FQM Paper 2 — Robustez e busca de sequências

Etapa 5 • LC Fibonacci • ngspice 47 + MNA independente

Esta etapa separa atenuação por reflexão de atenuação por dissipação. Essa distinção é essencial: S21 baixo, isoladamente, não demonstra a existência de uma stopband reflexiva útil.

1. Modelo e critérios

Escada de 21 capacitores e 22 indutores; L de extremidade = 5,1 µH; L interno = 10 µH; C_A = 5,6 nF; C_B = 2,4 nF; fonte/carga de 50 Ω. Modelo de perdas: QL=60, QC=200, Cp/C=2%, Q referenciado a 1 MHz. Faixa avaliada: 100 kHz–1,8 MHz; faixa de projeto para ranking: 300 kHz–1,8 MHz.

Stopband reflexiva: S21 < –10 dB e S11 > –3 dB. Stopband absorptiva: S21 < –10 dB e fração de potência dissipada > 0,5. Fração dissipada = 1 – |S11|² – |S21|², para portas casadas em 50 Ω.

2. Monte Carlo — resultado principal

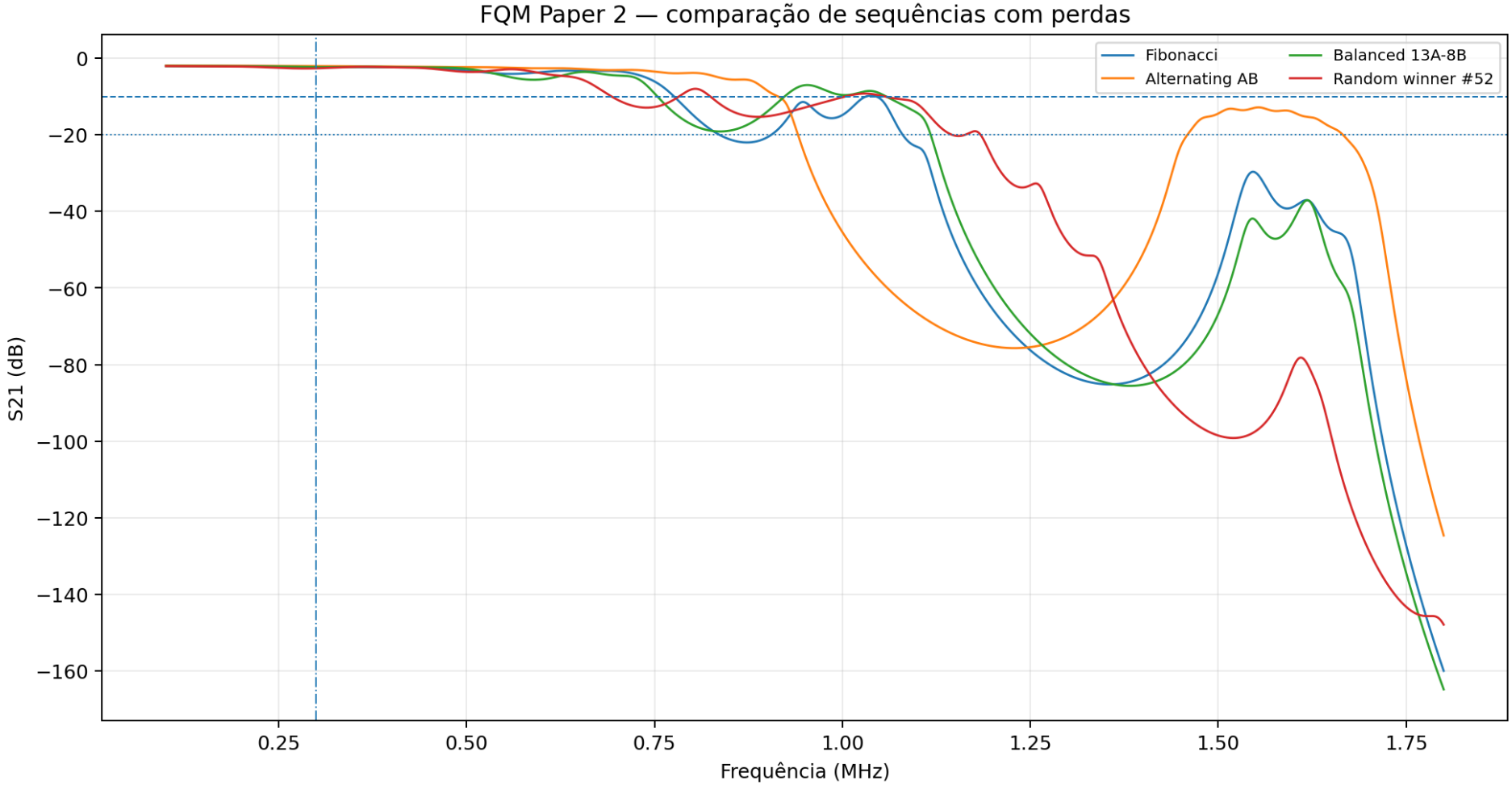
Tolerância	Sequência	Reflexiva média	P05–P95	Absorptiva média	S21 < –10 dB
±1%	Fibonacci	57.09%	56.60–57.38%	9.94%	67.65%
±1%	Balanced 13A-8B	55.05%	54.70–55.47%	4.94%	60.96%
±1%	Random search winner #52	62.13%	61.49–63.02%	2.64%	67.77%
±1%	Alternating AB	45.44%	44.15–47.19%	12.12%	59.18%
±5%	Fibonacci	56.18%	54.34–57.75%	11.05%	67.84%
±5%	Balanced 13A-8B	55.38%	53.17–57.36%	5.94%	62.43%
±5%	Random search winner #52	62.02%	59.25–64.55%	2.32%	67.77%
±5%	Alternating AB	48.73%	44.87–52.83%	9.16%	59.52%
±10%	Fibonacci	56.26%	52.45–59.25%	10.95%	67.86%
±10%	Balanced 13A-8B	56.16%	53.17–59.62%	7.31%	64.31%
±10%	Random search winner #52	62.30%	56.58–67.17%	3.14%	68.47%
±10%	Alternating AB	50.73%	46.02–55.13%	8.12%	59.66%

Com tolerância ±5%, a sequência #52 alcançou 62,02% de stopband reflexiva média (P05–P95: 59,25–64,55%), contra 56,18% para Fibonacci (54,34–57,75%) e 55,38% para o controle balanceado com a mesma composição 13A/8B. A stopband absorptiva média da sequência #52 foi 2,32%, contra 11,05% para Fibonacci. Diferença #52 – Fibonacci: +5,04 p.p. em ±1%, +6,84 p.p. em ±5% e +6,04 p.p. em ±10%.

3. Busca de sequência

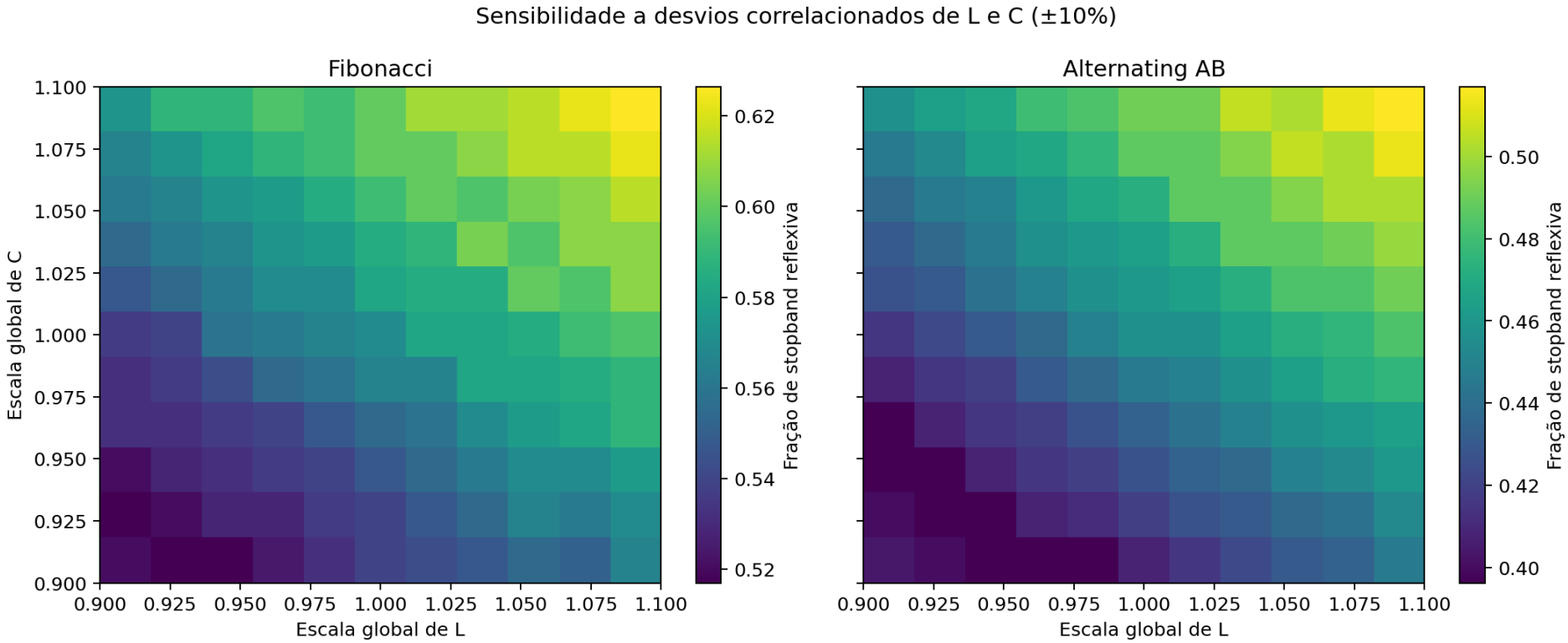
Foram avaliadas 250 permutações aleatórias com composição fixa de 13 A e 8 B. A função de ranking foi fração reflexiva – 0,25 × fração absorptiva. A melhor amostra foi a candidata #52: BAABABBABBAAAAABAABAA. Trata-se do melhor resultado dentro da amostra de 250 sequências, não de uma prova de ótimo global.

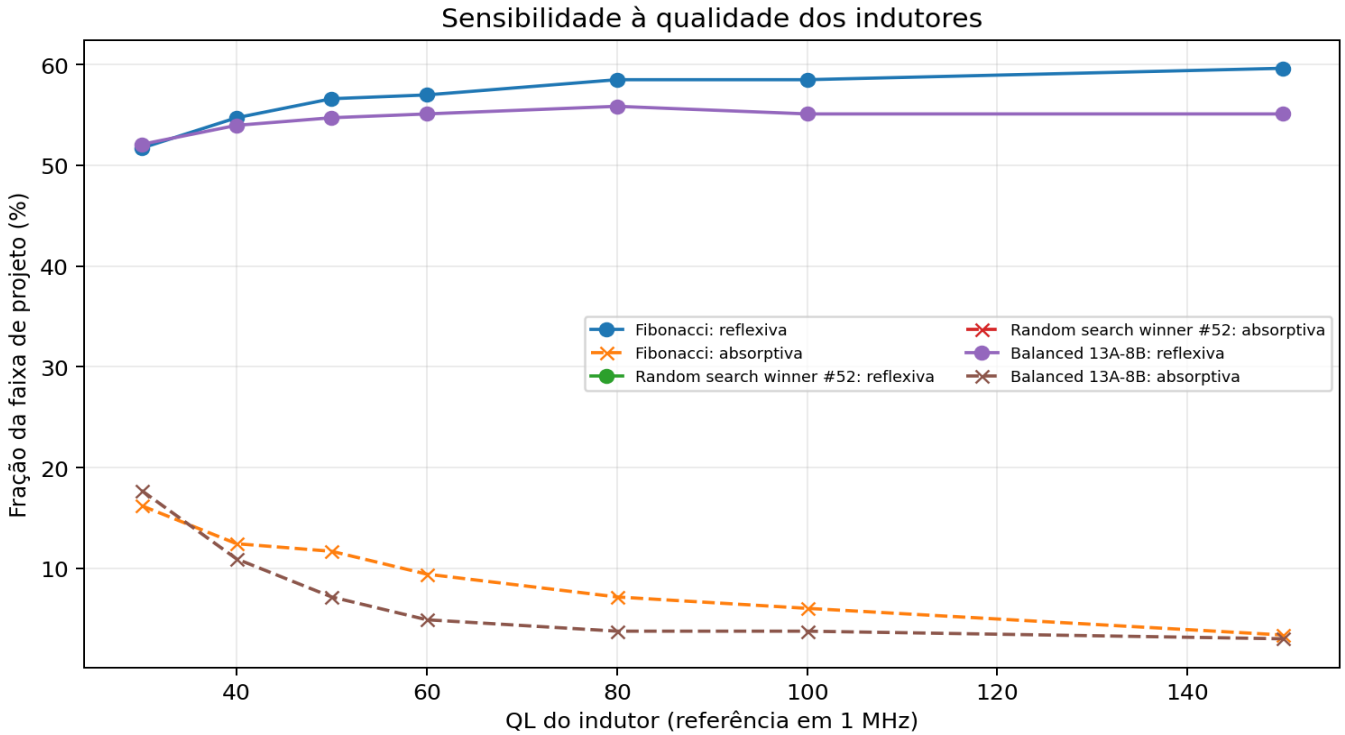
4. Curvas e robustez




Robustez Monte Carlo — tolerâncias independentes ±5% (100 realizações)
Fração de banda com S21 < -10 dB e S11 > -3 dB
0.65
0.60
0.55
0.50
0.45
Alternating AB
Balanced 13A-8B
Fibonacci
Random search winner #52

5. Sensibilidade de parâmetros





A sensibilidade de Q confirma que uma redução de Q pode elevar S21 abaixo do limiar simplesmente por dissipação. Por isso a otimização foi reclassificada por S11 e balanço de potência, e não por S21 isoladamente.

6. Verificação ngspice × MNA

Circuito	Pontos AC	Erro máximo |△S21| (dB)	Erro médio (dB)	Exit code
Fibonacci extension	3401	4.973e-07	2.671e-08	0
Random winner #52 extension	3401	4.999e-07	3.704e-08	0

A candidata #52 e a sequência Fibonacci foram executadas no ngspice 47 em 3.401 frequências, de 100 kHz a 1,8 MHz. O maior erro absoluto entre S21 do ngspice e do solver MNA independente foi inferior a 5,0 × 10■■ dB em ambos os casos.

7. Interpretação e limitações

Resultado: neste modelo, a busca aleatória identificou uma sequência que supera Fibonacci no critério reflexivo definido e mantém a vantagem sob as tolerâncias hipotéticas testadas. Isso não invalida a estrutura Fibonacci; mostra que ela não é automaticamente ótima para este objetivo. O controle balanceado 13A/8B também fica próximo de Fibonacci.

As tolerâncias são distribuições uniformes hipotéticas de ±1%, ±5% e ±10%, não distribuições medidas de lotes. MLCCs reais podem variar com polarização DC/AC, temperatura e envelhecimento; portanto, a etapa seguinte precisa usar números de peça e curvas de fabricante. Ainda não há extração EM de PCB, SRF real, medições de S-parâmetros ou protótipo físico. A simulação não valida alegações universais sobre FQM.

Conclusão operacional: avançar com a candidata #52 como nova hipótese de projeto, mantendo Fibonacci e o controle balanceado como referências. Próxima validação: otimização local/genética sob tolerâncias e dados de componentes comerciais, seguida de protótipo e medição VNA.