

Combinando Aprendizado de Máquina e Apoio Multicritério à Decisão na Avaliação de Cursos de Pós-Graduação no Brasil: Um Estudo de Caso na Área da Ciência da Computação a partir do método CROWM

Arthur Pinheiro de Araújo Costa

Instituto Militar de Engenharia
Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270
arthurcosta.araujo@ime.eb.br

Ronaldo Ribeiro Goldschmidt

Instituto Militar de Engenharia
Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270
ronaldo.rgold@ime.eb.br

Julio Cesar Duarte

Instituto Militar de Engenharia
Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270
duarte@ime.eb.br

Marcos dos Santos

Instituto Militar de Engenharia
Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270
marcosdossantos@ime.eb.br

RESUMO

Este estudo apresenta uma metodologia inovadora para avaliar cursos de pós-graduação brasileiros no quadriênio 2013-2016 utilizando o método *Communalities on Ranking and Objective Weights Method* (CROWM). Integrando Aprendizado de Máquina e Apoio Multicritério à Decisão, o objetivo é elaborar, mediante um estudo de caso, uma metodologia capaz de avaliar 17 cursos de pós-graduação em Ciência da Computação com base em seis critérios de desempenho retirados diretamente de informações oficiais da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES): Planejamento, Infraestrutura, Qualidade dos Docentes, Qualidade das dissertações, Eficiência, e Quantidade de Produções. Alcançando uma correlação de Pearson de 0,9 entre o ranking gerado e as Escalas CAPES de cada curso avaliado, demonstra-se a robustez do método. Ademais, ao ajudar a identificar pontos fortes e oportunidades de melhoria, os resultados deste estudo podem contribuir para auxiliar no aprimoramento dos programas em busca de excelência acadêmica e científica.

PALAVRAS-CHAVE. Apoio Multicritério à Decisão (AMD), Aprendizado de Máquina, CROWM, Educação, Ensino Superior.

Tópicos. [1°] 3. AdP&ED – PO na Administração Pública e Educação; [2°] 20. TEL&SI – PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações.

ABSTRACT

This study presents an innovative methodology to evaluate Brazilian postgraduate courses in the 2013-2016 quadrennium using the *Communalities on Ranking and Objective Weights Method* (CROWM). Integrating Machine Learning and Multicriteria Decision Making, the objective is to elaborate, through a case study, a methodology capable of evaluating 17 graduate

courses in Computer Science based on six performance criteria taken directly from official information from the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES): Planning, Infrastructure, Quality of Teachers, Quality of dissertations, Efficiency, and Quantity of Productions. Reaching a Pearson correlation of 0.9 between the ranking generated and the CAPES Scales of each course evaluated demonstrates the method's robustness. In addition, by helping to identify strengths and opportunities for improvement, the results of this study can contribute to assist in the improvement of programs in pursuit of academic and scientific excellence.

KEYWORDS. Multicriteria Decision Making (MCDM), Machine Learning, CROWM, Education, Higher Education.

Paper topics: Tópicos. [1°] 3. AdP&ED – OR in Public Administration and Education; [2°] 20. TEL&SI – OR in Telecommunications and Information Systems.

1. Introdução

No campo educacional, o uso de técnicas de Aprendizado de Máquina (AM) tem se mostrado relevante ao longo da história e tem recebido crescente atenção da academia e da sociedade [CHEN; JIN; LIN, 2020]. Esse interesse é particularmente evidente na avaliação e aprimoramento de cursos, áreas cruciais para o avanço acadêmico e profissional, como visto em Tavares et al. [2022]. No Brasil, a regulação e a avaliação da qualidade dos programas de pós-graduação são feitas pela Fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES). A avaliação é central para todo o sistema de pós-graduação, distribuindo recursos financeiros e legitimando os diferenciais entre os programas [MARQUES; VEIGA; BORGES, 2021].

Nesse sentido, à medida que as instituições acadêmicas buscam elevar a qualidade de seus programas, a aplicação de análise de dados e técnicas de AM não supervisionadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA), torna-se uma ferramenta de destaque. A PCA simplifica a análise de conjuntos de dados caracterizados por múltiplas variáveis inter-relacionadas ao extrair e representar informações essenciais por meio de novas variáveis independentes [FÁVERO; BELFIORE, 2017]. Esse processo ajuda a revelar padrões subjacentes nos dados de forma mais eficaz, conforme discutido por Abdi e Williams [2010], tornando a PCA uma ferramenta útil em cenários que requerem simplificação de dados e representação perspicaz [FÁVERO; BELFIORE, 2017]. Por sua vez, o Apoio Multicritério à Decisão (AMD), tema deste trabalho, é uma ferramenta que facilita o processo decisório, especialmente no que tange à seleção, classificação ou ordenação de alternativas [GRECO; FIGUEIRA; EHRGOTT, 2016].

No que diz respeito à avaliação de cursos na área da educação, incluindo programas de pós-graduação e formação especializada, Costa et al. [2022] gerenciaram portfólios de cursos de Tecnologia da Informação (TI), considerando critérios como certificação, demanda de mercado e esforço para propor recomendações estratégicas. Mellem et al. [2021] utilizaram o planejamento de cenários para a gestão de portfólios de cursos, destacando estratégias prospectivas e consultas com especialistas. Tavares et al. [2022] examinaram programas de pós-graduação interdisciplinares, baseando-se em indicadores já utilizados no modelo atual de avaliação dos estudos de pós-graduação brasileiros pela CAPES.

Neste artigo, serão avaliados 17 cursos de mestrado acadêmico dentro da Área de Avaliação de Ciência da Computação referentes à Avaliação Quadrienal 2013-2016, à luz de seis critérios de desempenho retirados diretamente das Fichas de Recomendação dos cursos [CAPES, 2024a]: Planejamento, Infraestrutura, Qualidade dos Docentes, Qualidade das dissertações, Eficiência, e Quantidade de Produções no período de 2013 a 2016 [CAPES, 2024b]. Para auxiliar nesta tarefa, utilizou-se o AM e o AMD por meio do método *Communalities on Ranking and Objective Weights Method* (CROWM) [COSTA et al., 2024], o qual combina a PCA com AMD para calcular os pesos dos critérios e avaliar o desempenho das alternativas de maneira objetiva.

A avaliação de cursos de pós-graduação é importante para garantir a qualidade no ensino superior. A relevância deste artigo reside na aplicação de uma metodologia validada estatisticamente, ao incluir testes como o KMO e Bartlett, assegurando a adequação dos dados para análise fatorial. Essa abordagem, associada ao uso do CROWM, permite uma visão dos dados, permitindo a identificação dos pontos fortes e das áreas que necessitam de melhorias. A metodologia aplicada analisa os principais fatores que influenciam o desempenho dos cursos, revelando correlações ocultas e variáveis críticas, e fornece subsídios para decisões estratégicas informadas, baseadas em evidências confiáveis, com o intuito de otimizar a qualidade e a eficácia dos programas de pós-graduação.

Além disso, este estudo está organizado em seis seções: a primeira, que corresponde à introdução, expõe os objetivos da pesquisa; a seção 2 discute a revisão sistemática da literatura e os trabalhos relacionados ao tema; a seção 3 detalha o referencial teórico com ênfase no CROWM; a seção 4 detalha a metodologia aplicada, com ênfase no estudo de caso da avaliação dos cursos de pós-graduação em computação; a seção 5 discute os resultados, contextualizando-os no panorama

da educação superior; e, finalmente, a seção 6 traz as conclusões do estudo, discutindo as implicações dos achados e sugerindo direções para futuras pesquisas.

2. Revisão da Literatura

Conforme explica Kitchenham [2004], uma revisão sistemática da literatura envolve a identificação, avaliação e interpretação de todas as pesquisas relevantes e disponíveis sobre uma questão específica de pesquisa, área temática ou fenômeno de interesse. Esta seção apresenta os trabalhos relacionados ao tema, demonstrando os resultados provenientes da Revisão da Literatura.

2.1 Trabalhos relacionados

Foi realizada uma revisão da literatura na Base Scopus, no período relativo aos últimos cinco anos (2019-2024), em abril de 2024, na busca de pesquisas que tenham abordado a avaliação de cursos de pós-graduação. Para tal, foi empregada a seguinte string de busca: ("education" OR "postgraduate courses" OR "courses") AND ("multi-criteria" OR "MCDA" OR "MCDM" OR "multicriteria" OR "multi-criteria decision analysis" OR "multi-criteria decision making" OR "multicriteria decision making" OR "multicriteria decision analysis" OR "principal component analysis" OR "PCA"). Como resultado foram encontrados 13 trabalhos relacionados, os quais abordam as áreas de Ciência da Computação, Ciências Sociais e Ciências da Decisão, temas relacionados a esta pesquisa.

Chairungruang et al. [2023] propôs um framework que utiliza os métodos *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) para ranquear componentes da educação vocacional digital. Esse estudo sintetizou elementos dessa modalidade de ensino e demonstrou a aplicação de métodos AMD para melhorar a avaliação e a implementação desses componentes. Tao e Wang [2023] desenvolveram um modelo integrado de AMD para planejamento sustentável de cursos de contabilidade utilizando uma combinação de métodos de avaliação, com foco numa educação mais sustentável. Krishnan et al. [2020] propuseram uma técnica não supervisionada para estimar valores da medida fuzzy λ e sua aplicação na tomada de decisão multicritério, avaliando cursos de graduação e modelando as interdependências entre critérios de satisfação estudantil. Nilashi et al. [2022] apresentaram um framework de recomendação de cursos para *Massive Open Online Courses* (MOOCs) utilizando técnicas de AM e avaliação de preferências dos usuários. De Castro-Pardo et al. [2019] integraram AHP e programação por metas para avaliar o e-learning em cursos de administração de empresas, melhorando a consistência das avaliações e reduzindo vieses dos participantes.

Riofrio-Calderon e Ramirez-Montoya [2022] analisaram dados de um curso MOOC sobre sustentabilidade energética utilizando PCA, auxiliando no entendimento do comportamento dos participantes para o design futuro de cursos online. Mohammed et al. [2023] utilizaram os métodos AHP e *ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR) para alocar disciplinas de TI a graduados com base em habilidades interpessoais, melhorando o processo de recrutamento de professores. Liu et al. [2021] desenvolveram um método de tomada de decisão que combina a teoria de evidências e o método TOMada de Decisão Interativa Multicritério (TODIM) para avaliação de cursos de pós-graduação baseados em especialistas. Chen et al. [2020] desenvolveram um sistema de alerta precoce acadêmico usando PCA, baseado em notas de cursos e grades, oferecendo uma ferramenta eficaz para monitorar o desempenho acadêmico dos alunos.

Chopra et al. [2021] utilizaram uma abordagem híbrida baseada em TOPSIS-AHP para classificar fatores-chave de aceitação de MOOCs, auxiliando no entendimento e gerenciamento de fatores que influenciam a aceitação desses cursos. Mellem et al. [2021] utilizaram planejamento de cenários (Momentum) e o método *ELimination Et Choix Traduisant la REALité* (ELECTRE)-MOr para priorização estratégica de portfólios de cursos de treinamento e desenvolvimento, identificando os que devem ser desenvolvidos ou descontinuados, com base em cenários futuros. Costa et al. [2022] empregaram o método híbrido ELECTRE-MOr para gerenciar portfólios de cursos de TI em uma empresa de treinamento corporativo, otimizando o portfólio oferecido. Tavares et al. [2022] propuseram um modelo para avaliar programas de pós-graduação

interdisciplinares usando o método MACBETH, alinhado com os indicadores CAPES e avaliações paritárias dos decisores.

Diferentemente de todos esses trabalhos, este artigo é o primeiro a gerar avaliação de desempenho de cursos de pós-graduação diretamente da CAPES de forma objetiva. Além disso, também foi implementado o uso de AM, representando uma inovação adicional na metodologia de avaliação.

3. Referencial Teórico

O método CROWM, empregado para avaliar os cursos neste trabalho, foi desenvolvido no Instituto Militar de Engenharia (IME) e integra PCA e AMD para calcular pesos de critérios e pontuações das alternativas [COSTA et al., 2024]. Esta seção apresenta o método CROWM, detalhando seu passo a passo.

3.2. Cálculo dos pesos dos critérios

O CROWM [COSTA et al., 2024] calcula os pesos dos critérios pelas cargas fatoriais da PCA [LEE et al., 2010] e pelo *M*ethod based on the *R*emoval Effects of *C*riteria (MEREC) [KESHAVARZ-GHORABAE et al., 2021]:

- **MEREC:** usa efeitos de remoção de critérios no desempenho agregado para calcular pesos objetivamente [KESHAVARZ-GHORABAE et al., 2021], envolvendo seis etapas principais:

- I. Estabelecimento da Matriz de Decisão;
- II. Determinação da Matriz de Decisão Normalizada;
- III. Determinação do desempenho geral das alternativas (S_i);
- IV. Desempenho das alternativas removendo cada critério (S'_{ij});
- V. Cálculo do efeito de remoção de cada critério (E_j):

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (1)$$

- VI. Cálculo do peso dos critérios (ω_j):

$$\omega_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad (2)$$

- **Pesos pelas Cargas fatoriais**

As cargas fatoriais da PCA representam a importância de cada critério na formação dos componentes principais (PC). Consideram-se apenas PCs com autovalores maiores que 1 (k), conforme o critério de Kaiser [RUSCIO; ROCHE, 2012].

- I. Cálculo do peso do j - ésimo critério pelas cargas fatoriais [φ_j];
- II. Cálculo dos pesos pelas cargas fatoriais [ω''_j]:

$$\omega''_j = \frac{\varphi_j}{\sum_{j=1}^m \varphi_j} \quad (3)$$

- **Pesos resultantes: CROWM**

$$\omega_j = \frac{\omega'_j + \omega''_j}{2} \quad (4)$$

3.1 Avaliação de desempenho das alternativas

Para avaliar o desempenho das alternativas, o CROWM segue estes passos [COSTA et al., 2024; FÁVERO; BELFIORE, 2017]:

- I. Estabelecimento da matriz de correlações ρ proveniente da Matriz de Decisão;
- II. Elaboração do teste de esfericidade de Bartlett:

O teste de Bartlett compara a matriz de correlação de Pearson com uma matriz de identidade para avaliar a significância estatística das discrepâncias a um nível de significância de

5%. Um valor significativo indica que a PCA pode ser utilizada, pois as variáveis são suficientemente correlacionadas para a análise [BARTLETT, 1954; FÁVERO; BELFIORE, 2017].

III. Determinação dos autovalores e suas respectivas variâncias compartilhadas;

IV. Determinação dos autovetores;

V. Determinação dos scores fatoriais (S_k);

VI. Determinação dos fatores (F_{ki});

VII. Determinação das cargas fatoriais e comunalidades: $\alpha_{ij}^2 = C_{ij}$ (5); e

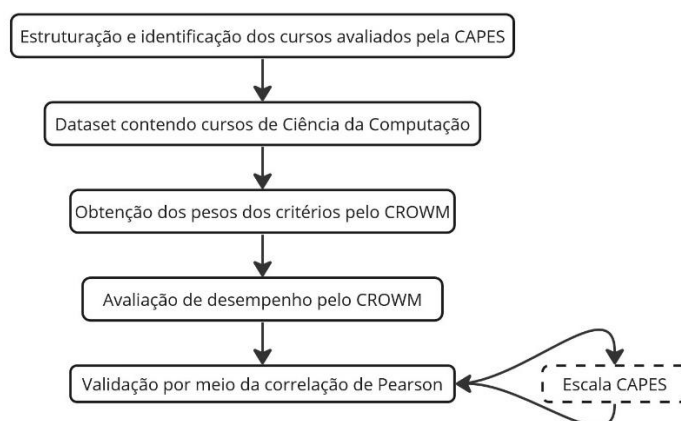
VIII. Cálculo das pontuações das alternativas (P_n):

$$P_n = \sum_{i=1}^{k_{max}} \sum_{j=1}^m F_{in} C_{ji} \omega_j \quad (6)$$

4. Metodologia

De acordo com a classificação proposta por Creswell e Creswell [2017], este artigo é caracterizado como quantitativo, combinando modelagem matemática e estudo de caso, conforme descrito por Bertrand e Fransoo [2002]. A Figura 1 apresenta o fluxo metodológico da avaliação de cursos de pós-graduação utilizando o método CROWM. Inicialmente, ocorre a identificação e estruturação dos cursos avaliados pela CAPES; em seguida, é compilado um conjunto de dados contendo os cursos de Ciência da Computação para, na sequência, aplicação do método CROWM, utilizado para calcular os pesos dos critérios de avaliação. Posteriormente, os cursos são avaliados com base nesses critérios ponderados pelo CROWM e, por fim, os resultados são validados por meio da correlação de Pearson, comparando-os com a escala CAPES.

Figura 1 – Passos da metodologia aplicada.



Fonte: Autores.

4.1. Estudo de caso

Nesta subseção será apresentado o estudo de caso, que consiste na avaliação dos cursos de pós-graduação na Área de Avaliação de Ciência da Computação utilizando o método CROWM. Esta pesquisa empregou o modelo de estruturação de problemas Soft Systems Methodology (SSM) [CHECKLAND, 1981; CHECKLAND; HAYNES, 2019], utilizado para estruturar o pensamento crítico em torno do estudo.

Figura 2 – Análise CATWOE.



Fonte: Adaptado de [SLIDEMODEL, 2024].

O SSM destaca os componentes Clientes (C), Atores (A), Transformações (T), Visão de Mundo (W), Proprietários (O) e Restrições Ambientais (E), conforme ilustrado na Figura 2.

4.2. Cursos avaliados

A seleção dos 17 cursos de mestrado (apresentados na Tabela 1) em computação foi realizada com base na diversidade geográfica e na representatividade das instituições de ensino superior brasileiras. Esses cursos foram escolhidos por pertencerem a instituições renomadas e por apresentarem variações significativas em suas avaliações, o que permite uma análise mais abrangente e detalhada dos diferentes contextos educacionais presentes no país. Além disso, a escolha dos cursos considerou a disponibilidade de dados detalhados nas Fichas de Recomendação da Plataforma Sucupira da CAPES [CAPES, 2024a, 2024b], conforme a avaliação quadrienal 2013-2016. Essa seleção foi ainda ratificada e orientada por três especialistas na avaliação de cursos de pós-graduação, com expertise na área.

A escolha do quadriênio 2013-2016 para a análise deste estudo deve-se à disponibilidade e detalhamento dos dados nas Fichas de Recomendação da CAPES, os quais oferecem uma visão abrangente e consistente sobre o desempenho dos programas de pós-graduação em Ciência da Computação, com critérios validados, neste estudo, por três especialistas. As Fichas de Recomendação deste período são mais completas, facilitando a heterogeneidade dos critérios e ampliando a análise. Apesar do tempo decorrido, a qualidade dos dados disponíveis foi crucial para a aplicação precisa do método CROWM, garantindo a validade e relevância dos resultados obtidos.

As instituições envolvidas foram: Instituto Militar de Engenharia (IME), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Universidade de São Paulo (USP), Instituto Federal do Ceará (IFCE), Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC RS) e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC RJ).

Destaca-se que as informações analisadas são de domínio público e o intuito é demonstrar a viabilidade e a validade da metodologia de avaliação de cursos usada neste artigo, servindo de base para instituições de ensino superior. Não há intenção de expor ou criticar nenhuma instituição específica. O foco é apenas demonstrar a viabilidade de uma nova metodologia que pode servir de base para uma avaliação complementar à que já é utilizada atualmente.

4.3. Definição dos critérios

Os critérios de desempenho utilizados para a avaliação dos cursos foram selecionados por sua relevância e abrangência na medição da qualidade e eficácia dos programas de pós-

graduação, sendo ratificados por três especialistas na avaliação de cursos de pós-graduação, com expertise na área.

Os critérios foram retirados diretamente dos sites da CAPES na Plataforma Sucupira, sendo analisadas as informações atinentes à avaliação quadrienal 2013-2016 [CAPES, 2024a, 2024b] e de acordo com o proposto por Ribeiro et al. [2020], sendo as pontuações estabelecidas segundo os conceitos Fraco, Regular, Bom e Muito Bom das Fichas de Recomendação, recebendo 40, 60, 80 e 90 pontos respectivamente. Exceto o critério Quantidade de Produções, o qual foi retirado da página de Produções [CAPES, 2024b], os demais critérios foram denominados pelo número constante em sua Ficha de Recomendação, para manter a transparência da avaliação, conforme visto a seguir [CAPES, 2024a, 2024b]:

- **Planejamento (PLA) - 1.2:** planejamento do programa com vistas a seu desenvolvimento futuro, contemplando os desafios internacionais da área na produção do conhecimento, seus propósitos na melhor formação de seus alunos, suas metas quanto à inserção social mais rica dos seus egressos, conforme os parâmetros da área;

- **Infraestrutura (INF) - 1.3:** infraestrutura para ensino, pesquisa e, se for o caso, extensão;

- **Qualidade do Corpo Docente (QCD) – 2.1:** perfil do corpo docente, consideradas titulação, diversificação na origem de formação, aprimoramento e experiência, e sua compatibilidade e adequação à Proposta do Programa;

- **Qualidade das dissertações (QLD) – 3.3:** qualidade das Teses e Dissertações e da produção de discentes autores da pós-graduação e da graduação (no caso de IES com curso de graduação na área) na produção científica do programa, aferida por publicações e outros indicadores pertinentes à área;

- **Eficiência (EFC) – 3.4:** eficiência do Programa na formação de mestres e doutores bolsistas: Tempo de formação de mestres e doutores e percentual de bolsistas titulados; e

- **Quantidade de Produções (PRD):** quantidade de produções do programa referentes ao quadriênio 2013-2016 [CAPES, 2024b].

4.4. Matriz de Decisão

Após essa apresentação inicial, tem-se a Matriz de Decisão (Dataset dos cursos) apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 – Dataset analisado.

Cursos		Critérios de desempenho					
		PLA	INF	QCD	EFC	QLD	PRD
Curso A	Sistemas e Computação (31007015009P3) - IME	80	80	80	80	60	204
Curso B	Computação (31003010046P4) - UFF	90	90	90	90	90	959
Curso C	Ciência da Computação (25001019004P6) - UFPE	90	90	90	90	90	1585
Curso D	Sistemas e Computação (31001017004P3) - UFRJ	90	90	90	90	90	976
Curso E	Sistemas e Computação (23001011022P9) - UFRN	90	90	90	80	90	964
Curso F	Ciência da Computação (33009015079P0) - UNIFESP	80	80	90	80	80	436
Curso G	Ciência da Computação (33002010176P0) - USP	90	90	90	80	90	839
Curso H	Ciência da Computação (22008012004P2) - IFCE	80	60	60	80	60	253
Curso I	Ciência da Computação (28001010095P3) - UFBA	90	90	90	80	80	808
Curso J	Ciência da Computação (33001014044P0) - UFSCAR	80	80	60	60	60	236
Curso K	Ciência da Computação (26001012035P1) - UFAL	80	60	80	60	80	420
Curso L	Informática aplicada (22002014002P1) - UNIFOR	80	90	90	60	80	471
Curso M	Informática (12001015012P2) - UFAM	90	90	90	90	90	653

Curso N	Informática (40001016034P5) - UFPR	90	90	90	90	90	487
Curso O	Ciências da Computação (41001010025P2) - UFSC	90	90	80	90	80	818
Curso P	Ciência da Computação (42005019016P8) - PUC RS	90	90	90	90	90	996
Curso Q	Informática (31005012004P9) - PUC RJ	90	90	90	90	90	912

Fonte: [CAPES, 2024a, 2024b].

5. Resultados obtidos

Destaca-se que os resultados foram gerados pela plataforma computacional do CROWM, a qual está disponível no link <https://crowm.ime.eb.br/>. Antes de apresentar os resultados, os dados da Tabela 1 foram submetidos ao Teste de Bartlett [BARTLETT, 1954] com um nível de significância de 5%, resultando em um p-valor de $9,03 \times 10^{-9}$ (menor que o nível de significância), indicando que a PCA pode ser utilizada na análise [FÁVERO; BELFIORE, 2017].

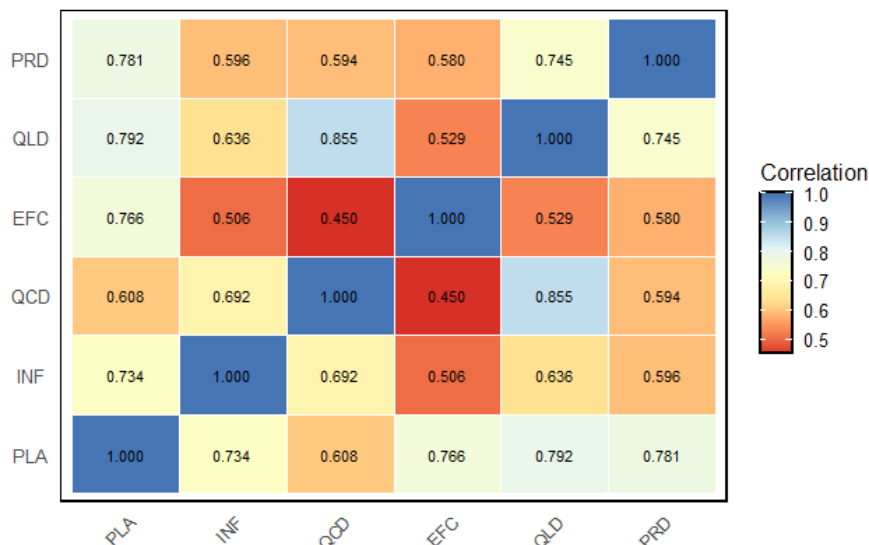
A Tabela 2 apresenta os parâmetros da PCA, destacando os autovalores, a variância explicada por cada PC e a variância acumulada. Os autovalores foram calculados a partir da matriz de covariância dos dados do dataset indicado na Tabela 1 e representam a magnitude da variância capturada por cada componente, com o PC1 possuindo um autovalor de 4,3, indicando que captura a maior parte da variância dos dados. A variância indica a quantidade de variação dos dados que cada PC é capaz de explicar, com o PC1 agregando 72% e o PC2 11,5%. A variância explicada pelos outros componentes é significativamente menor. A variância acumulada indica a proporção cumulativa da variância total explicada à medida que novos PCs são adicionados. O PC1 e o PC2 juntos explicam 83% da variância total. Embora o método CROWM usualmente utilize PCs com autovalores maiores que 1, neste caso, foram empregados os dois primeiros PCs para uma maior representatividade dos dados originais, conforme visto em Dugger et al. [2022], proporcionando uma análise mais robusta e representativa.

Tabela 2 – Autovalores e variâncias.

Parâmetros da PCA	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Autovalores	4,307	0,692	0,427	0,353	0,175	0,047
Variância	0,718	0,115	0,071	0,059	0,029	0,008
Variância Acumulada	72%	83%	90%	96%	99%	100%

Fonte: autores.

Figura 3 – Mapa de Calor entre os critérios de desempenho.



Fonte: autores.

A Figura 3 apresenta o Mapa de Calor contendo as correlações dos critérios de desempenho dos cursos, apontando para correlações altas entre todos os critérios, com valores variando de 0,450 a 0,855. Isso indica que os diferentes aspectos avaliados dos cursos de computação tendem a variar de forma conjunta, sugerindo uma interdependência entre os critérios de desempenho. Em outras palavras, melhorias em um critério específico, como a Qualidade do Corpo Docente (QCD), tendem a estar associadas a melhoria em outros critérios, como a Qualidade das Dissertações (QLD) e a Infraestrutura (INF).

5.1. Pesos dos critérios

Os pesos dos critérios de desempenho calculados pelo CROWM demonstram que o critério PRD é o mais importante com um peso de 0,31 indicando que a quantidade e qualidade das publicações científicas e outras produções acadêmicas são os fatores mais influentes na avaliação dos cursos pelo CROWM. Este critério é seguido por QCD com um peso de 0,152 e QLD com um peso de 0,1474, ambos refletindo a importância da qualificação dos professores e a relevância das dissertações defendidas pelos alunos. INF tem um peso de 0,1473 destacando a importância da infraestrutura disponível para o curso. Já EFC e PLA conquistaram pesos de 0,137 e 0,104, respectivamente, mostrando que, embora importantes, têm uma influência relativamente menor comparada aos outros critérios.

5.2. Ordenação das alternativas e validação dos resultados

A Tabela 3 apresenta os cursos, suas pontuações, seu ranqueamento e a escala CAPES de cada um deles.

Tabela 3 – Ranking do CROWM e Escala CAPES.

Cursos	C	P	D	B	Q	M	E	N	O
Ranking	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
Pontuação	0,85	0,60	0,59	0,59	0,57	0,46	0,40	0,38	0,35
CAPES	7	6	7	6	7	5	5	5	5

Cursos	G	I	F	L	A	K	H	J
Ranking	10º	11º	12º	13º	14º	15º	16º	17º
Pontuação	0,35	0,24	-0,42	-0,66	-0,79	-1,09	-1,14	-1,29
CAPES	6	4	4	4	3	3	3	3

Fonte: Autores e [CAPES, 2024a].

Para validar o ranqueamento gerado, foi calculada a correlação de Pearson entre as pontuações dos cursos e suas respectivas Escalas CAPES, conforme explica [FÁVERO; BELFIORE, 2017]. Como resultado, obteve-se um valor de 0,9 com p-valor de $1,07 \times 10^{-6}$. Um valor de 0,9 indica uma correlação muito forte [FÁVERO; BELFIORE, 2017] entre as pontuações dos cursos e as escalas CAPES, sugerindo que o ranqueamento gerado é consistente com a avaliação oficial; além disso, o p-valor é menor que o nível de significância de 5%, indicando que a correlação é estatisticamente significativa.

Ao comparar os resultados obtidos pelo método CROWM com a escala CAPES, observa-se que o CROWM oferece uma análise mais detalhada e quantitativa das pontuações dos cursos, o que complementa o trabalho já realizado pela CAPES. Enquanto a CAPES fornece uma avaliação qualitativa dos programas, destacando pontos fracos e sugerindo melhorias, o CROWM quantifica essas avaliações, permitindo a atribuição de pontuações precisas para cada curso com base em múltiplos critérios avaliados pela PCA. Esse processo de quantificação auxilia gestores e formuladores de políticas na tomada de decisões mais informadas, ao identificar não apenas o

desempenho geral dos cursos, mas também ao ordenar os programas de acordo com suas pontuações relativas, destacando aqueles que se sobressaem e aqueles que necessitam de atenção. Adicionalmente, o CROWM proporciona uma visão clara de como os cursos se comparam entre si dentro da mesma escala CAPES, facilitando a priorização de recursos e esforços para a melhoria contínua dos programas educacionais.

6. Conclusão

Cumprindo seu objetivo, esta pesquisa apresentou uma metodologia para avaliar cursos de pós-graduação utilizando o método CROWM, que simplifica a análise ao incorporar vários critérios de desempenho em uma estrutura coesa, mantendo as características essenciais dos dados. Este estudo contribui para a área da educação ao fornecer uma abordagem quantitativa para avaliar esses cursos, complementando a avaliação vigente, o que é corroborado pela alta correlação de Pearson de 0,9 entre o ranking gerado e a Escala CAPES dos cursos.

O curso C, Ciência da Computação da UFPE, destacou-se como o mais bem ranqueado, recebendo as maiores pontuações em todos os critérios avaliados. O valor da Escala CAPES 7 demonstra a efetividade da metodologia apresentada em identificar programas de alta qualidade, trazendo benefícios significativos para a sociedade ao assegurar a formação de profissionais qualificados e para as instituições de ensino ao fornecer uma ferramenta robusta para avaliação e aprimoramento contínuo de seus programas de pós-graduação.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do método CROWM em outros contextos educacionais, como cursos de graduação e programas técnicos, além de explorar a integração de outras técnicas de AM e AMD. Estudos adicionais poderiam também investigar a inclusão de novos critérios de avaliação, como a inserção dos egressos no mercado de trabalho e a inovação pedagógica, para fornecer uma análise ainda mais abrangente e detalhada dos cursos avaliados.

Referências

- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 4, p. 433–459, jul. 2010.
- BARTLETT, M. S. A note on the multiplying factors for various χ^2 approximations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, p. 296–298, 1954.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- CAPES. **Plataforma Sucupira**. Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/avaliacao/consultaFichaAvaliacao.xhtml>>. Acesso em: 8 maio. 2024a.
- CAPES. **Produções**. Disponível em: <<https://sucupira-v2.capes.gov.br/sucupira4/painel/ReportSectioned0fb7d6c51d5a51c13c>>. Acesso em: 8 maio. 2024b.
- CHAIRUNGRUANG, S.; PIRIYASURAWONG, P.; NILSOOK, P. **Multi Criteria Decision Making for Ranking Digital Vocational Education**. 4th Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics: Innovation for Better Life, RI2C 2023. **Anais...2023**.
- CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1981.
- CHECKLAND, P. B.; HAYNES, M. G. Varieties of systems thinking: the case of soft systems methodology. In: **Management Control Theory**. [s.l.] Routledge, 2019. p. 151–160.
- CHEN, X.; JIN, X.; LIN, G. **Research on College Students' Academic Early Warning System Based on PCA-SVM**. [s.l.: s.n.]. v. 1075

- CHOPRA, N.; SINDWANI, R.; GOEL, M. A hybrid approach based on fuzzy TOPSIS-AHP for ranking and classifying MOOC key acceptance factors. **International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies**, v. 16, n. 5, p. 1–20, 2021.
- COSTA, A. P. DE A. et al. Optimization of Obstructive Sleep Apnea Management: Novel Decision Support via Unsupervised Machine Learning. **Informatics**, v. 11, n. 2, 2024.
- COSTA, I. P. DE A. et al. Strategic Study for Managing the Portfolio of IT Courses Offered by a Corporate Training Company: An Approach in the Light of the ELECTRE-MOr Multicriteria Hybrid Method. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, v. 21, n. 1, p. 351–379, 2022.
- CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. [s.l.] Sage publications, 2017.
- DE CASTRO-PARDO, M. et al. Combining AHP and goal programming in the context of the assessment of e-learning. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 11, n. 3, p. 301–312, 2019.
- DUGGER, Z. et al. Principal Component Analysis in MCDM: An exercise in pilot selection. **Expert Systems with Applications**, v. 188, 2022.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. [s.l.] Elsevier Brasil, 2017.
- GRECO, S.; FIGUEIRA, J.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis**. [s.l.] Springer, 2016. v. 37
- KESHAVARZ-GHORABAE, M. et al. Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). **Symmetry**, v. 13, n. 4, p. 525, 2021.
- KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1–26, 2004.
- KRISHNAN, A. R.; HAMID, R.; KASIM, M. M. **An Unsupervised Technique to Estimate λ^0 -Fuzzy Measure Values and Its Application to Multi-criteria Decision Making**. 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2020. **Anais...2020**.
- LEE, J. et al. A hybrid approach of goal programming for weapon systems selection. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, n. 3, p. 521–527, 2010.
- LIU, P. et al. Double hierarchy hesitant fuzzy linguistic entropy-based TODIM approach using evidential theory. **Information Sciences**, v. 547, p. 223–243, 2021.
- MARQUES, C. A.; VEIGA, A. D. C.; BORGES, L. M. C. The graduate assessment in Brazil: Results and determinants of Capes evaluation (2013 -2016) | A avaliação da pós-graduação no Brasil: Resultados e determinantes da avaliação da Capes (2013-2016). **Meta: Avaliacao**, v. 12, n. 37, 2021.
- MELLEM, P. M. N. et al. **Prospective scenarios applied in course portfolio management: An approach in light of the Momentum and ELECTRE-MOr methods**. Procedia Computer Science. **Anais...2021**.
- MOHAMMED, M. T. et al. Intelligent Approach for School Teacher Recruitment: Distributing IT Subjects Based on Multiple Attributes. **Applications of Modelling and Simulation**, v. 7, p. 100–110, 2023.
- NILASHI, M. et al. Knowledge discovery for course choice decision in Massive Open Online Courses using machine learning approaches. **Expert Systems with Applications**, v. 199, 2022.

RIBEIRO, R. et al. **Análise do sistema CAPES de avaliação da pós-graduação no Brasil: 2010-2020**. Disponível em: <https://www.adusp.org.br/files/universidade/rel_pesq.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2024.

RIOFRIO-CALDERON, G.; RAMIREZ-MONTOYA, M.-S. **Study of the academic behavior of participants in a MOOC course on Energy Sustainability using Principal Component Analysis (PCA)**. Proceedings - JICV 2022: 12th International Conference on Virtual Campus. **Anais...**2022.

RUSCIO, J.; ROCHE, B. Determining the number of factors to retain in an exploratory factor analysis using comparison data of known factorial structure. **Psychological assessment**, v. 24, n. 2, p. 282, 2012.

SLIDEMODEL. **CATWOE Analysis Slide Template**. Disponível em: <<https://slidemodel.com/free-powerpoint-templates/free-catwoe-analysis-slide-template-for-powerpoint/>>. Acesso em: 6 mar. 2024.

TAO, M.; WANG, X. An Integrated MCDM Model for Sustainable Course Planning: An Empirical Case Study in Accounting Education. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 6, 2023.

TAVARES, R. S. et al. Interdisciplinary graduate programs: application of the MACBETH multicriteria method for assessing their performances. **Annals of Operations Research**, v. 316, n. 2, p. 1383–1399, 2022.