FQM Paper 2 — Stage 6

Relatório de otimização multiobjetivo, robustez e validação independente

20 de novembro de 2026 · pacote v2.2 · resultados computacionais, sem validação experimental

1. Objetivo e escopo

A Etapa 6 amplia a busca aleatória da Etapa 5 para uma busca evolucionária e uma avaliação de robustez, mantendo o circuito LC de 21 células, a composição de 13 capacitores A e 8 B, portas de 50 Ω e o modelo de perdas previamente definido. O objetivo não é provar que a sequência encontrada seja globalmente ótima, mas identificar candidatos que superem controles específicos sob métricas de potência que separam reflexão de dissipação.

2. Modelo e critérios

L de extremidade = 5,1 µH; L interno = 10 µH; CA = 5,6 nF; CB = 2,4 nF; QL = 60; QC = 200; Cp/C = 2%; referência de Q = 1 MHz. A banda de projeto é 300 kHz–1,8 MHz. Stopband reflexivo: S21 < –10 dB e S11 > –3 dB. Stopband absorptivo: S21 < –10 dB e fração dissipada > 0,5, com Pdiss = 1 – |S11|² – |S21|². A função escalar de seleção é freflexivo – 0,25 fabsorptivo – 0,10 penalidade de perda média na região abaixo de 300 kHz.

3. Busca e reprodutibilidade

População 72; 30 gerações; semente 20261124; 1508 sequências únicas avaliadas; 37 soluções no conjunto Pareto nominal. A lista de candidatos foi submetida a 24 realizações por tolerância (±1%, ±5%, ±10%), com perturbações uniformes independentes de 22 indutores e 21 capacitores. Os fatores exatos usados estão preservados em stage6_tolerance_draws.csv e os resultados por realização em stage6_tolerance_trials.csv.

Sequência	Nominal refl.	Nominal abs.	±5% refl.	±5% abs.	±10% refl.
Novo candidato	69.43%	1.13%	68.58%	1.16%	65.30%
Fibonacci	56.98%	9.43%	56.57%	10.83%	56.34%
Vencedor Etapa 5	62.26%	2.26%	62.37%	2.25%	63.65%
Controle balanceado	55.09%	4.91%	55.31%	6.29%	56.01%
Alternado*	45.66%	12.83%	49.10%	8.74%	51.92%

* O controle alternado possui 11 A e 10 B; portanto, não é composição-matched com a busca 13 A / 8 B.

4. Resultado principal

A melhor sequência robusta encontrada foi AABABBABAAABBAABAABAA (13 A, 8 B). Ela alcançou 69,43% de stopband reflexivo nominal e média de 68,58% sob tolerância ±5%; Fibonacci apresentou 56,98% nominal e 56,57% em ±5%. O vencedor amostrado da Etapa 5 apresentou 62,26% nominal e 62,37% em ±5%. Para a nova sequência, a fração média de stopband absorptivo em ±5% foi 1,16%, contra 10,83% para Fibonacci e 2,25% para o vencedor anterior.

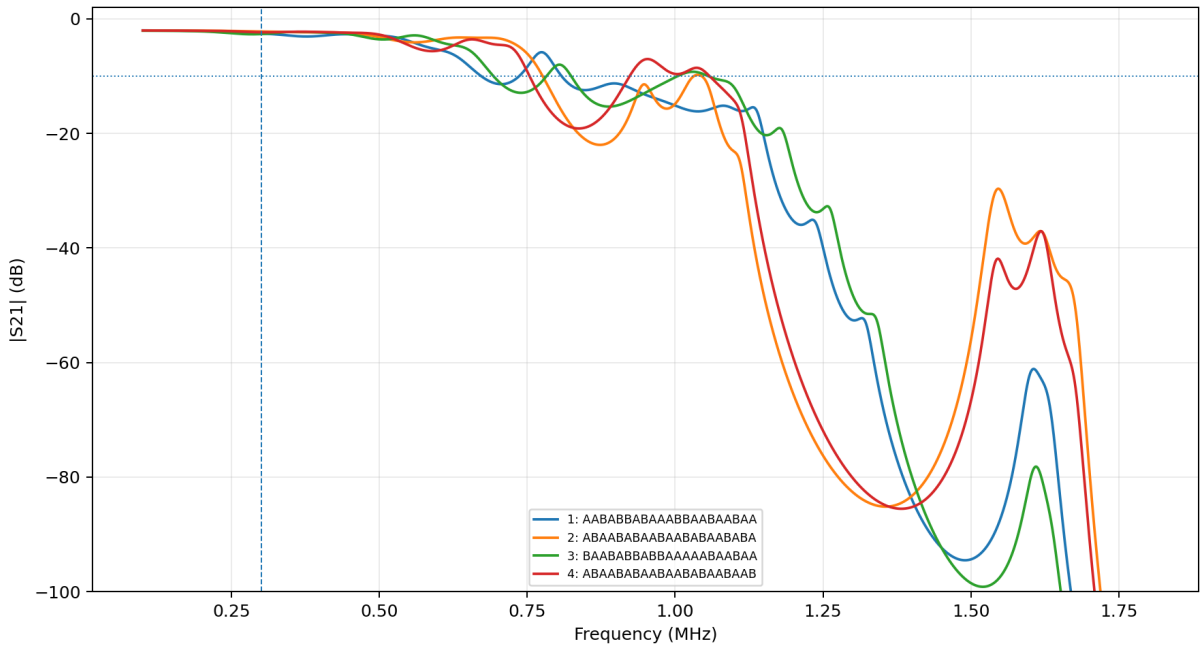


Figura 1. Espectros S21 dos quatro finalistas; a linha vertical marca 300 kHz e a horizontal −10 dB.

5. Validação cruzada ngspice 47

Deck	Pontos	Erro máximo (dB)	Erro médio (dB)
stage6_finalist_1	3401	4.934e-07	3.405e-08
stage6_finalist_2	3401	4.973e-07	2.671e-08
stage6_finalist_3	3401	4.999e-07	3.704e-08
stage6_finalist_4	3401	4.970e-07	2.639e-08

Os quatro decks executaram 3401 pontos cada. O erro máximo entre ABCD independente e ngspice foi inferior a 5,0×10■■ dB. Isso valida consistência numérica entre duas implementações do mesmo modelo lumped; não equivale a validação física.

6. Limitações e critérios de refutação

A busca é heurística, finita e dependente da função objetivo; não prova ótimo global nem universalidade. Os intervalos de tolerância são hipóteses uniformes, não distribuições medidas. O modelo não inclui modelos reais de fabricante, dependência de MLCC com polarização DC/AC, temperatura, envelhecimento, auto-ressonância, extração EM de PCB ou medições VNA. A hipótese será refutada para o hardware testado se, após caracterização dos componentes e calibração idêntica, a sequência otimizada não superar a Fibonacci em fração de stopband reflexivo dentro da incerteza de medição.

7. Arquivos para reprodução

O script scripts/stage6_multiobjective_search.py gera a história evolutiva, o conjunto Pareto, a shortlist robusta, os fatores de tolerância, os resultados por trial, os espectros e os decks SPICE. O script spice/run_stage6_ngspice.sh executa os quatro netlists. Consulte README.md, requirements.txt, KNOWN_GAPS.md e checksums/SHA256SUMS. Os dados históricos das Etapas 1–5 estão arquivados, mas parte dos scripts-fonte originais não estava disponível no conjunto herdado; por isso, a reprodução integral das Etapas 1–5 não é reivindicada nesta versão.