INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA CAMPUS CAJAZEIRAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

Implementação dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II ao software FRANCISCO para análise multicritério

ISRAEL LÁZARO MANGUEIRA TAVARES

Cajazeiras
2025

ISRAEL LÁZARO MANGUEIRA TAVARES

Implementação dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II ao software FRANCISCO para análise multicritério

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras, como requisito para a conclusão do curso.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Daladier Marques Junior

Cajazeiras

2025

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

T231i Tavares, Israel Lázaro Mangueira.

Implementação dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II ao software FRANCISCO para análise multicritério / Israel Lázaro Mangueira Tavares.– 2025.

35f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2025.

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Daladier Marques Junior.

1. Desenvolvimento de sistemas. 2. Software Francisco. 3. Análise envoltória de dados. 4. Desenvolvimento de software. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ CDU: 004.41(043.2)

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

ISRAEL LÁZARO MANGUEIRA TAVARES

Implementação dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II ao software FRANCISCO para análise multicritério

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras, como requisito à obtenção do título de Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Daladier Marques Júnior

Aprovada em: **10 de setembro de 2025.**

Prof. Dr. Francisco Daladier Marques Júnior - Orientador

Prof. Me. Diogo Dantas Moreira - Avaliador

IFPB - Campus Cajazeiras

Prof. Me. Fábio Abrantes Diniz - Avaliador

IFPB - Campus Cajazeiras

Documento assinado eletronicamente por:

- **Francisco Paulo de Freitas Neto**, **COORDENADOR(A) DE CURSOS - FUC1 - CADS-CZ**, em 11/09/2025 08:26:34.
- **Fabio Abrantes Diniz**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/09/2025 08:46:39.
- **Francisco Daladier Marques Junior**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/09/2025 09:39:52.
- **Diogo Dantas Moreira**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/09/2025 10:27:33.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código 764574
Verificador: 0f94d663c4
Código de Autenticação:

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao professor Dr. Daladier pela confiança, paciência e apoio, não só na produção deste trabalho, mas em toda a trajetória do curso de ADS. Para mim, ele é um exemplo de dedicação, compromisso e excelência área tecnologia que vou levar para vida, e tenho certeza que todo o esforço dedicado por ele ao campus de Cajazeiras será devidamente reconhecido.

À minha amada esposa Raquel, por todo carinho, paciência e apoio incansável durante esta longa jornada acadêmica. Sua presença foi fundamental para minha perseverança, sendo a força que me impediu de abandonar este sonho.

Aos professores Paulo de Freitas e Fábio Gomes por despertar um interesse tão profundo pela área de tecnologia, com seu jeito de simplificar o complicado e tornar o aprendizado uma jornada inspiradora.

Ao professor Diogo, por me ensinar muito mais do que ele imagina. Por me fazer refletir profundamente sobre o que significa ser um bom professor e proporcionar um novo olhar sobre a sala de aula. Saio desta formação não apenas com diploma, mas com uma reformulação do meu papel como professor.

A todos os professores cuja dedicação foi fundamental durante toda a minha formação neste curso. Obrigado por cada incentivo, cada inspiração e por cada palavra que me deu coragem para persistir diante tantos desafios que enfrentei nesses anos.

Aos meus colegas de trabalho, que sempre encontraram uma forma de organizar meus horários para que eu pudesse estudar. Sua compreensão e apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

O software FRANCISCO é uma ferramenta desenvolvida para análise e otimização de redes de computadores por meio teoria dos fractais, autossimilaridade e Análise Envoltória de Dados (DEA) utilizando apenas de métodos objetivos de tomada de decisão. Visando incorporar a dimensão subjetiva das preferências do tomador de decisão neste processo, este trabalho teve como objetivo a implementação dos métodos de decisão multicritérios VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II no software. Esse processo visa ampliar as funcionalidades e expandir as possibilidades de métodos de análise dessa ferramenta, permitindo avaliações mais complexas dentro do contexto com múltiplos critérios e critérios conflitantes. A implementação dos métodos foi realizada utilizando o ambiente de programação R juntamente com a biblioteca MCDA. Os métodos foram adaptados de modo que os parâmetros utilizados foram gerados a partir das métricas geradas pelo próprio FRANCISCO. Os resultados obtidos pelas análises dos métodos integrados demonstraram que a implementação ocorreu com sucesso, gerando um ranking consistente de DMUs. A implementação agregou um peso significativo nos processos de análise do FRANCISCO, disponibilizando novos métodos que expande as possibilidades de abordagens para a avaliação de redes de acordo com as definições específicas dos parâmetros estabelecidos pelo tomador de decisão, dando a oportunidade de o usuário trabalhar conforme a necessidade do seu contexto decisório. Assim, a importância da integração destes métodos não está em oferecer ao usuário uma resposta única, mas em oferecer ao tomador de decisão um ambiente flexível para a análise.

Palavras-chave: Francisco, Tomada de decisão multicritério, ELECTRE III, VIKOR, PROMETHEE II.

ABSTRACT

The FRANCISCO software is a tool developed for the analysis and optimization of computer networks through fractal theory, self-similarity, and Data Envelopment Analysis (DEA), using only objective decision-making methods. In order to incorporate the subjective dimension of the decision-maker's preferences into this process, this work aimed to implement the multicriteria decision-making methods VIKOR, ELECTRE III, and PROMETHEE II in the software. This process seeks to broaden the functionalities and expand the analytical possibilities of the tool, enabling more complex evaluations within contexts involving multiple and conflicting criteria. The implementation was carried out using the R programming environment along with the MCDA library. The methods were adapted so that the parameters employed were generated from the metrics provided by FRANCISCO itself. The results obtained from the integrated analyses demonstrated that the implementation was successful, producing a consistent ranking of DMUs. This integration added significant value to FRANCISCO's analytical processes, providing new methods that expand the range of approaches for network evaluation according to the specific parameters defined by the decision-maker, allowing the user to work according to the needs of their decision-making context. Thus, the importance of integrating these methods lies not in offering the user a single answer, but in providing a flexible environment for analysis.

Keywords: Francisco, Multi-criteria decision making, ELECTRE III, VIKOR, PROMETHEE II.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tabela de resultados método VIKOR (valores padrão) 31
Figura 2 - Tabela de resultados método ELECTRE III (valores padrão) 32
Figura 3 - Tabela de resultados método PROMETHEE II (valores padrão).....33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rankings DMUs DEA x MCDM (dataset: 4vram - apache2).....34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução do Software FRANCISCO 21
Quadro 2 - Parâmetros de entrada da função VIKOR () do pacote MCDA 25
Quadro 3 - Valores padrão para critérios no método VIKOR.....26
Quadro 4 - Parâmetros de entrada da função ELECTRE3() do pacote MCDA.....27
Quadro 5 - Valores padrão para critérios no método ELECTRE III.....28
Quadro 6 - Parâmetros de entrada da função PROMETHEEII() do pacote MCDA.....28
Quadro 7 - Valores padrão para critérios no método PROMETHEE II.....29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEA	Data Envelopment Analysis
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
VIKOR	VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
ELECTRE	Elimination Et Choice Translating REality
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluation
TOPSIS	Technique of Order Preference by Similarity of Ideal Solution
AHP	Analytical Hierarchy Process
FRANCISCO	FRActal Network Cloud Infrastructure Service Comparison and Optimisation
DMU	Decision Making Unit
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
TCP	Transmission Control Protocol
AHP	Analytical Hierarchy Process
TOPSIS	Technique of Order Preference by Similarity of Ideal Solution
SELFIS	SELF-Similarity AnalysIS
CCR	Charns, Cooper and Rhodes
BCC	Banker, Charnes and Cooper
R	Ambiente de programação R
WDEA	Window Data Development Analysis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.2 JUSTIFICATIVA 15
1.3 Objetivos 16
1.3.1 Objetivo Geral 16
1.3.2 Objetivos Específicos 16
2 REVISÃO DA LITERATURA 16
2.1 O processo de tomada de decisão os a análise multicritérios 16
2.2 Linha do tempo do FRANCISCO 18
2.2.1 FRANCISCO 1.0 – Uma ferramenta para análise e otimização de redes de computadores através da teoria dos fractais (2022) 18
2.2.2 FRANCISCO 2.0 - Aprimorando usabilidade e novos modelos multiplicativos DEA (2024) 19
2.2.3 FRANCISCO 3.0 – Implementação dos métodos ELECTRE, VIKOR e PROMETHEE ao software FRANCISCO para análise multicritério (2025) 20
2.3 Métodos de tomada de decisão multicritérios MCDM 21
2.3.1 Método VIKOR 21
2.3.2 Método ELECTRE III 22
2.3.3 Método PROMETHEE II 22
2.4 Métodos MCDM no R: implementações com o pacote MCDA 23
3 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE: FRANCISCO 3.0 23
3.1 Levantamento de requisitos e definição dos critérios 23
3.2 Estudo de implementação dos métodos 24
3.3 Implementação dos métodos MCDM 25
3.3.1 Implementação VIKOR package 'MCDA' 25
3.3.2 Implementação ELECTREE III package 'MCDA' 26
3.3.3 Implementação PROMETHEE II package 'MCDA' 28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 29
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 34
6 REFERÊNCIAS 36

1 INTRODUÇÃO

O ambiente de redes de computadores atual tem mostrado um número significativo de novos serviços e isso fez surgir diferentes recursos para atender essa demanda. Torna-se, então, necessário otimizar cada vez mais esses recursos para oferecer um melhor serviço ao usuário (WU & ZENG, 2022).

De acordo com BACELAR JUNIOR (2008), para garantir o melhor desempenho nas redes de computadores e para que possa atingir sua melhor eficiência, um aspecto se torna fundamental neste processo, a análise de qualidade de redes.

Para isso, tem-se um número significativo de métricas que são utilizadas para analisar de forma qualitativa e quantitativa as redes de computadores e avaliá-las nos mais diversos cenários possíveis. Dentre as análises de uma rede, COSTA (2008) destaca como forma de garantir que ela esteja operando corretamente e com desempenho desejado, por exemplo, as métricas de latência, perda de pacotes e throughput.

A latência desempenha um papel importante na qualidade, uma vez que mede o tempo necessário para que um pacote de dados encontre seu destino após a saída de sua origem. Já a perda de pacotes fornece uma análise de comportamento da rede em um determinado momento, podendo indicar congestionamentos ou até mesmo falhas na rede. O throughput pode fornecer medições importantes sobre a real qualidade de uma rede de dados e a eficácia com que esses dados são transmitidos em um determinado intervalo de tempo.

Essas e outras métricas são fundamentais para avaliar as redes em diferentes conjunturas. É neste cenário que o software FRActal Network Cloud Infrastructure Service Comparison and Optimisation (FRANCISCO) tem se destacado como uma ferramenta versátil no processo de análise e tomada de decisão, a fim de avaliar a eficiência de redes virtuais, mostrando-se essencial no desenvolvimento de aplicações que podem auxiliar o mecanismo de avaliação de eficiência e, ao mesmo tempo, destacar as melhores alternativas para a estruturação ou escolha de um conjunto de ferramentas computacionais para prestar serviços na Internet ao longo do tempo.

O FRANCISCO atua hoje com foco na análise e otimização de redes, com base na teoria dos fractais, utilizando os métodos da Análise Envoltória de Dados (do inglês: Data Envelopment Analysis (DEA)). Essa ferramenta é capaz de comparar, prever a eficiência na prestação de serviço em redes ao longo do tempo e ranquear as mesmas de modo a apontar a melhor alternativa possível, mostrando-se como um recurso fundamental para as mais diversas

atividades que tem como objetivo encontrar soluções fundamentadas no processo de tomada de decisão (ANDRADE & MARQUES JUNIOR, 2023).

MACIEL FILHO (2024), traz uma atualização ao FRANCISCO tornando-o uma ferramenta mais intuitiva, com novos modelos DEA, manipulando uma maior quantidade de dados e observando um número maior de séries temporais simultaneamente, além de um aperfeiçoamento da análise dos resultados e melhor usabilidade da aplicação.

Mas ainda há outras melhorias que podem ser trabalhadas para tornar essa ferramenta ainda mais completa. Uma possibilidade é a integração de novos métodos de análise, de modo que amplie o escopo de avaliação e leve em consideração diferentes perspectivas no processo decisório.

1.2 JUSTIFICATIVA

Embora as técnicas DEA tenham demonstrado resultados significativos em medir a eficiência, seus métodos são essencialmente objetivos. Por outro lado, os métodos de tomada de decisão multicritério (do inglês: Multi-Criteria Decision Making (MCDM)), permite que o tomador de decisão possa incorporar uma dimensão subjetiva, considerando suas preferências. A motivação deste trabalho originou-se do interesse em fornecer a ferramenta FRANCISCO uma maior possibilidade de análises, como métodos subjetivos e contribuir ativamente com sua evolução no processo de tomada de decisão.

YOUSEFI & HADI-VENCHEH (2016) explica que a análise promovida pelas técnicas DEA tem uma eficácia em medições de eficiência relativa, já a análise com métodos MCDM mostra uma abordagem mais subjetiva, levando em consideração as percepções do tomador de decisão e a ponderação de critérios. Isso mostra uma ideia de que estas técnicas podem agir de forma complementar, apresentando ao usuário suas vantagens específicas.

Com isso, este trabalho apresenta uma possibilidade de tornar a ferramenta FRANCISCO mais abrangente com a integração dos métodos ELECTRE III, VIKOR e PROMETHEE II. Isso pode representar uma amplitude de cenário e trazer um avanço significativo em suas funcionalidades, estendendo ainda mais as alternativas de análises e viabilizando aos usuários a utilização de múltiplos fatores simultaneamente, permitindo assim trabalhar com cenários mais complexos na tomada de decisão. A inclusão destes métodos agregará um peso significativo ao software, tornando o FRANCISCO mais abrangente ao estender novas funções permitindo que os usuários analisem a eficiência relativa e, além disso, tenham sugestões de outras técnicas para compará-las e observar quais dos resultados gerados são os melhores do ponto de vista da prestação de serviços.

Dessa forma, este trabalho tem como contribuição implementar métodos MCDM (ELECTRE III, VIKOR & PROMETHEE II) no software FRANCISCO, sem substituir as funcionalidades já existentes, caracterizando uma nova possibilidade na análise de redes e contribuindo para a evolução dessa ferramenta. A implementação desses métodos não apenas tornará o software mais completo, mas também poderá estimular a utilização de abordagens multicritério em estudos e aplicações práticas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Implementar os métodos de tomada de decisão multicritério ELECTRE III, VIKOR e PROMETHEE II no software FRANCISCO, visando ampliar suas funcionalidades e possibilitar análises mais abrangentes e eficientes em cenários complexos de tomada de decisão, sem comprometer as funcionalidades já existentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento de requisitos e a definição dos critérios necessários para a integração dos métodos ELECTRE III, VIKOR e PROMETHEE II ao software FRANCISCO.
- Estudar e detalhar os métodos MCDM (ELECTRE III, VIKOR e PROMETHEE II), compreendendo suas bases teóricas, matemáticas e aplicações práticas
- Desenvolver e implementar os algoritmos dos métodos ELECTRE III, VIKOR e PROMETHEE II ambiente de programação matemática R[1], garantindo sua integração ao ambiente do software FRANCISCO.
- Integrar os métodos MCDM ao software FRANCISCO de forma que sejam acessíveis aos usuários por meio de uma interface clara e intuitiva, mantendo a usabilidade e as funcionalidades já existentes.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura, buscou-se compreender de forma mais aprofundada o processo de tomada de decisão e o papel desempenhado pelos métodos multicritérios neste cenário.

2.1 O processo de tomada de decisão os a análise multicritérios

A tomada de decisão ocorre através de um processo complexo que pode envolver o pensamento racional ou irracional, dar-se de maneira implícita ou explícita, além de poder ser afetada por fatores externos. Pode-se dizer que uma tomada de decisão consiste em trabalhar

[1] R é uma linguagem de programação estatística. Pode ser baixada em https://cran.r-project.org.

um plano de soluções de problemas aplicando-o na análise dos dados para atingir o resultado desejado levando em consideração diversos aspectos (TAHERDOOST & MADANCHIAN, 2023).

Para THAKKAR (2021), o processo de tomada de decisão demanda, entre outros aspectos, a identificação do problema, a categorização das principais preferências para os resultados, alternativas disponíveis a serem consideradas e a seleção das melhores alternativas. Esse processo visa promover uma organização da análise dos cenários de forma lógica e estruturada, resultando assim na melhor solução possível.

TOLOIE-ESHLAGHY & HOMAYONFAR (2011) destacam a importância do uso das técnicas MCDM, classificando-as como um fator relevante dentro da ciência de decisão moderna. De forma que diante de múltiplos critérios e alternativas essas técnicas servem de suporte, para uma variedade de problemas e incentivo para o aprimoração, desenvolvimento e otimização em diversas áreas do conhecimento.

De acordo com THAKKAR (2021), as técnicas utilizadas pelos modelos MCDM podem ser utilizadas para os mais diversos problemas, focando essencialmente em suprir adequadamente, tanto os critérios tangíveis, quanto os intangíveis.

GAVADE (2014) complementa essa visão afirmando que o processo com multicritérios pode exercer um papel significativo dentro de tomada de decisão com critérios conflitantes. O autor ainda destaca os métodos Analytical Hierarchy Process (AHP), Technique of Order Preference by Similarity of Ideal Solution (TOPSIS), ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR), Elimination Et Choice Translating REality (ELECTRE) e Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) como os recursos mais eficazes para análise de problemas e na escolha da melhor alternativa.

No contexto da seleção de redes de computadores, o uso de métodos de apoio à tomada de decisão multicritério pode ser útil para identificar, entre inúmeras alternativas, uma rede que se apresente como melhor opção para suprir as necessidades diante do ambiente de trabalho de um usuário. De acordo com CHAGAS DA SILVA et al. (2014), a utilização de métodos de tomada de decisão multicritérios podem ser aplicados com sucesso para classificar e selecionar redes em cenários reais, permitindo lidar com critérios conflitantes e alcançar uma seleção de redes de maneira mais eficiente e precisa.

2.2 Linha do tempo do FRANCISCO

O software FRANCISCO é uma ferramenta desenvolvida para realizar análise fractal em séries temporais no processo de tomada de decisão na escolha de um conjunto de ferramentas distintas para se prestar o mesmo serviço na Internet, onde cada conjunto de ferramentas é uma alternativa a ser comparada com as demais. Ele representa um importante marco na análise de redes de computadores, combinando os processos de análises com métodos de otimização. De acordo com ANDRADE & MARQUES JUNIOR (2023), essa ferramenta não só torna o mecanismo de análise mais eficiente, como também possibilita a utilização da autossimilaridade em conjunto com a teoria dos fractais, para gerar fronteiras de eficiência, traduzidas em um processo de avaliação de redes, que resulta no ranqueamento e permite a escolha da alternativa mais eficiente.

A evolução do FRANCISCO representa avanços na usabilidade e também os métodos utilizados, o que torna as análises dessa ferramenta cada vez mais sofisticadas, possibilitando trabalhar com diversos ambientes no que se trata as análises de redes.

2.2.1 FRANCISCO 1.0 – Uma ferramenta para análise e otimização de redes de computadores através da teoria dos fractais (2022)

O FRANCISCO foi um projeto desenvolvido por Francisco Iarlyson Santana de Andrade em seus estudos de Trabalho de Conclusão de Curso. Tendo como objetivo central preencher a lacuna de ferramentas computacionais capazes de realizar análises fractais e ao mesmo tempo avaliar a eficiência de redes de computadores usando métodos matemáticos avançados, como a DEA.

Segundo ANDRADE & MARQUES JUNIOR (2023), a aplicação oferece ao usuário opções de escolha para as variáveis de entrada (inputs) e saída (outputs), bem como a seleção de modelos de super-eficiência clássicos da DEA. A ferramenta realizava o processo de predição das redes, identificando, dentre as Unidades de Tomada de Decisão (do inglês: Decision Making Unit (DMUs)) analisadas, aquela que apresentava o melhor padrão fractal, para a prestação de serviços de rede aos clientes ao longo do tempo.

Ainda de acordo com os autores, as principais características apresentadas por esta ferramenta ao usuário incluíam o upload de séries temporais, a possibilidade de seleção das variáveis input/output para análise DEA, a geração de tabelas com os rankings das DMUs, criação de fronteiras de eficiência DEA, bem como a análise exploratória de cada DMU. Esse processo possibilita a comparação de múltiplas redes simultaneamente.

O trabalho destaca ainda a limitação da ferramenta SELFIS (SELF-similarity analysIS), que promovia a análise de apenas uma série temporal por vez, o que permitia a possibilidade de erros no cálculo de variáveis fractais. O FRANCISCO corrigiu essas falhas, de modo que permitia análises mais robustas e a comparação entre diferentes configurações de redes de forma mais eficiente, representando um avanço na avaliação de redes virtuais com base em autossimilaridade.

Por outro lado, a interface do FRANCISCO avaliava apenas uma série temporal por DMU, além de disponibilizar somente análises fractais associadas a modelos DEA clássicos, como o modelo CCR, proposto por CHANES, COOPER & RHODES (1978), e o modelo BCC, posteriormente desenvolvido por BANKER, CHARNES & COOPER (1984), o que limitava o uso da ferramenta em contextos mais complexos e dinâmicos.

2.2.2 FRANCISCO 2.0 - Aprimorando usabilidade e novos modelos multiplicativos DEA (2024)

Franks Patricio Maciel Filho realizou um trabalho onde foram adicionadas melhorias ao FRANCISCO, principalmente na usabilidade da ferramenta e na expansão de suas funcionalidades, principalmente no uso de modelos ajustados da Análise Envoltória de Dados (DEA).

Segundo MACIEL FILHO (2024), as limitações encontradas na versão anterior da ferramenta estavam ligadas à orientação do usuário, manipulação de dados e profundidades dos modelos trabalhados, onde seu trabalho buscou aprimorar principalmente a experiência do usuário e a capacidade analítica do FRANCISCO.

O autor destaca o desenvolvimento de uma melhoria na interface gráfica para a nova versão da ferramenta, além da criação de uma página que detalha as funcionalidades da aplicação. Também foi incluído um dataset para possibilitar testes, permitindo que os usuários o utilizem para experimentação e aprendizado. Por fim, a ferramenta foi ampliada para incorporar métodos DEA multiplicativos estáticos e dinâmicos como o Windows Multiplicative DEA (WMDEA) (MARQUES JÚNIOR et al., 2019).

Com isso, o FRANCISCO se tornou uma ferramenta mais completa, com sistema de análise mais robusta e possibilitando que a utilização seja mais intuitiva, o que permite que usuários em diferentes níveis de conhecimento em análise de redes possam trabalhar com a ferramenta de modo simples.

Mas apesar do avanço, observou-se que a inclusão de métodos multicritérios flexíveis que visam trabalhar com critérios conflitantes poderia agregar um peso significativo à

ferramenta. Esse ponto serviu de motivação para a proposta de integração dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II em uma nova evolução, o FRANCISCO 3.0[2].

2.2.3 FRANCISCO 3.0 – Implementação dos métodos ELECTRE, VIKOR e PROMETHEE ao software FRANCISCO para análise multicritério (2025)

O trabalho de atualização do FRANCISCO para os novos métodos visa ampliar e aprimorar o processo de análise e seleção de redes utilizando os métodos de tomada de decisão MCDM. Isso vai fortalecer a ferramenta oferecendo maiores possibilidades de análise, com cenários mais complexos em que o tomador de decisão poderá escolher preferências, critérios e pesos que melhor se ajustem ao contexto decisório trabalhado.

Os métodos empregados atualmente pelo FRANCISCO são exclusivamente DEA, o que faz da implementação dos métodos MCDM um passo importante em situações que envolvam decisões não compensatórias ou parcialmente subjetivas, oferecendo ao usuário novas formas de avaliar redes de computadores.

O FRANCISCO em 2025 conta com os métodos MCDM:

- VIKOR: que busca uma solução de compromisso, considerando a proximidade de uma solução ideal.
- ELECTRE III: que atua de maneira não compensatória, realizando uma classificação por meio de limiares de indiferença, preferência e veto.
- PROMETHEE II: que realiza a comparação de alternativas a partir de uma função de preferência, calculando os fluxos de entrada e saída para montagem de uma classificação geral.

A linguagem R, no entanto, não traz a biblioteca MCDM completa com todos os métodos proposto por este trabalho, o que fez necessário a utilização da biblioteca Análise de Decisão Multicritério (do inglês: Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)), pois estavam disponíveis os métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II necessários para a implementação na ferramenta FRANCISCO.

A capacidade de trabalhar com multicritérios e pesos, torna essa ferramenta mais completa, podendo auxiliar o processo de tomada de decisão em cenários mais complexos e, assim, ampliar suas possibilidades de uso. A seguir o Quadro 1 com as principais inovações e limitações do FRANCISCO ao longo de sua evolução.

[2] FRANCISCO 3.0 é um software desenvolvido para realizar análise fractal em séries temporais, por meio de técnicas de DEA e métodos de MCDM no apoio à tomada de decisão em redes de computadores. Pode ser acessado em: https://israellmt.shinyapps.io/Francisco-3-0

Quadro 1 - Evolução do Software FRANCISCO

	Ano		Principais Inovações	Limitações
FANCISCO	2022	ANDRADE (2022)	Análise fractal modelos DEA básicos	Interface simples Análises limitadas aos modelos DEA clássicos.
	2024	MACIEL FILHO (2024)	UI intuitiva Modelos DEA multiplicativos WDEA	Ausência de métodos MCDM.
	2025	FRANCISCO 3.0 (2025)	Integração dos métodos VIKOR ELECTRE PROMETHEE	Requer conhecimento de MCDM por parte do usuário.

Fonte: Autoria própria (2025)

2.3 Métodos de tomada de decisão multicritérios MCDM

2.3.1 Método VIKOR

Proposto por OPRICOVIC (1998), o método (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) VIKOR é uma técnica usada para realizar classificações com base em múltiplos critérios conflitantes, tendo o papel de realizar a otimização de sistemas complexos, através da classificação das melhores alternativas. CHANG (2010) aprofundam essa ideia destacando a possibilidade de aplicação deste método em diferentes contextos.

Este método visa resolver problemas conflitantes em processos de tomada de decisão com critérios inconsistentes, onde o tomador de decisão tenta alcançar uma solução próxima ao ideal, tendo como base os critérios pré-determinados para as alternativas avaliadas. Este método realiza um ordenamento e classifica a melhor alternativa, que por sua vez é denominada "solução de compromisso", que seria aquela que equilibra melhor a proximidade do ideal (AIT RAI et. Al, 2021).

De acordo com AZHAR et al. (2021), o processo de construção da solução por compromisso no VIKOR usa a normalização linear transformando os critérios em valores comparáveis, eliminando suas respectivas unidades físicas, o que permite a comparação e agregação de diferentes atributos com escalas distintas. Com isso, é possível calcular os dois principais índices para realização do método, índice de utilidade (Sj) e o índice de arrependimento (Rj), que serão utilizados para classificar as alternativas. O autor explica que o índice de utilidade (Sj) representa a distância agregada de uma alternativa em relação à melhor solução, já o índice de arrependimento (Rj), representa a distância agregada de uma alternativa em relação a pior solução. A partir destes índices é calculado um índice de compromisso (Qj), de forma que a solução de compromisso será aquela que apresentar o menor valor de Qj.

A ordenação das alternativas é feita, por tanto, com os valores dos índices de compromisso (Qj) de maneira que quanto menor o valor, melhor será a alternativa.

2.3.2 Método ELECTRE III

Desenvolvido por ROY (1968), o método (ELimination Et Choice Translating REality) ELECTRE é uma técnica bastante utilizada no processo de tomada de decisão, ele emprega uma lógica simples com uma matriz de decisão fortemente baseada nas preferências dos decisores. Este método possui natureza não compensatória, o que impossibilita que valores ruins sejam compensados por valores bons em outros critérios (TAHERDOOST & MADANCHIAN, 2023).

O ELECTRE III é uma evolução deste método. DEL VASTO-TERRIENTES (2015) afirma que este método pode ser usado no processo de ordenação de alternativas com critérios conflitantes, permitindo representar incerteza ou gradualidade nas preferências do decisor por meio de limiares de indiferença (q), preferência (p) e veto (v). O autor explica que o ELECTRE III cria uma relação de superação (outranking) entre as alternativas, de modo a ranquea-las partindo dos valores do: a) índice de concordância, que mede o quanto uma alternativa é melhor ou igual a outra em termos dos critérios, e; b) índice de discordância, que mede o quanto uma alternativa é pior que outra em termos dos critérios. A partir da matriz de decisão, atribui-se os pesos desejados a concordância e discordância e combinação desses índices resulta no índice de credibilidade, utilizado para verificar o quanto uma alternativa é considerada preferível à outra. E isso permite uma análise não compensatória, ou seja, uma rede não pode compensar um critério ruim com outro bom.

2.3.3 Método PROMETHEE II

O método (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) PROMETHEE foi proposto por BRANS (1982) e aprimorado em BRANS & VINCKE (1985). Dentre suas versões, destaca-se o PROMETHEE II, uma das variantes mais utilizadas por fornecer uma ordenação completa (ranking total) das alternativas analisadas.

O PROMETHEE é considerado um dos mais eficazes na resolução de problemas envolvendo MCDM, isso ocorre devido este método proporcionar uma comparação entre pares de alternativas para cada critério, estabelecendo assim uma classificação geral das alternativas disponíveis, para isso é utilizado uma função de preferência que quantifica as vantagens entre elas (QI et al., 2019).

Segundo PESSOA FILHO (2021), o uso do PROMETHEE II requer que o tomador de decisão escolha os pesos para os critérios a serem analisados e o tipo de função de preferência que melhor se adapta ao tipo de ordenação desejada, essa função será responsável pela avaliação dos pares para cada critérios das alternativas disponíveis. A partir dos valores obtidos por meio

da função de preferência, para cada critério, são calculados o fluxo positivo, que mede o quanto uma alternativa é preferida em relação às outras e o fluxo negativo, que mede o quanto as outras alternativas são preferidas em relação a ela. A combinação dos fluxos ocorre pelo cálculo do fluxo de preferência líquida (ϕ), resultando em uma ordenação total das alternativas.

2.4 Métodos MCDM no R: implementações com o pacote MCDA

O ambiente R e o pacote MCDA oferecem uma abordagem estratificada e extensível para a implementação de métodos MCDM. Segundo BIGARET et al. (2017), o pacote MCDA foi desenvolvido com o objetivo de permitir que analistas e tomadores de decisão possam estruturar todo o processo de decisão, desde a modelagem inicial até a geração de recomendações, utilizando uma biblioteca unificada e flexível de algoritmos multicritério.

A utilização destes pacotes apresenta uma simplificação na utilização de métodos como VIKOR, ELECTRE e PROMETHEE que foram abordados neste trabalho.

Ainda de acordo com BIGARET et al. (2017), o MCDA apresenta facilidade de adaptação a diferentes contextos e pela viabilidade de integração com outras bibliotecas do R, em especial aquelas voltadas para a análise de dados. Dessa forma, se apresenta muito útil nos estudos acadêmicos e no processo de tomar decisões que envolvem vários critérios.

3 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE: FRANCISCO 3.0

O procedimento de implementação dos métodos multicritério VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II no software FRANCISCO foi estruturado levando em consideração um levantamento dos requisitos necessários para que os métodos se adequassem corretamente à aplicação. Em seguida, realizou-se um estudo teórico dos métodos, que serviu como base para realizar a implementação no ambiente R, fazendo uso da biblioteca MCDA. Por fim, foi realizada a integração funcional ao sistema FRANCISCO.

Todos os passos da implementação dos métodos seguiram a estrutura apresentada pela documentação da biblioteca MCDA no R.

3.1 Levantamento de requisitos e definição dos critérios

O mapeamento das funcionalidades do software FRANCISCO foi realizado observando a estrutura de entrada e saída de dados, os modelos nativos da aplicação, e a forma como os resultados são apresentados ao usuário.

Isso auxiliou na identificação dos requisitos necessários para integração dos métodos MCDM ao FRANCISCO, considerando sua arquitetura atual e as métricas utilizadas para análise. Definiu-se assim, as variáveis já disponíveis, Dimensão Fractal (FractalDim), Throughput TCP (TCP_AVG), Parâmetro de Hurst (memória fractal), Variância (Var),

Estimato de Whittle e o Alfa Tail Shape (tamanho da curvatura obtido das medições por alternativa) como métricas de desempenho para as comparações.

Essas variáveis são originadas a partir da análise de séries temporais com base em dados extraídos das ferramentas Apache Bench[3]e Iperf[4], sendo tratadas pelo próprio FRANCISCO com diferentes métodos de cálculo, como estimadores de dimensão fractal (Madogram, Variogram, Rodogram, Variation, Incrl, Boxcount, Hallwood, Periodogram, Wavelet, Dctll e Genton). O sistema também permite configurar o tamanho das janelas temporais para segmentar as séries e realizar análises. A aplicação organiza as informações em uma tabela dinâmica com os nomes das DMUs analisadas e os seus respectivos valores para cada uma das variáveis.

Essas informações ajudaram a entender como utilizar as variáveis para trabalhar uma matriz de desempenho, exigida pelas funções dos métodos MCDA no ambiente R, considerando as orientações de tratamento de maximização e minimização padrão para cada critério. Onde foram considerados para maximização: TCP_AVG, Hust e Alfa Tail Shape Parameter; e minimização: FractalDim, Var e Whittle's Estimator.

A partir dessas definições, se montou uma base para relacionar os critérios analisados pela aplicação com os parâmetros exigidos pelos métodos a serem implementados, de forma que fosse possível assegurar a compatibilidade dos dados gerados com o fluxo padrão da ferramenta.

3.2 Estudo de implementação dos métodos

Para que a aplicação executasse corretamente os métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II, realizou-se um estudo aprofundado da documentação disponível destes métodos no pacote MCDA para a linguagem R. Considerando os requisitos individuais e comuns entre si, bem como suas respectivas estruturas de organização de entrada de dados e os parâmetros fundamentais para integração com o sistema.

A implementação dos métodos mostrou que todos trabalham com uma matriz de desempenho composta por linhas, compostas pelas alternativas (em nosso trabalho são as DMUs) e colunas composta pelos critérios de avaliação (em nosso trabalho são as variáveis FractalDim, TCP_AVG, Hurst, Var, Whittle's Estimator e Alfa Tail Shape Parameter), todos gerados pelo FRANCISCO com os dados inseridos pelo usuário.

[3] Apache Bench – ferramenta para teste de desempenho de servidores web. Disponível em: https://httpd.apache.org/docs/2.4/programs/ab.html

[4] Iperf – ferramenta para medição de largura de banda em redes de computadores. Disponível em: https://iperf.fr/

3.3 Implementação dos métodos MCDM

O processo de implementação ocorreu utilizando o ambiente de programação matemática R, utilizado para o desenvolvimento do software FRANCISCO em suas versões de seus predecessores.

Os algoritmos desenvolvidos foram implementados como módulos independentes para cada método, com base nas adaptações analisadas nos passos anteriores. Já a integração com FRANCISCO foi realizada de modo que seus métodos podem ser acessados pelos usuários por meio da interface do software de forma clara e que a exibição dos resultados ocorre em concordância com os padrões do sistema.

3.3.1 Implementação VIKOR package 'MCDA'

Foi utilizada a função VIKOR(), do pacote MCDA, acessível no ambiente R para realizar a implementação do método VIKOR. Ela requer como parâmetros principais uma função de desempenho (performanceTable), delimitação de pesos para cada critério (criteriaWeights), a definição das direções dos critérios para maximização e minimização (criteriaMinMax) e o valor do parâmetro de equilíbrio (v).

A estrutura das funções no ambiente R, assim como suas características técnicas e organização dos dados, foram trabalhadas seguindo o fluxo de execução sugerido na documentação disponível pela biblioteca MCDA. O Quadro 2 apresenta uma descrição técnica dos parâmetros de entrada:

Quadro 2 - Parâmetros de entrada da função VIKOR () do pacote MCDA

MÉTODO	PARÂMETROS	DESCRIÇÃO TÉCNICA
VIKOR(performanceTable, criteriaWeights, criteriaMinMax, v = 0.5)	performanceTable	*Matriz de informações com nAlt linhas (alternativas) e nCrit colunas (critérios). Cada valor indica o desempenho de uma alternativa em relação a um critério específico. Todos os valores devem ser numéricos. As linhas devem ser nomeadas com as alternativas e as colunas com os critérios.*
	criteriaWeights	*Vetor numérico com nCrit elementos, representando os pesos atribuídos a cada critério. Indica a importância relativa de cada critério na decisão. O vetor deve ter nomes correspondentes aos critérios usados na performanceTable.*
	criteriaMinMax	*Vetor de strings (caracteres) com nCrit elementos, indicando se cada critério deve ser minimizado ou maximizado. Deve conter apenas os valores "min" (se quanto menor, melhor) ou "max" (se quanto **maior, melhor). A ordem dos elementos deve corresponder à ordem dos critérios na performanceTable`.*
	v = 0.5	*Escalar numérico entre 0 e 1. Define o peso relativo entre dois objetivos conflitantes do VIKOR: utilidade do grupo (group utility, S) e arrependimento máximo individual (individual regret, R). O valor padrão é 0.5, o que representa um equilíbrio entre os dois critérios.*

Fonte: Documentation for package 'MCDA' version 0.1.0

A matriz de desempenho da função (performanceTable) é gerada a partir das métricas extraídas das séries temporais das alternativas analisadas. No FRANCISCO, as alternativas representam as DMUs, sendo analisadas de acordo com os critérios quantitativos escolhido pelo usuário, podendo ser eles: Fractal Dimension, TCP_AVG, Hurst Exponent, Variância, Whittle's Estimator e Alpha Tail Shape Parameter. Com isso, a matriz é montada de forma que cada linha representa uma DMU e cada coluna representa um critério.

O vetor criteriaWeights é criado a partir dos pesos dos critérios, que representa a importância relativa da métrica durante a análise. No FRANCISCO eles são definidos interativamente pelo usuário por meio da interface gráfica, havendo também a possibilidade de usar o valor padrão com a distribuição uniforme dos pesos, ou seja, os critérios recebem a mesma importância relativa.

O vetor criteriaMinMax é utilizado para indicar orientação dos critérios, ou seja, os que devem ser maximizados ou minimizados no processo de análise multicritério. A entrada desses valores também é feita por meio da interface gráfica do FRANCISCO pelo próprio usuário.

O parâmetro v representa o equilíbrio entre os índices de utilidade e arrependimento. Seu valor varia de 0 a 1, tomando como valor padrão, v =0.5, o que representa o equilíbrio entre os dois aspectos. No FRANCISCO, o usuário pode ajustar o valor conforme o contexto da análise de redes. A seguir, apresenta-se o Quadro 3 com os valores padrão configurados para caso os seis critérios sejam aplicados na análise:

Quadro 3 - Valores padrão para critérios no método VIKOR

CRITÉRIOS	CRITERIAWEIGHTS	CRITERIAMINMAX	v
FractalDim	0,17	Minimizar	0.5
TCP_AVG	0,17	Maximizar	
Hurst	0,17	Maximizar	
Var	0,17	Minimizar	
Whittle's Estimator	0,17	Minimizar	
Alfa Tail Shape Paramet	0,17	Maximizar	

Fonte: Autoria própria (2025)

A função VIKOR () retorna uma ordenação das DMUs com base no índice de compromisso (Q), que equilibra os índices de utilidade (S) e de arrependimento (R). A rede considerada ideal será aquela com menor valor de Q, sendo, portanto, a mais próxima da solução de compromisso entre os critérios avaliados.

3.3.2 Implementação ELECTREE III package 'MCDA'

A implementação do método ELECTRE III foi realizada utilizando a função ELECTRE3() do pacote MCDA, que utiliza a lógica clássica do modelo proposto por Bernard Roy. A função requer uma matriz de desempenho (scores), os limiares de indiferença (q),

preferência (p) e veto (v), e os pesos dos critérios (w). O Quadro 4 apresenta uma descrição técnica dos parâmetros de entrada:

Quadro 4 - Parâmetros de entrada da função ELECTRE3() do pacote MCDA

MÉTODO	PARÂMETROS	DESCRIÇÃO TÉCNICA
ELECTRE3(scores, q, p, v, w)	scores	Matriz ou quadro de dados contendo a tabela de desempenho. Cada coluna corresponde a um critério e cada linha a uma alternativa.
	q	Vetor contendo os limiares de indiferença.
	p	Vetor contendo o limite de preferência em cada um dos critérios.
	v	Vetor contendo os limites de veto para cada critério.
	w	Vetor contendo os pesos dos critérios.

Fonte: Documentation for package 'MCDA' version 0.1.0

Assim como no VIKOR, a matriz scores é gerada a partir das métricas extraídas das séries temporais das alternativas analisadas, montada de forma que cada linha representa uma DMU e cada coluna representa um critério.

O vetor q define os limiares de indiferença para cada critério, representando a margem de diferença que o usuário considera insignificante entre duas DMUs. Quando a diferença de desempenho entre alternativas for menor ou igual a esse valor para um determinado critério, elas serão tratadas como equivalentes naquele aspecto.

O vetor p define os limiares mínimos de diferença para que uma alternativa seja claramente preferida a outra em cada critério. Quando a diferença de desempenho entre duas DMUs em um critério ultrapassar esse valor, a alternativa com melhor desempenho será considerada estritamente superior naquele aspecto.

O vetor v estabelece os valores críticos que podem desqualificar uma alternativa, mesmo que ela tenha bom desempenho nos demais critérios. Quando uma DMU apresenta desempenho inferior além desse limiar em qualquer critério, ela é automaticamente rejeitada na comparação com alternativas melhores nesse aspecto específico.

No FRANCISCO, o usuário poderá delimitar os valores q, p e v de acordo com a análise que deseja realizar, podendo optar também por usa o valor padrão fornecido pela função implementada.

O vetor w é criado a partir dos pesos dos critérios, assim como no método VIKOR, eles são definidos interativamente pelo usuário por meio da interface gráfica, havendo também a possibilidade de usar o valor padrão com a distribuição uniforme dos pesos, ou seja, os critérios recebem a mesma importância relativa. A seguir, apresenta-se o Quadro 5 com os valores padrão configurados para caso os seis critérios sejam aplicados na análise:

Quadro 5 - Valores padrão para critérios no método ELECTRE III

CRITÉRIOS	w	ORIENTAÇÃO	q	p	v
FractalDim	0,17	Minimizar	0.10	0.30	0.80
TCP_AVG	0,17	Maximizar	0.10	0.30	0.80
Hurst	0,17	Maximizar	0.10	0.30	0.80
Var	0,17	Minimizar	0.10	0.30	0.80
Whittle's Estimator	0,17	Minimizar	0.10	0.30	0.80
Alfa Tail Shape Paramet	0,17	Maximizar	0.10	0.30	0.80

Fonte: Autoria própria (2025)

A função ELECTRE3() permite realizar a ordenação das alternativas e acessar algumas de suas matrizes como, matriz de concordância global, discordância, credibilidade, dominância e pontuação final.

3.3.3 Implementação PROMETHEE II package 'MCDA'

O método PROMETHEE II foi implementado utilizando a função PROMETHEEII() do pacote MCDA, essa função trabalha com os parâmetros (performanceTable) que é a matriz de desempenho, a função de preferência (preferenceFunction), o limiar de preferência (preferenceThreshold), o limiar de indiferença (indifferenceThreshold), o vetor para quando a função de preferência for gaussiana (gaussParameter), os pesos dos critérios (criteriaWeights) e a orientação dos critérios (criteriaMinMax). É possível observar a técnica de parâmetros de entrada no Quadro 6.

Quadro 6 - Parâmetros de entrada da função PROMETHEEII() do pacote MCDA

MÉTODO	PARÂMETROS	DESCRIÇÃO TÉCNICA
PROMETHEEII(performanceTable, preferenceFunction, preferenceThreshold, indifferenceThreshold, gaussParameter, criteriaWeights, criteriaMinMax)	performanceTable	Matriz contendo a tabela de avaliação. Cada linha corresponde a uma alternativa e cada coluna a um critério.
	preferenceFunction	Um vetor com funções de preferência.preferenceFunction deve ser igual a Usual, U-shape, V-shape, Level, V-shape-Indiff ou Gaussian.
	preferenceThreshold	Um vetor contendo o limite de preferência estrita.
	indifferenceThreshold	Um vetor contendo o limiar de indiferença.
	gaussParameter	Um vetor contendo parâmetros da função de preferência gaussiana.
	criteriaWeights	Vetor contendo os pesos dos critérios.
	criteriaMinMax	Vetor contendo a direção da preferência em cada um dos critérios. "min" (ou "max") indica que o critério deve ser minimizado (maximizado).

Fonte: Documentation for package 'MCDA' version 0.1.0

A montagem da matriz performanceTable segue o padrão dos outros métodos, extraindo as métricas das séries temporais e organizando as DMUs e critérios em linhas e colunas respectivamente. O vetor de preferenceFunction, responsáveis por definir como as diferenças entre alternativas são traduzidas em graus de preferência para cada critério, é definido pelo usuário por meio da interface gráfica.

O vetor preferenceThreshold estabelece a diferença mínima necessária para que uma alternativa seja estritamente preferida em um critério específico. vetor indifferenceThreshold estabelece a diferença máxima para que duas alternativas sejam consideradas indiferentes em um critério. O vetor gaussParameter é utilizado apenas quando preferenceFunction = "Gaussian", responsável por controlar a suavidade da curva de preferência. Esses valores podem ser personalizados ao serem definidos manualmente pelo usuário ou calculados automaticamente como valores padrão.

Já os vetores criteriaWeights e criteriaMinMax seguem a mesma lógica adotada nos demais métodos. O vetor criteriaWeights é composto pelos pesos atribuídos a cada critério, podendo ser definidos manualmente pelo usuário por meio da interface gráfica, ou assumirem valores padrão com distribuição uniforme, conferindo igual importância a todos os critérios. Já o vetor criteriaMinMax define a orientação de cada critério, indicando se ele deve ser maximizado ou minimizado durante a análise. Essa configuração também é realizada interativamente pelo usuário. O Quadro 7 apresenta os valores padrão configurados caso sejam utilizados todos os critérios na análise.

Quadro 7 - Valores padrão para critérios no método PROMETHEE II

CRITÉRIOS	criteria Weights	criteriaMin Max	preference Function	preference Threshold	indifference Threshold	gaussPa rameter
FractalDim	0,17	Minimizar	Usual	0	0	-
TCP_AVG	0,17	Maximizar	Usual	0	0	-
Hurst	0,17	Maximizar	Usual	0	0	-
Var	0,17	Minimizar	Usual	0	0	-
Whittle's Estimator	0,17	Minimizar	Usual	0	0	-
Alfa Tail Shape Paramet	0,17	Maximizar	Usual	0	0	-

Fonte: Autoria própria (2025)

A função PROMETHEEII() permite realizar a ordenação das alternativas da melhor para pior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A integração dos métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II no software FRANCISCO foi realizada com sucesso e de forma modular, mantendo a arquitetura original e seguindo o estilo pré-existente na aplicação. O novo algoritmo de análise foi implementado de modo independente, possibilitando que o usuário possa escolher o método desejado diretamente na interface Shiny[5], mantendo-se fiel a lógica de uso adotada pelo sistema.

[5] Shiny é um pacote do R que permite criar aplicações web interativas diretamente a partir de scripts em R. Pode ser acessado em: https://shiny.rstudio.com

Apesar da análise dos dados ocorrer de modo independente, o processo de manipulação dos dados é o mesmo, o que permitiu seguir o fluxo já definido na aplicação, com a escolha da janela temporal, seleção do tipo de arquivo, inserção das variáveis, seleção do método de dimensão fractal e geração da tabela.

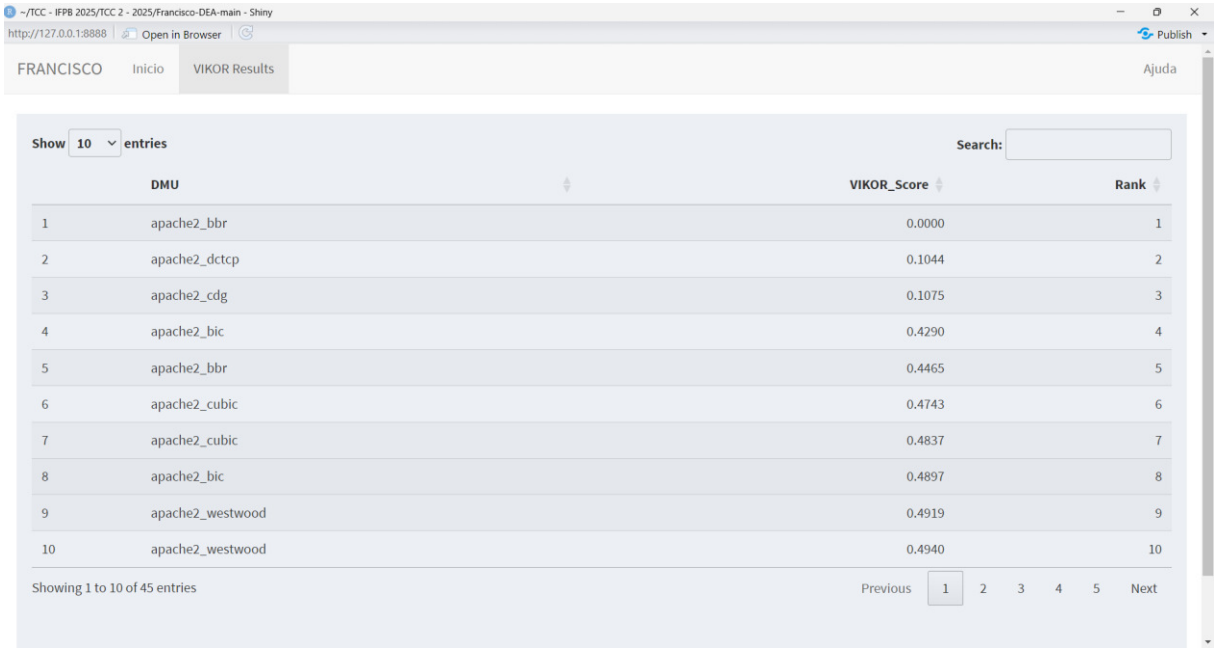
A tabela gerada pela aplicação foi utilizada por todos os métodos multicritérios para a extração das métricas fractais (FractalDim, TCP_AVG, Hurst, Var, Whittle's Estimator e Alfa Tail Shape Parameter) e os nomes das DMUs para a geração da matriz de desempenho comum entre eles.

A execução dos métodos para validação foi realizada com os dados disponíveis no dataset do FRANCISCO, utilizando DMUs do APACHE BENCH. Apesar de não conseguir realizar testes em outras aplicações para fortalecer a validação dos métodos, e isso devido à dificuldade de encontrar ferramentas que disponibilizem este tipo de análise, os resultados obtidos se apresentaram consistentes e satisfatórios.

A execução do método VIKOR ocorreu utilizando os valores padrão pré-estabelecidos anteriormente neste trabalho. Foi observado a ordenação das alternativas de acordo com os índices de compromisso (Q) gerados (variando entre 0 e 1), posicionando as DMUs com índice mais próximo de zero como as redes mais próximas da solução ideal de compromisso. Dessa forma, a aplicação do método com os dados do dataset de fato conseguiu retornar uma ordenação das redes e os respectivos valores de índice de compromisso (Q) de cada uma das DMUs analisadas. O retorno dos dados resultantes foi tratado seguindo o estilo compatível com o já trabalhado pela aplicação, para isso, os resultados da função VIKOR() foram convertidos em uma tabela dinâmica com os valores de nomes das DMUs, score com os valores de índice de compromisso (Q) e um ranking crescente de ordenação.

A seguir, na Figura 1, é possível observar a montagem da tabela com a respectiva ordenação, onde a DMU com a melhor colocação no ranking é a opção para prestação de serviços de rede ao longo do tempo para aquele cenário trabalho pelo usuário.

Figura 1 - Tabela de resultados método VIKOR (valores padrão)



Fonte: Autoria própria (2025)

A aplicação do método ELECTRE III também foi executada utilizando os valores padrão demonstrados na seção 5.3.2 deste trabalho e os dados do dataset do FRANCISCO.

No ambiente R, foi necessário a utilização da função do do.call para execução do método ELECTRE3(), devido a construção direta da função apresentar problemas na normalização dos parâmetros. Com isso, foi criado uma lista com um os argumentos necessários e em seguida realizada a chamada do método por meio da função do.call, passando o método e a lista com os parâmetros.

Conforme esperado pelo estudo teórico de sua metodologia, o método gerou um objeto complexo de resultados, diferente do método VIKOR com ordenação gerada diretamente, o ELECTRE III forneceu uma série de matrizes intermediárias, matriz de concordância ($concordance), matriz de discordância ($discordance), matriz de credibilidade ($credibility) que por sua vez gerou uma matriz de dominância ($dominance) e um vetor de pontuação($scoring) para as DMUs analisadas.

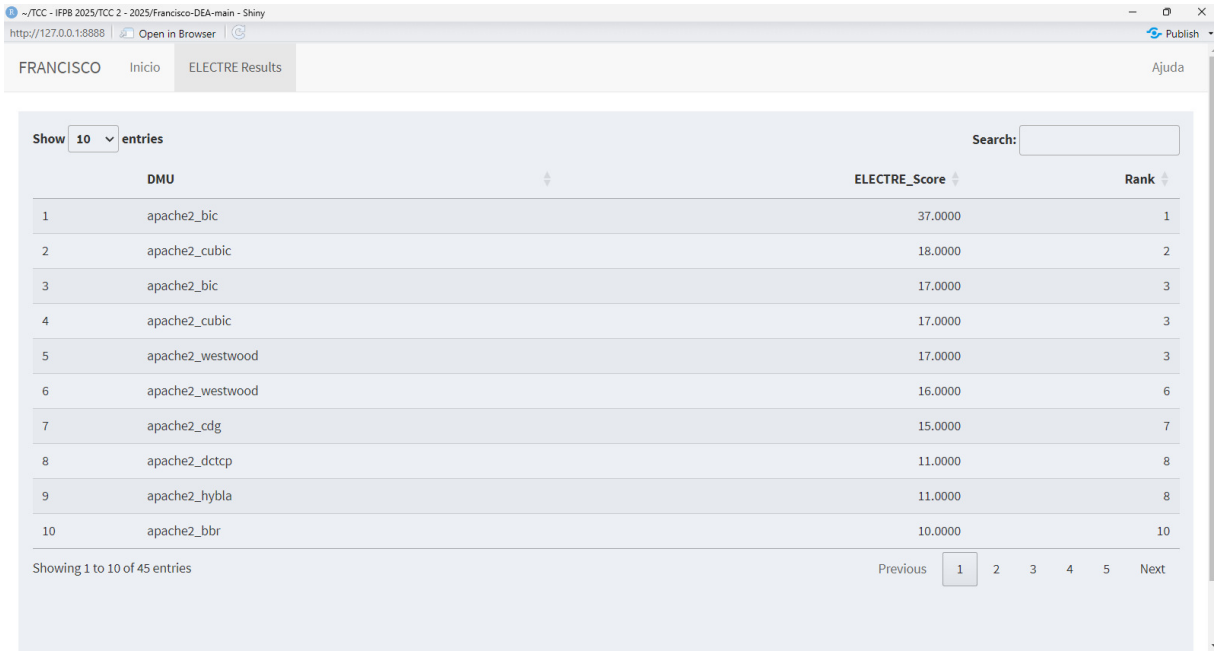
O vetor scoring foi utilizado para realizar a ordenação, onde as DMUs que apresentaram os maiores valores para este vetor indicavam uma maior força líquida de dominância sobre as demais analisadas em relação ao outranking, ou seja, a melhor opção para prestação de serviço foi a DMU com o maior valor de scoring, pois apresentou na maioria das comparações par a par ser tão boa quanto as outras nos limiares de veto e preferível a maioria delas.

Assim, o método também foi executado com sucesso e capaz de apresentar resultados suficientes para que fosse possível realizar a ordenação das DMUs analisadas. O retorno dos

resultados também foi tratado seguindo o fluxo do FRANCISCO, para isso, os dados foram convertidos em uma dinâmica com valores de nomes das DMUs, score com os valores de índice agregado da matriz de credibilidade descrito no scoring e um ranking decrescente de ordenação gerado a partir do valor do scoring.

A seguir, na Figura 2, é possível observar a montagem da tabela com a respectiva ordenação, onde a DMU com a melhor colocação no ranking é a opção para prestação de serviços de rede ao longo do tempo para aquele cenário trabalho pelo usuário.

Figura 2 - Tabela de resultados método ELECTRE III (valores padrão)



FONTE: Autoria própria (2025)

O método PROMETHEE II foi executado utilizando os valores padrão pré-estabelecidos e descritos na seção 5.3.3 na descrição de implementação do método e com a utilização dos dados do dataset do FRANCISCO.

A função PROMETHEEII() apresentou um retorno bem sucedido da ordenação completa das DMUs analisadas e indicadas em ordem crescente de preferência. Porém, diferente das outras funções, não foram retornados valores como os fluxos positivos e negativos ou fluxo de preferência líquido (ϕ), mas já o resultado ordenado das alternativas analisadas pelo método, como esperado pelo estudo teórico do método.

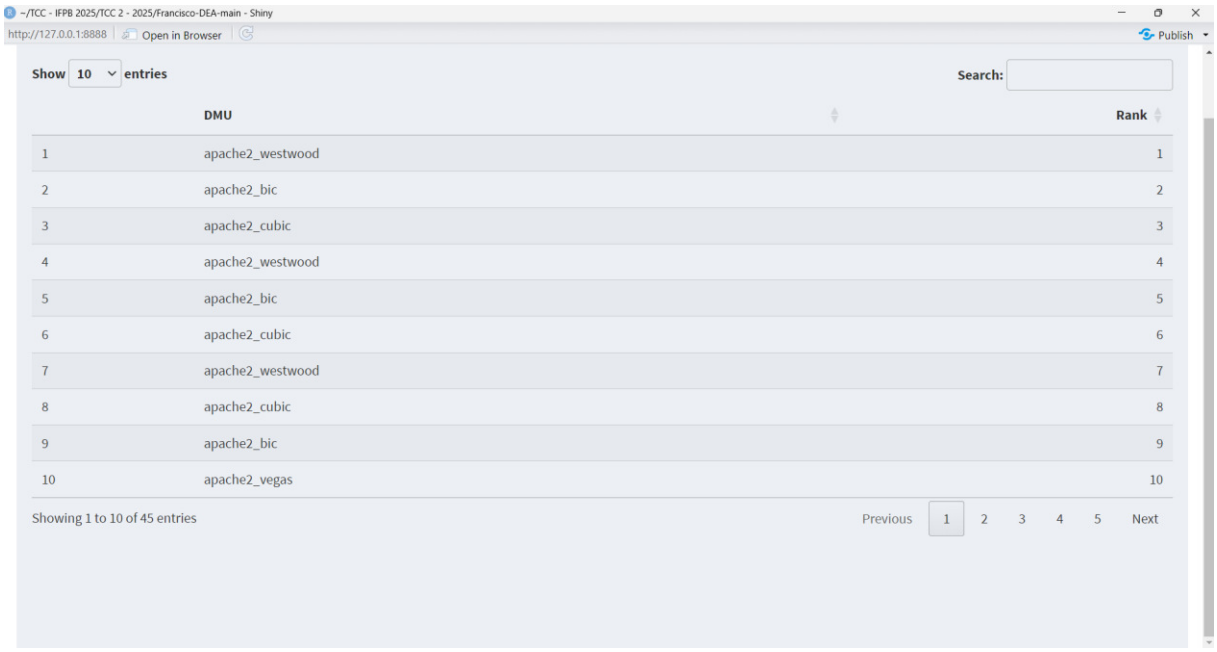
Esse resultado demonstra que o método PROMETHEE II apresenta uma visão gradual de preferência entre as DMUs com base no fluxo líquido (ϕ), certificando que aquela que demonstrou um grau de superioridade da preferência entre as outras é a melhor alternativa para a prestação de serviço dentro do cenário trabalhado. Isso mostra-se extremamente útil no

contexto em que o tomador de decisão precisa selecionar apenas uma rede viável dentre diversas com desempenhos semelhantes.

Para converter os valores fornecidos pela função PROMETHEEII() em uma tabela compreensível para o usuário, foi necessário uma numeração de ranking sequencial de cada DMU. Foi gerada então uma tabela dinâmica seguindo o estilo adotado pela aplicação FRANCISCO, onde os dados obtidos em forma de lista foram transformados em um vetor para extração dos nomes das DMUs, em seguida foi criado um vetor sequencial com base no vetor de DMUs para gerar um ranking, de forma que cada alternativa é apresentada conforme sua posição final. Isso garante que a ordem de preferência retornada pelo método seja organizada e apresentada de forma clara, associando o nome da DMU com seu respectivo rank.

A seguir, na Figura 3, é possível observar a montagem da tabela com a respectiva ordenação, onde a DMU com a melhor colocação no ranking é a opção para prestação de serviços de rede ao longo do tempo para aquele cenário trabalho pelo usuário.

Figura 3 - Tabela de resultados método PROMETHEE II (valores padrão)



FONTE: Autoria própria (2025)

Os três novos métodos possibilitam trabalhar dentro do FRANCISCO análises que oferecem uma solução de compromisso equilibrada entre os critérios (VIKOR), tratam o desempenho insatisfatório por meio de uma lógica não compensatória, muito importante quando se trabalha dentro de cenários com contextos críticos (ELECTRE III) e trabalham com profundidade na comparação entre alternativas por meio da comparação par a par (PROMETHEE II).

Em todos os casos, os métodos MCDM no ambiente FRANCISCO foram executados de forma bem sucedida, integrando-se de forma eficiente à interface da aplicação gerando relatórios compatíveis com o sistema, o que mostra a viabilidade de expansão de métodos analíticos a esta ferramenta para oferecer uma maior quantidade de opções de análises ao tomador de decisão, consequentemente, um número maior de cenários possíveis a serem trabalhados.

Para realizar a comparação dos resultados obtidos pelas técnicas DEA e MCDM, foram realizadas as análises utilizando o método BCC, por parte da técnica DEA e os métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II, por parte da técnica MCDM. Os rankings gerados foram disponibilizados na tabela 1.

Tabela 1 - Rankings DMUs DEA x MCDM (dataset: 4vram - apache2)

DMU	Rank DEA	Rank VIKOR	Rank ELECTRE III	Rank PROMETHEE II
apache2_bbr	1	1	2	1
apache2_bic.1	2	4	1	7
apache2_cdg	3	3	5	2
...	...	...	...	...

FONTE: Autoria própria (2025)

Observa-se que a DMU apache2_bbr apresentou um desempenho consistente, estando presente entre as melhores DMUs em todos os métodos. As DMUs apache2_bic.1 e apache2_cdg, apresentaram uma variação moderada nas respectivas posições do ranking. Esse padrão é observado nas demais DMUs analisadas, apontando uma correlação moderada e positiva entre as técnicas, além de mostrar que a DMU com maior eficiência se destaca independentemente do método utilizado, fortalecendo os resultados. Isso reforça a confiabilidade nos métodos implementados.

Alguns dos desafios encontrados no processo de integração foram a normalização dos parâmetros em algumas funções, validação dos métodos e a exibição dos resultados distintos de cada método para a interface do usuário. A estratégia de apresentação dos resultados na interface do FRANCISCO consistiu em exibi-los em forma de tabela de ranking com colunas “DMU”, “Score” e “Rank”. A implementação foi realizada de forma não intrusiva, estendendo-se a interface com uma nova opção de seleção “Análise MCDM”, que traz os campos específicos para os métodos implementados. Já os resultados são exibidos em abas dedicadas para o método específico, seguindo o estilo nativo da estrutura das tabelas do sistema, o que facilita a interação com o usuário.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho conseguiu atingir seu objetivo principal com sucesso ao realizar a implementação dos métodos de tomada de decisão multicritérios VIKOR, ELECTRE III e

PROMETHEE II no software FRANCISCO, ampliando suas possibilidades analíticas e tornando a ferramenta mais completa para o processo de tomada de decisão em redes de computadores e ao mesmo tempo que preserva todas as funcionalidades originais e estilo de apresentação.

Dentre os desafios encontrados, é importante ressaltar a validação dos métodos, pois foi encontrado uma dificuldade em comparar resultados devido à escassez de aplicações disponíveis com os métodos VIKOR, ELECTRE III e PROMETHEE II acessíveis, fez necessário realizar a validação utilizando-se o dataset interno do FRANCISCO e por meio da verificação de consistência lógica dos métodos. Essa escassez, no entanto, reforça a relevância da contribuição deste trabalho e a importância de continuar com o aprimoramento desta ferramenta, além de trabalhar novas expansões de aplicabilidade.

Já os resultados demonstram que as contribuições deste trabalho oferecem suporte a cenários decisórios complexos, levando em consideração a preferência do tomador de decisão, fatores subjetivos e critérios conflitantes. Possibilitando análises por meio de soluções de compromisso equilibradas e não compensatórias, com comparação e ordenação, realizando assim a predição de alternativas mais preferíveis para o contexto adotado.

É importante ressaltar que a interpretação dos resultados está diretamente ligada aos parâmetros definidos pelo usuário, o que mostra uma certa complexidade em se trabalhar estes métodos, exigindo um conhecimento prévio do tomador de decisão. Portanto, a importância destes novos métodos de análises não está em fornecer ao usuário uma resposta única, mas em oferecer ao tomador de decisão um ambiente flexível para análise que possa ser trabalhado em diversos cenários.

No entanto, apesar dos desafios, a implementação dos métodos foi bem sucedida e apresentou resultados consistentes com o uso do dataset do software FRANCISCO, mostrando a capacidade de executar os três métodos MCDM distintos a partir de um único conjunto de dados gerados pela aplicação, validando assim o potencial destes métodos no processo de tomada de decisão e avaliação de desempenho de redes de computadores junto aos demais métodos já existentes nesta ferramenta.

Embora o FRANCISCO 3.0 tenha ampliado as capacidades analíticas do software, em trabalhos futuros essa ferramenta ainda se mostra passível de novos aperfeiçoamentos, sobretudo para a incorporação de novos métodos adicionais MCDM e suas variações, de acordo com o cenário trabalhado. Além disso, pode-se criar módulos de agregação de ranking de modo

que o usuário possa combinar os rankings gerados em ambas as técnicas, promovendo uma visão unificada da análise que dispõe uma média relativa das posições das DMUs.

6 REFERÊNCIAS

AIT RAI, Khaoula et al. **VIKOR based Methodology using Local and Global Centralities to Detect Spreaders in Complex Network**. Int. J. of Multidisciplinary and Current research, v. 9, 2021.

ANDRADE, Francisco Iarlyson Santana de; MARQUES JUNIOR, Francisco Daladier. **FRANCISCO: FRActal Network Cloud Infrastructure Service Comparison and Optimisation**. In: Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance). SBC, 2023. p. 109-120.

AZHAR, Nayli A.; RADZI, Nurul AM; WAN AHMAD, Wan Siti Halimatul Munirah. **Multi-criteria decision making: a systematic review.** Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering), v. 14, n. 8, p. 779-801, 2021.

BACELAR JÚNIOR, José Jackson Machado. **Metodologia para análise de tráfego em redes MPLS. 2008**. Monografia (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2008.

BANKER, Rajiv D.; CHARNES, Abraham; COOPER, William Wager. **Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis**. Management science, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BIGARET, S. et al. **Supporting the multi-criteria decision aiding process: R and the MCDA package**. EURO J Decis Processes 5: 169–194 [em linha]. 2017.

BRANS, Jean-Pierre. **L'ingénierie de la décision: l'élaboration d'instruments d'aide a la décision**. Université Laval, Faculté des sciences de l'administration, 1982.

BRANS, Jean-Pierre; VINCKE, Ph. **Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)**. Management science, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

CHAGAS DA SILVA, D., DE CASTRO MONTEIRO, C. & BATISTA, L. S. (2014). **Classificação e seleção de redes via tomada de decisão multicritério**, VI Congresso Internacional de Computação e Telecomunicações pp. 259–265.

CHANG, Chia-Ling. **A modified VIKOR method for multiple criteria analysis**. Environmental monitoring and assessment, v. 168, p. 339-344, 2010.

CHARNES, Abraham; COOPER, William Wager; RHODES, Edwardo. **Measuring the efficiency of decision-making units**. European journal of operational research, v. 3, n. 4, p. 339, 1979.

COSTA, G. H. **Métricas para Avaliação de Desempenho em Redes QoS sobre IP**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologias, Gerência e Segurança de Redes de Computadores) – Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DEL VASTO-TERRIENTES, Luis et al. **ELECTRE-III-H: An outranking-based decision aiding method for hierarchically structured criteria**. Expert Systems with Applications, v. 42, n. 11, p. 4910-4926, 2015.

GAVADE, Rohan K. **Multi-Criteria Decision Making: An overview of different selection problems and methods**. International Journal of Computer Science and Information Technologies, v. 5, n. 4, p. 5643-5646, 2014.

MACIEL FILHO, Franks Patrício. **Aprimorando usabilidade e novos modelos multiplicativos DEA no Francisco: uma ferramenta de análise de redes de computadores**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2024.

MARQUES JÚNIOR, Francisco Daladier et al. **Optimising virtual networks over time by using Windows Multiplicative DEA model**. Expert Systems with Applications, v. 132, p. 209-225, 2019.

OPRICOVIC, Serafim. **Multicriteria optimization of civil engineering systems**. Faculty of civil engineering, Belgrade, v. 2, n. 1, p. 5-21, 1998.

PESSOA FILHO, Ronaldo Medeiros. **Análise de uma metodologia MCDA baseada em modelos para fatiamento de redes 5G**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande, 2021.

QI, Xiuli et al. **PROMETHEE for prioritized criteria**. Soft Computing, v. 23, n. 22, p. 11419-11432, 2019.

ROY, Bernard. Classement et choix en présence de points de vue multiples. **Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle**, v. 2, n. 8, p. 57-75, 1968.

TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. **Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts**. Encyclopedia, v. 3, n. 1, p. 77-87, 2023.

THAKKAR, Jitesh J. **MULTI-CRITERIA DECISION MAKING**. Vol. 336. Singapore: Springer, 2021.

TOLOIE-ESHLAGHY, Abbas; HOMAYONFAR, Mahdi. **MCDM methodologies and applications: a literature review from 1999 to 2009.** Research Journal of International Studies, v. 21, n. 21, p. 86-137, 2011.

YOUSEFI, Ali; HADI-VENCHEH, Abdollah. **Selecting six sigma projects: MCDM or DEA?**. Journal of Modelling in Management, v. 11, n. 1, p. 309-325, 2016.

WU, Guanqaun; ZENG, Desheng. **Optimization of network resource management based on software-defined networking in the 5G environment**. The Journal of Supercomputing, v. 78, n. 15, p. 16721-16744, 2022.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega do Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Entrega do Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Israel Lazaro
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Israel Lazaro Mangueira Tavares**, **ALUNO (202012010008) DE TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS - CAJAZEIRAS**, em 18/09/2025 16:21:43.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1614483
Código de Autenticação: d6a62d858a