

TRIAGEM DE FATORES CRÍTICOS DO DESEMPENHO EM REDES 5G POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS - DoE. ODS 9

ODS 9 — Indústria, inovação e infraestrutura:
“Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.”

João Guilherme de Castro Monteiro (UNESP Guaratinguetá); Ana Maria Soares dos Santos Monteiro (UNESP Guaratinguetá); Carlos Augusto Marcondes dos Santos (UNESP Guaratinguetá)

Introdução

Em áreas urbanas densas, o desempenho do 5G, espinha dorsal da transformação digital, depende de múltiplos fatores de rede e propagação, em que métricas como latência, *jitter*, *packet loss*, RSRP/RSRQ e velocidades de *download/upload* orientam sua avaliação. Dado o caráter multivariado, são adotados métodos experimentais que estimam efeitos e interações com rigor. A análise em Scopus confirma a subutilização do Planejamento de Experimentos (DoE): 2000–2025 registra $\approx 2,55\%$ /ano ($\approx 3,26\%$ nos últimos cinco anos) e apenas $\approx 1,0\%$ citam clássicos, lacuna teórico-metodológica (dados bibliométricos do presente estudo, Scopus 2000–2025). Objetiva-se planejar e conduzir o DoE para triagem e quantificação, aplicar RSM quando pertinente e alimentar modelos preditivos (regressões/ML) e recomendações de implantação, reduzindo a lacuna com maior rigor estatístico (dados bibliométricos do presente estudo, Scopus 2000–2025).

Revisão da literatura

O DoE estima efeitos e interações com menos testes via fatoriais (completos/fracionários), triagem (Plackett–Burman/Taguchi) e RSM, superando OFAT (Montgomery, 2020; Myers; Montgomery; Anderson-Cook, 2016; Box; Hunter; Hunter, 2005). Já os critérios D/A/I-ótimos refinam a seleção sob restrições (Duarte, 2023). Em redes móveis predominam *drive tests* e análises estatísticas/ML sem DOE,

configurando lacuna confirmada por nossa bibliometria 2000–2025 (participação muito baixa, menor em telecomunicações) (Dados bibliométricos do presente estudo, 2000–2025; Zreikat; Mathew, 2024; Zmysłowski; Kelner, 2024; Tsoulos *et al.*, 2024). No 5G urbano, morfologia, distância, banda/largura, densidade/interferência, NSA/SA, mobilidade e carga modulam RSRP/RSRQ/SINR, vazão e latência; a *C-band* revela heterogeneidade e efeitos de configuração dinâmica (Fezeu *et al.*, 2024; Kousias *et al.*, 2024). Assim, DOE+ANOVA/RSM, integrado a ML, quantifica interações e gera dados balanceados que fortalecem modelos e recomendações (Montgomery, 2020; Myers; Montgomery; Anderson-Cook, 2016; Fezeu *et al.*, 2024; Kousias *et al.*, 2024).

Método

Estudo aplicado e quantitativo em duas frentes. Na bibliometria (Scopus, 2000–2025; 5G urbano 2023–2025), usa-se *Analyze* → *Year*, ordenação por *Cited by (highest)* e exclusão de “Department of Energy”; calcula-se DOE% anual (DOE/Baseline) e CB-DOE% marcando clássicos do DoE, Montgomery; Box-Hunter-Hunter; Response Surface Methodology (RSM); Taguchi; Central Composite Design (CCD); Plackett-Burman. A triagem 5G (2023+) foca RSRP, RSRQ, SINR, latência, jitter, *packet loss* e *download/upload throughput* em cenários urbanos (morfologia, densidade de sites, NSA×SA, mobilidade, carga). Na frente experimental, realiza-se *screening* com fatorial fracionado (res. IV ou Plackett-Burman) com pontos centrais, seguido de RSM (CCD ou Box-Behnken) nos fatores priorizados. Fatores: morfologia, hora/carga, mobilidade, distância, largura de banda, razão UL/DL, potência/Tx e carga artificial; respostas: latência, jitter, perdas, RSRP/RSRQ/SINR e *throughput*. Coleta: UE/modem 5G, *drive-test*, iPerf3, GPS/GNSS, ≥1 Hz, randomização, bloqueio por rota e metadados ambientais. Análise: ANOVA (interações), curvatura e *lack-of-fit*; modelos RSM; apoio preditivo com regressões regularizadas (Ridge/LASSO/Elastic Net) e *ensembles* (Random Forest, XGBoost) com validação cruzada. Qualidade/transparência: protocolo pré-registrado; scripts versionados (Python 3.x: pandas, numpy, matplotlib, statsmodels, scikit-learn), calibração/replicação.

Para a condução do trabalho foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial e não-IA. Entre as primeiras, destaca-se o uso do ChatGPT (*OpenAI*, versão

GPT-5), empregado na formulação de hipóteses, na estruturação do delineamento de experimentos (DoE), na elaboração de trechos textuais padronizados (*boilerplate*) e na revisão preliminar do manuscrito. A validação dos conteúdos gerados pela ferramenta foi realizada por meio de verificação local, com análise crítica e ajustes realizados pelos autores. Como ferramentas não-IA, empregaram-se o Google Colab/Python, voltado à execução de rotinas de processamento e análise, e o VOSviewer, utilizado para análises bibliométricas de coocorrência e co-citação, com thesaurus documentado, assegurando transparência e reprodutibilidade dos resultados.

Resultados Esperados

A análise bibliométrica mostra que o uso de delineamento de experimentos (DoE) em telecomunicações ainda é reduzido, representando cerca de 2,55% ao ano entre 2000 e 2025 e 3,26% nos últimos cinco anos, com citações clássicas abaixo de 1%. Essa lacuna justifica a proposta, que na Fase 1 aplicará delineamentos fatoriais fracionados e de Plackett–Burman para identificar efeitos e interações entre variáveis de desempenho de rede, como latência, *jitter*, perda de pacotes, RSRP/RSRQ e vazões, em diferentes condições de carga, mobilidade e largura de banda. Na Fase 2, delineamentos de superfície de resposta (CCD e Box–Behnken) buscarão condições ótimas em cenários variados, com expectativa de redução significativa de latência e *jitter*. Modelos preditivos baseados em regressões regularizadas e ensembles devem melhorar a acurácia e gerar interpretações consistentes, resultando em diretrizes práticas para redes 5G, consolidação dos indicadores bibliométricos e um fluxo de processamento reprodutível integrando DoE e *machine learning*.

Considerações finais

O estudo evidencia a subutilização do Planejamento de Experimentos (DoE) em telecomunicações e propõe sua aplicação como eixo metodológico para identificar fatores e interações determinantes da qualidade do 5G urbano. Ao combinar delineamentos fatoriais e de superfícies de resposta com modelos de machine learning, busca-se construir um quadro de evidências reprodutível e interpretável,

capaz de orientar decisões práticas de implantação e operação das redes. Espera-se, assim, reduzir lacunas na literatura, oferecer diretrizes robustas para diferentes cenários e reforçar a relevância do DoE como ferramenta estratégica para aprimorar desempenho, confiabilidade e eficiência em sistemas 5G.

Referências

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2005.

DUARTE, B. P. M. Exact Optimal Designs of Experiments for Factorial Models via Mixed-Integer Semidefinite Programming. *Mathematics*, v. 11, n. 4, art. 854, 2023. DOI: 10.3390/math11040854.

FEZEU, R. A. K. *et al.* Unveiling the 5G Mid-Band Landscape: From Network Deployment to Performance and Application QoE. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM 2024 Conference**, Sydney, 2024.

KOUSIAS, K. *et al.* Empirical performance analysis and ML-based modeling of 5G non-standalone networks. *Computer Networks*, v. 241, art. 110207, 2024.

MERTES, N. *et al.* **Experimental evaluation of a 5G standalone network using factorial design**. 2024.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

PARASHARE, A. **AI-augmented Design of Experiments: bridging classical DOE and data-driven methods**. 2024.

TSOULOS, G. *et al.* Empirical Insights into 5G Deployments in Highway Operational Environments and Comparative Performance with 4G. *Electronics*, v. 13, n. 8, art. 1533, 2024.

ZMYŚŁOWSKI, D.; KELNER, J. M. Mobile Network Operators' Assessment Based on Drive-Test Campaign in Urban Area for iPerf Scenario. *Applied Sciences*, v. 14, n. 3, art. 1268, 2024.

ZREIKAT, A. I.; MATHEW, S. **Performance Evaluation and Analysis of Urban-Suburban 5G Cellular Networks**. *Computers*, v. 13, n. 4, art. 108, 2024.