



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

RONALDO MEDEIROS PESSOA FILHO

**ANÁLISE DE UMA METODOLOGIA MCDA BASEADA EM MODELOS
PARA FATIAMENTO DE REDES 5G**

CAMPINA GRANDE - PB

2021

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Análise de uma metodologia MCDA baseada em
modelos para Fatiamento de Redes 5G

Ronaldo Medeiros Pessoa Filho

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande -
Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau
de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Reinaldo César de Moraes Gomes

(Orientador)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Ronaldo Medeiros Pessoa Filho, 14/10/2021

P475a

Pessoa Filho, Ronaldo Medeiros.

Análise de uma metodologia MCDA baseada em modelos para Fatiamento de Redes 5G / Ronaldo Medeiros Pessoa Filho. – Campina Grande, 2022.

79 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2021.

“Orientação: Prof. Dr. Reinaldo César de Moraes Gomes”.

Referências.

1. Fatiamento de Rede 5G. 2. VNE. 3. Teoria de Redes Complexas.
4. MCDA. I. Gomes, Reinaldo César de Moraes. II. Título.

CDU 004.7(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO CIENCIAS DA COMPUTACAO
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

RONALDO MEDEIROS PESSOA FILHO

ANÁLISE DE UMA METODOLOGIA MCDA BASEADA EM MODELOS PARA FATIAMENTO DE REDES 5G

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada em: 29/10/2021

Prof. Dr. REINALDO CÉZAR DE MORAIS GOMES, Orientador, UFG

Prof. Dr. JOSÉ ANTÃO BELTRÃO MOURA, UFG

Prof. Dr. ANDERSON FABIANO BATISTA FERREIRA DA COSTA, Examinador Externo, IFPB



Documento assinado eletronicamente por **REINALDO CEZAR DE MORAIS GOMES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2021, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Fabiano Batista Ferreira da Costa, Usuário Externo**, em 09/12/2021, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE ANTAO BELTRAO MOURA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 13/12/2021, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufmg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1891485** e o código CRC **07E76531**.

Referência: Processo nº 23096.068165/2021-03

SEI nº 1891485



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO CIENCIAS DA COMPUTACAO
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA Nº 014/2021 (DISSERTAÇÃO Nº 694)

Aos vinte e nove (29) dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e um (2021), às nove horas (09:00), de forma remota, através da plataforma virtual do GOOGLE MEET, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores REINALDO CÉZAR DE MORAIS GOMES, Dr., UFCG, Orientador(a), funcionando neste ato como Presidente, JOSÉ ANTÃO BELTRÃO MOURA, Ph.D, UFCG, ANDERSON FABIANO BATISTA FERREIRA DA COSTA, Dr., IFPB. Constituída a mencionada Comissão Examinadora pela Portaria Nº 028/2021 do Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, tendo em vista a deliberação do Colegiado do Curso, tomada em reunião de 18 de Outubro de 2021 e com fundamento no Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, juntamente com o Sr(a) RONALDO MEDEIROS PESSOA FILHO, candidato(a) ao grau de MESTRE em Ciência da Computação, presentes ainda professores e alunos do referido centro e demais presentes. Abertos os trabalhos, o(a) Senhor(a) Presidente da Comissão Examinadora anunciou que a reunião tinha por finalidade a apresentação e julgamento da dissertação "ANÁLISE DE UMA METODOLOGIA MCDA BASEADA EM MODELOS PARA FATIAMENTO DE REDES 5G", elaborada pelo(a) candidato(a) acima designado, sob a orientação do(s) Professor(es) REINALDO CÉZAR DE MORAIS GOMES, com o objetivo de atender as exigências do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. A seguir, concedeu a palavra ao (a) candidato(a), o qual, após salientar a importância do assunto desenvolvido, defendeu o conteúdo da dissertação. Concluída a exposição e defesa do(a) candidato(a), passou cada membro da Comissão Examinadora a arguir o(a) mestrando(a) sobre os vários aspectos que constituíram o campo de estudo tratado na referida dissertação. Terminados os trabalhos de arguição, o(a) Senhor(a) Presidente da Comissão Examinadora determinou a suspensão da sessão pelo tempo necessário ao julgamento da dissertação. Reunidos, em caráter secreto, no mesmo recinto, os membros da Comissão Examinadora passaram à apreciação da dissertação. Reaberta a sessão, o(a) Presidente da Comissão Examinadora anunciou o resultado do julgamento, tendo assim, o(a) candidato(a) obtido o Conceito APROVADO. A seguir, foi encerrada a sessão e lavrada a presente ata, que vai assinada por mim, Lyana Silva e Cavalcante Nascimento, pelos membros da Comissão Examinadora e pelo(a) candidato(a). Campina Grande, 29 de Outubro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **LYANA SILVA E CAVALCANTE NASCIMENTO**, **ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 29/10/2021, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Fabiano Batista Ferreira da Costa, Usuário Externo**, em 29/10/2021, às 19:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **REINALDO CEZAR DE MORAIS GOMES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/10/2021, às 19:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Medeiros Pessoa Filho, Usuário Externo**, em 31/10/2021, às 21:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE ANTAO BELTRAO MOURA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/11/2021, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1891483** e o código CRC **2BDF47F**.

Resumo

Diversos desafios surgem ao planejarmos a implantação do 5G, como a necessidade de atender a mercados verticais consolidados e emergentes e seus requisitos associados, o que demanda novas soluções para permitir a evolução da infraestrutura de rede através de uma visão orientada a serviços e propiciar maior personalização e flexibilidade na sua implantação e execução. Com o objetivo de tratar estas questões surge o conceito de Fatiamento de Rede, que tem como base Redes Definidas por Software (SDN), Virtualização de Funções de Rede (NFV) e Computação na Borda de Múltiplo Acesso (MEC) para permitir a criação de múltiplas redes virtuais fim-a-fim (E2E) sobre uma mesma infraestrutura de recursos totalmente ou parcialmente compartilhados.

Essas redes virtuais podem usar diversos modelos de alocação de recursos, o que levanta diversas perspectivas e questões que precisam ser analisadas no processo de implantação das fatias de rede, uma vez que existe uma grande variedade de mapeamentos possíveis entre os recursos da infraestrutura do provedor de rede e as características de serviço e requisitos de um cliente. Essa variedade de mapeamentos pode causar uma sobrecarga de informação que o provedor de rede precisa tratar para propor alternativas apropriadas de fatias de rede para um certo serviço ou caso de negócio.

Neste trabalho, temos como objetivo analisar e ampliar uma metodologia existente que utiliza técnicas de tomada de decisão de múltiplos critérios (MCDA) para tratar do problema da sobrecarga de informação na criação de instâncias de fatia de rede em uma infraestrutura de recursos compartilhados e também buscamos analisar a adequabilidade das instâncias de fatia de rede criadas seguindo esta metodologia aos principais conjuntos de casos de uso definidos para o 5G.

Palavras chave: Fatiamento de Rede, 5G, VNE, Teoria de Redes Complexas, MCDA

Abstract

Several challenges arise when planning the 5G deployment, such as the need to meet consolidated and emerging vertical markets and their associated requirements, which demand new solutions to enable the evolution of the network infrastructure through a service-oriented vision and provide greater customization and flexibility in its implementation and execution. To address these issues, the concept of Network Slicing arises, which is based on Software Defined Networks (SDN), Network Function Virtualization (NFV), and Multiple Access Edge Computing (MEC) to allow the creation of multiple end-to-end (E2E) virtual networks over the same infrastructure of fully or partially shared resources.

These virtual networks can use different resource allocation models, which raises several perspectives and questions that need to be analyzed in the process of deploying the network slices since there is a wide variety of possible mappings between the resources of the infrastructure provider's infrastructure, network and the service characteristics and requirements of a customer. This variety of mappings can cause an information overload that the network provider needs to handle to propose appropriate network slice alternatives for a certain service or business case.

In this work, we aim to analyze and extend an existing methodology that uses multiple criteria decision-making (MCDA) techniques to address the problem of information overload in creating network slice instances in a shared resources infrastructure and we also seek to analyze the suitability of network slice instances created following this methodology to the main sets of use cases defined for 5G.

Keywords: Network Slicing, 5G, VNE, Complex Network Theory, MCDA

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Novamente ao professor Reinaldo César de Moraes Gomes pela imensa ajuda, paciência, orientação, apoio e confiança, o qual sempre mantinha o bom humor, mesmo quando eu não era capaz de cumprir com as expectativas. Aos professores Antão Moura e Anderson Batista pelas observações e contribuições de grande valor feitas durante a qualificação deste estudo. Aos demais professores do programa pelo incentivo e pelos momentos enriquecedores que tivemos durante as disciplinas e a todos os que me apoiaram e que estiveram ao meu lado durante essa jornada. Para finalizar, gostaria de agradecer ao apoio financeiro da CAPES e do povo brasileiro.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Definição do Problema	2
1.3	Relevância	4
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo Geral	5
1.4.2	Objetivos Específicos	6
1.5	Contribuição	6
1.6	Organização do Trabalho	7
2	Fundamentação Teórica	9
2.1	5G	9
2.1.1	Principais Conjuntos de Casos de Uso	10
2.2	Incorporação de Rede Virtual (VNE)	12
2.2.1	Algoritmo RW-BFS	16
2.3	Teoria de Redes Complexas (CN)	17
2.3.1	Métricas Topológicas	19
2.4	Análise de Decisão de Múltiplos Critérios (MCDA)	21
2.4.1	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)	22
2.4.2	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)	23
2.5	Trabalhos Relacionados	23

3	Avaliação Experimental	28
3.1	Metodologia	28
3.1.1	Modelo de Infraestrutura	29
3.1.2	Projeto de Fatia de Rede	30
3.2	Arquitetura Experimental	31
3.2.1	Cenários de Avaliação	35
4	Discussão dos Resultados	37
4.1	Cenário 1	37
4.1.1	Modelo 1A <i>grid-waxman</i>	38
4.1.2	Modelo 1B <i>redge-grid</i>	46
4.1.3	Modelo 1C <i>waxman-redge</i>	53
4.1.4	Aspectos Gerais do Cenário 1	55
4.2	Cenário 2	59
4.2.1	Modelo 2A <i>grid-waxman</i>	60
4.2.2	Modelo 2B <i>redge-grid</i>	61
4.2.3	Modelo 2C <i>waxman-redge</i>	63
4.2.4	Aspectos Gerais do Cenário 2	64
4.3	Cenário 3	66
4.3.1	Aspectos Gerais do Cenário 3	67
5	Considerações Finais	70
5.1	Lições Aprendidas	71
5.2	Trabalhos Futuros	72

Lista de Símbolos

Modelo de Infraestrutura

N_I - Número de Nós do Modelo de Infraestrutura

C_I - Intervalo de Recursos Computacionais do Modelo de Infraestrutura (CPU Units)

B_I - Intervalo de Taxa de Transferência do Modelo de Infraestrutura (BW Units)

Projetos de Fatia de Rede

N_S - Número de Nós dos Projetos de Fatia de Rede

C_S - Intervalo de Recursos Computacionais dos Projetos de Fatia de Rede (CPU Units)

B_S - Intervalo de Taxa de Transferência dos Projetos de Fatia de Rede (BW Units)

Mapeamentos

Q - Número de Projetos de Fatias de Rede a serem mapeados em cada Cenário

Vetores de Critérios

ITM - Intermediação

VTL - Vitalidade

ACB - Acessibilidade

CM - Capacidade Mínima (CPU Units)

CT - Capacidade Total (CPU Units)

TTM - Taxa de Transferência Mínima (BW Units)

TTT - Taxa de Transferência Total (BW Units)

SN - Sobrecarga de Nós

SE - Sobrecarga de Enlaces

Análise de Decisão de Múltiplos Critérios

ϕ - Fluxo de Preferência Líquida

Lista de Acrônimos

5G - Quinta Geração de Internet Móvel

4G - Quarta Geração de Internet Móvel

3G - Terceira Geração de Internet Móvel

IoT - *Internet of Things*

CAPEX - *Capital Expenditure*

OPEX - *Operational Expenditure*

RoI - *Return on Investment*

E2E - *End-to-End*

SDN - *Software-defined Networking*

NFV - *Network Function Virtualization*

MEC - *Multi-access Edge Computing*

NGMN - *Next Generation Mobile Networks*

ONF - *Open Network Foundation*

IETF - *Internet Engineering Task Force*

3GPP - *3rd Generation Partnership Project*

ITU-T - *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*

GSMA - *Global System for Mobile Communications Association*

VNE - *Virtual Network Embedding*

eMBB - *enhanced Mobile Broadband*

uRLLC - *ultra Reliable Low Latency Communications*

mMTC - *massive Machine Type Communications*

MCDA - *Multiple-Criteria Decision Analysis*

LTE - *Long Term Evolution*

ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*

VN - *Virtual Network*

SN - *Substrate Network*

VNoM - *Virtual Node Mapping*

VLiM - *Virtual Link Mapping*

ILP - *Integer Linear Programming*

VNR - *Virtual Network Request*

RW - *Markov Random Walk*

BFS - *Breadth-first Search*

VANETs - *Vehicular Ad Hoc Networks*

DSS - *Decision Support System*

VNF - *Virtual Network Function*

QoS - *Quality of Service*

NSaaS - *Network Slicing as a Service*

SLA - *Service Level Agreements*

CPU - *Central Processing Unit*

XML - *Extensible Markup Language*

Lista de Figuras

1.1	Representação do Fatiamento de Rede (<i>Network Slicing</i>) para os principais conjuntos de caso de uso do 5G em uma mesma infraestrutura de recursos compartilhados, retirado de [25].	3
1.2	Representação dos principais componentes lógicos de uma arquitetura de Fatiamento de Rede 5G, apresentando fatias de rede para diferentes casos de uso, retirado de [33].	5
2.1	Comparativo dos principais conjuntos de caso de uso do 5G sob a óptica de algumas métricas de serviço, inspirado por uma ilustração similar presente em [24].	11
2.2	Modelo lógico de Virtualização de Rede com a presença de redes virtuais mapeadas em uma mesma rede de substrato, retirado de [22].	13
2.3	Processo de mapeamento de redes virtuais representadas na forma de VNRs em uma mesma rede de substrato de acordo com seus requisitos de funcionamento e a capacidade de provisionamento da infraestrutura, retirado de [7].	16
3.1	Exemplo de Modelo de Infraestrutura na forma topologia <i>Grid</i> com $N_I = 3$, $C_I = [0, 500]$ e $B_I = [0, 1000]$ onde estão representadas as capacidades de provisionamento computacional (CPU_C) e taxa de transferência (BW_C) como atributos dos nós (n) e enlaces de infraestrutura (pl) respectivamente.	32

3.2	Exemplo de modelo de Projeto de Fatia de Rede na forma da topologia <i>Random Edge Generator</i> com $N_S = 3$, $C_S = [0, 25]$ e $B_S = [0, 50]$ onde estão representadas as VNFs e os enlaces (vl) que realizam a sua interconexão com suas respectivas demandas de recursos computacionais (CPU_D) e de rede (BW_D).	33
4.1	Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTL) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT) utilizando as configurações do Modelo 1A.	38
4.2	Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 1A.	40
4.3	Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1A.	41
4.4	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1A.	41
4.5	Distribuições da Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) com foco em diferentes atributos em relação aos <i>rankings</i> gerados pelo algoritmo TOPSIS considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1A.	44
4.6	Distribuições da Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) com foco em diferentes atributos em relação aos <i>rankings</i> gerados pelo algoritmo PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1A.	46
4.7	Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTM) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT), utilizando as configurações do Modelo 1B.	47

4.8	Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 1B.	48
4.9	Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1B.	49
4.10	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1B.	50
4.11	Distribuição da Capacidade Total (CT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos <i>rankings</i> gerados pelos algoritmo TOPSIS e PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1B.	51
4.12	Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTM) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT), utilizando as configurações do Modelo 1C.	53
4.13	Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação ao Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1C.	54
4.14	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1C.	55
4.15	Distribuição da Taxa de Transferência Total (TTT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos <i>rankings</i> gerados pelo algoritmo TOPSIS considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1C.	57
4.16	Mediana dos atributos topológicos do Cenário 1.	58
4.17	Mediana das capacidades computacionais e taxas de transferência do Cenário 1.	59
4.18	Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 1.	60

4.19	Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 2A.	61
4.20	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2A.	62
4.21	Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2B.	62
4.22	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2B.	63
4.23	Mapa de calor do coeficiente de correlação de <i>Spearman</i> entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2C.	64
4.24	Distribuição da Taxa de Transferência Total (TTT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos <i>rankings</i> gerados pelo algoritmo PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 2C.	64
4.25	Mediana dos atributos topológicos do Cenário 2.	65
4.26	Mediana das capacidades e taxas de transferência do Cenário 2.	66
4.27	Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 2.	67
4.28	Mediana dos atributos topológicos do Cenário 3.	68
4.29	Mediana das capacidades e taxas de transferência do Cenário 3.	68
4.30	Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 3.	69

Lista de Tabelas

2.1	Principais aspectos considerados na análise dos trabalhos relacionados a esta pesquisa.	27
3.1	Características dos diferentes Cenários definidos para realização dos experimentos.	35
4.1	<i>Ranking</i> gerado pelos algoritmos MCDA TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios utilizando as configurações do Modelo 1A.	43
4.2	<i>Ranking</i> gerado pelos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios e utilizando as configurações do Modelo 1B.	52
4.3	<i>Ranking</i> gerado pelos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios e utilizando as configurações do Modelo 1C.	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Como consequência de uma sociedade cada vez mais conectada vivenciamos um enorme crescimento da utilização de dispositivos móveis. A presença destes dispositivos se torna a cada dia mais pervasiva, totalizando cerca de 12.3 bilhões de dispositivos móveis conectados, ultrapassando até a projeção da população mundial para o ano de 2022 [6]. Para lidar com esse cenário e as inúmeras novas possibilidades de mercado e serviços que advém dele, é necessário dar o próximo passo na evolução das redes móveis.

A Quinta Geração de Internet Móvel (5G) apresenta uma série de novos desafios envolvendo as formas de implementação de infraestruturas de redes móveis em relação à geração anterior (4G). Além de apresentar uma melhoria da capacidade (cobertura, volume de tráfego, número de usuários, taxa de transferência e latência) essa nova geração carrega consigo uma mudança de paradigma na forma como os serviços são estruturados, implantados e operados [6][1].

As redes móveis 5G buscam sair do modelo “*one-fit-all*” predominante nas gerações anteriores, apresentando uma abordagem mais orientada aos serviços, com foco em flexibilidade, velocidade de provisionamento e operação distribuída [1][33]. É necessário atender a uma grande variedade de casos de uso e diferentes demandas de serviço simultaneamente, mesmo no contexto onde estes requisitos são conflitantes e estão em constante evolução [33][41].

Melhorias nas redes de acesso e núcleo são de fundamental importância para implemen-

tação efetiva do 5G, porém modelos de arquitetura baseados em sobre-provisionamento estão sendo questionados em relação a sua sustentabilidade em tratar de um dos principais focos do 5G: os mercados verticais. Os mercados verticais são caracterizados por uma demanda de serviços com requisitos bastante específicos e diferentes peculiaridades de funcionamento, como por exemplo: Telemedicina, Veículos Autônomos e Internet das Coisas (IoT) [40][1].

Diante desses desafios, há a necessidade de uma reavaliação das arquiteturas de redes móveis, com o objetivo de atender de forma sustentável os requisitos desta próxima geração e das futuras. Múltiplos Inquilinos (*Multitenancy*) e o compartilhamento de recursos de rede (*Network Sharing*) são conceitos fundamentais para redução das despesas de capital (CAPEX), despesas operacionais (OPEX) e no aumento do Retorno de Investimento (RoI) e terão um papel central nessa mudança de paradigma [41][40].

1.2 Definição do Problema

Para lidar com os desafios propostos pelo 5G surge o conceito de Fatiamento de Rede (*Network Slicing*), que consiste na criação de múltiplas redes virtuais fim-a-fim (E2E) sobre uma mesma infraestrutura de recursos, que podem ser parcialmente ou totalmente compartilhados, customizadas para atender a diferentes demandas e casos de uso. No contexto de 5G, o fatiamento de rede é um dos principais viabilizadores na implantação e suporte de mercados verticais e provedores de aplicações, permitindo uma maior aproximação entre as aplicações e a rede [40][1]. A Figura 1.1 apresenta uma visão da arquitetura física do fatiamento de rede.

O fatiamento de redes permite isolamento e gerência própria para os requisitantes, mesmo no caso de diferentes domínios administrativos, causando a impressão que o usuário está em sua própria arquitetura dedicada [6][40]. Para tanto, Redes Definidas por Software (SDN), Virtualização de Funções de Rede (NFV) e Computação na Borda de Múltiplo Acesso (MEC) são as principais tecnologias usadas para viabilizar esse novo paradigma [25] [33].

Considerado uma das espinhas dorsais do 5G, o fatiamento de rede tem ganhado grande visibilidade na indústria e academia [40] [33], porém ainda há muitas perspectivas e questões a serem analisadas para a sua realização efetiva, dentre elas está o fato que essas redes

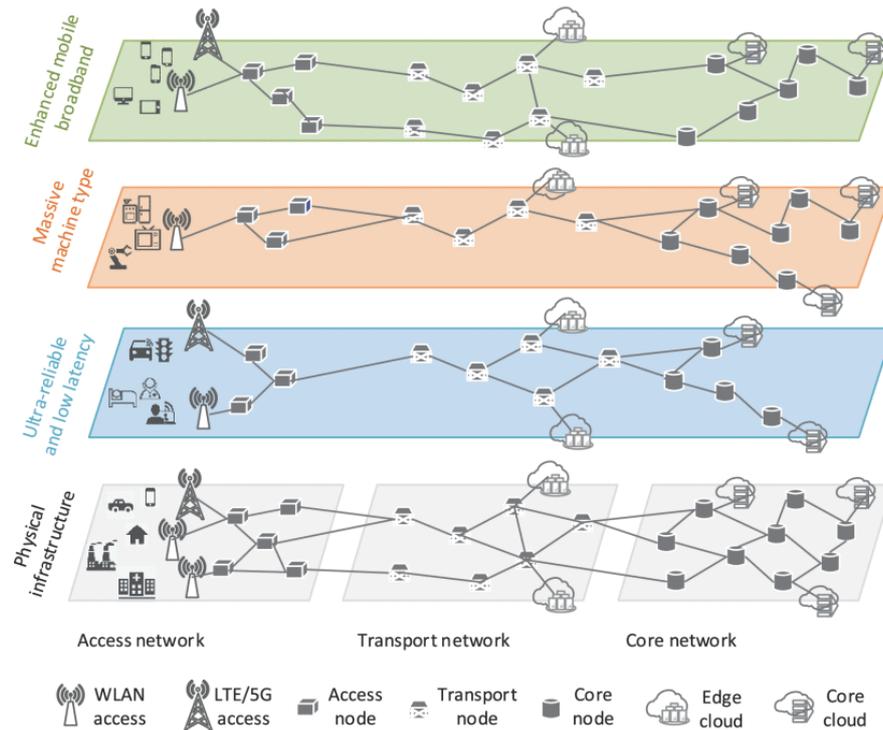


Figura 1.1: Representação do Fatiamento de Rede (*Network Slicing*) para os principais conjuntos de caso de uso do 5G em uma mesma infraestrutura de recursos compartilhados, retirado de [25].

virtuais podem utilizar diversos modelos de alocação de recursos, o que por consequência leva a existência de uma grande variedade de maneiras possíveis de realizar instanciações de fatias de rede com base no mapeamento dos recursos disponíveis da infraestrutura e a adequabilidade desses mapeamentos em relação aos requisitos de serviço propostos por um requisitante [40].

Essa grande variedade de mapeamentos leva a uma explosão combinacional de estados possíveis do sistema que podem ser implementados no processo de alocação de um conjunto de fatias de rede com características customizadas. O provedor de serviço de rede precisa administrar e analisar essa infinidade de estados em busca de uma configuração do sistema que leve a uma otimização na utilização de recursos, na velocidade de operação e na conformidade com os requisitos de serviço, o que pode causar uma sobrecarga de informação no provedor de serviço de rede [40].

Uma sobrecarga de informação é caracterizada por um cenário onde uma entidade avaliadora não consegue avaliar todo o conjunto de alternativas possíveis que podem ser im-

plementadas, nem assimilar ou atuar sobre a informação gerada por essas alternativas [40]. Desta forma é importante fazer uso de técnicas que possam analisar o conjunto de possíveis instanciações de fatias de rede, possibilitando uma melhor seleção dos mapeamentos infraestrutura-fatia de acordo com os requisitos estabelecidos e tratando de forma efetiva a sobrecarga de informação.

1.3 Relevância

O fatiamento de rede tem sido alvo de pesquisas por diversos órgãos padronizadores como por exemplo *Next Generation Mobile Networks* (NGMN), *Open Network Foundation* (ONF), *Internet Engineering Task Force* (IETF), *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) [40][1].

Um relatório publicado pela *Global System for Mobile Communications Association* (GSMA) afirma que o fatiamento de rede pode levar a uma oportunidade de mercado de US \$ 300 bilhões até 2025 na era do 5G, porém como atender de forma eficiente e sustentável essa grande variedade de requisitos, serviços e mercados verticais é uma questão a ser trabalhada [3][6]. A partir da utilização de fatias de rede é possível a criação de um ecossistema flexível de partes interessadas, onde há integração e a inovação técnica e empresarial com o objetivo de integrar recursos físicos, lógicos e de nuvem em um ambiente de rede aberto, programável, multi-inquilinos orientado ao software [1].

O fatiamento de rede permite uma oportunidade para mercados verticais, provedores de aplicações e serviços terceirizados que não apresentam a sua própria infraestrutura de rede, dessa forma oferecendo recursos de rádio, rede e nuvem customizados e diferenciação de serviço adequada aos requisitos de funcionamento desses setores [1][6]. Como consequência da concepção dessa nova forma de estruturação de redes podemos observar o sistema sobre duas perspectivas, sendo uma delas uma visão física da rede, onde há uma grande diferença nas entidades alocadas a diferentes fatias de rede, embora estas façam parte de uma mesma infraestrutura de recursos compartilhados, as entidades são atribuídas de acordo com as características e requisitos de cada fatia, representado na Figura 1.1.

A outra perspectiva possível é uma visão lógica do sistema, onde há um foco nos prin-

principais elementos lógicos presentes e como eles se relacionam nos diferentes níveis de separação do sistema, como demonstrado na Figura 1.2. Dessa forma podemos destacar o fatiamento de rede como tendo um papel fundamental na implantação efetiva do 5G, sendo um dos principais mecanismos para lidar com os novos requisitos e demandas de serviço advindos dessa nova geração e de gerações futuras. A agilidade e flexibilidade apresentadas por esse novo paradigma entram em contraste com o grau de complexidade adicionado ao gerenciamento de rede. Impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de novos mecanismos de gerenciamento automático, orquestração e ciclo de vida, com uma crucial relevância na otimização da utilização de recursos em infraestruturas 5G [33].

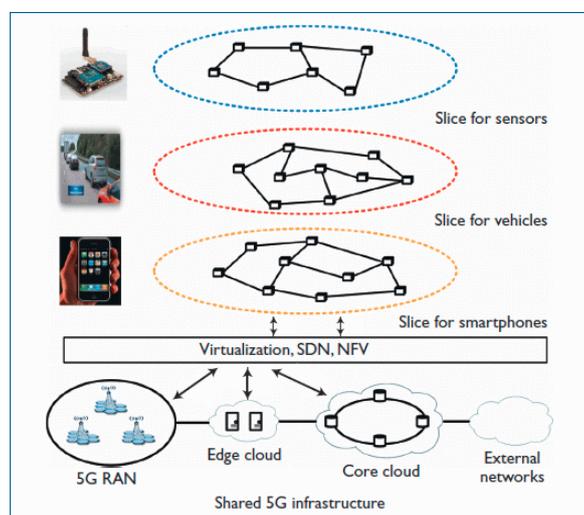


Figura 1.2: Representação dos principais componentes lógicos de uma arquitetura de Fatiamento de Rede 5G, apresentando fatias de rede para diferentes casos de uso, retirado de [33].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo expandir e detalhar a análise do problema da sobrecarga de informação na implementação de fatias de rede em uma infraestrutura de recursos compartilhados, tendo como base uma metodologia existente na literatura [40][45]. A partir de um modelo que representa a infraestrutura física do provedor de serviço de rede e de um outro modelo que retrata as características de fatias de rede requeridas por um cliente, realizare-

mos mapeamentos entre esses modelos obedecendo às restrições de recursos do modelo de infraestrutura e os requisitos necessários para o funcionamento das fatias de rede por meio de um algoritmo de Incorporação de Rede Virtual (VNE).

Posteriormente, aplicaremos técnicas de Análise de Decisão de Múltiplos Critérios (MCDA) para analisar as instâncias de fatia de rede criadas e observar a sua adequabilidade em relação aos principais casos de uso do 5G, sendo eles *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *ultra Reliable Low Latency Communications* (uRLLC) e *massive Machine Type Communications* (mMTC) [44] [25]. Para realização do objetivo proposto definiremos um design experimental que permita a comparação e classificação dessas instâncias de fatia de rede mapeadas pelo algoritmo VNE levando em conta atributos topológicos e tecnológicos das instâncias criadas em diferentes configurações topológicas e tamanhos de fatia de rede.

1.4.2 Objetivos Específicos

No contexto do objetivo geral especificado neste trabalho, propomos os seguintes objetivos específicos:

1. Observar e comparar como a utilização de diferentes topologias tanto no modelo de infraestrutura como nos projetos de fatia de rede afeta as características do conjunto das instâncias de fatia de rede criadas e como essa mudança afeta a aplicação de técnicas MCDA.
2. Investigar a compatibilidade e adequabilidade das instâncias de fatia de rede criadas nos diferentes cenários e topologias em relação aos principais conjuntos de casos de uso do 5G a partir dos atributos definidos nos vetores de critérios.
3. Observar o efeito da utilização de diferentes algoritmos MCDA na análise das instâncias de fatia de rede computadas por meio das diferenças nos *rankings* gerados por cada algoritmo.

1.5 Contribuição

Neste trabalho realizamos uma expansão da metodologia proposta por Rosa e Rothemberg [40] realizando uma avaliação experimental da aplicação de técnicas de MCDA em um mo-

delo de implementação de fatiamento de rede 5G. Foram utilizados diferentes modelos topológicos de rede para representar tanto a infraestrutura física como as fatias de rede, onde o mapeamento entre essas entidades é criado por um algoritmo VNE, de forma que os projetos de fatia de rede são mapeados simultaneamente no mesmo modelo de infraestrutura com recursos compartilhados. Diferente de Rosa e Rothemberg utilizamos combinações de três topologias de rede diferentes (*Grid*, *Random Edge Generator* e *Waxman*) no processo de avaliação das instâncias de fatia de rede criadas, assim como diferentes tamanhos de projetos de fatia de rede.

Selecionamos também diferentes atributos para a composição dos vetores de critérios e o algoritmo VNE RW-BFS para realização de mapeamentos simultâneos na infraestrutura. Optamos por uma quantidade menor de atributos nos modelos de infraestrutura e fatia de rede que na abordagem de Rosa e Rothemberg com objetivo de obter uma quantidade maior de mapeamentos viáveis. Consideramos outros fatores importantes na composição dos vetores de critérios, como a sobrecarga de recursos computacionais e de rede. Além do algoritmo MCDA TOPSIS utilizado em Rosa e Rothemberg expandimos a avaliação para considerar também o algoritmo PROMETHEE II e analisamos qualitativamente a aplicabilidade das fatias de rede geradas nos cenários propostos aos principais conjuntos de caso de uso do 5G propostos na literatura.

1.6 Organização do Trabalho

O restante deste trabalho fundamenta e detalha a abordagem proposta para o problema da sobrecarga de informação na implementação de fatias de rede no contexto de redes 5G. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, com destaque para os conceitos fundamentais e tecnologias possibilitadoras da abordagem proposta, presente entre as Seções 2.1 a 2.4. Seguido e uma síntese dos principais trabalhos relacionados e a sua respectiva influência nesta pesquisa na Seção 2.5.

No Capítulo 3 é apresentado a avaliação experimental, mais especificamente na Seção 3.1 estão presentes os principais aspectos metodológicos que foram seguidos. A arquitetura experimental utilizada, ferramentas e os diferentes cenários de experimentação definidos constam na Seção 3.2. Os resultados experimentais e suas características específicas

são apresentados no Capítulo 4 divididos nos diferentes Cenários propostos. O Capítulo 5 apresenta uma análise qualitativa generalizada dos resultados de acordo com os objetivos definidos, concluindo o trabalho e ressaltando os aspectos mais importantes que foram alcançados.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 5G

Motivado pelo sucesso dos sistemas 4G a indústria e a academia estão acreditando no 5G como a principal tecnologia possibilitadora da criação de uma nova geração de aplicações verticais com diferentes requisitos de serviço e particularidades de funcionamento e impulsioná-las para o uso de uma quantidade cada vez maior de usuários. Nesse sentido, o aumento explosivo do consumo de serviços multimídia e a demanda incessante por serviços de alta qualidade vem ocasionando uma mudança fundamental no paradigma de como as infraestruturas de redes são projetadas e administradas, principalmente envolvendo abstração, separação, controle e gerenciamento de serviços [6].

Com o número crescente de novas aplicações além da comunicação pessoal, os dispositivos móveis provavelmente chegarão ao número de bilhões antes da implantação comercial de redes 5G [6]. Nesse contexto, o 5G deve se utilizar da flexibilidade e programabilidade proporcionada por tendências emergentes como fatiamento de rede e virtualização de infraestruturas de rede. Habilitando as operadoras a fornecer serviços diferenciados de redes móveis e a sua unificação com tecnologias de rádio e redes heterogêneas como 3G, *Long Term Evolution* (LTE) e *Wi-Fi* (IEEE 802.11) [1].

A interoperabilidade entre essas tecnologias deve ser eficiente e capaz de dar suporte ao novo sistema de rádio introduzido pelo 5G e também a redes de acesso fixo. É esperado que as conexões 5G gerem cerca de 4.7 vezes mais dados e apresentem 1000 vezes mais a capacidade dos sistemas comerciais 4G, aliado a um aumento significativo nas taxas de

cobertura e uma taxa de dados do usuário entre 10 a 100 vezes maiores que a geração anterior. É necessário providenciar uma economia de energia de cerca de 90% e valores de latência E2E sobre o ar menor que 1 milissegundos [6].

Se torna fundamental não apenas conectar pessoas, mas também conectar e controlar máquinas, objetos e dispositivos, de forma a se tornar uma nova plataforma de inovação providenciando novos serviços, experiências de usuário e conectando novas indústrias. O 5G irá melhorar o serviço e diminuir o custo dos serviços de banda larga móvel disponíveis atualmente nas redes 3G e 4G, ao mesmo tempo que introduz novos tipos de serviços, como o controle crítico de entidades por meio de enlaces ultra confiáveis de baixa latência e a conexão massiva de elementos no contexto de Internet das Coisas (IoT) [37].

2.1.1 Principais Conjuntos de Casos de Uso

O 5G é concebido com o objetivo de suportar uma multitude de serviços e dispositivos. Para isso é necessário se adaptar a uma grande variedade de requisitos envolvendo densidade de tráfego, confiabilidade, densidade de conexões, latência e eficiência energética. É necessário um nível de escalabilidade preparado para suportar sensores com baixa taxa de dados funcionando a 10 Kbps e ao mesmo tempo que temos que providenciar novas experiências imersivas móveis funcionando a múltiplos Gbps [37]. Nesse contexto de alta diversidade de requisitos e características de funcionamento a *International Telecommunication Union* (ITU) identificou três principais famílias de casos de uso do 5G [44], sendo elas:

1. **Enhanced Mobile Broadband (eMBB):** Casos de uso de banda larga móvel centrados no usuário e o seu acesso a dados, multimídia e serviços. Prezando por uma melhoria no desempenho e na experiência do usuário, podendo ser dividido nos seguintes subconjuntos: *Ampla Área de Cobertura (Wide-area Coverage)* e *Pontos de Acesso (Hotspots)*. *Ampla área de cobertura* consiste em uma cobertura uniforme e um nível de mobilidade entre médio e alto, com uma taxa de dados do usuário melhorada, porém menor que em *Pontos de Acesso*, um exemplo interessante são usuários de rede no sistema de transporte público. *Pontos de Acesso* consiste em uma área com alta densidade de usuários, capacidade de tráfego muito alta, baixa mobilidade e uma taxa de dados do usuário maior que ampla área de cobertura, como conexões em grandes

eventos e estádios esportivos.

2. **Ultra-reliable Low Latency Communication (uRLLC):** Também chamado de *Critical Communications* ou *Mission Critical Control*. São casos de uso que possuem requisitos rigorosos de taxa de transferência, latência e disponibilidade e que podem ou não necessitar também de alta mobilidade, como o controle sem fio de processos industriais, cirurgia médica remota, *Smart Grids* e Veículos Autônomos.
3. **Massive Machine Type Communication (mMTC):** Também chamado de *Machine-to-Machine* e *Massive Internet of Things*. Casos de uso caracterizados por um número muito grande de dispositivos conectados, normalmente transmitindo um volume relativamente baixo de dados não sensíveis ao atraso, representado principalmente por IoT e Redes de Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Networks*).

Na Figura 2.1 há uma comparação entre os principais conjuntos de casos de uso do 5G em relação a importância de certos requisitos e características de serviço.

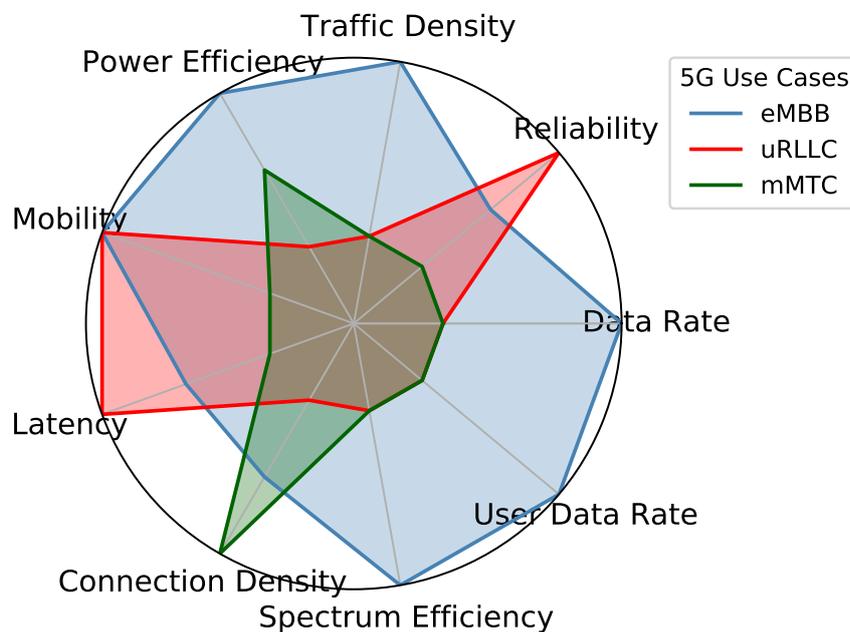


Figura 2.1: Comparativo dos principais conjuntos de caso de uso do 5G sob a óptica de algumas métricas de serviço, inspirado por uma ilustração similar presente em [24].

2.2 Incorporação de Rede Virtual (VNE)

A Virtualização de Redes ou *Network Virtualization* (NV) tem se tornado uma das principais ferramentas para tratar a resistência do modelo atual da Internet em lidar com mudanças fundamentais. Este novo paradigma tem potencial para se tornar um componente inerente nas arquiteturas e tecnologias atuais e futuras que constituirão a Internet [21]. Uma vez que esta se mostrou extremamente resistente à adoção de novas tecnologias e mudanças arquiteturais. Vários fatores são responsáveis por essa "petrificação" da rede onde podemos destacar o princípio de projeto fim-a-fim (E2E) e os interesses diversos e concorrentes dos investidores de capital [27][43].

Diversos mecanismos de virtualização de redes já estão sendo utilizados pela indústria e academia, principalmente em pesquisas envolvendo *Testbeds*, em ambientes de computação em nuvem distribuída e no mercado de telecomunicações, impulsionado principalmente pela ONF e a *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) [21][19]. Quando analisamos os diversos problemas e cenários possíveis no contexto de computação em nuvem distribuída, é possível considerar a virtualização de redes como uma instância particular deste grande cenário, caracterizado por vários níveis de abstração de recursos [19]. A virtualização de redes não só é uma forma de tratar os problemas do modelo atual da Internet, mas também é uma ferramenta flexível e eficaz para implementação de tecnologias inovadoras e disruptivas [27].

Introduzida como uma forma de testar novos protocolos e serviços, a virtualização de redes é um elemento chave em sistemas de computação em nuvem [21]. Constituída de um conjunto de entidades primárias denominadas Redes Virtuais (VN) onde estão presentes elementos ativos e passivos caracterizados por nós e enlaces virtuais respectivamente, instanciadas por meio da virtualização de recursos de uma ou mais redes físicas, denominadas de Redes de Substrato (SN). Dessa forma, é possível gerenciar e customizar redes virtuais de forma flexível e dinâmica, assim como criar diversas redes virtuais com propriedades bastante diversas simultaneamente sobre a mesma rede de substrato com recursos compartilhados [21][31].

Os nós virtuais são interconectados por enlaces virtuais formando uma topologia virtual, de forma análoga o mesmo acontece com a rede de substrato, onde enlaces físicos interco-

nectam nós físicos. As topologias virtuais e físicas podem ser bastante diferentes e é possível que uma rede de substrato não seja necessariamente formada de recursos físicos, podendo ser também constituída de recursos virtuais em um sistema de virtualização aninhada (*nested virtualization* [21]). Uma das questões mais importantes envolvendo virtualização de redes é a utilização eficiente dos recursos da rede de substrato, com o objetivo evitar o congestionamento da infraestrutura do mesmo [27]. A Figura 2.2 apresenta uma representação do modelo lógico de virtualização de redes, com alguns mapeamentos entre nós virtuais e físicos.

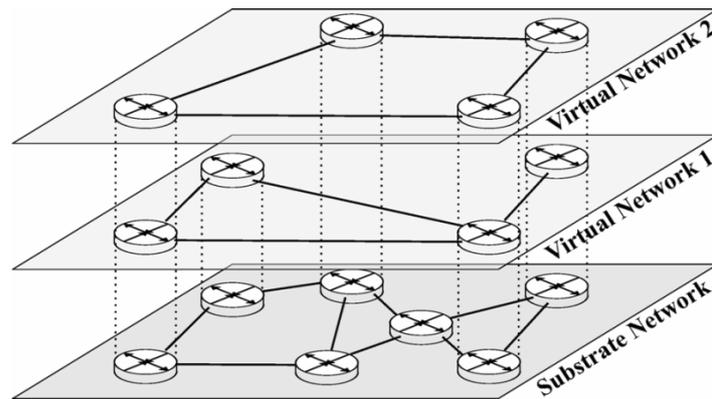


Figura 2.2: Modelo lógico de Virtualização de Rede com a presença de redes virtuais mapeadas em uma mesma rede de substrato, retirado de [22].

A primeira vista, o mapeamento de VNs em um substrato pode ser feito de maneira estática ou dinâmica, onde na sua forma estática os recursos alocados não mudam durante o ciclo de vida da VN. Na forma dinâmica, os recursos vão sendo realocados de acordo com a carga de tráfego, objetivando melhorar a utilização geral da rede. Essa nova forma de lidar com os recursos de rede busca reservar os mesmos com uma maior granularidade e com a duração de longos períodos de tempo, em contraste com o modelo tradicional de redes onde os recursos são reservados fim-a-fim e apenas durante o ciclo de vida de um fluxo de dados [27].

No processo de criação de VNs é necessário selecionar nós do substrato que apresentam CPU, Memória, Disco e outras capacidades de hardware, assim como enlaces com taxa de transferência, latência, taxa de quadros perdidos e entre outras métricas de rede suficientes para caracterizar os requisitos de funcionamento das redes virtuais, ao mesmo tempo que se deseja minimizar a utilização geral de recursos. Em alguns casos também é necessário a alo-

cação de um fator de segurança de recursos para garantir que a instânciação é capaz de lidar com os padrões de tráfego desejado mesmo em circunstâncias anormais de funcionamento e em mecanismos de tolerância a falha [27].

O problema de incorporar redes virtuais em uma rede de substrato é o principal problema de alocação de recursos envolvendo redes virtuais, também chamado de *Virtual Network Embedding* (VNE) ou problema de Incorporação de Rede Virtual [21][27]. Através de uma alocação de recursos otimizada é possível uma automatização da criação e organização de redes virtuais customizadas fim-a-fim com garantias de serviço. A otimização na escolha do mapeamento das VNs pode ser feito de acordo com diferentes objetivos, sendo alguns deles: QoS, lucro econômico, *survivability*, eficiência energética e segurança [21].

Os algoritmos de VNE realizam o mapeamento tanto dos nós como dos enlaces das VNs, podendo ser dividido em dois subproblemas: *Virtual Node Mapping* (VNoM) ou Mapeamento de Nós Virtuais e *Virtual Link Mapping* (VLiM) ou Mapeamento de Enlaces Virtuais. VNoM consiste em mapear os nós virtuais em nós físicos respeitando os requisitos e as capacidades dos nós físicos e virtuais respectivamente. VLiM consiste em alocar caminhos na rede de substrato onde serão instanciados os enlaces virtuais que interconectam os nós virtuais de acordo com os nós de substrato correspondentes aos nós virtuais e os requisitos de rede dos enlaces virtuais [21].

Os algoritmos de VNE realizam o mapeamento tanto dos nós como dos enlaces das VNs, podendo ser dividido em dois subproblemas: *Virtual Node Mapping* (VNoM) ou Mapeamento de Nós Virtuais e *Virtual Link Mapping* (VLiM) ou Mapeamento de Enlaces Virtuais. VNoM consiste em mapear os nós virtuais em nós físicos respeitando os requisitos e as capacidades dos nós físicos e virtuais respectivamente. VLiM consiste em alocar caminhos na rede de substrato onde serão instanciados os enlaces virtuais que interconectam os nós virtuais de acordo com os nós de substrato correspondentes aos nós virtuais e os requisitos de rede dos enlaces virtuais [21].

Além de estático e dinâmico há outras categorias de classificação de abordagens VNE, podendo ser concisas ou redundantes, onde os mapeamentos são executados utilizando exatamente a quantidade necessária de recursos, sem a reserva de recursos adicionais ou redundantes e com a reserva de recursos adicionais para as entidades virtuais no caso de falhas e erros durante a execução respectivamente. Podem também ser centralizados, onde há ape-

nas uma entidade responsável pela realização dos mapeamentos, que por sua vez tem um visão global do sistema, ou distribuído, onde há múltiplas entidades responsáveis pela computação dos mapeamentos e a necessidade de certos níveis de sincronização entre essas entidades. [21] [14].

Em relação às formas de solução do problema podemos classificar em não-coordenada, onde não há coordenação entre a resolução dos subproblemas VNoM e VLiM de forma que a solução é computada em dois estágios independentes, que por sua vez podem até ser resolvidos por entidades diferentes. E coordenada, quando há uma coordenação na resolução dos subproblemas, podendo resolver VNoM para obter resultados que otimizem a solução de VLiM, ou solucionar ambos simultaneamente [21]. Na versão não-coordenada o subproblema VNoM precisa ser resolvido primeiro, visto que serve como entrada para resolução de VLiM. De acordo com o estado atual de pesquisa na literatura, técnicas que utilizam a abordagem coordenada ocasionam em soluções de melhor desempenho [21].

Ainda sobre a solução do problema, quando se trata de estratégias de otimização podemos separar em estratégias exatas, onde se busca-se obter soluções ótimas mesmo que para pequenas instâncias do problema, principalmente por meio de Programação Linear Inteira ou *Integer Linear Programming* (ILP). Com o aumento do tamanho do problema as soluções exatas se tornam cada vez mais inviáveis, logo estratégias de otimização baseadas em heurísticas passam a ter a preferência, visto que o tempo de execução é um fator crucial na escolha da solução, principalmente em cenários de VNE dinâmico e em tempo real [21].

As soluções baseadas em heurísticas buscam obter soluções boas ao mesmo tempo que mantêm um tempo de execução baixo. Porém é possível que uma heurística escolha uma solução ótima local que é bastante distante da solução ótima global. Para evitar isso há abordagens de otimização baseadas em meta-heurísticas que buscam escapar de soluções ótimas locais em um tempo computacional aceitável, de forma a encontrar soluções quase-ótimas de acordo com uma medida de qualidade estabelecida [21].

No processo de execução de algoritmos VNE as redes virtuais são comumente representadas na forma de *Virtual Network Requests* ou Requisições de Rede Virtual (VNRs), que são requisições de mapeamento de rede virtual feitas a um sistema de gerenciamento ou operador de uma rede de substrato. A Figura 2.3 exibe o mapeamento de dois VNRs em uma rede de substrato, as capacidades de provisionamento da rede de substrato e requisitos de

funcionamento das redes virtuais também estão representados nos nós e enlaces da figura mencionada.

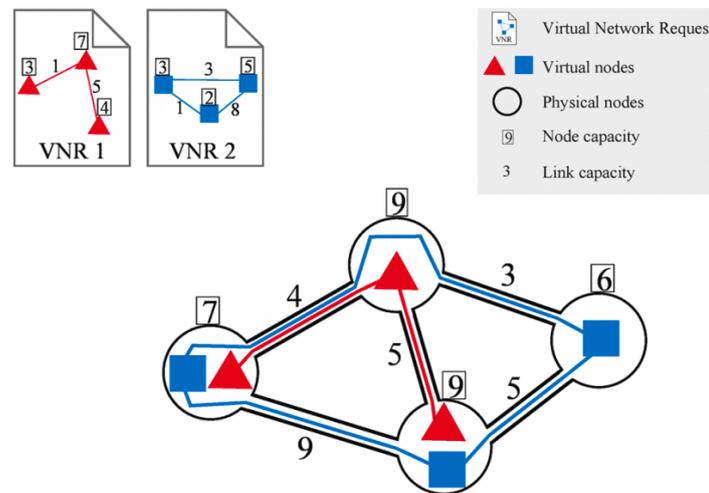


Figura 2.3: Processo de mapeamento de redes virtuais representadas na forma de VNRs em uma mesma rede de substrato de acordo com seus requisitos de funcionamento e a capacidade de provisionamento da infraestrutura, retirado de [7].

2.2.1 Algoritmo RW-BFS

Chang et al propõe uma abordagem para o problema de VNE utilizando um sistema de *ranking* que descreve a importância relativa dos nós presentes em uma topologia de rede. Estes *rankings* são construídos utilizando um modelo de Passeio Aleatório de Markov ou *Markov Random Walk* (RW) que leva em consideração atributos topológicos e recursos disponíveis em cada nó. Utilizando o sistema de *ranking* proposto, Chang et al apresenta um algoritmo para resolução do problema VNE baseado em Busca em Largura ou *Breadth-first Search* (BFS), incorporando nós e enlaces virtuais no mesmo estágio de execução com base nos *rankings* computados pelo RW, em outras palavras resolvendo os problemas de VNoM e VLiM de forma coordenada e simultânea com um algoritmo denominado RW-BFS [16][21].

O algoritmo RW-BFS revolve o problema de VNE em um único estágio considerando o impacto do mapeamento dos nós virtuais no mapeamento dos enlaces virtuais. O primeiro passo na sua execução consiste no cálculo do *ranking* dos nós virtuais e do substrato por meio do modelo RW, em seguida temos a construção de uma árvore BFS contendo os nós da rede virtual a ser mapeada, de forma que o nó raiz dessa árvore apresenta o maior valor no

ranking e os nós filhos são distribuídos da esquerda para direita baseado no valor decrescente de seus *rankings*. O mapeamento é feito percorrendo a árvore BFS e mapeando cada nó virtual no primeiro nó de substrato possível de acordo com os recursos disponíveis nele e ao mesmo tempo mapeando os enlaces incidentes deste nó virtual no menor caminho da rede de substrato que satisfaça as suas demandas de taxa de transferência. O mesmo processo é realizado para todos os nós e enlaces virtuais em uma única etapa [16] [21].

RW-BFS é um algoritmo baseado em *Backtracking*, uma classe de algoritmos bastante conhecida por sua complexidade exponencial em tempo, dessa forma, para evitar uma explosão exponencial de estados, RW-BFS introduz um parâmetro para limitar superiormente o número de operações de remapeamento de nós. A realização de mapeamentos em dois estágios independentes (VNoM e VLiM) pode ocasionar em um consumo desnecessário da taxa de transferência dos enlaces da rede de substrato, principalmente quando os nós virtuais estão muito próximos entre si (com apenas um nó entre eles). Se a distância entre os nós de substrato cujos estes nós virtuais próximos foram mapeados for consideravelmente longa, os enlaces virtuais entre eles vão ser mapeados em longos caminhos pelo substrato, resultando em um desperdício de taxa de transferência. Esse problema foi um dos principais motivadores para o desenvolvimento do algoritmo RW-BFS [16] [21].

2.3 Teoria de Redes Complexas (CN)

Teoria de Redes Complexas ou *Complex Network Theory* (CN) é uma área emergente que busca analisar características estáticas e dinâmicas de sistemas interconectados em larga escala. Na sua forma tradicional uma rede complexa pode ser definida como um conjunto de nós ou vértices interconectados por um conjunto de arestas de forma que não há arestas que apresentam origem e destino no mesmo vértice (*loops*) e a inexistência de múltiplas arestas que ligam dois vértices distintos. Tendo Teoria dos Grafos e Ciência de Redes como bases teóricas, diversas propriedades relacionadas a estas áreas têm sido analisadas nas últimas décadas [17][18].

Na maioria dos casos, redes complexas aparecem na forma de grafos direcionados ponderados, grafos direcionados não-ponderados, grafos ponderados e grafos não-ponderados de forma que é possível aplicar operações (*Symmetry* e *Thresholding*) que realizam transfor-

mações de um modelo para o outro neste conjunto de tipos de grafos. A origem do estudo de redes complexas se deu nos trabalhos pioneiros envolvendo percolação e grafos aleatórios de Flory [23], Rapoport [38] e Erdős e Rényi [20] sendo uma área de pesquisa bastante interdisciplinar [18].

Redes complexas apresentam uma estrutura irregular que tende a evoluir dinamicamente com o tempo. Na última década houve um grande aumento do interesse de pesquisa nesta área, motivado principalmente pelos trabalhos de Watts e Strogatz em Redes de Pequeno Mundo (*Small-world Networks*) [46], Barabási e Albert em Redes Livres de Escala (*Scale-free Networks*) [5] aliado ao aumento da capacidade computacional nos últimos anos e a possibilidade de estudar as propriedades de uma grande variedade de bancos de dados de redes reais, como redes de transportes, Internet, WEB, redes genéticas, de proteínas e redes de coautoria científica [10].

Os resultados da análise massiva de redes de diversas áreas produziu resultados inesperados e importantes. O foco de pesquisa envolvendo redes complexas se torna a análise empírica de várias características presentes neste tipo de rede, com o objetivo de revelar padrões e comportamentos intrigantes incorporados nas suas estruturas. Os modelos propostos na área de Teoria dos Grafos mostraram-se distantes em representar as propriedades estruturais e o processo de crescimento de redes reais. Uma vez que uma rede real é o resultado da evolução contínua das forças que a formaram e a sua estrutura se relaciona intimamente com os sistemas que por ela são representados [10][17][18].

Um dos principais motivos por trás da grande popularidade na utilização de redes complexas é a sua capacidade de representar uma grande quantidade de estruturas naturais e artificiais e as possíveis mudanças que acontecem dinamicamente nestas topologias. Dessa forma, uma grande quantidade de pesquisas envolvendo redes complexas consiste na representação de uma estrutura de interesse na forma de uma rede complexa seguida de uma análise das suas características topológicas na forma de uma série de medidas informativas, este processo é denominado caracterização topológica de estruturas [18].

A análise de redes complexas depende da utilização de métricas capazes de expressar as características topológicas mais relevantes de uma rede. A realização de medições tem um papel bastante importante na representação, caracterização, classificação e modelagem de redes complexas. O que leva a questão de como escolher as métricas mais adequadas de

acordo com a área de aplicação e objetivos definidos. Ainda não há um procedimento matemático definitivo para a escolha das métricas mais adequadas, ao mesmo tempo que existe infinidade de métricas que podem ser calculadas onde muitas delas estão correlacionadas, implicando redundância na informação [18].

Abordagens estatísticas para diminuição da correlação cruzada entre métricas podem ser utilizadas para servir de apoio no processo de decisão das mesmas, como análise de componentes principais e análise canônica, porém sem garantia de resultados ótimos. O conhecimento disponível sobre o cenário analisado é bastante importante na escolha de um conjunto viável de métricas para um determinado caso. É importante ter em mente não apenas o conhecimento das medidas de caracterização adequadas a um certo cenário, mas também suas propriedades e a interpretação por trás desses valores [18].

O Grau Médio dos Vértices (*Average Vertex Degree*), o Coeficiente de Agrupamento (*Clustering Coefficient*) e o Comprimento Médio do Caminho Mais Curto (*Average Shortest Path Length*) eram as métricas mais utilizadas na caracterização inicial de redes complexas, porém um conjunto mais sofisticado de métricas tem sido proposto na literatura nos últimos anos, como consequência dos últimos desenvolvimentos nesta área bastante dinâmica [18]. Dentre as áreas de aplicação de redes complexas temos *Smart Grids* [17], Dinâmica de Tráfego [15], eficiência energética em Redes Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Networks*) [54], VANETs [52], e mais recentemente na área de Fatiamento de Rede no contexto de redes 5G [25][40].

2.3.1 Métricas Topológicas

A partir da análise de redes reais uma grande quantidade de novas métricas de caracterização de redes complexas foram propostas na última década, com o propósito de capturar diferentes características estruturais dessas redes. Dentre as principais classes de novas medidas estão os índices de centralidade e vitalidade. Os índices de centralidade tem como objetivo quantificar a ideia intuitiva de que em uma rede complexa alguns nós ou arestas são mais centrais do que outras, já os índices de vitalidade buscam avaliar o impacto da retirada de determinados nós ou arestas da rede na estrutura e funcionalidade de rede, apresentaremos algumas destas métricas a seguir:

1. **Centralidade de Intermediação:** ou *Betweenness Centrality* consiste na quantidade de vezes que um determinado nó ou vértice existente na rede aparece como intermediário no menor caminho entre quaisquer outros pares de nós presentes na mesma, representada pela Equação 2.1.

$$CI_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (2.1)$$

onde σ_{st} é a quantidade total de menores caminhos entre os nós s e t e $\sigma_{st}(i)$ é o número desses menores caminhos que tem i como nó intermediário. A Centralidade de Intermediação passa a indicação de quão central é um determinado nó em relação a os vários outros nós existentes da rede [25][40].

2. **Vitalidade de Proximidade:** ou *Closeness Vitality* de um determinado nó i quantifica a mudança na soma das distancias entre qualquer outros pares de nós na rede caso excluirmos i da mesma rede. Tendo como base o índice de Wiener (I_W) [49] podemos definir a Vitalidade de Proximidade pela seguinte Equação 2.2:

$$VP_i = I_W(G) - I_W(G/\{i\}) \quad (2.2)$$

onde $I_W(G)$ consiste no valor do índice de Wiener para toda a rede representada pelo grafo G e $I_W(G/\{i\})$ consiste no índice Wiener para o grafo G após a remoção de um determinado nó i . O índice Wiener de um grafo G com um conjunto de vértices V consiste na soma das distâncias entre todos os seus pares de vértices, representado pela Equação 2.3:

$$I_W(G) = \sum_{s \in V} \sum_{t \in V} d(s, t) \quad (2.3)$$

onde d é a distância entre os vértices s e t presentes no grafo. A Vitalidade de Proximidade é uma forma de quantificar a importância de um certo nó como um conector de menor caminho para todos os caminhos possíveis existentes no grafo [11] [40].

3. **Centralidade de Proximidade:** ou *Closeness Centrality* determina o quão central é um nó ou vértice utilizando uma abordagem que envolve da soma de todas as distancias

possíveis no grafo, representado pela Equação 2.4:

$$CP_i = \frac{1}{\sum_j d(i, j)} \quad (2.4)$$

onde d é a distância entre os vértices i e j presentes no grafo. A Centralidade de Proximidade é uma indicação da distância total de um determinado nó em relação aos outros, quantificando o quão próximo este nó está de todos os demais presentes no grafo [50][40].

2.4 Análise de Decisão de Múltiplos Critérios (MCDA)

Multiple-criteria Decision Analysis (MCDA) também chamado de *Multiple-criteria Decision Making* (MCDM) ou Análise de Decisão de Múltiplos Critérios consiste na criação de ferramentas matemáticas e computacionais que possam apoiar a avaliação subjetiva de um conjunto finito de alternativas de decisão, analisadas sobre um número também finito de critérios de desempenho, por uma única entidade responsável pela tomada de decisão ou por um conjunto de entidades na forma de um grupo [9].

As abordagens MCDA permitem um processo sólido de tomada de decisão em situações e ambientes onde selecionar a melhor alternativa é um processo complexo. A melhor solução pode ser obtida através de um escopo definido de critérios com seus respectivos pesos e a escolha adequada de um método MCDA dentre os vários existentes [2]. Tendo como origem a área de Pesquisa Operacional, MCDA é uma área multidisciplinar, utilizando conhecimento de vários domínios, como Matemática, Teoria da Decisão Comportamental, Economia, Engenharia de Software, Sistemas de Informação e entre outras áreas [9].

Desde 1960 a área de MCDA tem sido uma área ativa de pesquisa tanto teórica como aplicada, com diversos artigos e livros publicados. A partir dos anos 2000 houve um grande aumento no interesse de pesquisa nesta área, principalmente na resolução de problemas do mundo real [9] [8]. Métodos MCDA são criados com o objetivo de dar preferência a uma ou mais opções em relação a um conjunto de alternativas, fazer a classificação destas alternativas em categorias e organizar as mesmas em uma ordem de preferência subjetiva.

O avanço na pesquisa trouxe consigo variações na abordagem MCDA tradicional, incluindo a utilização de Teoria dos Conjuntos Difusos (*Fuzzy Set Theory*), a aplicação con-

junta de diferentes métodos MCDA, a sua expansão para possibilitar tomada de decisão em grupo (*Group Decision-making*) e a sua ampla utilização em Sistemas de Apoio à Decisão (DSS) [39] [9] [2]. Dentre a infinidade existente de técnicas MCDA podemos citar os métodos: TOPSIS, PROMETHEE, AHP, VIKOR, ELECTRE e SIR [2][48].

2.4.1 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

Concebido em 1981 por Hwang e Yoon [29], o TOPSIS em sua forma padrão consiste em escolher alternativas que simultaneamente apresentam a menor distância da solução positiva ideal e ao mesmo tempo a maior distância da solução negativa ideal. A solução positiva ideal é aquela que maximiza todos os critérios considerados como benefícios, isto é aqueles cujo o objetivo é obter o maior valor possível e minimizar os critérios considerados como custos, analogamente aqueles onde se deseja obter o menor valor [9].

O algoritmo tem como objetivo a criação de um *ranking* de alternativas onde quanto mais próximo das posições iniciais melhor qualificada é a alternativa. Para isso, o conjunto de medidas dos critérios de decisão de cada alternativa precisam ser numéricos, crescer ou diminuir monotonicamente e ter unidades comensuráveis [9] [2]. Várias formas de realizar o cálculo das distâncias podem ser utilizadas no algoritmo, sendo elas principalmente as distâncias Euclidiana, Hamming, Manhattan e Chebyshev [30] [42].

O TOPSIS necessita que a entidade responsável pela decisão defina adequadamente a importância de cada critério de decisão na forma de pesos, sem a necessidade que esses valores sejam independentes [9]. Um fator importante a se levar em consideração são as diferentes formas de realizar a normalização dos critérios, aplicando a normalização pelo método de vetores (*vector normalization*), de forma linear, não-monotônica e entre outros métodos. O processo normalização pode afetar fortemente o resultado do algoritmo, levando a grandes alterações no *ranking* proposto [42]. As principais áreas de aplicação do TOPSIS são: Gestão de Cadeias de Abastecimento e Logística, Design, Engenharia e Sistemas de Fabricação [9].

2.4.2 Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)

Criado por Brans em 1982 e expandido por Vinkle e Brans em 1985 o PROMETHEE é um método baseado em *outranking*, onde um número finito de alternativas são avaliadas e classificadas na forma de um *ranking* com base em uma série de critérios que podem ser ou não conflitantes [12]. A proposição dos métodos PROMETHEE originais (I e II) deu origem a uma quantidade considerável de variações da abordagem original, criando uma família inteira de métodos MCDA, como por exemplo: PROMETHEE III, IV, V, GDS e Cluster [8].

De forma semelhante ao TOPSIS, o PROMETHEE II tem como objetivo gerar um *ranking* completo de um conjunto finito de alternativas, sendo considerado a base para os outros métodos posteriores da família PROMETHEE, sua ideia principal consiste em realizar uma comparação par-a-par entre as alternativas levando em consideração cada critério de decisão definido [12]. Assim como outros métodos MCDA, o PROMETHEE II requer a atribuição de pesos para os critérios de decisão e necessita que a entidade responsável pela decisão defina a função de preferência que será utilizada na avaliação par-a-par de cada critério entre as alternativas possíveis [8].

As funções de preferência calculam a diferença das avaliações entre pares de alternativas em um nível de propensão que varia entre 0 e 1 para cada critério de decisão considerado. Originalmente seis funções de preferência foram propostas [12]. Com os valores obtidos pelas funções de preferência de cada critério para todas as alternativas, é possível calcular os Fluxos de Superação Positivo e Negativo de cada alternativa e a partir deles determinar o Fluxo de Preferência Líquida (ϕ), que por sua vez, combina ambos os fluxos em um único valor, quanto maior o valor do ϕ mais bem qualificada foi a alternativa. As principais áreas de aplicação do PROMETHEE são Gestão Ambiental, Hidrologia e Gestão de Águas, Gestão Empresarial e Financeira [8].

2.5 Trabalhos Relacionados

Em [6] temos uma análise detalhada e compreensiva do estado da arte de soluções envolvendo o Fatiamento de Rede no contexto de redes 5G utilizando SDN, NFV, MEC e Com-

putação em Nuvem. Há uma ênfase nos requisitos de qualidade e de serviço que o 5G carrega consigo, aliado a uma apresentação detalhada do processo de mudança de paradigma das infraestruturas de rede com objetivo de se tornarem mais programáveis e orientadas ao software.

Está presente também em [6] uma discussão sobre o surgimento do conceito de Fatiamento de Rede e seus principais casos de uso, sucedido por um levantamento sobre a evolução das iniciativas e projetos propostos pela indústria e academia. O artigo apresenta um destaque na contextualização dos principais fatores que levaram ao aumento crescente das demandas de comunicação observadas nos últimos anos, sendo uma das principais bases teóricas desta pesquisa.

Semelhante a [6], [1] também apresenta uma visão geral do Fatiamento de Rede no contexto de redes 5G, com um maior destaque nos serviços e requisitos de mercado, discutindo os principais impulsionadores por trás de mercados emergentes e os esforços de padronização que tinham sido feitos até o momento. Os autores também trouxeram uma perspectiva histórica, analisando iniciativas que serviram como base para o Fatiamento de Rede antes do surgimento das redes móveis 5G.

Já [41] discute questões envolvendo o compartilhamento de recursos de rede e arquiteturas multi-inquilino na redução dos custos de capital (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) de forma a viabilizar as próximas gerações de redes móveis. O artigo tem como foco uma visão geral da evolução do padrão 3GPP e a introdução do conceito de um *5G Network Slice Broker*, que tem como objetivo possibilitar que operadores de rede virtual, provedores de serviços *over-the-top* e mercados verticais possam requisitar recursos dinamicamente de provedores de infraestrutura de forma automatizada.

O artigo [53] introduz o conceito de *Network Slicing as a Service* (NSaaS) hierárquico, propondo uma arquitetura onde operadores podem oferecer redes celulares fim-a-fim (E2E) customizadas como serviço. Orquestração e mapeamento de *Service Level Agreements* (SLAs) são utilizados para garantir a qualidade dos serviços requisitados em diferentes modelos operacionais. O processo detalhado de funcionamento do NSaaS hierárquico é ilustrado a partir de um modelo de configuração, de gerenciamento de produtos e de APIs para os requisitantes.

Os autores de [53] acreditam que com o desenvolvimento de técnicas avançadas de SDN

e NFV o sistema de suporte irá se transformar em um sistema de produção, fornecendo uma solução completa para serviços de rede sem fio. Outro fato enfatizado pelos autores é a ideia da fusão do domínio de operações e de negócios, onde operadores poderão construir fatias de redes cada vez mais customizadas para indústrias verticais de forma ágil.

Em [36] temos uma análise da arquitetura SDN proposta pela ONF para o suporte de fatiamento de rede 5G. O trabalho argumenta que esta arquitetura abre o caminho para implementação do fatiamento de rede, porém carece de algumas capacidades essenciais que podem ser supridas pelo NFV. Dessa forma, os autores analisam a incorporação de SDN na arquitetura NFV proposta pela ETSI, propondo um exemplo da utilização conjunta de ambos na realização efetiva do fatiamento de rede.

A relação entre o compartilhamento de recursos e o isolamento de fatias de rede também é citada em [45], assim como questões envolvendo a escalabilidade e a orquestração dinâmica de recursos em curtas escalas de tempo. Aspectos envolvendo segurança e privacidade em redes orientadas a software também são tratados, além dos novos modelos de negócio e a sua compatibilidade com a infraestrutura de gerações anteriores em um eventual processo gradual de transição.

O foco de [45] é apresentar aspectos algorítmicos envolvendo o fatiamento de rede apresentando e argumentando sobre a viabilidade da representação do problema de fatiamento de rede como um caso especial do problema de VNE, sendo uma das principais justificativas para utilização da abordagem VNE no processo de criação de fatias de rede realizada neste trabalho.

O trabalho [25] introduz um modelo matemático orientado ao serviço para a implementação de fatias de rede em redes 5G com base em políticas. Onde há a integração das abordagens de Teoria de Redes Complexas e VNE. Os autores consideram três políticas diferentes de implantação de fatias de rede em uma infraestrutura de recursos compartilhados, levando em consideração as particularidades dos três principais conjuntos de casos de uso do 5G (eMBB, uRLLC e mMTC).

Essa nova abordagem que considera informações topológicas e tecnológicas da infraestrutura e das fatias de rede apresenta uma melhor performance em termos de eficiência de recursos e na taxa de aceitação das fatias de rede no modelo de infraestrutura. Com um tempo médio de execução que cresce linearmente ao tamanho do modelo de infraestrutura

utilizado. Esse trabalho foi uma das principais justificativas para utilização da Teoria de Redes Complexas integradas com a abordagem VNE neste trabalho.

Mais recentemente tivemos a proposta de uma metodologia para aplicação de MCDA no contexto de Fatiamento de Redes Móveis 5G, usando alguns conceitos de Teoria de Redes Complexas e VNE [40]. Os autores de [40] introduzem a aplicação de técnicas de tomada de decisão multicritério (MCDA) no contexto de Fatiamento de Rede utilizando modelos de representação da infraestrutura e das fatias de rede. O trabalho tem o objetivo de tratar do problema de sobrecarga de informação envolvendo as diferentes formas possíveis de instanciação dessas fatias de rede no modelo de infraestrutura e os requisitos específicos que elas precisam apresentar. [40] foi o principal trabalho motivador desta pesquisa, onde buscamos ampliar e detalhar a metodologia proposta.

Podemos destacar também a aplicação de técnicas de MCDA na área de redes móveis 4G, mais especificamente no problema de transferência vertical (*vertical handoff*) de pontos de acesso, onde técnicas de MCDA são utilizadas para selecionar os pontos de acesso mais adequados para a garantia da continuidade de serviço e do nível de QoS [34]. Outra aplicação importante é no processo de descarregamento (*offloading*) no contexto de computação em nuvem móvel, onde MCDA é utilizado para apurar quais configurações de serviços são mais adequadas para um determinado usuário final [4]. A Tabela 2.1 apresenta uma sumarização de alguns dos principais aspectos levados em consideração nos trabalhos relacionados a esta pesquisa.

Trabalhos	Abordagem	SDN	NFV	MEC	MCDA	Redes Complexas
Barakabitze <i>et al</i> [6]	<i>Survey</i>	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Afolabi <i>et al</i> [1]	<i>Survey</i>	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Samdanis <i>et al</i> [41]	Arquitetural	Não	Sim	Sim	Não	Não
Zhou <i>et al</i> [53]	Arquitetural	Sim	Sim	Não	Não	Não
Ordonez-Lucena <i>et al</i> [36]	Arquitetural	Sim	Sim	Não	Não	Não
Vassilaras <i>et al</i> [45]	VNE	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Guan <i>et al</i> [25]	VNE	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Rosa e Rothenberg [40]	VNE	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Martínez-Morales <i>et al</i> [34]	Simulação	Não	Não	Não	Sim	Não
Bangui <i>et al</i> [4]	<i>Survey</i>	Não	Não	Não	Sim	Não

Tabela 2.1: Principais aspectos considerados na análise dos trabalhos relacionados a esta pesquisa.

Capítulo 3

Avaliação Experimental

O objetivo da realização deste experimento é observar o efeito da variação das características estruturais e de provisionamento de recursos na implementação de um modelo de implantação de fatias de rede em uma infraestrutura virtualizada com recursos compartilhados por meio de uma abordagem que combina Teoria de Redes Complexas, VNE e MCDA. Buscamos entender melhor o sistema observando e determinar em que situações podemos melhorar certas características em detrimento ou não de outras e observar a adequabilidade dos princípios já estabelecidos na literatura para o sistema em questão.

Também realizaremos uma análise dos resultados focando em demonstrar características não triviais do sistema, analisando os dados coletados para permitir novos entendimentos sobre o mesmo, investigando regularidades e diferenças entre os Cenários estudados com o objetivo de prover abstrações úteis para a concepção de sistemas que fazem uso do princípio de Fatiamento de Rede.

3.1 Metodologia

Com o objetivo de expandir e detalhar a metodologia proposta por Rosa e Rothemberg em [40] as instâncias de fatia de rede são representadas na forma de vetores de critérios e criadas a partir de mapeamentos entre uma entidade que descreve as características e requisitos que uma fatia de rede apresenta, denominada Projeto de Fatia de Rede e uma segunda entidade que descreve as características e capacidades de provisionamento da infraestrutura física, denominada Modelo de Infraestrutura. Ambas as entidades são construídas como modelos

baseados em grafos direcionados.

Diferente de Rosa e Rothemberg [40] realizaremos a implementação de um modelo de fatia de rede considerando diferentes topologias de rede, tanto para os Projetos de Fatia de Rede como para o Modelo de Infraestrutura física, aliado a uma variação no número de entidades presentes em cada fatia de rede. Para tanto, será utilizado um algoritmo VNE específico para realização dos mapeamentos. O algoritmo VNE RW-BFS utilizado tem como objetivo maximizar o número de mapeamentos possíveis considerando cenários distintos e utilizando fatias de rede de tamanhos diferentes [16]. O algoritmo RW-BFS e o problema de VNE foram abordados na Seção 2.2 do Capítulo 2.

Consideramos também um conjunto diferente de atributos na composição dos vetores de critérios e por consequência na análise MCDA, considerando alguns dos atributos presentes em [40] e adicionando novos atributos de igual relevância. Por fim, expandiremos a análise MCDA para utilizar, além do TOPSIS, o algoritmo PROMETHEE II, considerando os atributos dos vetores de critérios como critérios de decisão. A aplicação de técnicas MCDA será feita com uma visão voltada para observar a adequabilidade das instâncias de fatias de rede criadas os principais conjuntos de caso de uso do 5G, trabalhados anteriormente na Seção 2.1 do Capítulo 2.

3.1.1 Modelo de Infraestrutura

O Modelo de Infraestrutura representa o recurso computacional através de nós ou vértices de um grafo direcionado, quantificados em unidades de CPU (*CPU units*). Os enlaces são representados na forma das arestas do grafo, apresentando recursos de rede quantificados na forma de unidades de taxa de transferência (*BW units*), de forma que os enlaces realizam a interconexão desses nós. Os recursos mencionados são representados como atributos numéricos nos vértices e arestas do grafo respectivamente. De posse desses dados, serão calculados uma série de atributos topológicos da infraestrutura que serão utilizados na composição dos vetores de critérios, com o objetivo de avaliar características de redes complexas das instâncias criadas. Questões envolvendo Teoria de Redes Complexas foram abordadas na Seção 2.3 do Capítulo 2.

Optamos por utilizar estes atributos topológicos pelo fato que estudos empíricos demonstraram que muitas redes de comunicação reais apresentam padrões como Redes de Pequeno

Mundo e Redes Livres de Escala [51][47]. Em [32] Redes sem Fio são caracterizadas como livres de escala utilizando um algoritmo próprio. Dessa forma, a utilização de Teoria de Redes Complexas para analisar os impactos topológicos da implementação de fatias de rede 5G é uma abordagem adequada e confiável, podendo revelar características importantes do sistema em questão [25]. Os atributos topológicos calculados são métricas que buscam extrair características estruturais importantes de redes complexas que podem vir a impactar no funcionamento de fatias de rede mapeadas em certas regiões do Modelo de Infraestrutura.

3.1.2 Projeto de Fatia de Rede

Os Projetos de Fatia de Rede também são representados na forma de um grafo direcionado, onde cada vértice equivale a uma Função Virtual de Rede ou *Virtual Network Functions* (VNF) e as arestas representam os enlaces virtuais entre elas. Cada VNF presente em um Projeto de Fatia de Rede apresenta um perfil de desempenho, que consiste em um conjunto de atributos que representam os recursos requisitados para o seu funcionamento. Para este experimento consideramos apenas a capacidade computacional requerida para o funcionamento das VNFs, também em unidades de CPU, porém outros tipos de requisitos de recursos também podem ser utilizados, como por exemplo memória e disco. Os enlaces virtuais que conectam as VNFs dos projetos de fatia de rede também apresentam atributos numéricos indicando os requisitos de rede necessários para o seu funcionamento, em unidades de taxa de transferência.

Utilizamos uma abordagem baseada em VNE para o mapeamento dos Projetos de Fatia de Rede no Modelo de Infraestrutura, semelhante ao proposto em [45], onde os Projetos de Fatia de Rede são representados pelas redes virtuais e o Modelo de Infraestrutura é caracterizado pela rede de substrato na execução do algoritmo. Os Projetos de Fatia de Rede são mapeados simultaneamente na mesma infraestrutura de forma coordenada, isto é, nós e enlaces são mapeados no mesmo estágio de execução de acordo com os recursos disponíveis no Modelo de Infraestrutura e os requisitos presentes nos Projetos de Fatias de Rede [21].

3.2 Arquitetura Experimental

Propomos definir um design experimental que permita a comparação de fatias de rede em diferentes topologias de rede, tanto para os Projetos de Fatia de Rede, como para os Modelos de Infraestrutura, de forma que é possível em um mesmo cenário comparar e classificar o comportamento de uma certa combinação de topologias em relação a outras combinações diferentes. Analisaremos também o impacto da implementação de fatias de rede de diferentes tamanhos e como isso afeta os valores dos atributos presentes nos vetores de critérios. Propomos também a utilização de algoritmos MCDA para identificar as fatias de rede mais adequadas para cada um dos conjuntos de casos de uso já mencionados anteriormente e analisar os resultados da execução de diferentes algoritmos MCDA no processo de seleção das fatias de rede.

Tendo como base [40] para construção do experimento, inicialmente iremos construir o Modelo de Infraestrutura física de um possível provedor de serviço, representando os recursos que serão provisionados e as características importantes para a realização do mapeamento das fatias de rede. Assumindo uma infraestrutura totalmente programável criada com base nos princípios e artefatos SDN, NFV e MEC. O uso dessas tecnologias é fundamental para que o sistema tenha as propriedades esperadas, possibilitando migrações de serviços entre fatias de rede já mapeadas e a alocação de fatias de redes adicionais para tolerância a falhas e balanceamento de carga.

Para fins de especificação das capacidades dos elementos presentes no experimento, semelhante a o expresso em [7], foram considerados as seguintes definições: para cada 500 unidades de CPU (*CPU units*) assumi-se o poder computacional equivalente a um núcleo de processamento que trabalha a uma frequência de 2.66 GHz. Já para a capacidade de comunicação é considerado que 1000 unidades de taxa de transferência (*BW units*) são equivalentes a uma taxa de transmissão de 1 Gbps. Não consideremos *Hidden Hops* nos mapeamentos, isto é, a necessidade de alocar capacidade computacional adicional em nós intermediários a um certo mapeamento para o encaminhamento de pacotes [7].

No Modelo de Infraestrutura temos um número de nós ou vértices N_I , onde cada nó apresenta um atributo numérico caracterizando a sua capacidade de provisionamento computacional medido em unidades de CPU. Os enlaces são representados pelas arestas do grafo

e detém um atributo que caracteriza a seus recursos de rede medidos em unidades de taxa de transferência. Os valores de capacidade computacional e recursos de rede de cada nó e enlace são escolhidos aleatoriamente de acordo com intervalos de valores definidos, sendo C_I o intervalo de valores para o recurso computacional dos nós e B_I para a taxa de transferência dos enlaces. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de Modelo de Infraestrutura, onde estão representadas algumas das suas características mais importantes.

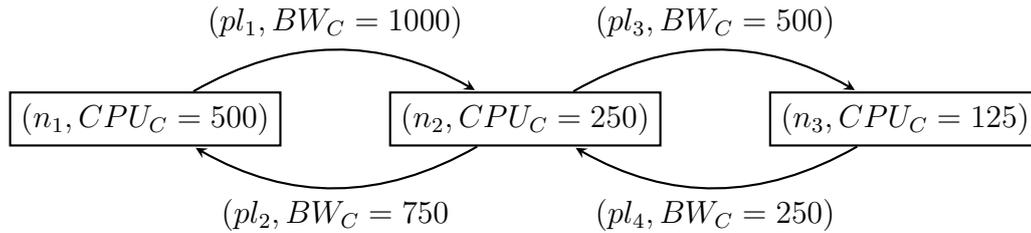


Figura 3.1: Exemplo de Modelo de Infraestrutura na forma topologia *Grid* com $N_I = 3$, $C_I = [0, 500]$ e $B_I = [0, 1000]$ onde estão representadas as capacidades de provisionamento computacional (CPU_C) e taxa de transferência (BW_C) como atributos dos nós (n) e enlaces de infraestrutura (pl) respectivamente.

Elaboramos os Projetos de Fatia de Rede como um grafo direcionado que delimita um número de VNFs representadas na forma de N_S nós ou vértices que apresentam um atributo numérico que caracteriza a sua demanda por recurso computacional. As VNFs presentes nos Projetos de Fatia de Rede são conectadas através de enlaces na forma de arestas que apresentam os valores de demanda de taxa da transferência, que assim como no Modelo de Infraestrutura são escolhidos aleatoriamente entre um intervalo de definido de valores, sendo eles C_S e B_S para os requisitos de recurso computacional e taxa de transferência respectivamente. Na Figura 3.2 temos algumas das características mais importantes dos Projetos de Fatia de Rede.

A Figura 3.1 apresenta um Modelo de Infraestrutura da topologia *Grid* contendo quatro nós n com capacidade computacional de 500, 250 e 125 unidades de CPU respectivamente e enlaces direcionados pl contendo uma taxa de transferência de 1000, 750, 500 e 250. É possível alocar alocar fatias de rede neste modelo até que todos os recursos provisionados sejam totalmente consumidos, onde para cada nó do Modelo de Infraestrutura podemos alocar vários nós virtuais pertencentes a diversas fatias de rede e o mesmo princípio pode ser

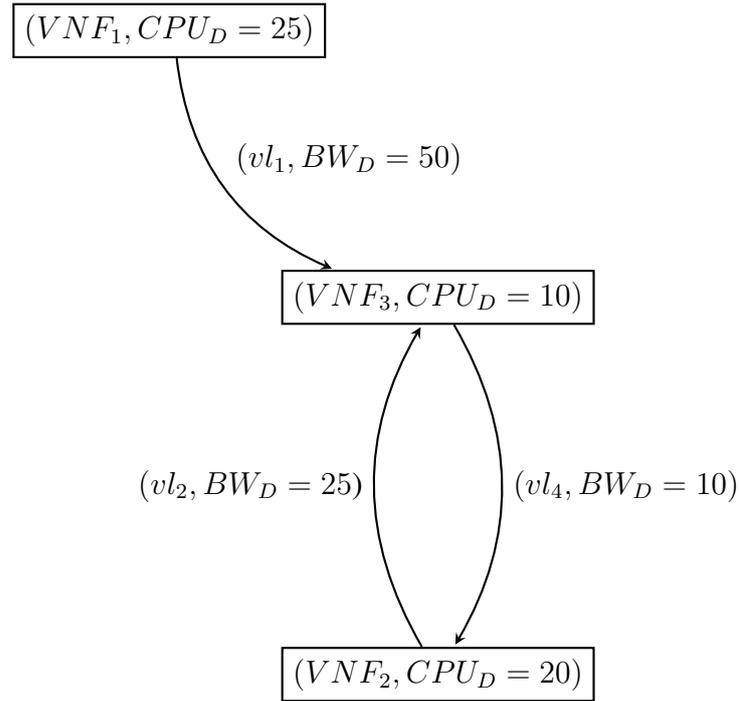


Figura 3.2: Exemplo de modelo de Projeto de Folia de Rede na forma da topologia *Random Edge Generator* com $N_S = 3$, $C_S = [0, 25]$ e $B_S = [0, 50]$ onde estão representadas as VNFs e os enlaces (vl) que realizam a sua interconexão com suas respectivas demandas de recursos computacionais (CPU_D) e de rede (BW_D).

aplicado aos recursos de rede, onde enlaces virtuais de múltiplas fatias de rede podem ser alocados em um enlace de infraestrutura. No exemplo apresentado na Figura 3.2, temos um Projeto de Folia de Rede da topologia *Random Edge Generator*, onde cada nó dos Projetos de Folia de Rede representa uma VNF, como por exemplo a $VNF1$ demanda 25 unidades de CPU e tem um enlace vl_1 que demanda 50 unidades de transferência. Ambos nós e enlaces virtuais podem ser mapeados em qualquer nós e enlaces do Modelo de Infraestrutura que suportem as demandas de recursos. Poderíamos mapear a $VNF1$ da Figura 3.2 no nó n_1 e o enlace virtual vl_1 do Projeto de Folia de Rede no enlace do Modelo de Infraestrutura pl_1 da Figura 3.1 e ainda teríamos 475 unidades de CPU restantes no nó n_1 e 950 unidades de taxa de transferência no enlace pl_1 .

O próximo estágio é realizar o mapeamento dos Projetos de Folia de Rede no Modelo de Infraestrutura utilizando o algoritmo RW-BFS [16] com objetivo de obter os vetores de critérios. Cada vetor de critério representa uma forma possível de instanciação (mapeamento)

de um determinado Projeto de Fatia de Rede no Modelo de Infraestrutura correspondente, constituídos de atributos tecnológicos e topológicos derivados de ambos os modelos, sendo eles:

1. **Capacidade Total (CT):** Atributo tecnológico que representa a soma das demandas de recurso computacional, em unidades de CPU, requeridos pelas VNFs de um Projeto de Fatia de Rede mapeado.
2. **Capacidade Mínima (CM):** Atributo tecnológico que representa o menor valor de recurso computacional requisitado entre as VNFs que compõem um Projeto de Fatia de Rede mapeado.
3. **Taxa de Transferência Total (TTT):** Atributo tecnológico que representa a soma das demandas de recursos de rede na forma de unidades de taxa de transferência requeridas pelos enlaces que conectam as VNFs de um Projeto de Fatia de Rede mapeado.
4. **Taxa de Transferência Mínima (TTM):** Atributo tecnológico que representa o menor valor de recursos de rede na forma de unidades de taxa de transferência entre os enlaces que conectam as VNFs que pertencem ao Projeto de Fatia de Rede mapeado.
5. **Sobrecarga de Nós (SN):** Atributo tecnológico que representa a soma da quantidade de VNFs mapeadas em cada nó da infraestrutura utilizado para mapear um Projeto de Fatia de Rede.
6. **Sobrecarga de Enlaces (SE):** Atributo tecnológico que representa a quantidade de enlaces virtuais mapeados em cada um dos enlaces da infraestrutura que foram utilizados para instanciar um Projeto de Fatia de Rede.
7. **Intermediação (ITM):** Atributo topológico que representa a soma dos valores de Centralidade de Intermediação de cada nó da infraestrutura utilizado para mapear um Projeto de Fatia de Rede.
8. **Vitalidade (VTL):** Atributo topológico que representa a soma dos valores de Vitalidade de Proximidade de cada nó da infraestrutura utilizado para mapear um Projeto de Fatia de Rede.

9. **Acessibilidade (ACB):** Atributo topológico que representa a soma dos valores de Centralidade de Proximidade de cada nó da infraestrutura utilizado para mapear um Projeto de Folia de Rede, consideramos os valores de Centralidade de Proximidade já normalizados.

3.2.1 Cenários de Avaliação

Para a execução dos experimentos, foram definidas diferentes configurações para os parâmetros na forma de Cenários, descritos na Tabela 3.1. Para cada Cenário, variamos as topologias de rede utilizadas, tanto nos Projeto de Folia de Rede como no Modelo de Infraestrutura em diferentes Modelos (A, B e C) e analisamos o resultado destas variações nos vetores de critérios resultantes. Nos diferentes Cenários também realizamos modificações no tamanho e na quantidade das fatias de redes mapeadas, buscando analisar diferentes características e estados do sistema.

Cenário	N_I	C_I	B_I	Q	N_S	C_S	B_S
1				25	3		
2	100	[0, 500]	[0, 1000]	25	6	[0, 25]	[0, 50]
3				10	9		

Tabela 3.1: Características dos diferentes Cenários definidos para realização dos experimentos.

Com a extração dos vetores de critérios, que por sua vez representam os possíveis mapeamentos entre os Projetos de Folia de Rede e o Modelo de Infraestrutura, podemos analisar as distribuições dos valores destes vetores, buscando encontrar características importantes do sistema em questão e também utilizá-los como entrada de algoritmos MCDA, com o objetivo de descrever, classificar e pontuar as possíveis instâncias de fatias de rede criadas e observar a sua adequabilidade para os principais conjunto de casos de uso do 5G.

Para realização dos experimentos utilizamos a ferramenta de software *ALgorithms for Embedding Virtual Networks* (ALEVIN) [7], que apresenta várias opções para a criação de modelos topológicos de rede, tanto para a rede infraestrutura como para as redes virtuais, permitindo a realização de mapeamentos por meio de algoritmos de VNE, representados na

forma de documentos XML (*Extensible Markup Language*), onde não só possível coletar métricas relativas ao algoritmos de mapeamento em si, mas também a correspondência entre entidades físicas e virtuais criados por estes.

Em seguida foi utilizado uma ferramenta customizada escrita na linguagem *Python* para a estruturação dos dados e realização do cálculo dos atributos topológicos do Modelo de Infraestrutura a partir da biblioteca *networkx* [26]. A aplicação de algoritmos MCDA foi feita por meio das bibliotecas *scikit-criteria* [13], *sckit-mcda* [28] e *pymcdm* [35].

Realizaremos a execução de algoritmos MCDA nos vetores de critérios criados utilizando seus atributos como critérios de decisão. Para tanto, foram usados os algoritmos TOPSIS [9] e PROMETHEE II [8]. Em ambos os algoritmos a normalização dos dados foi feita pelo método de normalização de vetores (*Vector Normalization*). Decidimos maximizar todos os critérios, com exceção da Sobrecarga de Nós e de Enlaces os quais optamos por minimizar. No algoritmo PROMETHEE II utilizamos a função de preferência usual.

Capítulo 4

Discussão dos Resultados

Neste Capítulo apresentaremos os resultados experimentais utilizando a metodologia e a arquitetura experimental descritas nas Seções 3.1 e 3.2 do Capítulo 3 respectivamente. Nos gráficos apresentados, além dos valores diretamente representados, também são consideradas duas escalas auxiliares: uma escala de cores, variando do azul (menor valor) até o vermelho (maior valor) e uma escada de tamanho dos pontos, onde quanto maior o ponto, maior será o seu valor. Cada Cenário está dividido em Modelos caracterizados pelas diferentes configurações topológicas nas quais o experimento foi executado.

4.1 Cenário 1

Como apresentado na Tabela 3.1 do Capítulo 3, no primeiro Cenário utilizamos um número de nós de infraestrutura (N_I) igual a 100, com capacidade computacional (C_I) e taxa de transferência (B_I) escolhidas aleatoriamente entre 0 e 500 unidades de CPU e entre 0 e 1000 unidades de taxa de transferência respectivamente. Com um número de fatias de rede (Q) igual a 25, onde cada uma apresenta um número de VNFs (N_S) igual a 3, com requisitos computacionais (C_S) escolhidos aleatoriamente entre 0 e 25 unidades de CPU, interconectadas por uma série de enlaces com requisitos de rede (B_S) escolhidos aleatoriamente entre 0 e 50 unidades de taxa de transferência.

4.1.1 Modelo 1A *grid-waxman*

No primeiro experimento do Cenário 1 utilizamos a topologia *Grid* no modelo de infraestrutura e *Waxman* para todos os projetos de fatia de rede mapeados. A topologia *Grid* tem uma grande regularidade no padrão de disposição e conexão dos nós, sendo ambos previamente definidos pelo modelo. Enquanto a topologia *Waxman* apresenta um grande fator de aleatoriedade, principalmente nas conexões entre nós.

Atributos Topológicos e Tecnológicos

Analisando a Figura 4.1 temos que cada ponto no gráfico de dispersão corresponde a um vetor de critério gerado, que por sua vez caracteriza uma possível instanciação de um projeto de fatia de rede no modelo de infraestrutura. Podemos observar que as fatias de rede apresentaram um padrão de comportamento bastante semelhante entre os valores de ITM e ACB. Já os valores de VTL se aproximaram bastante de uma versão espelhada deste mesmo padrão. A partir desse comportamento podemos identificar uma relação entre estas métricas, visto que é provável que um determinado nó que esteja mais próximo dos outros presentes no modelo de infraestrutura também seja um elemento mais intermediário entre vários menores caminhos entre estes mesmos nós.

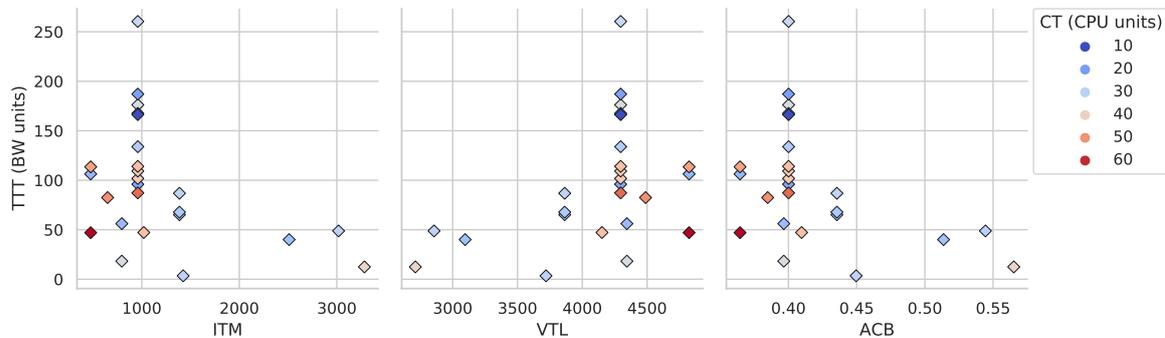


Figura 4.1: Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTL) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT) utilizando as configurações do Modelo 1A.

Fatias de rede com alta TTT também apresentaram valores altos de VTL, indicando que os nós presentes nestas fatias causariam um grande impacto na alteração dos menores caminhos percorridos através da rede do modelo de infraestrutura no caso de falha ou degradação

de performance. Podemos observar também uma concentração de instâncias em certas regiões dos atributos topológicos com apenas algumas instâncias apresentando valores consideravelmente maiores ou menores: próximo de 1000 em ITM, entre 4000 e 4500 para VTL e próximo de 0.40 em ACB. Esse agrupamento indica que temos uma grande variedade de fatias de rede com propriedades similares e que poderiam ser utilizadas alternadamente para implementação de um certo tipo de serviço de rede com pouca alteração nas características e desempenho do mesmo.

Já para as demais métricas, pode-se perceber que, de forma geral, uma alta TTT implicou em valores relativamente baixos de IMT e ACB. O mesmo pode ser dito em relação a CT obtida pelas fatias de rede, o que pode ser visto pela escala de cores concentradas em azul e tonalidades mais claras de laranja, representando uma menor quantidade de unidades de CPUs alocadas. Também podemos identificar que as fatias de rede com maior TTT foram mapeadas em nós menos centrais da rede e menos próximos dos outros nós presentes no modelo de infraestrutura. A concentração de atributos topológicos em certas regiões, provavelmente deve-se aos padrões regulares da topologia de infraestrutura *Grid*. Nós menos centrais da rede geralmente apresentam mecanismos menos sofisticados de tolerância a falhas e uma política de manutenção mais simples, sendo mais adequados para utilização de serviços não críticos, como alguns casos mais simples de mMTC.

Na Figura 4.2 temos uma análise mais detalhada da capacidade computacional dos vetores de critérios. Em relação a distribuição de CM e CT há uma certa similaridade com um padrão linear, onde o aumento de CT leva a um aumento de CM e a diminuição de TTT. Há uma concentração de valores baixos de SN próximo de $CT = 30$ e $CM = 2$, indicando que uma quantidade pequena de VNFs foi mapeada em cada nó físico que estas fatias de rede foram alocadas, sendo mais adequadas para casos de uso como uRLLC. Já nos demais pontos do gráfico, as instâncias apresentam valores relativamente altos de SN, o que é importante na alocação de fatias de rede para serviços críticos e de alto desempenho, visto que isso representa um maior compartilhamento dos recursos nos nós que instanciam as VNFs pertencentes a essas fatias de rede, podendo afetar o seu desempenho e confiabilidade.

Quando colocamos o foco sobre a taxa de transferência podemos observar um comportamento diferente em relação à capacidade computacional. Na Figura 4.3 há uma dispersão muito maior entre os valores de TTT e TTM, de forma que é possível obter instâncias que

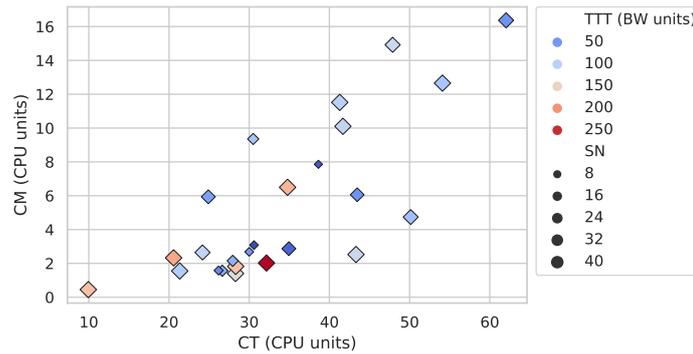


Figura 4.2: Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 1A.

apresentam uma grande TTT e ao mesmo tempo uma baixa TTM. Isso pode ser proibitivo em certos cenários onde se tem serviços de rede que requisitam um grande volume de dados e necessitam de altas taxas de transferência, porém ao mesmo tempo existem restrições sobre a taxa de transferência mínima que deve ser provisionada em cada enlace dessa fatia de rede, como por exemplo em casos de uso do tipo eMBB.

Podemos observar também que o aumento da TTM levou a uma diminuição da CT e um aumento da SE. Também há a presença de algumas fatias de rede que simultaneamente apresentam altos valores de TTT e CT e valores baixos de SE, o que faz com que elas sejam mais indicadas para serviços mais críticos, como por exemplo uRLLC, onde é necessário uma maior confiabilidade e previsibilidade do desempenho e também alguns casos mais específicos de mMTC onde se transportam dados sensíveis e de alto sigilo. Menores valores de SN e SE implicam uma menor sobrecarga de virtualização e compartilhamento de recursos na execução da fatia de rede e também levanta questões relacionadas à segurança, visto que um nó ou enlace físico pode estar executando vários componentes virtuais com diferentes requisitos de desempenho e níveis segurança, sendo necessário manter o isolamento adequado entre esses componentes.

Analisando os coeficientes de correlação de *Spearman* dos atributos que compõem os vetores de critérios obtivemos o mapa de calor presente na Figura 4.4. Como indicado anteriormente pelo padrão na Figura 4.2, ITM e ACB tiveram uma correlação positiva perfeita ao mesmo tempo que ambos obtiveram também uma correlação negativa perfeita com VTL.

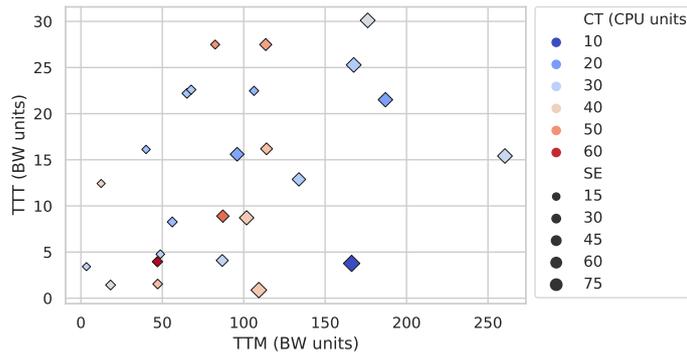


Figura 4.3: Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1A.

Como também era esperado, CT obteve valores altos de correlação positiva com CM, em contrapartida TTT não apresentou valores tão altos em relação a TTM, o que era diferente do esperado, estando mais correlacionado positivamente com SN e SE, que também obtiveram altos índices de correlação positiva entre si. De forma geral, além do mencionado anteriormente, temos em sua maioria correlações negativas fracas entre os atributos que compõem os vetores de critérios.

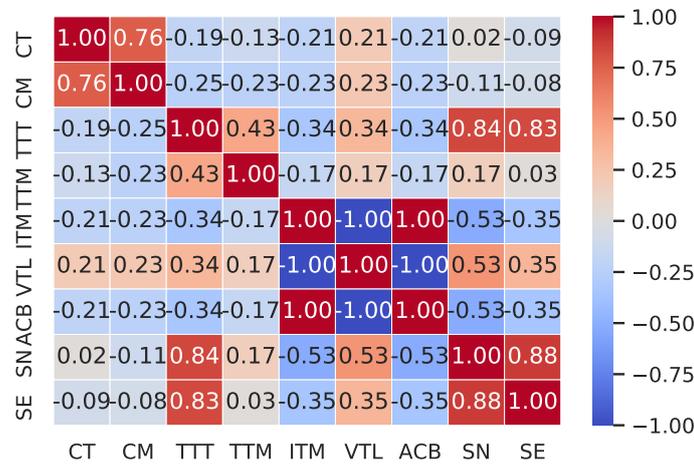


Figura 4.4: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1A.

Decisão de Múltiplos Critérios

Considerando o provedor de serviço de rede como a entidade responsável pelo processo de decisão da instanciação de fatias de rede 5G em uma infraestrutura virtualizada de recursos compartilhados, executamos os algoritmos MDCA TOPSIS e PROMETHEE II considerando os atributos presentes nos vetores de critérios como critérios de decisão. Para tanto foi utilizada uma distribuição igualitária de pesos entre os mesmos, buscando maximizar todos os critérios de decisão com exceção de SN e SE, os quais optamos por minimizar.

Na necessidade de priorizar certos atributos em relação a outros no processo de decisão os pesos podem ser facilmente modificados para refletir essa prioridade, podendo ser bastante útil em cenários e casos de uso onde se deseja priorizar certas características das fatias de rede criadas. Obtivemos como resultado a Tabela 4.1 onde as instâncias de fatia de rede estão ordenadas de acordo com as suas pontuações calculadas pelos algoritmos. Uma maior pontuação indica que a instância foi escolhida como melhor em comparação com as outras levando em conta os critérios de decisão selecionados e seus respectivos pesos.

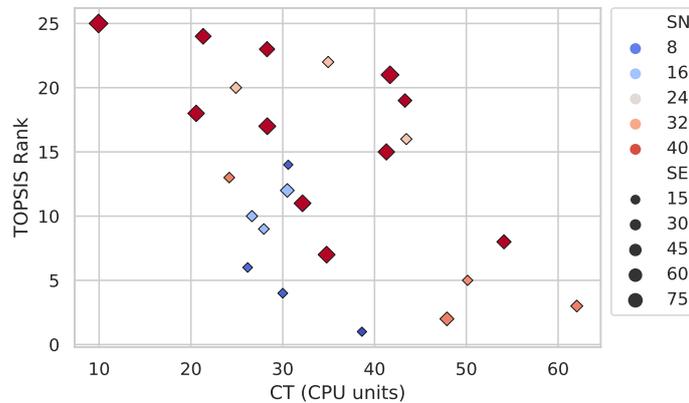
A Tabela 4.1 contém os resultados dos algoritmos MCDA aplicados as 25 fatias de rede mapeadas na infraestrutura pelo algoritmo VNE RW-BFS [16] e suas respectivas pontuações e fluxos de preferência líquida organizados em um *ranking*. Para os experimentos realizados com o PROMETHEE II consideramos a função de preferência usual. Pelo fato dos algoritmos MCDA utilizados apresentarem princípios de funcionamento diferentes é esperado que houvesse diferenças nos *rankings* gerados por cada um deles.

Diferente do TOPSIS que é baseado em agregação de valores, o algoritmo PROMETHEE II utiliza uma metodologia baseada em *Outranking* e comparações par a par para analisar as alternativas. Podendo empregar diferentes funções de preferência de acordo com a natureza do problema. Neste algoritmo o Fluxo de Preferência Líquida (ϕ) toma o lugar da pontuação como métrica de comparação do desempenho dos vetores de critérios e semelhante ao algoritmo anterior maiores valores do ϕ indicam melhores fatias de rede segundo os critérios considerados. Em contraste com o TOPSIS, o PROMETHEE II permite a existência de mais de uma alternativa com o mesmo ϕ , de forma que estas alternativas são classificadas igualmente no *ranking*. Optamos por colocar em posições adjacentes no *ranking* as alternativas com valores iguais de ϕ no algoritmo PROMETHEE II, utilizando números inteiros para sinalizar estas ocorrências.

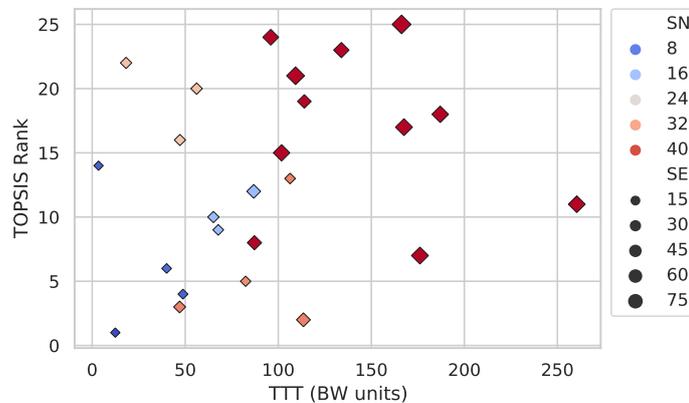
TOPSIS	PROMETHEE II	Pontuação	Fluxo de Preferência Líquida (ϕ)	Rank
slice-4	slice-4	0.549303	0.310185	1
slice-18	slice-18	0.539124	0.203704 ¹	2
slice-8	slice-22	0.484758	0.203704 ¹	3
slice-20	slice-20	0.480813	0.152778	4
slice-22	slice-24	0.478457	0.143519	5
slice-6	slice-13	0.47516	0.111111	6
slice-9	slice-9	0.462292	0.106481	7
slice-3	slice-23	0.458684	0.101852	8
slice-24	slice-7	0.450219	0.092593	9
slice-0	slice-6	0.433976	0.074074 ²	10
slice-11	slice-3	0.428693	0.074074 ²	11
slice-13	slice-19	0.42844	0.055556	12
slice-17	slice-0	0.418919	0.041667	13
slice-23	slice-8	0.402024	-0.009259 ³	14
slice-5	slice-5	0.401279	-0.009259 ³	15
slice-7	slice-17	0.390701	-0.050926	16
slice-12	slice-11	0.389643	-0.074074	17
slice-15	slice-12	0.388505	-0.087963	18
slice-19	slice-16	0.388457	-0.120370	19
slice-14	slice-15	0.373403	-0.129630	20
slice-16	slice-14	0.348055	-0.148148	21
slice-10	slice-10	0.330851	-0.171296	22
slice-2	slice-2	0.327409	-0.185185	23
slice-1	slice-1	0.292097	-0.277778	24
slice-21	slice-21	0.261689	-0.407407	25

Tabela 4.1: *Ranking* gerado pelos algoritmos MCDA TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios utilizando as configurações do Modelo 1A.

A Figura 4.5a apresenta a distribuição de alguns atributos presentes nos vetores critérios em relação a sua posição no *ranking* gerado pelo algoritmo TOPSIS, com uma maior ênfase na CT. *A priori* podemos observar uma diferença considerável nas características de instâncias em posições adjacentes, provavelmente devido ao fato do TOPSIS ser um algoritmo baseado em agregamento. Houve uma variação considerável entre os valores de CT e SN dos vetores de critérios presentes nas dez primeiras posições. Considerando fatias de rede com CT entre 25 e 35 temos uma grande variedade nas posições do *ranking* assim como dos valores de SN e SE.



(a) Capacidade Total (CT)



(b) Taxa de Transferência Total (TTT)

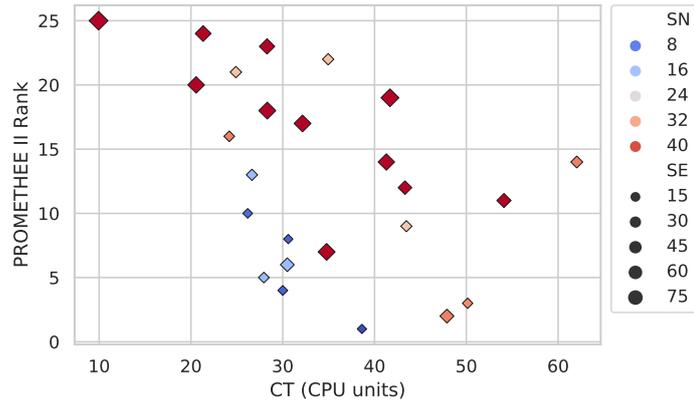
Figura 4.5: Distribuições da Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) com foco em diferentes atributos em relação aos *rankings* gerados pelo algoritmo TOPSIS considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1A.

Quando realizamos a mesma análise em relação a TTT, como a presente na Figura 4.5b

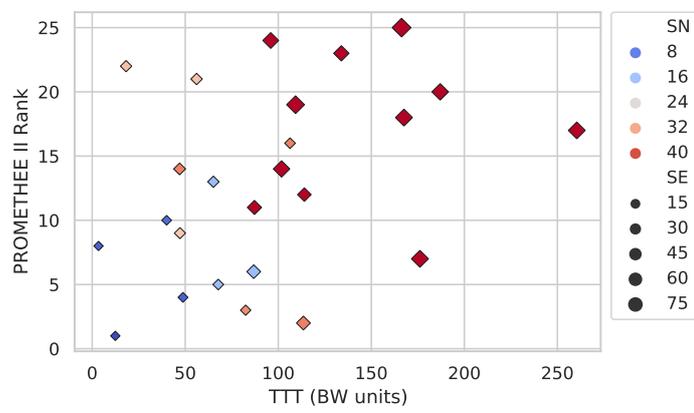
podemos observar uma maior semelhança entre as instâncias em posições mais próximas do que na distribuição de CT. Com uma tendência a aumentar a similaridade entre as fatias de rede proporcionalmente ao aumento da TTT. As fatias de rede que apresentaram os maiores valores TTT geralmente também apresentaram posições mais baixas no *ranking* o que implica que neste Modelo fatias de rede com alto valor de TTT não alcançam bons valores nos outros atributos presentes nos vetores de critérios, geralmente apresentando altos valores de SN e SE, com uma alocação em nós menos centrais da infraestrutura porém com altos valores de VTL.

Esse tipo de alocação leva a uma maior instabilidade no funcionamento das fatias de rede e um comportamento menos previsível na sua execução. Estas instâncias seriam mais adequadas para serviços que têm requisitos menos críticos e uma necessidade considerável de recursos de rede, como nos casos de uso mais padrões de eMBB e mMTC. Para o algoritmo PROMETHEE II tivemos os resultados presentes na Figuras 4.6 com foco em CT e TTT respectivamente. De forma geral o padrão foi semelhante ao TOPSIS, porém no algoritmo PROMETHEE II os vetores de critérios em posições adjacentes apresentaram uma maior semelhança, formando pequenos grupos locais com valores similares de seus atributos. Assim como no caso do TOPSIS, os resultados do PROMETHEE II indicaram que no Modelo 1A o aumento da CT levou a posições maiores no ranking ao mesmo tempo que um aumento na TTT leva a posições menores e maiores níveis de sobrecarga.

A partir dos resultados gerados pela execução dos algoritmos MCDA, o processo de análise e decisão sobre as propriedades das instâncias de fatia de rede se torna mais simples e transparente. Um sistema de suporte à decisão utilizando técnicas MCDA e a partir da customização dos critérios de decisão pode automaticamente designar as instâncias que segundo os algoritmos utilizados seriam mais adequadas a determinados casos de uso e detectar fatias de rede com propriedades semelhantes mapeadas simultaneamente na mesma infraestrutura física. Essa abordagem pode ser utilizada tanto anteriormente ao processo de criação efetiva das fatias de rede, simulando as características topológicas e tecnológicas que as fatias de rede irão apresentar para uma alocação futura como para analisar sistemas já em execução, observando a efetividade e adequabilidade das alocações realizadas e o seu relacionamento com os requisitos e demandas de serviço.



(a) Capacidade Total (CT)



(b) Taxa de Transferência Total (TTT)

Figura 4.6: Distribuições da Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) com foco em diferentes atributos em relação aos *rankings* gerados pelo algoritmo PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1A.

4.1.2 Modelo 1B *redge-grid*

Para o segundo experimento do Cenário 1 utilizamos a topologia *Redge* no modelo de infraestrutura e *Grid* para os projetos de fatia de rede. Na topologia *Redge* temos um certo nível de aleatoriedade em comparação com *Grid*. É esperado uma maior variação nos valores dos atributos topológicos quando comparamos com os resultados do Modelo 1A.

Atributos Topológicos e Tecnológicos

Para os atributos topológicos desse Modelo obtivemos os resultados presentes na Figura 4.7. Quando comparamos com o padrão exibido na Figura 4.1 do Modelo 1A, há uma diferença maior entre o padrão de comportamento de ITM e ACB e também no que diz respeito a forma espelhada deste atributos, presentes em VTL. Instâncias com valores altos de TTT desta vez apresentaram uma grande variedade de valores de CT e dos atributos topológicos. Há também a formação de pequenos grupos locais de vetores de critérios com propriedades semelhantes.

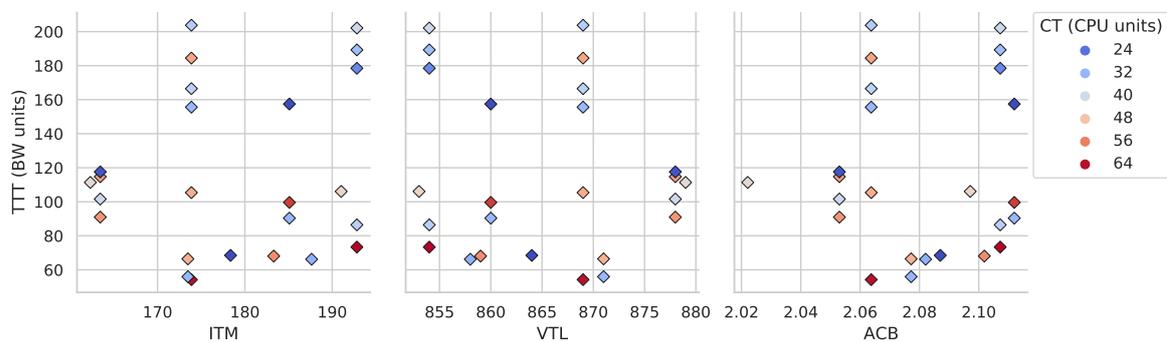


Figura 4.7: Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTM) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT), utilizando as configurações do Modelo 1B.

Fatias de rede com maiores valores de ITM indicam uma alocação em nós mais centrais da rede, estes nós geralmente recebem um maior destaque pelo operador de serviço de rede, apresentando uma maior disponibilidade de recursos computacionais e de rede. O que por sua vez os fazem mais suscetíveis a maiores cargas de trabalho e por consequência uma maior sobrecarga de recursos, sendo costumeiramente os primeiros alvos de tentativas de invasões e ataques de negação de serviço. Grandes valores de VTL caracterizam fatias de rede cuja remoção ou negação de serviço nos nós físicos em que suas VNFs foram instanciadas provocaria uma grande alteração nos menores caminhos de dados da rede, uma vez que estes nós funcionam como conectores de menores caminhos na rede, o que também os torna alvos significativos de ataques de segurança. O que leva a um questionamento sobre a sua adequabilidade a casos como alguns casos especiais de mMTC e uRLLC que lidam com dados sensíveis, principalmente na área de Telemedicina e Redes de Sensores Sem Fio

(WSL).

Para a CM e CT temos a Figura 4.8, onde está presente o que parece ser um forte padrão linear entre CM e CT. Assim como na Figura 4.2 do Modelo 1A a TTT parece diminuir com o aumento de CM e CT, além de apresentar uma dispersão considerável dos valores de SN. Essa combinação de topologias do Modelo 1B favorece uma alocação de fatias de rede com capacidades que variam em um padrão que se aproxima do linear, sendo mais adequada a alocação múltiplas instâncias com propriedades semelhantes para um determinado serviço, o que pode ser interessante para o caso de redes sensores sem fio em mMTC e para utilização de mecanismos de tolerância a falha alocando fatias de rede reservas para reposição no caso de falha em uRLLC. Essa configuração também favorece a escalabilidade de serviços, alocando fatias de rede que vão aumentando os valores de CM e CT com baixa granularidade enquanto mantém as outras propriedades semelhantes, o que pode ter bastante aplicabilidade em casos como eMBB.

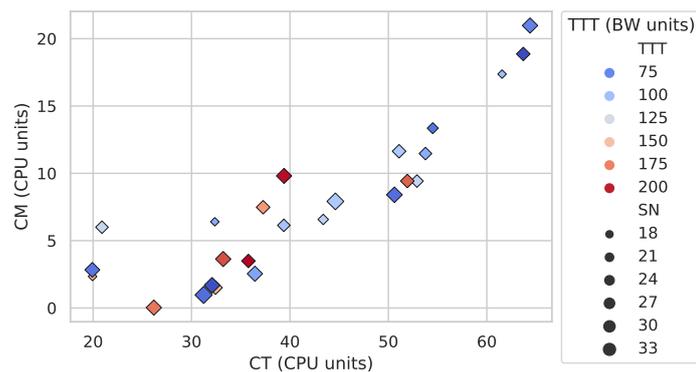


Figura 4.8: Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 1B.

Em contraste com os valores de CM e CT que crescem apresentando uma baixa granularidade e uma certa linearidade, na Figura 4.9 a partir de $TTT = 140$ podemos dividir o conjunto de vetores de critérios em dois grandes grupos. No primeiro grupo, constituído dos valores onde $TTT < 140$ há uma quantidade maior de instâncias de fatia de rede com valores mais próximos de TTM e TTT e variando bastante a CT. O segundo grupo com $TTT > 140$ é mais disperso, com uma quantidade menor de fatias de rede. De forma geral temos valores baixos de CT com aumento das taxas de transferência. Uma alocação que priorize a taxa de

transferência neste Modelo ficaria restrita a fatias de rede presentes entre estes dois grupos apresentados. As instâncias que pertencem a cada um destes grupos apresentam uma certa similaridade de suas propriedades, favorecendo casos de uso relacionados a mMTC, porém a escalabilidade de instâncias considerando a TTM e TTT é comprometida, visto que temos uma ausência de instâncias com propriedades intermediárias.

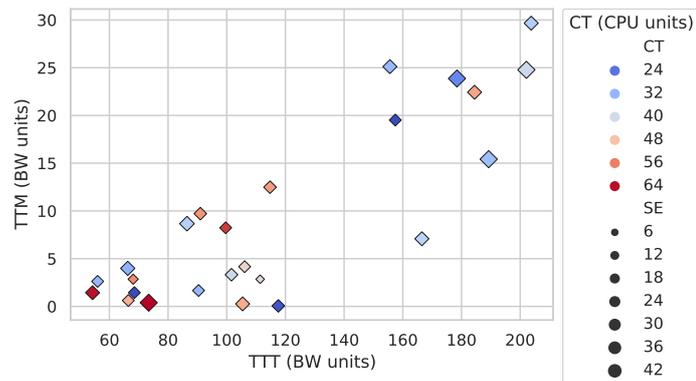


Figura 4.9: Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1B.

O coeficiente de correlação de *Spearman* neste Modelo apresentou em sua maioria correlações negativas fracas e algumas positivas moderadas com grande similaridade ao Modelo anterior quando analisamos de forma geral, principalmente em relação aos atributos topológicos. Destacamos as correlações entre CM e CT e TTM e TTT que apresentaram valores altos de correlação positiva, o que de certa forma era esperado, assim como a manutenção do comportamento dos atributos topológicos em comparação com o Modelo 1A.

Decisão de Múltiplos Critérios

Os resultados dos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II estão presentes na Tabela 4.2. Para as configurações definidas nesta versão do experimento obtivemos assim como no Modelo 1A alternativas com valores iguais do ϕ no *ranking* gerado pelo algoritmo PROMETHEE II, isto é, houve vetores de critérios que foram classificados como de igual valor pelo algoritmo de acordo com a importância de cada critério definido no processo de tomada de decisão, no Modelo 1B obtivemos apenas duas ocorrências também caracterizadas na forma de números inteiros ao lado dos valores do ϕ . Neste Modelo optamos por dar um foco maior a CT em

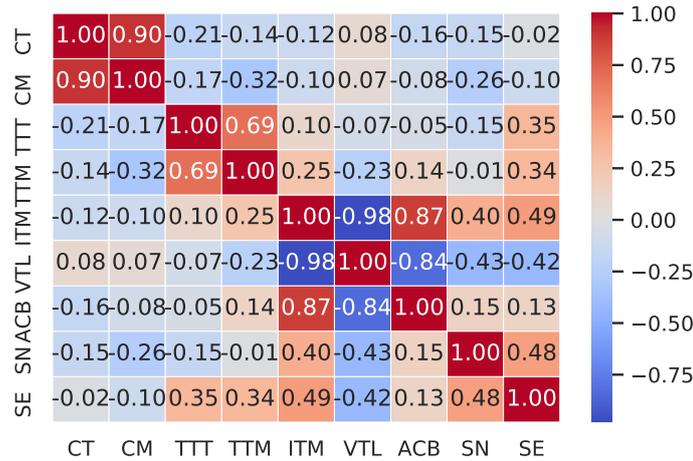


Figura 4.10: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1B.

relação ao *ranking* dos algoritmos MDCA, obtendo a Figura 4.11 que contrasta o resultado dos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II.

Observando os resultados do TOPSIS podemos ver um padrão semelhante ao de uma espiral, onde entre as dez primeiras posições há uma grande variação da CT e SN. O mesmo pode ser dito dos resultados do PROMETHEE II, que também apresentaram uma grande variedade nas propriedades dos vetores de critérios em posições próximas do *ranking*. Esse tipo de comportamento favorece uma alocação de recursos com uma maior granularidade, proporcionando fatias de rede com uma maior variedade de propriedades e diferenças relativamente pequenas entre seus valores, permitindo escalar mais facilmente os serviços em execução para fatias de rede com valores maiores ou menores dos atributos considerados, assim como a utilização dessas fatias semelhantes para substituição em caso de falha.

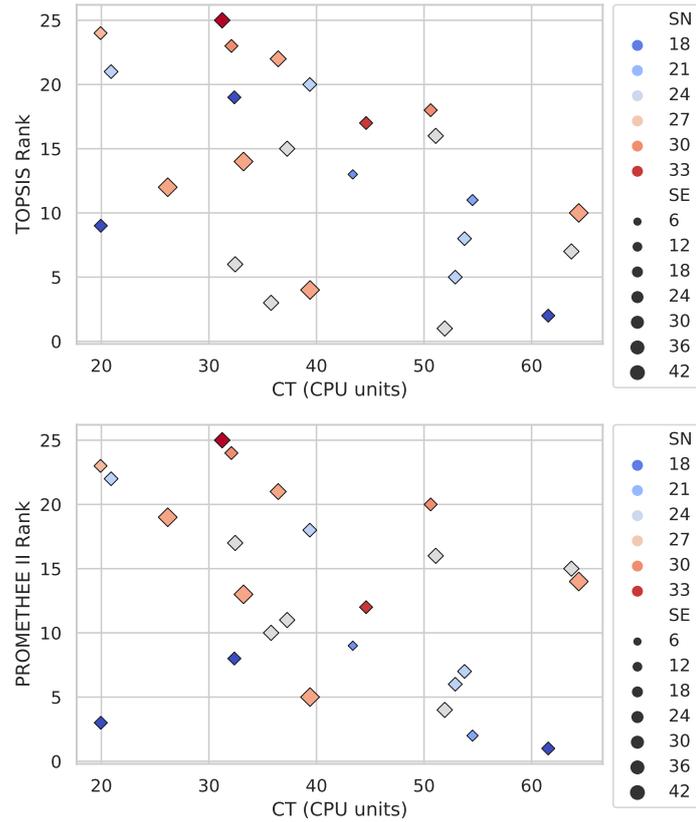


Figura 4.11: Distribuição da Capacidade Total (CT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos *rankings* gerados pelos algoritmo TOPSIS e PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1B.

TOPSIS	PROMETHEE II	Pontuação	Fluxo de Preferência Líquida (ϕ)	Rank
slice-20	slice-12	0.600884	$4.629630 \cdot 10^{-1}$	1
slice-12	slice-19	0.567135	$2.500000 \cdot 10^{-1}$	2
slice-24	slice-21	0.555825	$2.222222 \cdot 10^{-1}$	3
slice-11	slice-20	0.552433	$1.898148 \cdot 10^{-1}$	4
slice-6	slice-11	0.482148	$1.805556 \cdot 10^{-1}$	5
slice-5	slice-6	0.478125	$1.527778 \cdot 10^{-1}$	6
slice-10	slice-4	0.474875	$1.250000 \cdot 10^{-1}$	7
slice-4	slice-0	0.47117	$1.203704 \cdot 10^{-1}$	8
slice-21	slice-7	0.462891	$8.333333 \cdot 10^{-2}$	9
slice-17	slice-24	0.462581	$7.87037 \cdot 10^{-2}$	10
slice-19	slice-9	0.461771	$4.629630 \cdot 10^{-3}$	11
slice-13	slice-18	0.421023	$5.551115 \cdot 10^{-17}$	12
slice-7	slice-3	0.403386	$-4.629630 \cdot 10^{-31}$	13
slice-3	slice-17	0.382988	$-4.629630 \cdot 10^{-31}$	14
slice-9	slice-10	0.382466	$-5.092593 \cdot 10^{-22}$	15
slice-2	slice-2	0.37739	$-5.092593 \cdot 10^{-22}$	16
slice-18	slice-5	0.361224	$-6.018519 \cdot 10^{-2}$	17
slice-8	slice-1	0.342486	$-6.944444 \cdot 10^{-2}$	18
slice-0	slice-13	0.332448	$-1.157407 \cdot 10^{-1}$	19
slice-1	slice-8	0.320129	$-1.296296 \cdot 10^{-1}$	20
slice-16	slice-23	0.289751	$-1.574074 \cdot 10^{-1}$	21
slice-23	slice-16	0.256287	$-2.175926 \cdot 10^{-1}$	22
slice-14	slice-22	0.243756	$-2.407407 \cdot 10^{-1}$	23
slice-22	slice-14	0.242943	$-3.240741 \cdot 10^{-1}$	24
slice-15	slice-15	0.17952	$-4.444444 \cdot 10^{-1}$	25

Tabela 4.2: *Ranking* gerado pelos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios e utilizando as configurações do Modelo 1B.

4.1.3 Modelo 1C *waxman-redge*

Para o terceiro experimento do Cenário 1 utilizamos a topologia *Waxman* para o modelo de infraestrutura e *Redge* na criação dos projetos de fatia de rede. Ambas as topologias utilizadas apresentam níveis maiores de aleatoriedade.

Atributos Topológicos e Tecnológicos

No Modelo 1C podemos observar um padrão mais semelhante ao Modelo 1A em relação aos atributos topológicos, presentes na Figura 4.12. O comportamento de ITM e ACB são novamente bastante semelhantes, onde VTL se aproxima da mesma versão espelhada deste padrão, presente de maneira mais forte no Modelo 1A. Obtivemos uma formação forte de linhas verticais em certas regiões da cada atributo topológico, implicando fatias de rede instanciadas com características topológicas semelhantes porém valores distintos dos outros atributos presentes nos vetores de critérios, como instâncias que simultaneamente apresentam altos valores de CT e TTT e atributos topológicos semelhantes podem ser de grande valor no conjunto de casos de uso eMBB, principalmente quando desejamos implantar vários serviços semelhantes que requerem alta capacidade.

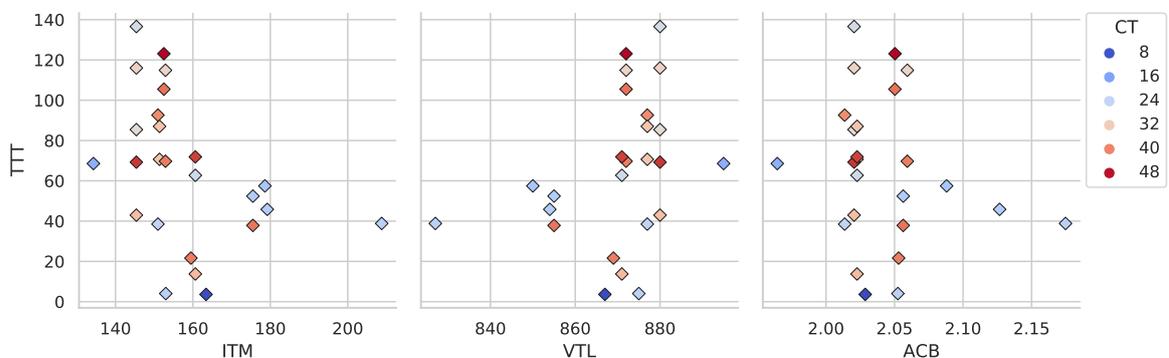


Figura 4.12: Valores de Intermediação (ITM), Vitalidade (VTM) e Acessibilidade (ACB) das instâncias de fatia de rede, em relação a sua Taxa de Transferência Total (TTT) e Capacidade Total (CT), utilizando as configurações do Modelo 1C.

Neste Modelo há uma maior facilidade na alocação de fatias de rede com características semelhantes em diferentes regiões do modelo de infraestrutura, escolhendo fatias de rede com nós mais ou menos centrais na rede, mais próximos ou mais distantes uns dos outros, ou com um maior ou menor impacto na infraestrutura. A TTT deste cenário apresentou um

padrão crescente até próximo de $TTT = 60$, seguido de uma diminuição e um retorno do crescimento perto de $TTT = 100$, como representado na Figura 4.13. Um comportamento semelhante aconteceu com a CT de forma que temos instâncias com altos valores de TTT e CCT. Como já mencionado anteriormente, essas características são bastante indicadas em casos de uso associados a eMBB, principalmente na utilização em *hotspots* onde há uma grande demanda por capacidade computacional e taxas de transferência altas para suportar o grande volume de tráfego. Os vetores de critérios com maiores valores de TTT apresentam também valores mais altos de SE, o que pode ser fator limitante na execução de certos tipos de serviços nestas instâncias.

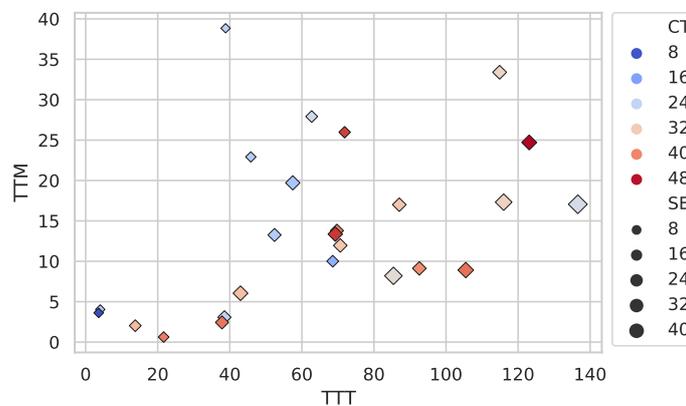


Figura 4.13: Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação ao Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1C.

Com exceção dos aspectos discutidos anteriormente, analisando de forma geral comportamento dos atributos tecnológicos presentes nos vetores de critérios deste Modelo também foram semelhantes ao padrão dos modelos anteriores. O mapa de calor, apresentado na Figura 4.14, indica parte desta semelhança. Podemos observar que houve uma correlação positiva considerável entre TTT e SE e também entre TTT e SN, sugerindo que fatias de rede com uma quantidade maior de recursos de rede estão também sujeitas a uma maior sobrecarga de recursos computacionais e de rede nesta configuração topológica.

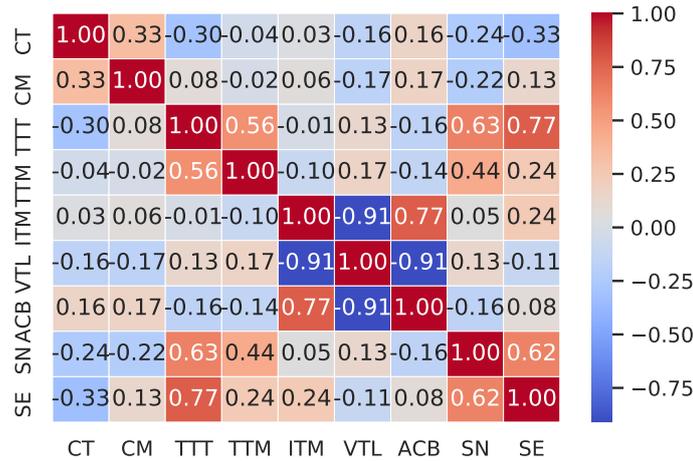


Figura 4.14: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 1C.

Decisão de Múltiplos Critérios

Podemos observar na tabela 4.3 as diferenças dos resultados dos algoritmos MDCA neste Modelo, que de certa forma também foi similar aos modelos anteriores. Na Figura 4.15 temos um foco nos resultados gerados pelo algoritmo TOPSIS, que apresentou um padrão em espiral bastante semelhante aos resultados do mesmo no Modelo 1B, apresentando uma grande variedade nas propriedades dos vetores de critérios localizados posições adjacentes do *ranking*.

4.1.4 Aspectos Gerais do Cenário 1

Fazendo uma síntese dos aspectos gerais do Cenário 1 calculamos as medianas dos atributos presentes nos vetores de critérios. Para os atributos topológicos temos a Figura 4.16, onde podemos ver que os Modelos *redge-grid* e *waxman-redge* apresentaram valores bem próximos destes atributos, sendo consideravelmente menores que *grid-waxman* em relação a ITM e VTL e consideravelmente maiores que o mesmo para os valores de ACB. De forma geral, o Modelo *grid-waxman* mapeia os projetos de fatia de rede no modelo de infraestrutura utilizando nós mais centrais deste modelo e com maior impacto na reconfiguração da rede de infraestrutura no caso de falha, porém mais distantes dos outros nós presentes nesta mesma infraestrutura.

TOPSIS	PROMETHEE II	Pontuação	Fluxo de Preferência Líquida	Rank
slice-21	slice-21	0.677045	0.398148	1
slice-3	slice-16	0.664443	0.310185	2
slice-14	slice-14	0.658933	0.310185	2
slice-8	slice-3	0.646817	0.277778	4
slice-16	slice-8	0.571557	0.277778	5
slice-5	slice-5	0.53286	0.143519	6
slice-0	slice-24	0.529879	0.083333 ¹	7
slice-24	slice-9	0.506219	0.083333 ¹ 8	
slice-9	slice-19	0.49348	0.060185	9
slice-10	slice-0	0.492112	0.046296	10
slice-20	slice-20	0.483382	0.037037	11
slice-15	slice-12	0.482382	0.032407	12
slice-19	slice-11	0.465779	-0.018519 ²	13
slice-17	slice-1	0.464277	-0.018519 ²	14
slice-12	slice-10	0.453723	-0.074074	15
slice-11	slice-2	0.452843	-0.078704	16
slice-1	slice-15	0.437115	-0.083333	17
slice-18	slice-17	0.427666	-0.138889	18
slice-6	slice-6	0.423671	-0.157407	19
slice-2	slice-18	0.41854	-0.166667	20
slice-22	slice-23	0.412063	-0.203704	21
slice-7	slice-22	0.403482	-0.208333	22
slice-23	slice-4	0.395962	-0.222222	23
slice-4	slice-7	0.389133	-0.250000	24
slice-13	slice-13	0.336668	-0.439815	25

Tabela 4.3: *Ranking* gerado pelos algoritmos TOPSIS e PROMETHEE II com atribuição igualitária de pesos aos atributos dos vetores de critérios e utilizando as configurações do Modelo 1C.

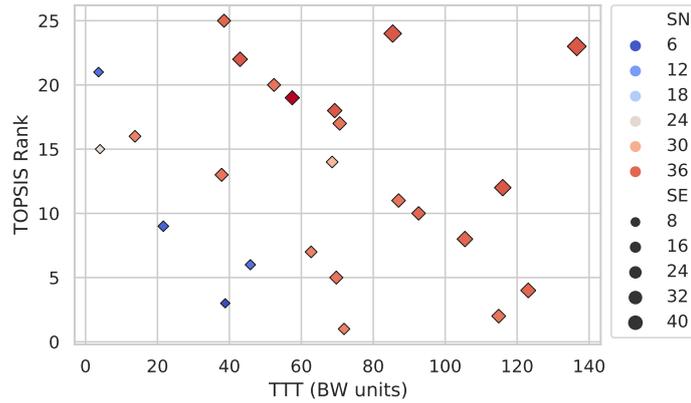


Figura 4.15: Distribuição da Taxa de Transferência Total (TTT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos *rankings* gerados pelo algoritmo TOPSIS considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 1C.

Os Modelos *redge-grid* e *waxman-redge* tiveram um comportamento oposto, sendo mapeados em menos centrais e com menor impacto na infraestrutura, porém consideravelmente mais próximos dos outros presentes na mesma. Uma das hipóteses possíveis para esse comportamento da topologia *Grid* é o fato da mesma apresentar conexões diretas apenas com nós em posições próximas, de forma que dois nós em posições muito distantes precisam passar por muitos nós intermediários para se comunicarem, logo, do ponto de vista de comunicação é mais efetivo instanciar fatias de rede em nós mais centrais dessa infraestrutura.

Investigando a capacidade computacional e taxa de transferência temos a a Figura 4.17. O Modelo *redge-grid* obteve o maior valor da mediana da CT e CM, o que favorece a sua utilização principalmente em casos como eMBB, devido a enorme demanda de recursos computacionais e de rede, em contraste com *grid-waxman* que apresentou os menores valores, podendo ser utilizado em aplicações de menor demanda e menos críticas como no caso de mMTC. Observando os recursos de rede, no caso do modelo *redge-grid* que obteve o maior valor da mediana da CT ao mesmo tempo que apresentou o menor valor da mediana de CM. Esse comportamento pode limitar a execução de certos tipos de serviços neste Modelo, apesar da alta TTT, visto que pode haver requisitos mínimos de taxa de transferência que certas fatias de rede precisam cumprir, principalmente em casos envolvendo uRLLC.

Investigando as medianas da capacidade computacional e taxa de transferência temos a

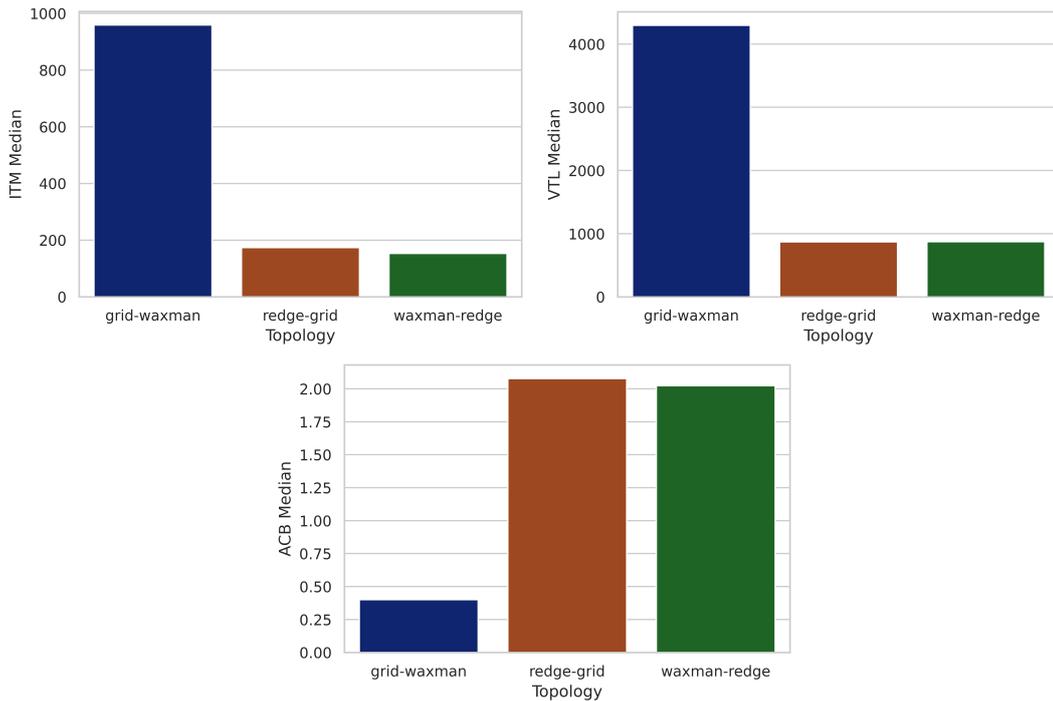


Figura 4.16: Mediana dos atributos topológicos do Cenário 1.

Figura 4.17. O Modelo *redge-grid* obteve o maior valor da mediana da CT e CM, o que favorece a sua utilização principalmente em casos como eMBB, devido a enorme demanda de recursos computacionais e de rede, *waxman-redge* obteve resultados semelhantes. Em contraste com *grid-waxman* que apresentou os menores valores, podendo ser utilizado em aplicações de menor demanda e menos críticas como no caso de mMTC. Observando os recursos de rede, no caso do modelo *redge-grid* que obteve o maior valor da mediana da TTT ao mesmo tempo que apresentou o menor valor da mediana de TTM. Esse comportamento pode limitar a execução de certos tipos de serviços neste modelo apesar da alta TTT, visto que pode haver requisitos mínimos de taxa de transferência que certas fatias de rede precisam cumprir, principalmente em casos envolvendo uRLLC.

Colocando em evidência os valores de sobrecarga temos a Figura 4.18. O Modelo *grid-waxman* alcançou os maiores valores de SN e SE, o que indica uma tendência dessa configuração topológica em alocar nós e enlaces que já foram alocados por outras instâncias de fatia de rede invés de buscar nós que estão mais livres na infraestrutura ou que ainda não foram alocados. Estes altos valores de compartilhamento de recursos impactam diretamente no desempenho e previsibilidade dos serviços alocados em instâncias neste modelo. A con-

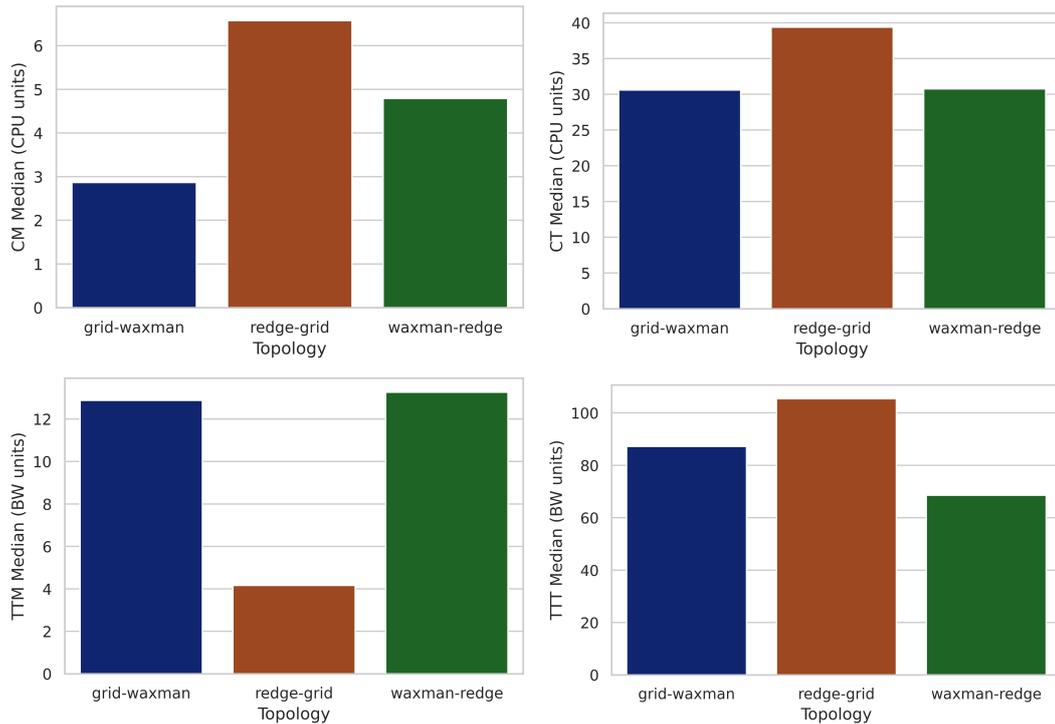


Figura 4.17: Mediana das capacidades computacionais e taxas de transferência do Cenário 1.

figuração topológica *waxman-redge* exibiu um valor relativamente alto de SN e baixo de SE, ao mesmo tempo que *redge-grid* manteve um padrão semelhante para SN e SE. O Modelo *grid-waxman* pode ser mais propício a utilização em casos de uso do tipo mMTC, principalmente em situações envolvendo dispositivos de baixo poder computacional, como em casos de IoT e Redes Sensores sem Fio, visto que não há uma grande necessidade de capacidade computacional nestes cenários, onde a prioridade é de recursos de rede voltados ao suporte a um grande número de dispositivos conectados.

4.2 Cenário 2

No segundo Cenário aumentamos o número de VNFs presentes em cada projeto de fatia de rede (N_S) mapeadas no modelo de infraestrutura de 3 para 6 VNFs e mantivemos os atributos restantes iguais ao do Cenário 1. Com esta configuração temos uma maior quantidade de VNFs e enlaces virtuais que as interconectam a serem mapeados no modelo de infraestrutura, ocasionando uma maior demanda pelos recursos disponíveis. Desejamos observar

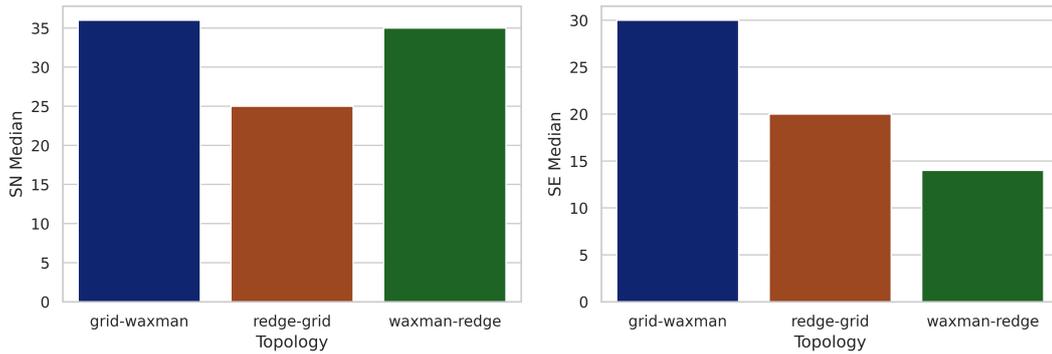


Figura 4.18: Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 1.

o comportamento do sistema a esse aumento nos requisitos de funcionamento das fatias de rede e por consequência no consumo dos recursos provisionados.

4.2.1 Modelo 2A *grid-waxman*

No Modelo 2A o comportamento dos atributos topológicos foi bastante semelhante ao seu correspondente no Cenário 1, apresentando a mesma alta semelhança entre ITM e ACB onde VTL se aproxima de uma versão invertida desse padrão. Examinando a Figura 4.19, podemos observar que os resultados de CM e CT manifestaram uma grande concentração de instâncias entre $CT = 60$ e $CT = 80$, com uma grande variação da TTT e SN e um único *outlier* que apresenta valores muito maiores que os outros vetores de critérios deste modelo. Dessa forma, podemos escalar os valores de TTT e SN enquanto mantivemos próximos os valores de CM e CT, assim como fazer a implantação de um serviço em múltiplas fatias similares.

Essa distribuição mais concentrada de instâncias em uma única região com capacidades computacionais semelhantes inviabiliza o processo de alocação fatias de rede para serviços que requisitam uma capacidade computacional maior que $CM = 6$ e $CT = 90$, assim como a escalabilidade dessas fatias quanto precisamos de valores maiores de CM e CT, que estão fora da região onde as instâncias estão concentradas, implicando em uma baixa compatibilidade para casos como eMBB, onde grandes capacidades computacionais a capacidade de escalar instâncias continuamente e não apenas em certos intervalos são propriedades desejadas. A utilização desta configuração topológica pode ser mais pertinente para o conjunto de casos de uso mMTC, onde em muitas ocasiões precisamos criar múltiplas fatias de rede com

propriedades semelhantes e temos baixos requisitos de capacidade computacional e também alguns casos de uso com menor de demanda de recursos do conjunto uRLLC onde se necessita a alocação de fatia de rede extras para tolerância a falhas.

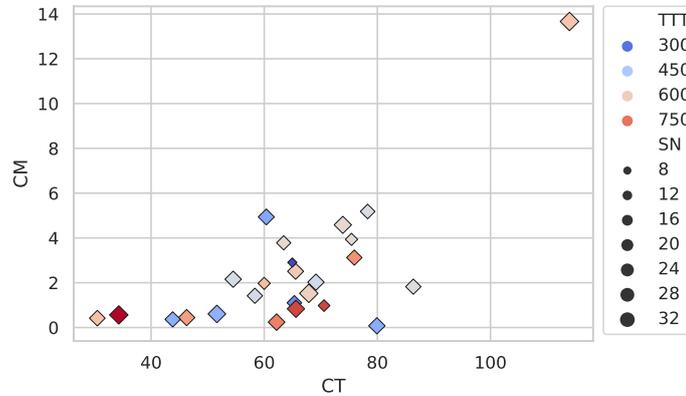


Figura 4.19: Capacidade Mínima (CM) em relação a Capacidade Total (CT), Taxa de Transferência Total (TTT) e Sobrecarga de Nós (SN) das instâncias de fatia de rede, utilizando as configurações do Modelo 2A.

Mais uma vez temos um mapa de calor na Figura 4.20 apresentando as características gerais do modelo e indicando a relação entre os atributos que compõem os vetores de critérios, que de forma geral foram bastante similares aos do Cenário 1. Dentre os valores presentes no mapa de calor podemos destacar a correlação positiva moderada entre SN e SE, sugerindo uma tendência em fatias de rede com uma maior sobrecarga de nós em apresentar também uma maior sobrecarga de enlaces. Os resultados dos algoritmos MCDA também apresentaram padrões similares aos presentes aos padrões gerais do Cenário 1, onde o algoritmo PROMETHEE II manteve instâncias de fatias de rede com maior similaridade em posições adjacentes. Em contraste, o algoritmo TOPSIS obteve uma maior variedade das propriedades dos vetores de critérios em posições próximas no *ranking*.

4.2.2 Modelo 2B *redge-grid*

Neste experimento obtivemos também resultados bastante semelhantes aos do Cenário 1, onde optamos por dar um maior destaque para os valores de TTM e TTT, que apresentaram um padrão semelhante ao comportamento de CM e CT no Modelo 2A. Além dos aspectos já discutidos anteriormente nos outros cenários e modelos podemos constatar dois grandes

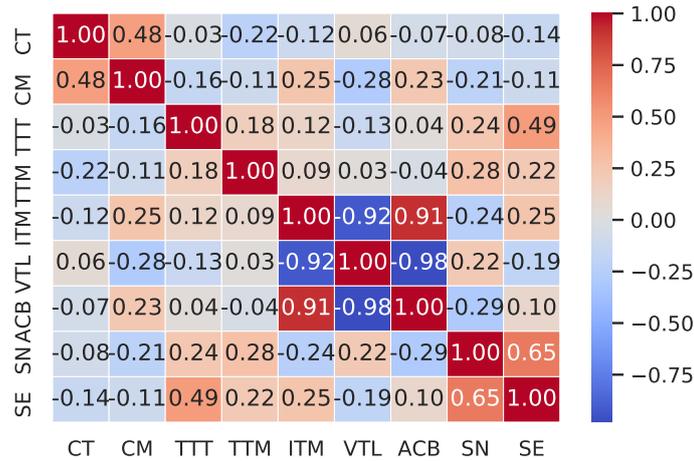


Figura 4.20: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2A.

grupos de instâncias com poucas fatias de rede com propriedades intermediárias entre esses grupos, prejudicando a granularidade da alocação, uma vez que no caso da não existência de uma fatia de rede com as propriedades adequadas aos requisitos de serviço o operador de rede terá que alocar instâncias que consomem mais recursos do que o requisitado, levando a uma baixa eficiência por parte do provedor de serviço ou prejudicar o desempenho da alocação ao utilizar instâncias com menos recursos disponíveis do que o requisitado. Constatamos mais uma vez o que parece ser um padrão linear crescente entre TTM e TTT até TTT = 500 e uma dispersão considerável dos valores de SE.

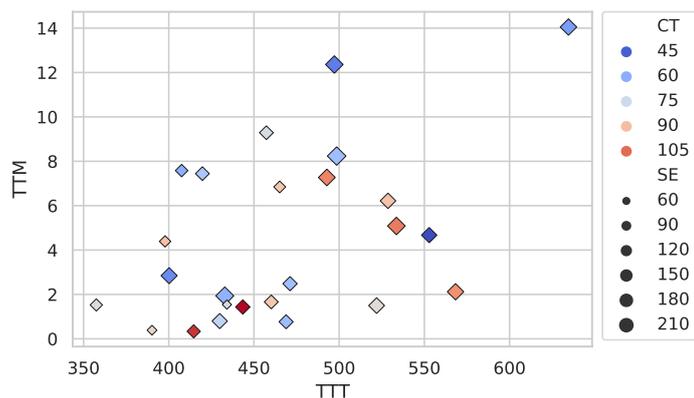


Figura 4.21: Taxa de Transferência Mínima (TTM) em relação à Taxa de Transferência Total (TTT), Capacidade Total (CT) e Sobrecarga de Enlaces (SE) dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2B.

Podemos confirmar novamente esta semelhança entre cenários analisando o mapa de calor da Figura 4.22. Neste Modelo obtivemos um maior valor de correlação entre SN e SE do que o seu correspondente no Cenário 1. Os algoritmos MCDA também apresentaram de forma geral resultados com características semelhantes ao cenário anterior.

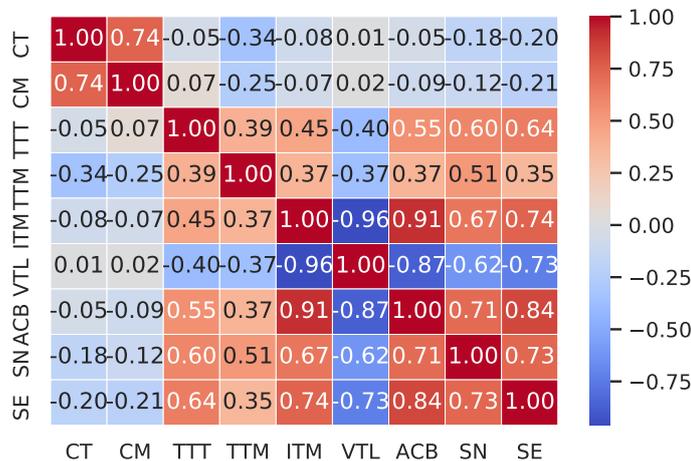


Figura 4.22: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2B.

4.2.3 Modelo 2C *waxman-redge*

No último Modelo do Cenário 2 alcançamos mais uma vez resultados semelhantes aos Modelos e Cenários anteriores, observando o mesmo padrão de comportamento nos atributos topológicos e comportamentos análogos nos atributos tecnológicos. No mapa de calor da Figura 4.23 destacamos a correlação positiva entre TTT e SE e SN e SE, sugerindo uma relação considerável entre o aumento dos valores de sobrecarga de nós ao aumento da sobrecarga de enlaces.

O resultado dos algoritmos MCDA novamente apresentaram uma correspondência com os Modelos anteriores. Podemos verificar fatias de rede com valores aproximados de TTT se diferenciando nas posições do *ranking* gerado pelo algoritmo PROMETHEE II a partir dos outros atributos presentes nos vetores de critérios. Este comportamento é representado pela formação de linhas verticais como as presentes na Figura 4.24, onde temos uma diversidade de valores de SN e SE e podemos observar o que parece ser um aumento nos valores de ambos com o crescimento da TTT.

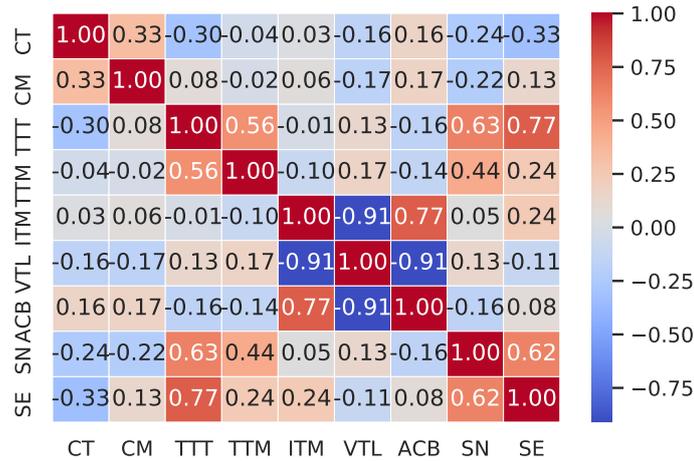


Figura 4.23: Mapa de calor do coeficiente de correlação de *Spearman* entre os atributos que fazem parte dos vetores de critérios, utilizando as configurações do Modelo 2C.

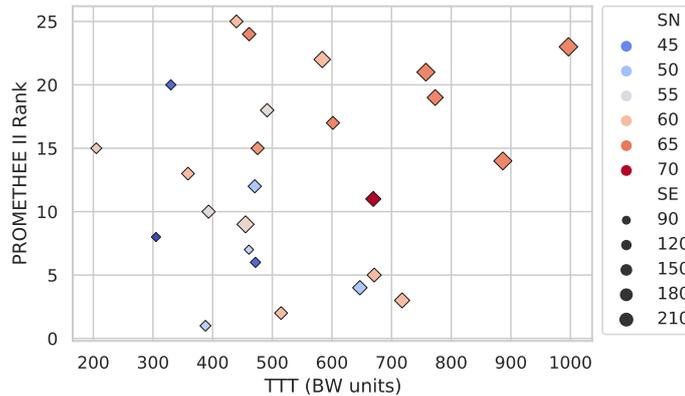


Figura 4.24: Distribuição da Taxa de Transferência Total (TTT), Sobrecarga de Nós (SN) e Sobrecarga de Enlaces (SE) em relação aos *rankings* gerados pelo algoritmo PROMETHEE II considerando os mesmos pesos para todos os critérios e utilizando as configurações do Modelo 2C.

4.2.4 Aspectos Gerais do Cenário 2

Investigando os aspectos gerais do Cenário 2 temos as Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, onde obtivemos o já esperado aumento nos valores das medianas das métricas analisadas, visto que agora temos uma quantidade maior de VNFs a serem mapeadas em cada fatia de rede, ocasionando um aumento geral nos valores dos atributos presentes nos vetores de critérios. Para os atributos topológicos os resultados foram bastante similares ao Cenário 1. O Modelo *grid-waxman* mais uma vez apresentou os maiores valores da mediana de ITM e VTL e o menor

valor da mediana de ACB enquanto *redge-grid* e *waxman-redge* apresentaram novamente medianas deveras próximas de ITM e VTL e consideravelmente menores que *grid-waxman*, em contraste com os seus altos valores da mediana de ACB, implicando que seus projetos de fatia de rede mapeados em nós que estão mais próximos dos outros presentes no modelo de infraestrutura.

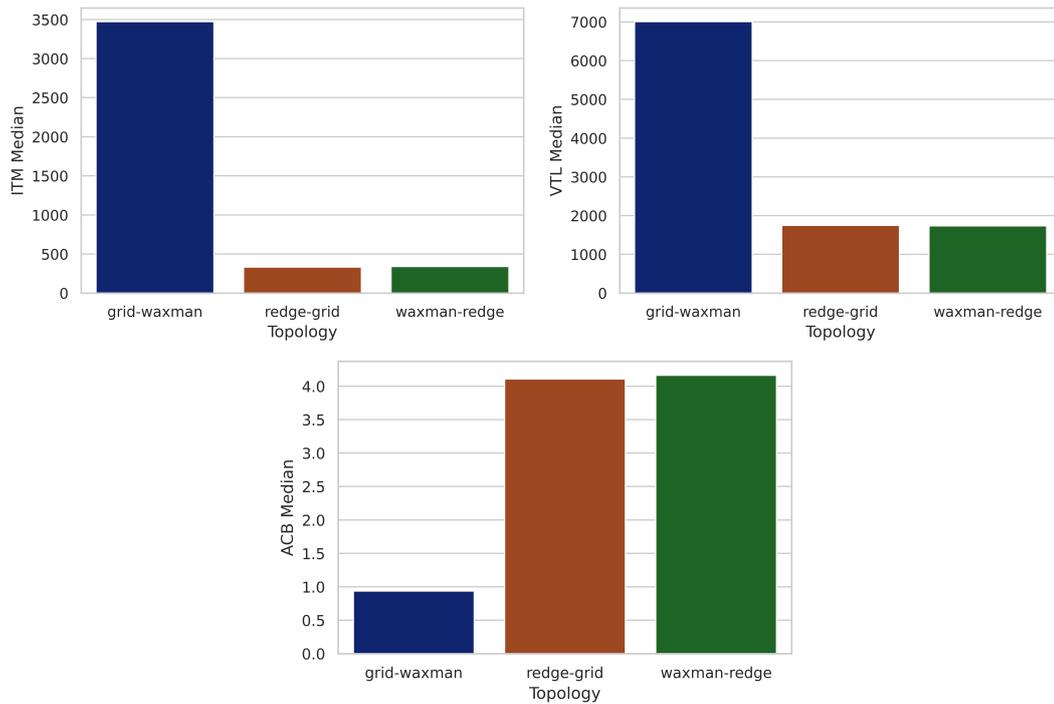


Figura 4.25: Mediana dos atributos topológicos do Cenário 2.

Se tratando das medianas dos atributos tecnológicos, diferente do Cenário 1 as fatias de rede da configuração topológica *waxman-redge* apresentaram um melhor balanceamento de recursos computacionais neste Cenário, enquanto *redge-grid* apresentou o melhor balanceamento de recursos de rede, manifestando o maior valor da mediana de TTM entre os Modelos e um valor consideravelmente alto da mediana de TTT próximo ao da configuração *waxman-redge*. O Modelo *grid-waxman* obteve uma mediana da sobrecarga de nós baixa, em contraste com valor alto da mediana da sobrecarga de enlaces que foi bastante próxima dos outros Modelos presentes neste Cenário. A configuração topológica *waxman-redge* obteve o melhor balanceamento das medianas da sobrecarga de nós e enlaces, enquanto *redge-grid* obteve o pior balanceamento.

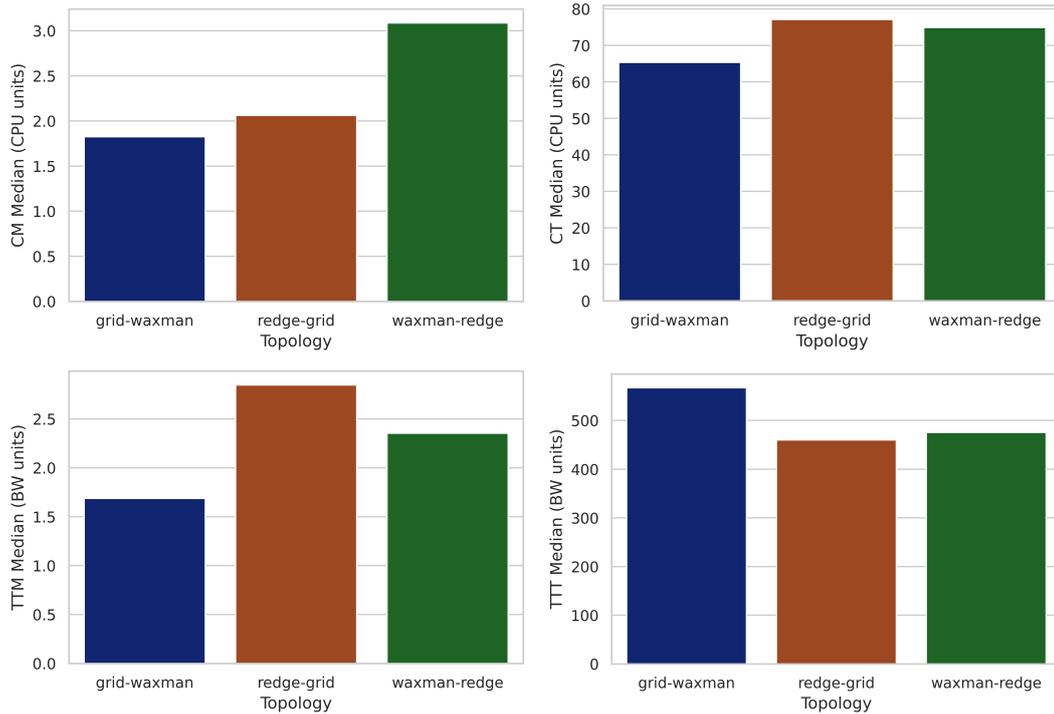


Figura 4.26: Mediana das capacidades e taxas de transferência do Cenário 2.

4.3 Cenário 3

No terceiro e último cenário aumentamos o número de VNFs presentes em cada projeto de fatia de rede a ser mapeado (N_S) de 6 para 9, como o objetivo de analisar o comportamento dos mapeamento de fatias de rede com um tamanho ainda maior do que no Cenário 2 e as suas possíveis consequências nos vetores de critérios. Em contrapartida, foi necessário diminuir a quantidade de projetos de fatia de rede a serem mapeados na infraestrutura (Q) de 25 para 10 para que possamos obter um conjunto de mapeamentos viáveis. Dessa forma, temos a configuração de um Cenário onde temos uma quantidade menor de instâncias de fatia de rede, porém estas apresentam uma quantidade de VNFs e requisitos ainda maiores de funcionamento, desejamos observar de que forma esse aumento no tamanho das das fatias de rede afetam as características das mesmas e como isso se relaciona com os Cenários anteriores.

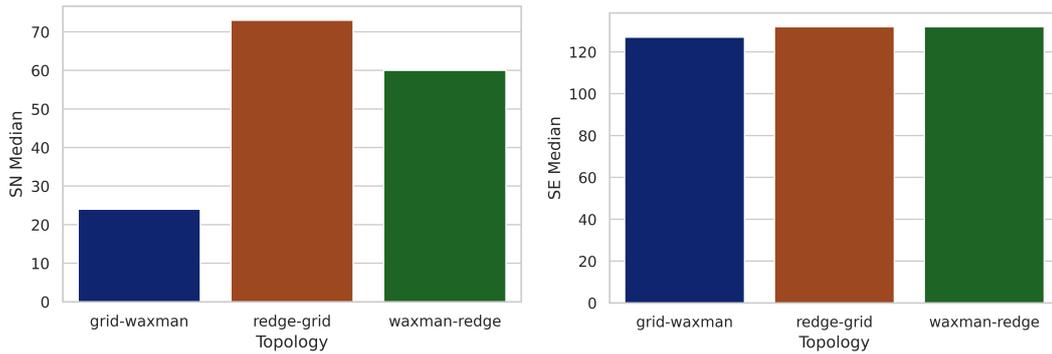


Figura 4.27: Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 2.

4.3.1 Aspectos Gerais do Cenário 3

De forma geral, o Cenário 3 apresentou um comportamento bastante semelhante aos dois cenários anteriores tanto nas características topológicas e tecnológicas dos vetores de critérios como no resultado dos algoritmos MCDA TOPSIS e PROMETHEE II, com o já esperado aumento dos recursos alocados pelos mapeamentos que por sua vez ocasiona no crescimento dos atributos que compõem os vetores de critérios. A Figura 4.28 apresenta uma visão geral dos valores das medianas dos atributos topológicos, onde é possível observar que os modelos *redge-grid* e *waxman-redge* novamente apresentaram valores próximos em todos os três atributos, ao mesmo tempo que *grid-waxman* apresentou valores consideravelmente maiores de ITM e VTL que os outros modelos, porém obteve também o menor valor da mediana de ACB assim como nos Cenários anteriores.

Se tratando dos atributos tecnológicos, constatamos na Figura 4.29 os resultados das medianas de CM, CT, TTM e TTT. Neste cenário obtivemos valores próximos de CT entre os Modelos, ao mesmo tempo que *grid-waxman* obteve os maiores valores de CM e CT em contraste com o seu comportamento nos Cenários anteriores. Destacamos o Modelo *redge-grid* que obteve o maior valor de TTM e ao mesmo tempo o menor valor de TTT. Em 4.30 temos indicados os resultados das medianas envolvendo os valores de sobrecarga de nós e enlaces, *grid-waxman* obteve valores de SN consideravelmente menores do que os outros Modelos, porém apresentou valores altos de SE, em contraste com *redge-grid* que apresentou o comportamento inverso.

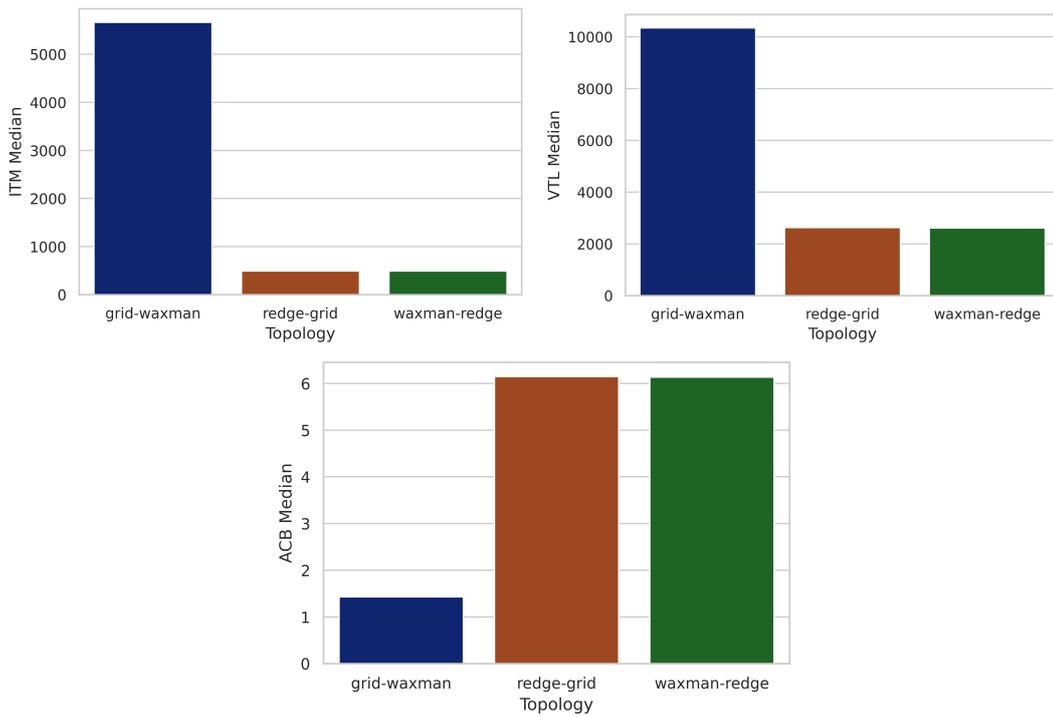


Figura 4.28: Mediana dos atributos topológicos do Cenário 3.

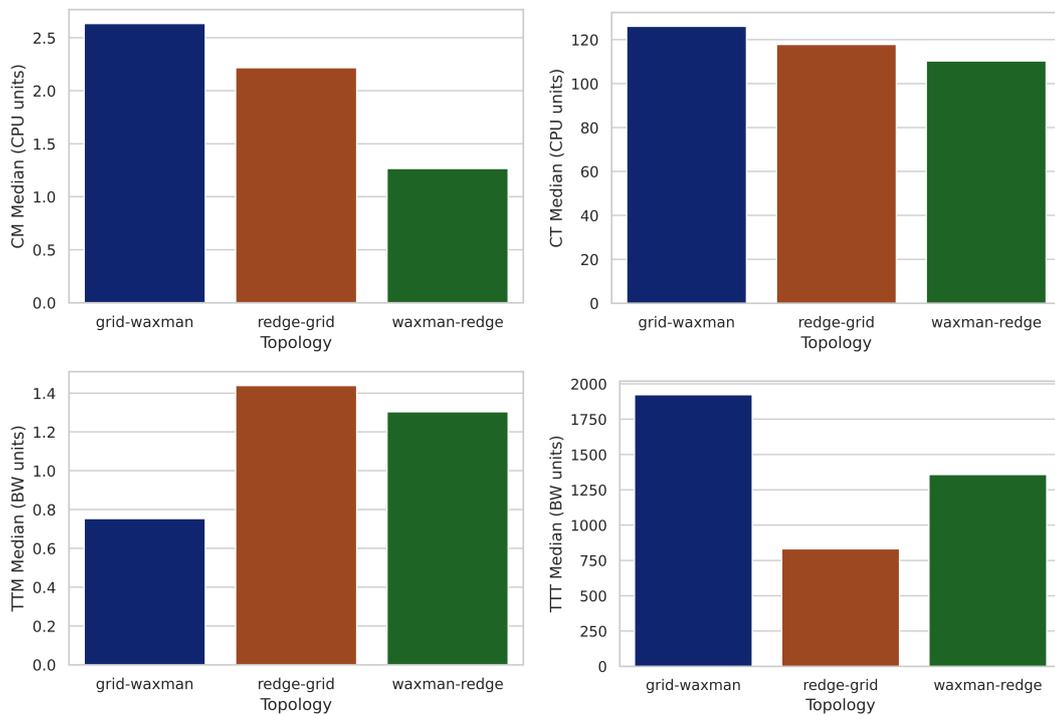


Figura 4.29: Mediana das capacidades e taxas de transferência do Cenário 3.

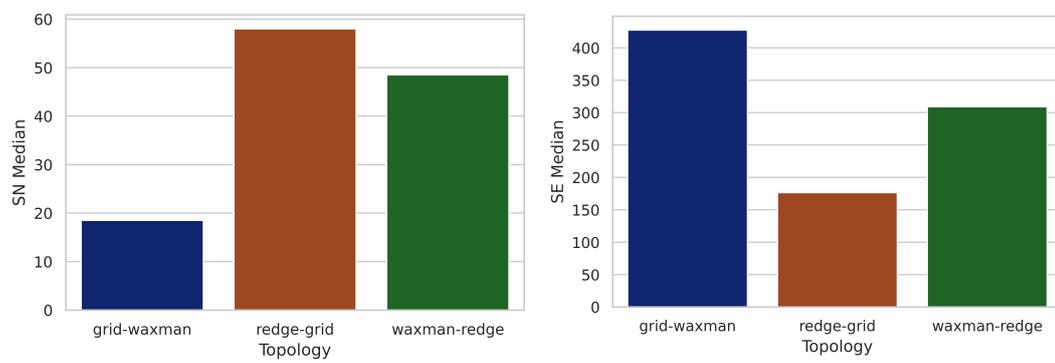


Figura 4.30: Mediana da sobrecarga de nós e de enlaces do Cenário 3.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste trabalho, apresentamos uma expansão da metodologia proposta por Rosa e Rothemberg [40] propondo uma análise da abordagem MCDA no Fatiamento de Rede em topologias de rede distintas e diferentes atributos compondo os vetores de critérios, os quais foram criados a partir de técnicas de VNE. Através dos experimentos realizados podemos observar que a utilização do algoritmo VNE RW-BFS e do algoritmo MCDA PROMETHEE II nos permitiu expandir o trabalho inicialmente realizado e analisar outros aspectos voltados para os principais conjuntos de caso de uso do 5G.

Ressaltamos questões envolvendo a criação de fatias de rede no contexto de redes 5G e os diferentes valores de atributos topológicos e tecnológicos que elas podem apresentar quando instanciadas em diferentes elementos de uma infraestrutura de rede constituída de elementos SDN, NFV e MEC. Nesse sentido, o uso de algoritmos de MCDA pode ser de grande valor no processo de escolha de fatias mais adequadas para casos de uso específicos, assim como a utilização de Teorias de Redes Complexas para caracterização estrutural do Modelo de Infraestrutura, um fator que pode ter grande importância no processo de mapeamento de fatias de rede.

A metodologia proposta por Rosa e Rothemberg e expandida neste trabalho pode ser aplicada tanto antes do processo de criação das fatias de rede, com objetivo de escolher instâncias com propriedades específicas, quanto para a avaliação de instâncias já em execução, buscando analisar a alocação implementada e realizar possíveis correções, fazer migrações de serviços, selecionar instâncias reservas para tolerância a falhas e escalar serviços para maiores ou menores valores de recursos computacionais e de rede, buscando sempre uma

alocação eficiente e com baixa granularidade de recursos.

5.1 Lições Aprendidas

Uma das primeiras e principais características que podemos observar é a existência de várias instâncias de fatia alocadas simultaneamente no Modelo de Infraestrutura que apresentam valores semelhantes em relação aos atributos topológicos (ITM, VTL e ACB) e ao mesmo tempo diferentes valores de atributos tecnológicos (CT, CM, TTT, TTM, SN e SE). Dessa forma temos instâncias com propriedades topológicas semelhantes e diferentes níveis de recursos alocados. Com essa informação podemos fazer uma alocação mais precisa de recursos de acordo com os requisitos e casos de uso, selecionando dentre as instâncias que carregam certas propriedades topológicas, aquelas que possuem quantidades de recursos mais próximos da demanda, evitando assim o desperdício de recursos.

É possível observar também instâncias que são similares em suas propriedades de forma geral, sendo possíveis candidatas para a realização de migrações dos serviços que nelas estariam alocados. Além de migrações locais em uma mesma infraestrutura é possível também realizar migrações entre infraestruturas diferentes, desde que seja executado a mesma metodologia proposta de avaliação de fatias de rede nas diferentes infraestruturas, buscando por instâncias de propriedades semelhantes por meio da comparação dos valores presentes nos vetores de critérios. Para isso, os *rankings* gerados pelos algoritmos MCDA podem ser bastante úteis na identificação dessas similaridades.

De forma semelhante, podemos ter uma visão voltada a tolerância a falhas, no caso de serviços críticos podemos alocar instâncias de fatia de rede reserva que apresentam propriedades similares para substituição no caso de falha ou degradação do desempenho na fatia de rede principal. É possível empregar também o conceito de escalabilidade dos serviços alocados a um determinado cliente, escolhendo instâncias similares que variam na quantidade de recursos computacionais e de rede de acordo com a demanda de um determinado momento, ao mesmo tempo que mantém as outras propriedades da fatia de rede com valores semelhantes, escalando tanto para cima como para baixo os serviços em execução.

Fatias de rede que apresentaram maiores valores de ITM tem os seus nós virtuais alocados em nós mais centrais no Modelo de Infraestrutura, por consequência são nós que apresentam

um maior controle sobre a rede, pois sobre eles transita um maior fluxo de informações. Nós com uma maior centralidade em topologias de rede reais tem um tendência a serem melhores monitorados, receberem uma melhor manutenção, terem uma capacidade maior, com suporte a um grande número de conexões, de forma a serem mais adequados para os casos de uso mMTC e eMBB, visto que esses casos priorizam um grande número de conexões e uma alta capacidade computacional respectivamente.

Vetores de critérios que tiveram maiores valores de VTL estão alocados em nós que, em caso de falha, ocasiona um maior impacto na infraestrutura, levando a um aumento no tamanho dos menores caminhos entre os nós da mesma. De posse dessa informação, podemos evitar a alocação de serviços de menor prioridade nesses nós, priorizando seu uso para casos de uso como uRRLC, visto que esses nós provavelmente terão melhores mecanismos de monitoramento, segurança e tolerância e recuperação de falhas, dessa forma sendo mais eficientes em lidar com requisitos estritos de performance e latência.

Maiores valores de ACB indicam fatias de rede mapeadas em nós do Modelo de Infraestrutura que estão mais próximos dos outros nós existentes na mesma. Por consequência, o número de saltos intermediários realizados pelos pacotes que circulam na fatia de rede mapeada nestes nós é menor, proporcionando menores valores de latência e *jitter* na comunicação, aliado a uma maior previsibilidade do desempenho. Indicado para serviços que apresentam requisitos estritos de latência e performance, como por exemplo uRRLC e alguns casos de eMBB.

Fatias de rede que apresentam maiores valores de SN e SE podem sofrer com degradações de desempenho devido ao maior nível de virtualização de recursos, portanto no caso de uRRLC e eMBB deve-se priorizar fatias de rede alocadas em nós com uma menor sobrecarga de nós e enlaces, alocando esses nós para casos de usos com requisitos menos restritivos, como em alguns casos de mMTC.

5.2 Trabalhos Futuros

Como próximos passos na abordagem envolvendo a aplicação de técnicas MCDA no contexto de Fatiamento de Rede 5G propomos a análise da utilização de diferentes algoritmos VNE na criação dos mapeamentos fatia-infraestrutura, assim como a consideração de atribu-

tos adicionais na composição dos vetores de critérios, como memória, disco, taxa de perda de pacotes, latência e entre outros aspectos. Também é possível a utilização de diferentes topologias de rede para o Modelo de Infraestrutura e de Projeto de Fatia de Rede além das empregadas neste trabalho. Buscando capturar diferentes comportamentos do sistema a partir da aplicação de diferentes tamanhos e quantidades de fatias de rede mapeadas em um mesmo Modelo de Infraestrutura.

A utilização de diferentes algoritmos MCDA além dos utilizados neste trabalho pode ser de grande valor do processo de caracterização das fatias de rede criadas. Comparando algoritmos distintos que apresentam abordagens diferentes pode prover mais segurança no processo de decisão das fatias de rede mais adequadas para um certo caso de uso ou serviço. Podendo empregar algoritmos como ÉLECTRE, SIR, VIKOR, entre outros, assim como variações de abordagens tradicionais utilizando Teoria dos Conjuntos Difusos (*Fuzzy Set Theory*) e Tomada de Decisão em Grupo (*Group Decision-making*).

Devido a dificuldade atual de se obter ambientes de experimentação realistas de uma infraestrutura de Fatiamento de Rede 5G, optamos pela utilização de modelos que representassem uma rede de infraestrutura virtualizada e um conjunto de fatias de rede. A capacidade de representação dos modelos propostos em relação ao seu poder de representação real das características e do funcionamento desses elementos é algo que se pode colocar em questão. Podendo levar a proposição de modelos mais representativos, capturando melhor as características e o comportamento real de um eventual sistema de produção e por consequência melhorando a efetividade da metodologia abordada.

Outro fator a ser levado em consideração é a eventual evolução das tecnologias impulsionadoras do 5G, podendo levar à implementação da metodologia abordada em sistemas reais mesmo que em ambientes experimentais e controlados, de forma a verificar de forma mais fidedigna a efetividade da metodologia abordada por meio da realização de um processo de validação nesses ambientes.

Bibliografia

- [1] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck. Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(3):2429–2453, 2018.
- [2] Martin Aruldoss, T. Miranda Lakshmi, and V. Prasanna Venkatesan. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1):31–43, 2013.
- [3] GSMA Association et al. Network slicing use case requirements, white paper. Technical report, GSMA, April 2018.
- [4] Hind Bangui, Mouzhi Ge, Barbora Buhnova, Said Rakrak, Said Raghay, and Tomas Pitner. Multi-criteria decision analysis methods in the mobile cloud offloading paradigm. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(4):25, 2017.
- [5] Albert-László Barabási and Réka Albert. Emergence of scaling in random networks. *science*, 286(5439):509–512, 1999.
- [6] Alcardo Alex Barakabitze, Arslan Ahmad, Rashid Mijumbi, and Andrew Hines. 5g network slicing using sdn and nfv: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*, 167:106984, 2020.
- [7] M. T. Beck, C. Linnhoff-Popien, A. Fischer, F. Kokot, and H. de Meer. A simulation framework for virtual network embedding algorithms. In *2014 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*, pages 1–6, 2014.

-
- [8] Majid Behzadian, R.B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi. Promethee: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1):198–215, 2010.
- [9] Majid Behzadian, S. Khanmohammadi Otaghsara, Morteza Yazdani, and Joshua Ignatius. A state-of-the-art survey of topsis applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17):13051–13069, 2012.
- [10] Stefano Boccaletti, Vito Latora, Yamir Moreno, Martin Chavez, and D-U Hwang. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics reports*, 424(4-5):175–308, 2006.
- [11] Ulrik Brandes. *Network analysis: methodological foundations*, volume 3418. Springer Science & Business Media, 2005.
- [12] J.P. Brans, Ph. Vincke, and B. Mareschal. How to select and how to rank projects: The promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2):228–238, 1986. Mathematical Programming Multiple Criteria Decision Making.
- [13] Juan B Cabral, Nadia Ayelen Luczywo, and José Luis Zanazzi. Scikit-criteria: Colección de métodos de análisis multi-criterio integrado al stack científico de Python. In *XLV Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (45JAIIO)- XIV Simposio Argentino de Investigación Operativa (SIO) (Buenos Aires, 2016)*, pages 59–66, 2016.
- [14] Haotong Cao, Shengchen Wu, Yue Hu, Yun Liu, and Longxiang Yang. A survey of embedding algorithm for virtual network embedding. *China Communications*, 16(12):1–33, 2019.
- [15] Shengyong Chen, Wei Huang, Carlo Cattani, and Giuseppe Altieri. Traffic dynamics on complex networks: a survey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012.
- [16] Xiang Cheng, Sen Su, Zhongbao Zhang, Hanchi Wang, Fangchun Yang, Yan Luo, and Jie Wang. Virtual network embedding through topology-aware node ranking. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 41(2):38–47, April 2011.

- [17] Chia-Chi Chu and Herbert Ho-Ching Iu. Complex networks theory for modern smart grid applications: A survey. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 7(2):177–191, 2017.
- [18] Luciano da Fontoura Costa, Osvaldo N Oliveira Jr, Gonzalo Travieso, Francisco Aparecido Rodrigues, Paulino Ribeiro Villas Boas, Lucas Antiqueira, Matheus Palhares Viana, and Luis Enrique Correa Rocha. Analyzing and modeling real-world phenomena with complex networks: a survey of applications. *Advances in Physics*, 60(3):329–412, 2011.
- [19] Patricia Takako Endo, Andre Vitor de Almeida Palhares, Nadilma Nunes Pereira, Glauco Estacio Goncalves, Djamel Sadok, Judith Kelner, Bob Melander, and Jan-Erik Mangs. Resource allocation for distributed cloud: concepts and research challenges. *IEEE network*, 25(4):42–46, 2011.
- [20] Paul Erdos, Alfréd Rényi, et al. On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci*, 5(1):17–60, 1960.
- [21] Andreas Fischer, Juan Felipe Botero, Michael Till Beck, Hermann de Meer, and Xavier Hesselbach. Virtual network embedding: A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(4):1888–1906, 2013.
- [22] Andreas Fischer, Juan Felipe Botero Vega, Michael Duelli, Daniel Schlosser, Xavier Hesselbach Serra, and Hermann De Meer. Alevin-a framework to develop, compare, and analyze virtual network embedding algorithms. In *Open-Access-Journal Electronic Communications of the EASST*, pages 1–12, 2011.
- [23] Paul J Flory. Molecular size distribution in three dimensional polymers. i. gelation1. *Journal of the American Chemical Society*, 63(11):3083–3090, 1941.
- [24] Xenofon Foukas, Georgios Patounas, Ahmed Elmokashfi, and Mahesh K Marina. Network slicing in 5g: Survey and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(5):94–100, 2017.

- [25] W. Guan, X. Wen, L. Wang, Z. Lu, and Y. Shen. A service-oriented deployment policy of end-to-end network slicing based on complex network theory. *IEEE Access*, 6:19691–19701, 2018.
- [26] Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult, and Pieter J. Swart. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. In Gaël Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman, editors, *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, pages 11 – 15, Pasadena, CA USA, 2008.
- [27] Aun Haider, Richard Potter, and Akihiro Nakao. Challenges in resource allocation in network virtualization. In *20th ITC specialist seminar*. ITC, 2009.
- [28] Antonio HORTA. Scikit-mcda: The python library for multi-criteria decision aid, 2021.
- [29] CL Hwang and K Yoon. Multiple attributes decision making methods and applications, spring. *New York*, 1981.
- [30] Mohammad Izadikhah. Using the hamming distance to extend topsis in a fuzzy environment. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 231(1):200–207, 2009.
- [31] Raj Jain and Subharthi Paul. Network virtualization and software defined networking for cloud computing: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 51(11):24–31, 2013.
- [32] Young-bin Kim, Bi Hong, and Wan Choi. Scale-free wireless networks with limited degree information. *IEEE Wireless Communications Letters*, 1(5):428–431, 2012.
- [33] Xin Li, Mohammed Samaka, H. Anthony Chan, Deval Bhamare, Lav Gupta, Chengcheng Guo, and Raj Jain. Network slicing for 5g: Challenges and opportunities. *IEEE Internet Computing*, 21(5):20–27, 2017.
- [34] Jose D Martinez-Morales, Ulises Pineda-Rico, and Enrique Stevens-Navarro. Performance comparison between madm algorithms for vertical handoff in 4g networks. In *2010 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control*, pages 309–314. IEEE, 2010.
- [35] Gianluca MASSEI. pymcda: Mcda library in pure python, 2021.

- [36] J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz, J. Lorca, and J. Folgueira. Network slicing for 5g with sdn/nfv: Concepts, architectures, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(5):80–87, 2017.
- [37] Inc Qualcomm Technologies. Making 5g nr a reality, white paper. Technical report, Qualcomm, White Paper, December 2016.
- [38] Anatol Rapoport. Nets with distance bias. *The bulletin of mathematical biophysics*, 13(2):85–91, 1951.
- [39] Jamil Razmak and Belaid Aouni. Decision support system and multi-criteria decision aid: A state of the art and perspectives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 22(1-2):101–117, 2015.
- [40] Raphael Vicente Rosa and Christian Esteve Rothenberg. The pandora of network slicing: A multicriteria analysis. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(1):e3651, 2019. e3651 ett.3651.
- [41] K. Samdanis, X. Costa-Perez, and V. Sciancalepore. From network sharing to multi-tenancy: The 5g network slice broker. *IEEE Communications Magazine*, 54(7):32–39, 2016.
- [42] Hsu-Shih Shih, Huan-Jyh Shyur, and E. Stanley Lee. An extension of topsis for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7):801–813, 2007.
- [43] Jonathan S Turner and David E Taylor. Diversifying the internet. In *GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005.*, volume 2, pages 6–pp. IEEE, 2005.
- [44] International Telecommunication Union. Imt vision – framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond m series mobile, radio-determination, amateur and related satellite services. Technical report, International Telecommunication Union, 2015.
- [45] S. Vassilaras, L. Gkatzikis, N. Liakopoulos, I. N. Stiakogiannakis, M. Qi, L. Shi, L. Liu, M. Debbah, and G. S. Paschos. The algorithmic aspects of network slicing. *IEEE Communications Magazine*, 55(8):112–119, 2017.

-
- [46] Duncan J Watts and Steven H Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *nature*, 393(6684):440–442, 1998.
- [47] Jiajing Wu, K Tse Chi, and Francis CM Lau. Optimizing performance of communication networks: An application of network science. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 62(1):95–99, 2014.
- [48] Xiaozhan Xu. The sir method: A superiority and inferiority ranking method for multiple criteria decision making. *European journal of operational research*, 131(3):587–602, 2001.
- [49] Norman Zadeh. Theoretical efficiency of the edmonds-karp algorithm for computing maximal flows. *Journal of the ACM (JACM)*, 19(1):184–192, 1972.
- [50] Mohammed J Zaki, Wagner Meira Jr, and Wagner Meira. *Data mining and analysis: fundamental concepts and algorithms*. Cambridge University Press, 2014.
- [51] Beichuan Zhang, Raymond Liu, Daniel Massey, and Lixia Zhang. Collecting the internet as-level topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 35(1):53–61, 2005.
- [52] Hong Zhang and Jie Li. Modeling and dynamical topology properties of vanet based on complex networks theory. *Aip Advances*, 5(1):017150, 2015.
- [53] X. Zhou, R. Li, T. Chen, and H. Zhang. Network slicing as a service: enabling enterprises’ own software-defined cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(7):146–153, 2016.
- [54] Hailin Zhu, Hong Luo, Haipeng Peng, Lixiang Li, and Qun Luo. Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(4):1828–1835, 2009.