, em ambientes com cobertura limitada, tráfego previsível e requisitos operacionais bem definidos, a O-RAN oferece vantagens significativas ao permitir dimensionamento preciso e maior controle sobre o domínio do tráfego. Esses resultados indicam que

esse tipo de implantação é particularmente favorável tanto para operadoras tradicionais quanto para redes privadas ou operadoras especializadas, ampliando o leque de modelos de negócio viáveis no contexto do 5G.

Para ambientes de alta densidade de usuários, representados pelo cenário de outdoor small cells, o estudo evidenciou que a modularidade da O-RAN e o menor custo unitário das RUs tornam essa arquitetura especialmente competitiva. Apesar disso, o OPEX tende a ser fortemente influenciado pelos custos associados ao transporte e à sincronização, exigindo planejamento cuidadoso da infraestrutura de x-haul. Do ponto de vista estratégico, esse cenário favorece operadoras com presença consolidada em áreas urbanas e acesso a infraestrutura óptica existente. Ainda assim, a flexibilidade da O-RAN permite que operadoras de menor porte ou novos entrantes explorem implantações incrementais, utilizando infraestruturas compartilhadas, reduzindo barreiras econômicas à entrada.

De forma geral, os resultados demonstraram que os principais benefícios econômicos da O-RAN não estão associados exclusivamente à redução do CAPEX inicial, mas sobretudo à diminuição progressiva do OPEX ao longo do ciclo de vida da rede. Fatores como automação, escalabilidade, elasticidade computacional e independência de fornecedores contribuem de maneira cumulativa para a redução do custo total de propriedade, corroborando observações já destacadas na literatura, como nos estudos de (PAOLINI, 2020) e (RED HAT, 2023).

Embora os objetivos geral e específicos tenham sido plenamente atingidos, este trabalho apresenta limitações inerentes ao processo de modelagem. Parte das premissas relacionadas ao consumo energético, aos custos de transporte, à eficiência de *pooling* e aos valores unitários dos equipamentos foi extraída de documentos técnicos e fontes de mercado, podendo variar conforme o fornecedor, a topologia real da rede e o nível de otimização operacional do operador. Ademais, a ausência de dados reais de campo exigiu a uniformização de parâmetros para viabilizar a comparação entre cenários, o que pode simplificar determinadas nuances práticas.

Como continuidade natural deste estudo, destaca-se a possibilidade de aprofundar a análise econômica por meio da incorporação de métricas financeiras mais completas, como Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno, ampliando a precisão da avaliação do TCO em horizontes de longo prazo. Adicionalmente, estudos futuros podem considerar dados reais de tráfego e elasticidade de demanda, bem como cenários mais complexos envolvendo *multi-tenancy*, *network slicing* e funções avançadas de gerenciamento, especialmente em ambientes industriais e hospitalares. A integração de medições empíricas de consumo energético, desempenho e disponibilidade também contribuiria para validar e refinar as premissas adotadas.

Conclui-se, portanto, que a O-RAN constitui uma alternativa tecnicamente robusta e economicamente competitiva para diferentes contextos de implantação, contribuindo para maior flexibilidade, escalabilidade e democratização do ecossistema de redes móveis.

Os resultados evidenciam que seu potencial não reside apenas na redução de custos iniciais, mas principalmente na capacidade de adaptação, automação e reconfiguração ao longo da vida útil da rede, reforçando sua relevância no contexto da evolução das arquiteturas de acesso rumo ao 5G, ao 6G e às futuras gerações de redes móveis.

REFERÊNCIAS

- AFOLABI, I.; TALEB, T.; SAMDANIS, K.; KSENTINI, A.; FLINCK, H. Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2429–2453, 2018.
- ALLIANCE, O-RAN. **O-RAN: Open RAN Architecture – CU/DU/RU Functional Split**. [*S.l.: s.n.*], 2023. White Paper / Especificação técnica.
- BARRETO, Priscila Solís; SARAIVA JR, Raimundo G.; FERREIRA, Gabriel de C.; CARVALHO, Paulo H. P. de. Open RAN e os Desafios da sua Experimentação em Plataformas de Código Aberto. *In*: XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2022). Sta. Rita do Sapucaí, MG, Brasil: [*s.n.*], set. 2022. P. –.
- BONATI, L.; D'ORO, S.; POLESE, M.; BASAGNI, S.; MELODIA, T. Intelligence and Learning in O-RAN for Data-driven NextG Cellular Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 59, n. 10, p. 21–27, out. 2021.
- CHEN, K.; DUAN, R. **C-RAN: The Road Towards Green RAN**. [*S.l.*], 2011. P. 1–48.
- FERRO, Vinicius; MONTEIRO, Gustavo; OLIVEIRA, João Gustavo R.; SILVA, Luis Flávio. Implementação de um Ambiente Open RAN LTE Containerizado e Virtualizado. *In*: XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2022). Sta. Rita do Sapucaí, MG, Brasil: [*s.n.*], set. 2022. P. –.
- GAWAS, Anju Uttam. An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G. **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication**, v. 3, n. 5, p. 3130–3133, 2015.
- GUPTA, A.; JHA, R. K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. **IEEE Access**, v. 3, p. 1206–1232, 2015.
- HE, Qi; JU, Yunxia; WANG, Jianguo; ZHAO, Gang; QIN, Haiyong; ZHAO, Kai; ZHOU, Yilan; LI, Min; DONG, Qi. Network Slicing to Enable Resilience and High Availability in 5G Mobile Telecommunications. *In*: MATEC Web of Conferences. [*S.l.*]: EDP Sciences, 2018. v. 246, p. 03028.

ILHA OPENRAN. **Equipamentos da Ilha OpenRAN: Especificações e Valores.** [S.l.], 2025.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Minimum technical performance requirements for IMT-2020 radio interface technologies.** [S.l.], 2017.

KONDRASHOV, Danila; ROGOZHNIKOV, Evgeniy; ABENOV, Renat; NOVICHKOV, Serafim. Calculation of the Total Cost of Ownership of 5G Network for Different Types of Architecture: Distributed RAN, Centralized RAN and Open RAN. **Proceedings on Engineering Sciences**, 2023. Received 15.09.2022; Accepted 21.01.2023.

LEE, S.; KI, D.; EDGE, M. A Way Forward for Accommodating NFV in 3GPP Systems. *In*: 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). [S.l.: s.n.], 2017. P. 114–116.

LEE, Young; LEE, Hyunjeong; LIM, Jai-Jin. **vRAN Value Proposition and Cost Modeling.** White Paper. Versão 1.0. [S.l.], set. 2020.

O-RAN ALLIANCE. **O-RAN: Towards an Open and Smart RAN.** [S.l.], 2018.

PAOLINI, Monica. **Which Open RAN is Best for You? TCO Tradeoffs: Transport versus Location.** [S.l.], 2020.

RAMESH, M.; PRIYA, C. G.; ANANTHAKIRUPA, J. Design of Efficient Massive MIMO for 5G Systems - Present and Past: A Review. *In*: PROCEEDINGS of the 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). [S.l.: s.n.], 2017. P. 1–4.

RED HAT. **Entendendo os Aspectos Financeiros da Telco Cloud.** [S.l.], 2023.

SARASÚA ZUBIMENDI, Paula. **División de funciones en arquitecturas C-RAN (Functional Split in C-RAN Architectures).** Out. 2017. Trabajo Fin de Máster – Universidad de Cantabria.

WU, J.; ZHANG, Z.; HONG, Y.; WEN, Y. Cloud Radio Access Network (C-RAN): A Primer. **IEEE Network**, v. 29, n. 1, p. 35–41, 2015.

APÊNDICE A – Descrição

A seguir está o código em Python utilizado para os cálculos do TCO:

```

1 import pandas as pd
2
3 # CUSTOS CIF OBRIGATORIOS
4
5 P_RU_out = 204000
6 P_RU_in  = 83300
7 P_DU     = 126000
8 P_CU     = 126000
9 P_RIC    = 170000
10 P_orch   = 214200
11 P_switch = 166000
12 P_gnss   = 9350
13
14
15 # PARAMETROS GERAIS
16
17
18 f_inst = 0.10
19 f_infra = 0.08
20 f_transp_cap = 0.05
21 f_integ = 0.06
22 alpha_manut = 0.05
23 f_lic = 0.02
24 f_transp_op = 0.02
25
26 T_kWh = 0.90
27 H_year = 8760
28
29 # Potencias (kW)
30 p_RU = 0.2
31 p_DU = 0.5
32 p_CU = 0.5
33 p_RIC = 0.5
34 p_orch_kW = 0.5
35 p_switch_kW = 0.2
36 p_gnss_kW = 0.05
37
38
39 # FUN AO DE CALCULO

```

```

40
41
42 def compute_tco(name, C_equip, power_kW, N_tech):
43     # CAPEX components
44     C_inst = f_inst * C_equip
45     C_infra = f_infra * C_equip
46     C_transp_cap_comp = f_transp_cap * C_equip
47     C_integ_comp = f_integ * C_equip
48
49     CAPEX = C_equip + C_inst + C_infra + C_transp_cap_comp +
        C_integ_comp
50
51     # OPEX components
52     E_year = power_kW * H_year
53     C_energy = E_year * T_kWh
54
55     C_manut = alpha_manut * C_equip
56     C_lic = f_lic * C_equip
57     C_transp_op_comp = f_transp_op * C_equip
58     C_pessoal = N_tech * 80000
59
60     OPEX = C_energy + C_manut + C_lic + C_transp_op_comp +
        C_pessoal
61
62     TC05 = CAPEX + 5 * OPEX
63
64     return {
65         "Cen rio": name,
66         "CAPEX_□[R$]": round(CAPEX, 2),
67         "OPEX_□anual_□[R$/ano]": round(OPEX, 2),
68         "TCO_□(5_□anos)_□[R$]": round(TC05, 2)
69     }
70
71
72 # CENARIO 1      MACRO DISTRIBUIDO
73
74 N_site = 30
75 C_equip_1 = N_site * (P_RU_out + P_DU + P_CU)
76 power_1 = N_site * (p_RU + p_DU + p_CU) # 0.2 + 0.5 + 0.5 = 1.2
    kW por site
77 N_tech_1 = 10
78

```



```

79 res1 = compute_tco("Macro_Distribuido(30_sites)", C_equip_1,
    power_1, N_tech_1)
80
81
82 # CENARIO 2      MACRO CENTRALIZADO
83
84 N_RU = 8
85 N_DU = 2
86 N_CU = 1
87 N_RIC = 1
88 N_orch = 1
89 N_switch = 1
90 N_gnss = 1
91 N_tech_2 = 5
92
93 # Pooling DU+CU
94 phi_pool = 0.6
95
96 C_DU_CU_pool = phi_pool * (N_DU * P_DU + N_CU * P_CU)
97
98 C_equip_2 = (
99     N_RU * P_RU_out +
100     C_DU_CU_pool +
101     N_RIC * P_RIC +
102     N_orch * P_orch +
103     N_switch * P_switch +
104     N_gnss * P_gnss
105 )
106
107 power_2 = (
108     N_RU * p_RU +
109     N_DU * p_DU +
110     N_CU * p_CU +
111     N_RIC * p_RIC +
112     N_orch * p_orch_kW +
113     N_switch * p_switch_kW +
114     N_gnss * p_gnss_kW
115 )
116
117 res2 = compute_tco("Macro_Centralizado(8_RU)", C_equip_2,
    power_2, N_tech_2)
118

```

```
119
120 # CENARIO 3      INDOOR HOSPITAL (5 RU)
121
122 N_RU = 5
123 N_DU = 1
124 N_CU = 1
125 N_orch = 1
126 N_switch = 1
127 N_tech_3 = 2
128
129 C_equip_3 = (
130     N_RU * P_RU_in +
131     N_DU * P_DU +
132     N_CU * P_CU +
133     N_orch * P_orch +
134     N_switch * P_switch
135 )
136
137 power_3 = (
138     N_RU * p_RU +
139     N_DU * p_DU +
140     N_CU * p_CU +
141     N_orch * p_orch_kW +
142     N_switch * p_switch_kW
143 )
144
145 res3 = compute_tco("Indoor_Hospital_(5_RU)", C_equip_3, power_3,
146     N_tech_3)
147
148 # CENARIO 4      SMALL CELL (10 RUs)
149
150 N_RU = 10
151 N_DU = 2
152 N_CU = 1
153 N_tech_4 = 6
154
155 C_equip_4 = (
156     N_RU * P_RU_out +
157     N_DU * P_DU +
158     N_CU * P_CU
159 )
```

```
160
161 power_4 = (
162     N_RU * p_RU +
163     N_DU * p_DU +
164     N_CU * p_CU
165 )
166
167 res4 = compute_tco("Outdoor_Small_Cell_(10_RU)", C_equip_4,
168     power_4, N_tech_4)
169
170 # RESULTADOS FINAIS
171
172 df = pd.DataFrame([res1, res2, res3, res4])
173 print(df)
174
175
176 import matplotlib.pyplot as plt
177
178 # GRAFICO      TCO (5 anos) por cenario
179
180 plt.figure(figsize=(9,5))
181 plt.bar(df["Cen rio"], df["TCO_(5_anos)_[R$]"])
182 plt.xticks(rotation=20)
183 plt.ylabel("TCO_(5_anos)_[R$]")
184 plt.title("Compara o do TCO_(5_anos) entre os Cen rios")
185 plt.tight_layout()
186 plt.show()
187
188
189 import numpy as np
190 import matplotlib.pyplot as plt
191
192
193 # TCO ACUMULADO AO LONGO DO TEMPO (5 ANOS)
194
195 anos = np.arange(0, 6) # 0 a 5 anos
196
197 def curva_tco(res):
198     CAPEX = res["CAPEX_[R$]"]
199     OPEX_anual = res["OPEX_anual_[R$/ano]"]
200
```

```

201     # custo acumulado: CAPEX no ano 0 + OPEX acumulado ao longo
        dos anos
202     return CAPEX + OPEX_anual * anos
203
204 plt.figure(figsize=(10,6))
205
206 plt.plot(anos, curva_tco(res1), marker='o', label=res1["Cen rio "
        ])
207 plt.plot(anos, curva_tco(res2), marker='o', label=res2["Cen rio "
        ])
208 plt.plot(anos, curva_tco(res3), marker='o', label=res3["Cen rio "
        ])
209 plt.plot(anos, curva_tco(res4), marker='o', label=res4["Cen rio "
        ])
210
211 plt.xlabel("Ano")
212 plt.ylabel("Custo_acumulado_(R$)")
213 plt.title("Evolu    o _do_TCO_acumulado_ao_longo_de_5_anos")
214 plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.6)
215 plt.legend()
216 plt.tight_layout()
217 plt.show()
218
219
220 plt.figure(figsize=(9,5))
221 plt.plot(df["Cen rio"], df["CAPEX_(R$)"], marker='o')
222 plt.xticks(rotation=20)
223 plt.ylabel("CAPEX_(R$)")
224 plt.title("Compara    o _do_CAPEX_entre_os_Cen_rios")
225 plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
226 plt.tight_layout()
227 plt.show()
228
229
230
231 plt.figure(figsize=(9,5))
232 plt.plot(df["Cen rio"], df["OPEX_anual_(R$/ano)"], marker='o')
233 plt.xticks(rotation=20)
234 plt.ylabel("OPEX_Anual_(R$/ano)")
235 plt.title("Compara    o _do_OPEX_Anual_entre_os_Cen_rios")
236 plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
237 plt.tight_layout()

```

```
238 plt.show()
```
