

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
ANTONIO PAULO DE MORAES LEME

**UM ESTUDO SOBRE OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA E EXTRAÇÃO DE
CONHECIMENTO DE FRONTEIRAS DE PARETO APLICADO A UM
AMPLIFICADOR OPERACIONAL DE TRANSCONDUTÂNCIA**

São Bernardo do Campo
2012

ANTONIO PAULO DE MORAES LEME

**UM ESTUDO SOBRE OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA E EXTRAÇÃO DE
CONHECIMENTO DE FRONTEIRAS DE PARETO APLICADO A UM
AMPLIFICADOR OPERACIONAL DE TRANSCONDUTÂNCIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica, orientada pelo
Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

Leme, Antonio Paulo de Moraes.

Um estudo sobre Otimização Evolucionária e Extração de Conhecimento de Fronteiras de Pareto aplicado a um Amplificador Operacional de Transcondutância / Antonio Paulo de Moraes Leme. São Bernardo do Campo, 2012.

112 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

1. Eletrônica Evolucionária. 2. Múltiplos Objetivos. 3. Amplificador Operacional de Transcondutância. I. Thomaz, Carlos Eduardo, orient. II. Título.

CDU 621.381



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

Programa de Mestrado de Engenharia Elétrica

Aluno: Antonio Paulo de Moraes Leme

Matrícula: 1091065

Título do Trabalho: **Um estudo sobre otimização evolucionária e extração de conhecimento de fronteiras de Pareto aplicado a um amplificador operacional de transcondutância.**

Área de Concentração: Inteligência Artificial Aplicada à Automação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

ORIGINAL ASSINADA

Data da realização da defesa: 13 / abril / 2012

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao candidato o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 13 / 04 / 2012.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Ass.: _____

Prof. Dr. Flavio Tonidandel

Ass.: _____

Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Aos meus filhos Paulo Gabriel e Maria Eduarda.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria completo sem os devidos agradecimentos a todos os que direta e indiretamente colaboraram com sua concepção e elaboração. Patrícia, minha esposa, supriu a minha ausência parcial aos meus filhos com a determinação e empenho de mãe e para que pudesse dedicar-me à pesquisa e redação da dissertação. O Prof. Dr. Carlos Eduardo Tomaz, na figura de orientador, apoiou-me em todos os aspectos da pesquisa e dissertação, orientou e recomendou artigo e participação em congresso e não permitiu que esmorecesse na hora mais difícil, quando o trabalho na Volkswagen e os problemas pessoais me consumiam. O Prof. Carlos ajudou a estruturar os alicerces fundamentais deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez cabe o título de co-orientador, ainda que esta atribuição não exista oficialmente para o mestrado no Centro Universitário da FEI. O Prof. Salvador encorajou muito a pesquisa realizada e sempre contribuiu com seu grande conhecimento na análise dos resultados obtidos e no direcionamento da pesquisa. Seu orientado, o colega Rodrigo Alves de Lima Moreto contribui na escolha do modelo BSIM3 do MOSFET, nas primeiras simulações com SPICE, na extração dos pontos de inversão da curva g_m/I_{DS} e contribuiu com discussões que ajudaram a responder questões importantes. A inspiração veio do trabalho de mestrado de outro colega, Thiago Turcato do Rego, que forneceu seus modelos MOSFET BSIMSOI para SPICE, utilizados nos primeiros experimentos, e sugeriu que os algoritmos evolucionários poderiam revelar regras de projetos. Esta idéia fundamental foi perseguida desde o início.

A banca da qualificação do mestrado deu direcionamentos e correções importantes para o desenvolvimento da pesquisa, na área de Eletrônica pelo Prof. Dr. Renato Giacomini e na área de otimização a Profa. Dra. Patrícia Prado Belfiore com inúmeras sugestões de como superar o problema de restrições. Também a banca julgadora composta pelo Prof. Dr. Fávio Tonidandel e Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho, com nobre espírito crítico, conhecimento do tema e interesse, apontaram as deficiências e virtudes do trabalho em detalhes que passariam despercebidos e para que pudessem ser corrigidas nesta versão final.

Por fim, agradeço ainda aos meus pais, Antonio Carlos e Maria Inês pelo encorajamento e orações em todos os momentos e também pelo apoio financeiro nos momentos de dificuldade.

“Evolution is free to explore very unusual designs: circuits with strange structures and intricate dynamical behaviours beyond the scope of conventional design and analysis. In this larger search-space there is the possibility of better solutions, if we are prepared to set aside our prejudices (based on existing design methods) of how an electronic circuit should be.”

*Analysis of Unconventional Evolved Electronics
Adrian Thompson & Paul Layzell, 1999*

RESUMO

A otimização de múltiplos objetivos do amplificador operacional de transcondutância é um dos problemas mais estudados em microeletrônica. Dentro da área de Automação do Projeto Eletrônico encontra-se um grande número de ferramentas para a automação de projetos de circuitos integrados digitais, com grandes possibilidades de abstração, capazes de realizar otimização de parâmetros até síntese de sistemas completos. Para *circuitos integrados analógicos*, por outro lado, não encontra-se ferramentas com as mesmas características. O principal fator para esta divergência é a falta de um fluxo estruturado no projeto de circuitos integrados analógicos. O objetivo desta dissertação é investigar o processo de otimização para Amplificadores Operacionais de Transcondutância utilizando Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos na tentativa de descoberta de regras de projeto para a configuração automática de parâmetros de transistores na tecnologia CMOS. O desdobramento deste objetivo permite a elaboração de um arcabouço computacional que inclui a obtenção de aproximações da Fronteira de Pareto e a utilização de um modelo preciso para a simulação dos amplificadores operacionais de transcondutância, respeitando as restrições impostas pela topologia de interesse. Apesar do alto custo computacional, a obtenção de aproximações da fronteira de Pareto, através do conhecido algoritmo evolucionário *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*, integrado ao simulador SPICE, revela relações de compromisso entre os objetivos conhecidas muitas vezes somente intuitivamente pelos projetistas de circuitos integrados analógicos. Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que a Análise Multivariada das aproximações Pareto é um guia importante para a obtenção de projetos de amplificadores operacionais de transcondutância mais aprimorados.

Palavras-chave: Eletrônica Evolucionária, Múltiplos Objetivos, Amplificador Operacional de Transcondutância.

ABSTRACT

The optimization of multiple objectives of the operational transconductance amplifier is one of the most studied problems in microelectronics. Within the area of Electronic Design Automation is a large number of tools for design automation of digital integrated circuits, with great possibilities of abstraction, able to perform from parameter optimization to the synthesis of complete systems. For *analog integrated circuits*, on the other hand, its tools do not have the same characteristics. The main reason for this discrepancy is the lack of a structured flow in the design of analog integrated circuits. The objective of this dissertation is to investigate the optimization process for Operational Transconductance Amplifiers using Evolutionary Algorithms of Multiple Objectives in an attempt to discover design rules for the automatic configuration of parameters for transistors in CMOS technology. The unfolding of this goal allows the development of a computational framework that includes obtaining approximations of the Pareto Front and the use of an accurate model for the simulation of the operational transconductance amplifiers, respecting the restrictions imposed by the topology of interest. Despite the high computational cost, to obtain approximations of the Pareto front, through the known evolutionary algorithm *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*, integrated with SPICE simulation reveals compromise relationships between the objectives often known only intuitively by designers of analog integrated circuits. The present results suggest that the Multivariate Analysis of Pareto approaches is an important guide for obtaining more refined designs for operational transconductance amplifiers.

Keywords: Evolutionary Electronics, Multiple Objectives, Operational Transconductance Amplifier.

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Limites entre as regiões de inversão dos transistores utilizados	10
TABELA 3.1	Terminologia Biológica e os significados correspondentes em GAs (GOLDBERG, 1989, p. 22).	20
TABELA 3.2	Exemplo de cruzamento em um GA simples ($t=0$) (GOLDBERG, 1989).	23
TABELA 3.3	Relações Pareto binárias para vetores objetivo.	33
TABELA 3.4	Relações entre Conjuntos de Aproximação Pareto.	35
TABELA 3.5	Matriz de construção de topologias de amplificadores operacionais utilizada por Kruiskamp e Leenaerts (1995).	40
TABELA 5.1	Parametrização do Algoritmo	56
TABELA 5.2	Simbologia utilizada nos gráficos dos resultados experimentais	57
TABELA 5.3	Resultados do experimento de busca aleatória.	58
TABELA 5.4	Limites máximos e mínimos obtidos para os 5 experimentos.	62
TABELA B.1	Lista de Soluções	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Percentual de Circuitos Integrados Digitais com Conteúdo Analógico (IBS Corporation, 2002).	2
FIGURA 1.2 Contextualização de Projetos Analógicos e EDA, adaptado de McConaghy et al. (2009).	2
FIGURA 2.1 O Amplificador Operacional de Transcondutância ideal.	6
FIGURA 2.2 Vistas esquemáticas de um MOSFET de canal N.	8
FIGURA 2.3 Curvas características I-V de um MOSFET de canal N.	9
FIGURA 2.4 Curva de g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ para transistores NMOS e PMOS utilizados.	10
FIGURA 2.5 Esquema elétrico de um amplificador implementado com um único nMOSFET.	11
FIGURA 2.6 Esquema elétrico de um OTA de um único estágio e uma única saída. . .	11
FIGURA 2.7 OTA Miller	12
FIGURA 2.9 Resposta em frequência do OTA em malha aberta	14
FIGURA 2.8 Circuito OTA em malha aberta.	14
FIGURA 2.10 Circuito OTA em malha fechada.	15
FIGURA 2.11 Resposta à função degrau de grandes sinais utilizada para a extração do <i>Slew Rate</i>	15
FIGURA 2.12 Fluxo de projeto manual de circuitos integrados analógicos e o escopo de otimização adotado neste trabalho, adaptado de Hjalmarson (2003).	16
FIGURA 3.1 Função de aptidão artificial de Schwefel dada pela equação $f(x) = 418.9829 \cdot n - \sum_{i=1}^n \sin(\sqrt{ x_i })$	19
FIGURA 3.2 Método da Roleta ou Seleção Proporcional adaptado de Goldberg (1989). . .	23
FIGURA 3.3 Caracteres virtuais em um espaço contínuo de busca de 2 variáveis (GOLDBERG, 1990).	27

FIGURA 3.4	Distribuição probabilística do operador SBX.	28
FIGURA 3.5	Classificação de MOEAs quanto ao tratamento de relações de compromisso entre os objetivos (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2006).	30
FIGURA 3.6	Distância de apinhamento, adaptado de Deb (2001).	31
FIGURA 3.7	Função de mapeamento do <i>espaço de decisão</i> ao <i>espaço de objetivos</i> . Adaptado de (ZITZLER et al., 2002)	32
FIGURA 3.8	Relações binárias Pareto, considerando <i>minimização</i> dos objetivos f_1 e f_2 , verifica-se que: $a \prec b, a \prec c, a \prec d, a \preceq d, a \preceq a, a \preceq b, a \preceq c, a \preceq d, b \prec d, b \preceq b, b \parallel c, c \prec d, c \preceq c$ e $c \parallel b$	33
FIGURA 3.9	Relações entre Conjuntos de Aproximação para um problema de minimização de dois objetivos f_1 e f_2 . Observa-se que $\mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_1 \prec \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_2 \prec \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_1, \mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_2, \mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_2 \preceq \mathcal{A}_2, \mathcal{A}_2 \preceq \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_3 \preceq \mathcal{A}_3, \mathcal{A}_1 \triangleleft \mathcal{A}_2, \mathcal{A}_1 \triangleleft \mathcal{A}_3$ e $\mathcal{A}_2 \triangleleft \mathcal{A}_3$	34
FIGURA 3.10	Deficiências na obtenção de Conjuntos de Aproximação Pareto.	35
FIGURA 3.11	O Hipervolume, exemplificado para o caso de minimização de dois objetivos, corresponde a área delimitada pelos pontos da <i>Frenteira de Pareto</i> e o ponto de referência nadir.	37
FIGURA 3.12	Circuito Embrionário de Koza et al. (1999, p. 403).	42
FIGURA 3.13	Exemplo de programa GP para a construção de um circuito eletrônico(KOZA et al., 1999)	42
FIGURA 3.14	A abstração do AGE comparada ao mecanismo biológico equivalente, adaptado de Mattiussi et al. (2008).	43
FIGURA 4.1	Heatmap de Andrade (2008) utilizado para exemplificação por Friendly (2009). As linhas (ou colunas) representam os genes e as colunas (ou linhas) representam as amostras. Os gradientes de cores representam a intensidade da expressão do gene na amostra. Os dendrogramas lateral e superior representam os <i>Agrupamentos</i> entre genes e entre amostras.	50
FIGURA 4.2	Integração do MOEA ao SPICE.	53
FIGURA 4.3	Processo proposto por este trabalho: Otimização e Extração de Conhecimentos.	54
FIGURA 5.1	Quantidade de indivíduos factíveis obtidos com VEGA e NSGA-II.	55

FIGURA 5.2	Hipervolume ($I_{\mathcal{H}\mathcal{V}}$), equação 3.12, para as 6000 gerações dos 5 experimentos com NSGA-II.	59
FIGURA 5.3	Saturação ($SAT = V_{DS} - V_{GS} + V_{TH}$), Tensão <i>Bias</i> de Saída ($\left \frac{V_{dd}}{2} - V_{out} \right \leq 0,1 \cdot V_{dd}$) e Margem de Fase ($45^\circ \leq \phi_M \leq 75^\circ$).	60
FIGURA 5.4	Resposta Transiente das soluções obtidas no Apendice B.	61
FIGURA 5.5	Diagrama de Bode das soluções obtidas do Apendice B.	61
FIGURA 5.6	Projeções das aproximações da Fronteira de Pareto resultantes dos 5 experimentos com NSGA-II para cada par de objetivos: A_{v0} [dB], f_T [MHz], SR [V/ μ s], Pwr [mW] e $Area$ [μ m ²].	62
FIGURA 5.7	<i>Heatmap</i> e dendrogramas da correlação de Spearman ao quadrado (ρ^2) entre os parâmetros e os objetivos. IDWL [$I_{DS}/(W/L)$] é a medida da região de inversão do MOSFET.	63
FIGURA 5.8	Agrupamento de Observações das Fronteiras de Pareto ($\mathcal{P}\mathcal{F}^*$) das soluções obtidas no Apendice B. (1) Preto: <i>Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos</i> , (2) Vermelho: <i>Alto Ganho</i> , (3) Verde: <i>Alta Frequência</i> , (4) Azul: <i>Baixa Potência</i>	64
FIGURA 5.9	Exemplos de relações extraídas da observação do <i>Heatmap</i> e Agrupamento de Observações.	65
FIGURA 5.10	Parâmetros dos Transistores MOSFET. (1) Preto: <i>Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos</i> , (2) Vermelho: <i>Alto Ganho</i> , (3) Verde: <i>Alta Frequência</i> , (4) Azul: <i>Baixa Potência</i>	66
FIGURA 5.11	Árvore de Classificação para as Classes: (1) Preto: <i>Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos</i> , (2) Vermelho: <i>Alto Ganho</i> , (3) Verde: <i>Alta Frequência</i> , (4) Azul: <i>Baixa Potência</i>	67
FIGURA 5.12	Árvores de Regressão.	68
FIGURA 5.13	Densidade de A_{v0} (Nó 23) para soluções restritas pelas inequações $L_{78} > 18,374\mu$ m (Nó 1), $L_{56} > 1,224\mu$ m (Nó 17) e $L_{56} > 5,845\mu$ m (Nó 19) da árvore de regressão de A_{v0}	69

LISTA DE ALGORITMOS

ALGORITMO 1	Algoritmo Evolucionário	19
ALGORITMO 2	O Algoritmo Genético Canônico.	22
ALGORITMO 3	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i> (SCHAFFER, 1984 apud DEB, 2001, p. 179–184)	29
ALGORITMO 4	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>	47
ALGORITMO 5	<i>Non-dominated Sorting</i> de complexidade $\mathcal{O}(mn^2)$ (DEB et al., 2000) .	48
ALGORITMO 6	Distância de <i>Apinhamento</i> (DEB et al., 2000)	49
ALGORITMO 7	<i>k-means clustering</i>	51
ALGORITMO 8	<i>k-medoids clustering</i>	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGE “Analog Genetic Encoding” (Codificação Genética Analógica)

CI Circuito Integrado

CMOS “Complementary Metal Oxide Semiconductor” (Semicondutor Metal-Óxido Complementar)

DNA “Desoxyribonucleic Acid” (Ácido Desoxiribonucleico)

EA “Evolutionary Algorithm” (Algoritmo Evolucionário)

EDA “Electronic Design Automation” (Automação do Projeto Eletrônico)

EE “Evolutionary Electronics” (Eletrônica Evolucionária)

EHW “Evolvable Hardware” (Hardware Evolucionário)

EP “Evolutionary Programming” (Programação Evolucionária)

ES “Evolution Strategies” (Estratégias de Evolução)

FPA “Field Programmable Analog Array”

FPGA “Field Programmable Gate Array”

FPTA Field Programmable Transistor Array

GA “Genetic Algorithm” (Algoritmo Genético)

GP “Genetic Programming” (Programação Genética)

GRN “Genetic Regulatory Network” (Rede de Regulação Genética)

HSO “Hypervolume by Slicing Objectives” (Hipervolume por Divisão de Objetivos”)

INNOVIZATION “Innovative Design Principles Through Optimization” (Princípios Inovadores de Projeto através da Otimização)

MOEA “Multi-Objective Evolutionary Algorithm” (Algoritmo Evolucionário de Múltiplos Objetivos)

NFL “There is No Free Lunch” (Teorema da Inexistência do Almoço Grátis)

NSGA-II “Nondominated Sorting Genetic Algorithm II” (NSGA-II)

OTA “Operational Transconductance Amplifier” (Amplificador Operacional de Transcondutância)

PLD “Programmable Logic Device”

PTA “Programmable Transistor Array”

RNA “Ribonucleic Acid” (Ácido Ribonucleico)

SBX “Simulated Binary Crossover” (Cruzamento Binário Binário)

SMASH Simulador equivalente ao SPICE pertencente à Dolphin Integration

SoC “Systems on Chips” (Sistemas em Circuitos Integrados)

SPICE “Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis” (Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados)

VEGA “Vector Evaluated Genetic Algorithm” (VEGA)

VLSI “Very Large Scale Integration” (Integração em Escala Muito Grande)

LISTA DE SÍMBOLOS

Amplificador Operacional de Transcondutância

A_{v0}	Ganho de tensão em malha aberta em baixa frequência [dB]
f_T	Frequência de ganho de tensão unitário [MHz]
SR	Máxima taxa de variação do sinal de saída (Slew Rate) [$V/\mu s$]
Pwr	Potência dissipada [mW]
$Area$	Área de Silício [μm^2]
Φ_T	Margem de fase para a tensão de ganho unitário [$^\circ$]
M_i	MOSFET de índice i
W_i	Largura de canal do transistor M_i [μm]
L_i	Comprimento de canal do transistor M_i [μm]
g_m	Transcondutância [siemens]
V_{in+}	Entrada de tensão positiva do par diferencial do OTA [V]
V_{in-}	Entrada de tensão negativa do par diferencial do OTA [V]
V_{out}	Tensão de saída do OTA [V]
I_{out}	Corrente de saída do OTA [mA]
I_{abc}	Corrente de polarização do OTA [mA]
V_{DS}	Tensão entre Dreno e Fonte [V]
V_{TH}	Tensão de limiar [V]
V_{GS}	Tensão entre Porta e Fonte [V]
D	Dreno do MOSFET
S	Fonte do MOSFET

G	Porta do MOSFET
B	Substrato do MOSFET

Algoritmos Evolucionários

P	População de pais
O	População de descendentes
N	Tamanho da População $ P $
i	Indivíduo
t	Geração
p_{cross}	Probabilidade de cruzamento
p_{mut}	Probabilidade de mutação
η_c	Fator de forma para o cruzamento binário simulado (SBX)
η_m	Fator de forma para a mutação polinomial

Múltiplos objetivos e dominância Pareto

Ω	Espaço de Decisão $\Omega = \{x \in \mathfrak{R}^n\}$
Λ	Espaço de Objetivos $\Lambda = \{y \in \mathfrak{R}^m\}$
\mathcal{P}^*	Conjunto ótimo de Pareto $\mathcal{P}^* \subset \Omega$
\mathcal{PF}^*	Fronteira ótima de Pareto $\mathcal{PF}^* \subset \Lambda$
\mathcal{A}, \mathcal{B}	Conjuntos de arbitrários de Aproximação à Fronteira de Pareto $\mathcal{A}, \mathcal{B} \subset \Lambda$
n	Cardinalidade do espaço de decisão
m	Cardinalidade do espaço de objetivos
$I_{g\mathcal{D}}(\mathcal{A})$	Distância Geracional (Métrica Unária de Conjuntos Pareto)
$I_{\Delta}(\mathcal{A})$	Espalhamento (Métrica Unária de Conjuntos Pareto)
$I_{\mathcal{HV}}(\mathcal{A})$	Hipervolume (Métrica Unária de Conjuntos Pareto)

$I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ Cobertura do Conjunto (Métrica Binária de Conjuntos Pareto)

\succcurlyeq Dominância Pareto Estrita (operador binário)

\succ Dominância Pareto (operador binário)

\triangleleft Melhor Conjunto Pareto (operador binário)

\succsim Dominância Pareto Fraca (operador binário)

\parallel Incomparabilidade de Conjuntos Pareto (operador binário)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivo	3
1.3	Organização do Trabalho	4
2	O PROJETO DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS DE TRANSCONDUTÂNCIA	6
2.1	Amplificadores Operacionais de Transcondutância	6
2.2	OTAs implementados na Tecnologia CMOS	7
2.2.1	O Transistor de Efeito de Campo: MOSFET	7
2.2.2	Topologias de OTAs	10
2.3	O Simulador de Circuitos SPICE	13
2.3.1	Avaliação do Ponto de Operação (comando SPICE .OP)	13
2.3.2	Avaliação do Ganho em Malha Aberta, Frequência de Ganho Unitário e Margem de Fase (.AC)	13
2.3.3	Avaliação do <i>Slew-Rate</i> (.TRAN)	15
2.4	O ciclo manual de projetos.	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONTEXTUALIZAÇÃO	18
3.1	Algoritmos Evolucionários.	18
3.1.1	Representação Genética	20
3.1.2	O Algoritmo Genético Canônico	21
3.1.3	Teorema dos Esquemas de Holland	24
3.1.4	Teorema da Seleção e Covariância de Price	25
3.1.5	Codificação Genética por números Reais	27

3.2	Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos.	29
3.2.1	Modelo de Apinhamento	30
3.2.2	Modelo de Compartilhamento de Aptidão	31
3.3	Múltiplos Objetivos e Dominância Pareto	32
3.3.1	Relações Binárias Pareto	32
3.3.2	Conjunto Pareto e Fronteira de Pareto Ótimos	33
3.3.3	Conjuntos de Aproximação Pareto	34
3.3.4	Indicadores de Qualidade para Conjuntos de Aproximação Pareto	34
3.4	Eletrônica Evolucionária	38
3.4.1	Hardware Evolucionário - EHW	38
3.4.2	Evolução Extrínseca de Circuitos Analógicos	39
4	MÉTODOS	44
4.1	Otimização Evolucionária	44
4.1.1	Formulação do Problema	45
4.1.2	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i> (NSGA-II)	46
4.1.3	Tratamento de Restrições	48
4.2	Extração de Conhecimentos	49
4.2.1	O Mapa de Aquecimento (<i>Heatmap</i>)	50
4.2.2	Agrupamento de Observações (<i>Clustering</i>)	51
4.2.3	Árvores de Classificação e Regressão	52
4.3	Implementação	53
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
5.1	Parametrizações	56
5.2	Factibilidade dos Resultados Experimentais	56
5.3	Fronteira de Pareto.	61

5.4	Extração de Conhecimentos	63
5.4.1	Automação da Extração de Conhecimentos	67
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Listagens SPICE	76
A.1	Listagem para SIMULAÇÃO	76
A.2	Modelo nMOSFET	79
A.3	Modelo pMOSFET	80
A.4	Extração de g_m/I_{ds} (NMOS)	81
A.5	Extração de g_m/I_{ds} (PMOS)	82
	APÊNDICE B – Lista de Soluções ($\mathcal{P}\mathcal{F}^*$)	84
	ANEXO A – TRABALHO PUBLICADO EM CONGRESSO	106

1 INTRODUÇÃO

“Analog designers are few and far between. In contrast to digital design, most of the analog circuits are still handcrafted by the experts or so-called ‘zahs’ of analog design. The design process is characterized by a combination of experience and intuition and requires a thorough knowledge of the process characteristics and the detailed specifications of the actual product.

“Analog circuit design is known to be a knowledge-intensive, multiphase, iterative task, which usually stretches over a significant period of time and is performed by designers with a large portfolio of skills. It is therefore considered by many to be a form of art rather than a science.”

Trends in current analog design: A panel debate

O. Aaserud and I. Ring Nielsen, 1995

Otimização é um problema ubíquo em ciências e engenharias. Encontrar soluções ótimas para um determinado problema, dadas as preferências e restrições para sua resolução, é uma questão de central importância para todos os campos de atuação humana. Soluções que minimizam a utilização de recursos, minimizam perdas e maximizam o desempenho são cada vez mais necessárias em nosso mundo competitivo e com recursos cada vez mais escassos.

A Eletrônica nas últimas décadas expandiu em integração e complexidade acompanhando as profecias da lei de Moore. O uso dos circuitos chamados de *System on Chips* (SoCs) são encontrados em vários campos de aplicação: automotivo, biomédico, comunicações, etc. SoCs tornaram-se realidade em meados da década de 1990 devido à grande evolução da tecnologia *Very Large Scale Integration* (VLSI) (SANTOS et al., 2011). A cada dia mais e mais funcionalidade podem ser integradas com a evolução de tecnologias de processos de fabricação e miniaturização. Neste contexto, as ferramentas para o auxílio de projetos *Electronic Design Automation* (EDA) são fundamentais dado o crescimento da complexidade de projetos eletrônicos.

Dentro da área de EDA, encontra-se um grande número de ferramentas para a automação de projetos de circuitos integrados digitais, com grandes possibilidades de abstração, capazes de

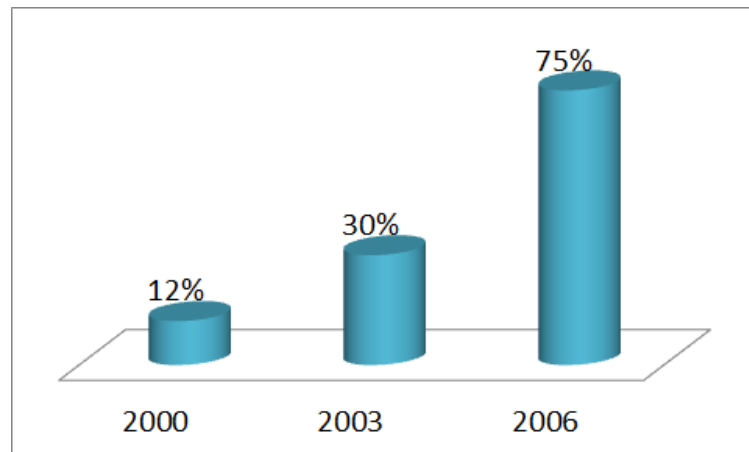


Figura 1.1: Percentual de Circuitos Integrados Digitais com Conteúdo Analógico (IBS Corporation, 2002).

realizar otimização de parâmetros até síntese de sistemas completos. Para *circuitos integrados analógicos*, por outro lado, não encontra-se ferramentas com as mesmas características. Hjalmarson (2003) argumenta que dentro de um Circuito Integrado (CI) de configuração comum, com 90% do CI composto de componentes digitais e 10% de componentes analógicos, e apesar desta grande diferença o projeto da parte analógica requer mais tempo e recursos do que a parte digital. Segundo Hjalmarson (2003) o principal fator para esta divergência é a falta de um fluxo estruturado no projeto de circuitos integrados analógicos.

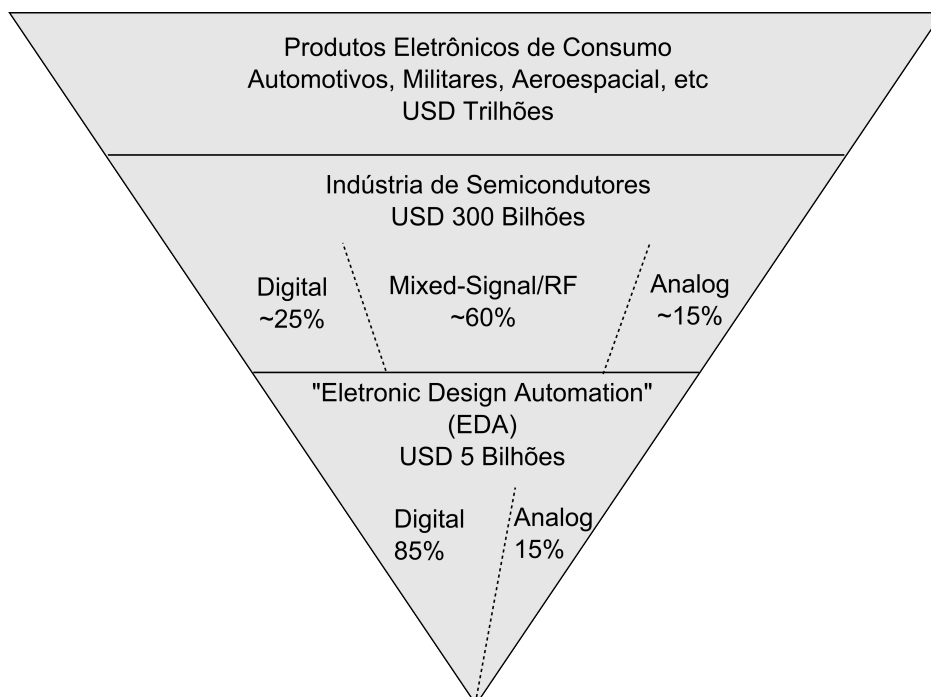


Figura 1.2: Contextualização de Projetos Analógicos e EDA, adaptado de McConaghy et al. (2009).

1.1 Motivação

Enquanto a relevância dos *circuitos integrados analógicos* cresce com a miniaturização e aumento de complexidade e funcionalidade dos CIs, conforme ilustrado na Figura 1.1, as ferramentas de automação de projetos de circuitos integrados analógicos ainda permanecem com participação de mercado aquém de suas equivalentes para circuitos integrados digitais. A Figura 1.2 apresenta uma contextualização desta afirmativa.

O maior desafio do projeto analógico, segundo Hjalmarson (2003), consiste no projeto de células básicas, como amplificadores operacionais, que exigem algumas semanas em um ciclo completo de projeto. O caminho crítico de um projeto passa pelo desenho e parametrização destas células. Ainda segundo Hjalmarson (2003), outro grande desafio são as relações de compromissos existentes entre as múltiplas especificações de desempenho exigidas dentro do projeto do sistema. A obtenção do correto balanço entre os parâmetros de desempenho exige múltiplas revisões e ciclos dentro do projeto de circuitos integrados analógicos.

Na verdade, as especificações de desempenho de um circuito analógico simples podem ser vistas como múltiplos objetivos de um problema de otimização. Os Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos (MOEAs) permitem a obtenção de uma aproximação da *Frenteira de Pareto*, que é um conjunto de soluções com as melhores relações de compromisso entre os objetivos.

Durante a fase final da pesquisa bibliográfica desta dissertação, foi encontrada uma referência que possui uma filosofia semelhante à proposta deste trabalho, que é a extração de conhecimento *tácito* das *Frentes de Pareto*, chamada de *Innovative Design Principles Through Optimization* (INNOVIZATION) de Deb e Srinivasan (2005). Embora o princípio seja o mesmo, existem diferenças significativas nos métodos de extração de conhecimentos e acréscimos importantes feitos neste trabalho, como uma análise de sensibilidade global feita através de um *Mapa de Aquecimento* ou *Heatmap* e uma forma distinta de automação da extração de conhecimento utilizando-se árvores de classificação e regressão. A automação da extração de conhecimento surgiu pela primeira vez no trabalho de Bandaru e Deb (2010) através de *agrupamento de observações* ou *clustering* durante o processo evolutivo. A comparação com estas referências sugere que a proposta apresentada neste trabalho, desenvolvida de forma independente, além de estar muito próxima ao estado da arte acrescenta métodos importantes.

1.2 Objetivo

O conhecimento da *Frenteira de Pareto* de um circuito analógico permite que configuremos o mesmo, para várias aplicações, sempre na condição ótima. Por outro lado, o conhecimento da

Fronteira de Pareto também permite investigar quais as relações entre parâmetros e objetivos que são ótimas para o projeto analógico, permitindo a extração de conhecimento e re-alimentação do ciclo de projetos.

O objetivo geral deste trabalho é investigar o processo de otimização para Amplificadores Operacionais de Transcondutância (OTAs) utilizando Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos (MOEAs) na tentativa de descoberta de *regras de projeto* para a configuração de parâmetros de transistores na tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Os parâmetros de transistores de Semicondutor Metal Óxido Complementar (CMOS) de interesse são: Largura de Canal (W), Comprimento de Canal (L), Razão de Largura por Comprimento (W/L) e a Região de Inversão que os transistores operam (Frac, Moderada ou Forte). As configurações de parâmetros devem levar em conta os compromissos de objetivos entre os diversos tipos de aplicação, como: *Micropower*, Alto Ganho e Alta Frequência.

O desdobramento deste objetivo inclui a elaboração de metodologia eficaz para a obtenção de aproximações da *Fronteira de Pareto Ótima* (\mathcal{PF}^*), utilização de um modelo preciso para a simulação de circuitos e MOEA), superação por parte do algoritmo utilizado sobre as restrições impostas pela topologia do circuito estudado e o estudo das correlações entre objetivos e parâmetros de projeto, permitindo a extração de regras de projeto das aproximações da *Fronteira de Pareto* (\mathcal{PF}).

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, nos quais apresentam-se:

1. *Introdução*: Motivação e Objetivos;
2. *Projeto de Amplificadores Operacionais de Transcondutância*: O objeto de estudo, o OTA em tecnologia CMOS;
3. *Fundamentação Teórica e Contextualização*: A teoria de Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos e seu contexto dentro da área de Eletrônica Evolucionária;
4. *Métodos*: A Formulação do Problema, o método de Otimização Evolucionária de Múltiplos Objetivos e os métodos para a Descoberta de Conhecimento a partir das aproximações da Fronteira de Pareto;
5. *Resultados Experimentais*: A evidência experimental para o suporte do discurso e argumentação sobre o OTA deste trabalho;

6. *Conclusão:* A conclusão sobre as questões abordadas, questões em aberto e possibilidades para trabalhos futuros.

2 O PROJETO DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS DE TRANSCONDUTÂNCIA

“Analog synthesis is always the holy grail.”

Ron Gyurcsik (Cadence AMS Group Director)

Neste capítulo são discutidos os aspectos básicos do projeto manual de Amplificadores Operacionais de Transcondutância (OTA) bem como os cálculos utilizando-se equações de primeira ordem, métricas de desempenho e refinamento do projeto por meio do simulador SPICE¹.

2.1 Amplificadores Operacionais de Transcondutância

Amplificadores Operacionais são essencialmente circuitos que amplificam em sua saída uma corrente ou tensão de entrada. Os amplificadores podem ser classificados em quatro tipos (GLISSON, 2011): Amplificadores de Corrente, Transresistência (ou Amplificador de Corrente-Tensão), Amplificadores de Tensão e Transcondutância (ou Amplificador de Tensão-Corrente). Este último é o objeto de estudo deste trabalho. Uma representação simbólica do OTA ideal é apresentada na Figura 2.1(a) e seu modelo de pequenos sinais é apresentado na Figura 2.1(b).

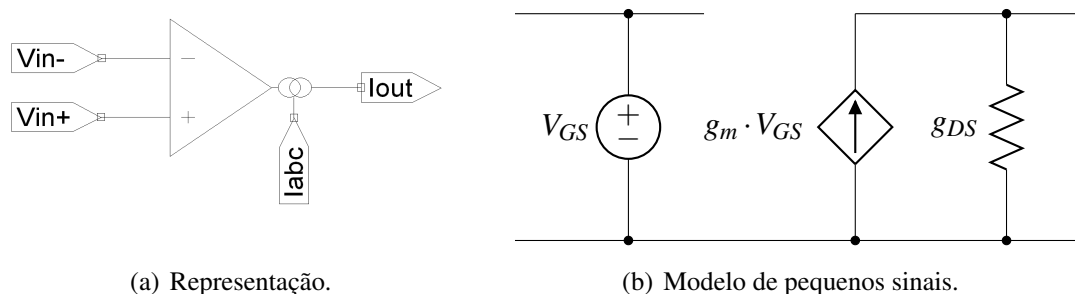


Figura 2.1: O Amplificador Operacional de Transcondutância ideal.

A transcondutância (g_m), propriedade principal deste circuito analógico, é definida pela razão entre a variação da corrente de saída (ΔI_{out}) pela variação da tensão de entrada (ΔV_{in}) em um

¹Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* - SPICE)

quadripolo (SCHAUMANN, 2004, p. 136), ou seja,

$$g_m = \frac{\Delta I_{out}}{\Delta V_{in}}. \quad (2.1)$$

O OTA Ideal representado na Figura 2.1 possui a função de transferência definida pela equação 2.2 (SCHAUMANN, 2004, p. 136),

$$I_{out} = g_m \cdot (V_{in+} - V_{in-}), \quad (2.2)$$

onde V_{in+} e V_{in-} são as tensões de entrada positiva e negativa do OTA. A corrente de polarização do OTA I_{abc} é utilizada para controlar a transcondutância, sendo I_{abc} diretamente proporcional à g_m (SCHAUMANN, 2004).

2.2 OTAs implementados na Tecnologia CMOS

OTAs podem ser construídos em diversas tecnologias de fabricação de circuitos integrados (CIs). Como em Zebulum, Pacheco e Vellasco (2001, p. 106), tem-se a tecnologia *BiCMOS* que utiliza transistores bipolares e MOSFET ao mesmo tempo. Particularmente neste trabalho somente será utilizada a tecnologia CMOS para a implementação do OTA.

2.2.1 O Transistor de Efeito de Campo: MOSFET

Transistores MOSFET podem ser feitos de tal maneira que o transporte de corrente da fonte (source) ao dreno (drain) é feita por elétrons (NMOS) ou lacunas (PMOS), ou no caso da tecnologia CMOS, elétrons e lacunas em ambos dispositivos NMOS e PMOS (MISHRA; SINGH, 2008). A Figura 2.2(a) ilustra a vista em perspectiva de um Transistor NMOS, uma representação esquemática apresenta-se na Figura 2.2(b) e a sua secção transversal na Figura 2.2(c). Transistores NMOS e PMOS podem ser produzidos no mesmo substrato (MISHRA; SINGH, 2008). A Tecnologia CMOS é amplamente utilizada em memórias, microprocessadores, *wireless* e um grande número de aplicações, sendo sua principal característica a baixa dissipação de potência (MISHRA; SINGH, 2008).

O modo de operação dos transistores também é um fator importante a ser considerado no projeto de OTAs. Existem três modos de operação para transistores MOSFET, a saber (GENTINNE, 1996):

- a) Região de *Corte*: ocorre quando $V_{GS} < V_{TH}$, onde V_{GS} é a tensão entre porta (gate) e fonte (source) e V_{TH} é a tensão de limiar do MOSFET (threshold). Neste modo de operação não há condução de corrente entre dreno (drain) e fonte (source) (I_{DS});
- b) Região *Triodo* ou modo linear: Ocorre quando $V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$, onde V_{DS} é a tensão entre dreno (drain) e fonte (source). Neste modo o transistor funciona como um resistor

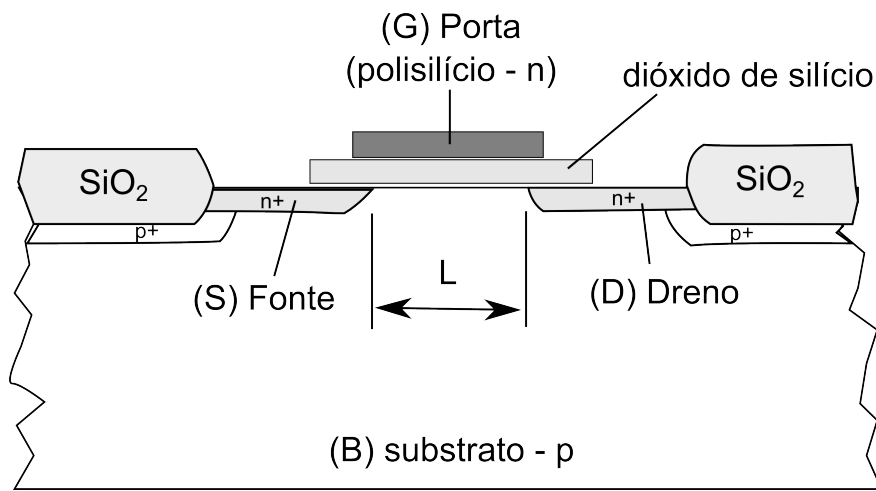
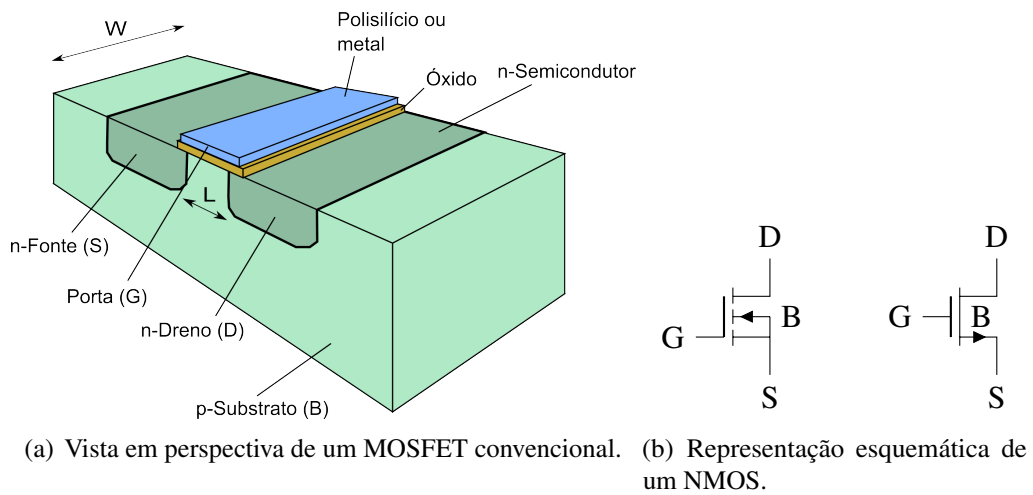


Figura 2.2: Vistas esquemáticas de um MOSFET de canal N.

controlado pela tensão de porta , e a corrente de dreno (I_{DS}) é proporcional a

$$I_{DS} \propto \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2]; \quad (2.3)$$

c) Região de *Saturação* ou pinçamento (*pinch-off*): Ocorre quando $V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$. Neste modo a corrente de dreno (I_{DS}) depende somente da tensão de porta V_{GS} . O OTA utiliza os transistores configurados neste modo de operação. A corrente de dreno (I_{DS}) neste modo é proporcional a

$$I_{DS} \propto \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2. \quad (2.4)$$

As características de corrente e tensão (I-V) de um NMOS são apresentadas na Figura 2.3. A corrente de dreno (I_{DS})² relaciona-se com a tensão de porta (V_{GS}) de forma linear no Modo Triodo (Equação 2.3) e de forma quadrática no Modo de Saturação (Equação 2.4) (MISHRA; SINGH, 2008).

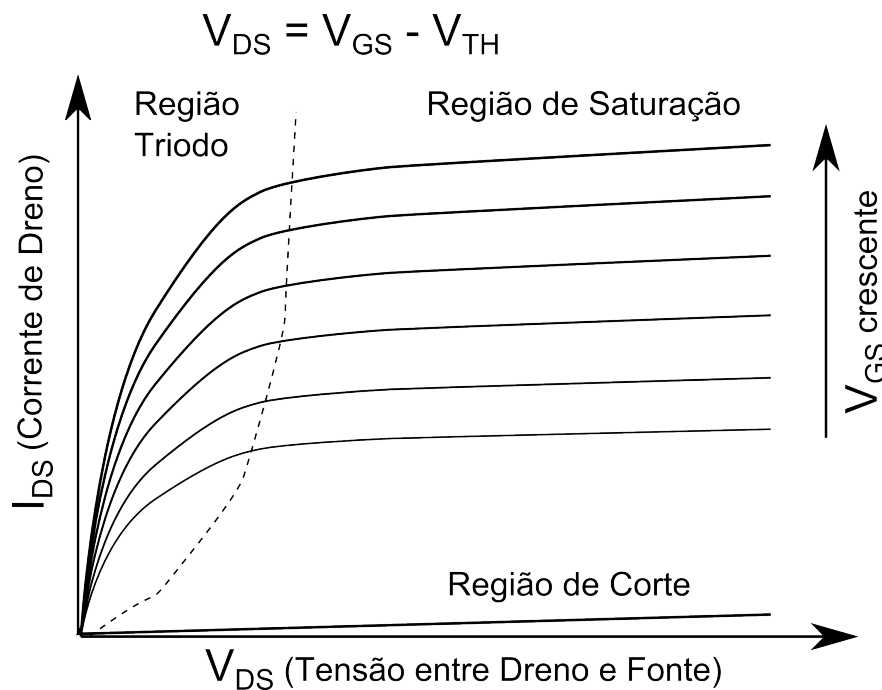


Figura 2.3: Curvas características I-V de um MOSFET de canal N.

Uma das características principais utilizadas para auxiliar no projeto de OTAs é a região de inversão dos MOSFETs, através da curva $g_m/I_{DS} \times I_{DS}/(W/L)$ ilustrada na Figura 2.4 (SILVEIRA; FLANDRE; JESPERS, 1996). Para obter esta curva, os autores mencionam dois métodos. Analiticamente através de um modelo do transistor da tecnologia a ser utilizada, ou por medidas de um transistor típico. Para realizar o trabalho de caracterização elétrica dos MOSFETs foram utilizados os arquivos SPICE dos anexos A.4 e A.5.

²A corrente de dreno-fonte (I_{DS}), considerando que a corrente de porta (I_g) é relativamente pequena, é igual à corrente de dreno-fonte ($I_{DS} = I_d + I_g$)

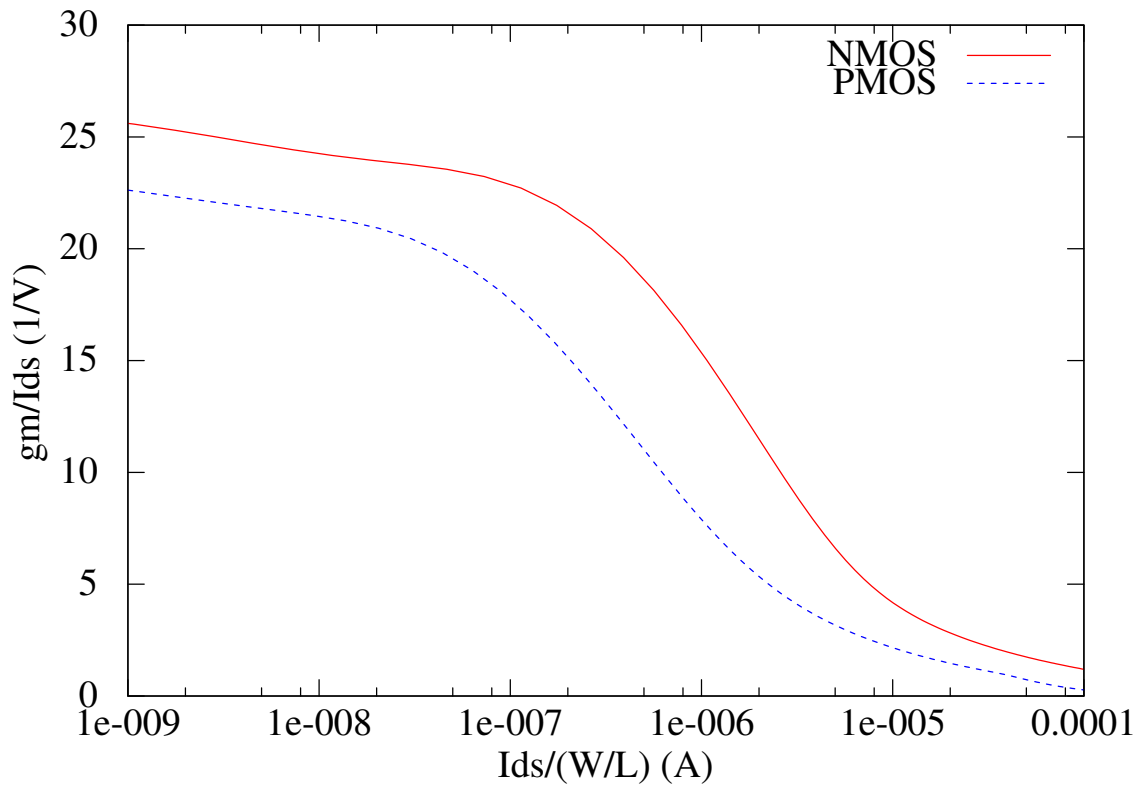


Figura 2.4: Curva de g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ para transistores NMOS e PMOS utilizados.

As transições entre as regiões de inversão *Fraca-Moderada* e *Moderada-Forte* em termos de $I_{DS}/(W/L)$ podem ser calculadas respectivamente nos pontos de 90% e 10% de g_m/I_{DS} máximo (GENTINNE, 1996). A Tabela 2.1 descreve os valores de transição entre as regiões inversão Fraca-Moderada e Moderada-Forte para os transistores utilizados neste trabalho³.

Tabela 2.1: Limites entre as regiões de inversão dos transistores utilizados

Transistor	Inversão Fraca-Moderada (A)	Inversão Moderada-Forte (A)
NMOS	$4.812956e-008$	$2.256894e-005$
PMOS	$1.977102e-008$	$8.373005e-006$

2.2.2 Topologias de OTAs

O OTA mais básico que pode ser construído utilizando-se um único MOSFET está ilustrado na Figura 2.5 (GENTINNE, 1996). Nesta Figura, Gnd é o aterramento, M_1 é o MOSFET de canal N, C_L é a capacitância de carga, I_{abc} é a corrente de polarização, V_{in} é a tensão de entrada e V_{out} é a tensão de saída.

³Para todas os experimentos é utilizado o modelo BSIM3v3.1 para simulação SPICE com os parâmetros MOSIS da tecnologia SCN05 CMOS de $0.5\mu m$ disponível em: <http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/ami-c5/t99j-params.txt>, anexos A.2 e A.3

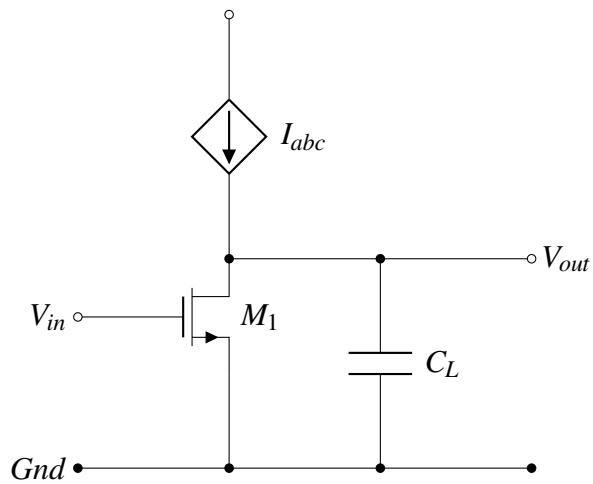


Figura 2.5: Esquema elétrico de um amplificador implementado com um único nMOSFET.

Outra implementação de OTA, de único estágio e única saída, é ilustrada na Figura 2.6. Esta é a implementação utilizada neste trabalho, onde M_1, M_2, M_7, M_8, M_9 e M_{10} são MOSFETs de canal N, M_3, M_4, M_5 e M_6 são MOSFETs de canal P e V_{dd} é a tensão de alimentação.

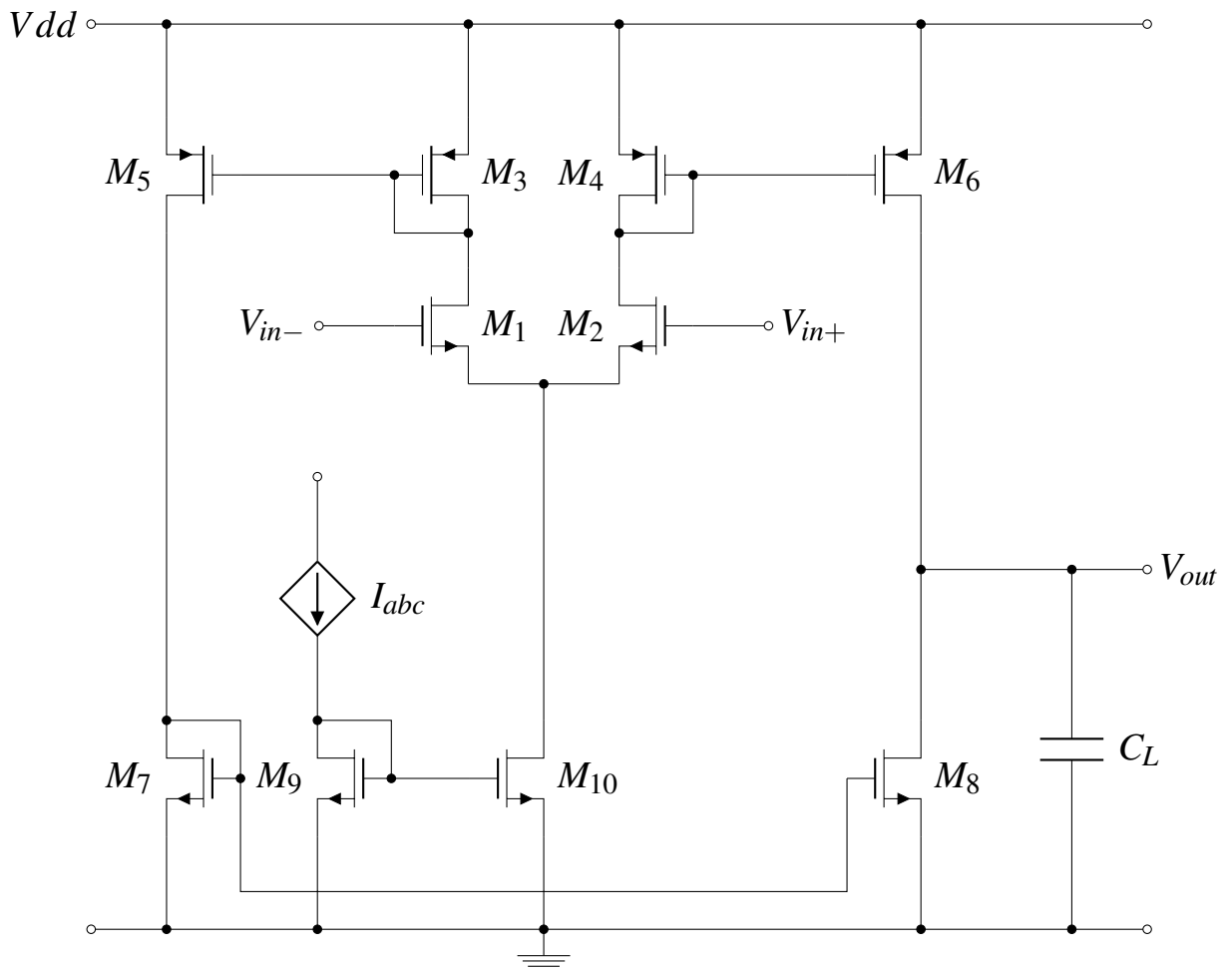


Figura 2.6: Esquema elétrico de um OTA de um único estágio e uma única saída.

Outro tipo de OTA é o OTA Miller, ilustrado na Figura 2.7, e que apresenta algumas melhorias em relação ao OTA de único estágio e única saída, onde o transistor M_5 constitui o segundo estágio de amplificação e C_p é a capacitância Miller (GENTINNE, 1996).

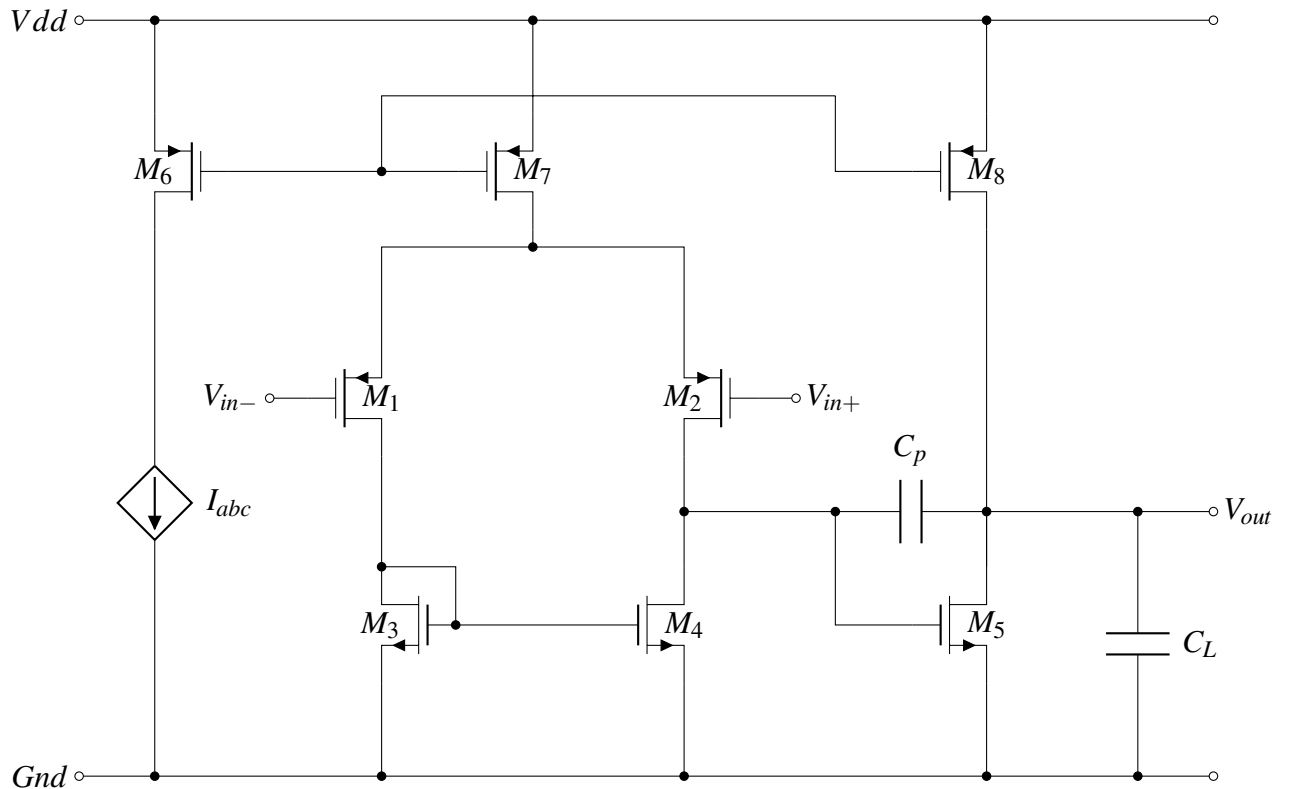


Figura 2.7: OTA Miller

Para o projeto de OTAs CMOS, dentro da topologia do circuito escolhido, é necessário que o projetista ajuste os seus diversos parâmetros, dentre eles a largura de canal W e comprimento de canal L para cada um dos transistores do circuito. Através do ajuste dos parâmetros, o projetista busca a otimização de diversas características do OTA como: ganho em malha aberta (A_{v0}), frequência de ganho unitário (f_T), *Slew Rate* (SR), potência dissipada (Pwr), área do circuito (A) e outros utilizando um simulador de circuitos como o SPICE (STEFANOVIĆ; KAYAL, 2008). O modelo dos **MOSFET**s também precisa ser selecionado de acordo com a tecnologia de fabricação. Geralmente estes modelos são fornecidos por fabricantes, no caso deste trabalho utiliza-se os modelos BSIM3 da MOSIS de tecnologia SCN05 CMOS de $0.5\mu m$ disponível em: <http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/ami-c5/t99j-params.txt>.

O modelo BSIM3v3 é bastante preciso e foi desenvolvido para aproximar as características I-V do MOSFET pela solução das equações de Poisson que modelam o transporte de cargas. O Modelo BSIM3v3 engloba fenômenos importantes observados nos MOSFETs (LIU et al., 1998):

2.3 O Simulador de Circuitos SPICE

O SPICE é o simulador de circuitos mais recente desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley, que tornou-se padrão na indústria e na Engenharia Eletrônica (NAGEL, 2008). O *Spice OPUS*, utilizado neste trabalho, é uma variante baseada no código aberto do *SPICE 3f4* da Berkeley, desenvolvida na Universidade de Ljubljana, Eslovênia (TUMA; BÜRMENT, 2009).

2.3.1 Avaliação do Ponto de Operação (comando SPICE .OP)

A primeira das avaliações a serem realizadas no OTA através do SPICE é o ponto de operação (.OP), que calcula as tensões e correntes contínuas (DC) em todos os nós e ramos do circuito respectivamente (TUMA; BÜRMENT, 2009). Através da análise do ponto de operação obtemos:

- a) Potência do Circuito (I_{src} em função de V_{src}), onde I_{src} é a corrente de alimentação e V_{src} a tensão de alimentação;
- b) Máxima Excursão do sinal de saída ($\min(|V_{dd} - V_{out}|, |V_{out} - G_{nd}|)$), máxima em $V_{out} = \frac{V_{dd}}{2}$);
- c) Modo de operação dos transistores (Saturação, Triodo ou Corte);
- d) Região de Inversão dos transistores extraída da curva de g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$.

2.3.2 Avaliação do Ganho em Malha Aberta, Frequência de Ganho Unitário e Margem de Fase (.AC)

Para a análise de pequenos sinais (comando SPICE .AC), o SPICE utiliza um modelo linearizado do circuito. Esta análise é conduzida no domínio de frequência (TUMA; BÜRMENT, 2009). Para realizar a simulação, utiliza-se o circuito em malha aberta ilustrado na Figura 2.8. Os parâmetros são:

- a) Ganho de tensão em Malha Aberta (A_{v0});
- b) Frequência de Ganho de Tensão Unitário (f_T);
- c) Margem de Fase (ϕ_T).

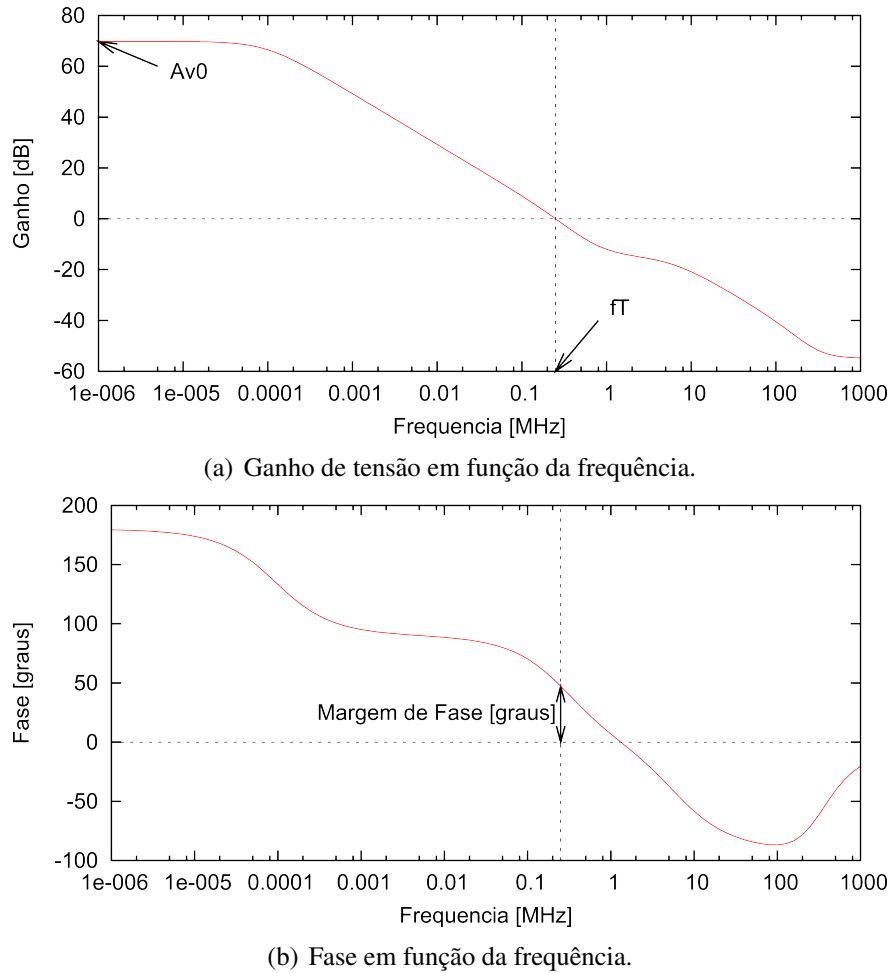


Figura 2.9: Resposta em frequência do OTA em malha aberta

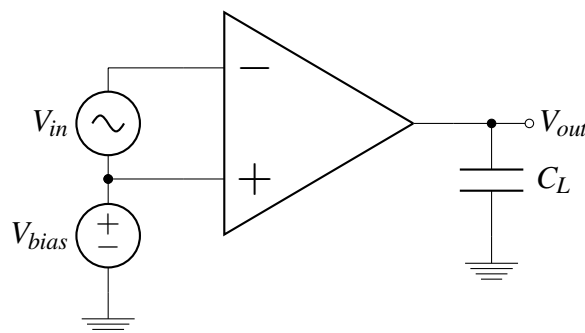


Figura 2.8: Circuito OTA em malha aberta.

O parâmetro A_{v0} é o ganho do OTA em baixa frequência, f_T é a frequência para o ganho unitário ($A_v = 0dB$), e a Margem de Fase⁴ φ_T é a fase para o ganho unitário ($A_v = 0dB$).

⁴ φ_T é utilizado como critério de estabilidade do OTA (GENTINNE, 1996). Os limites de aceitação utilizados neste trabalho são $55^\circ < \varphi_T < 75^\circ$.

2.3.3 Avaliação do *Slew-Rate* (.TRAN)

Para este estudo utiliza-se o circuito em malha fechada ilustrado na Figura 2.10. Esta configuração mantém o ganho igual a um ($A_{v0} = 0dB$). A análise de transiente (comando SPICE .TRAN) ocorre no domínio do tempo.

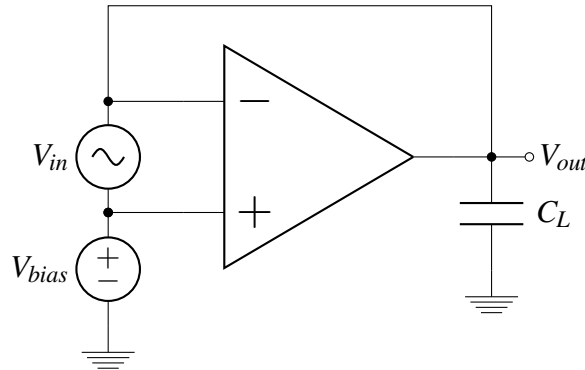


Figura 2.10: Circuito OTA em malha fechada.

O *Slew Rate* (SR) é uma medida da velocidade de resposta do circuito (TUMA; BÜRMEIN, 2009), sua unidade é volt por microsegundo ($V/\mu s$). Para realizar a medida de SR, aplica-se uma função degrau na entrada do circuito e mede-se a máxima inclinação ($\Delta V/\Delta t$) da resposta, geralmente obtidas dos pontos 10% e 90% da rampa de subida como ilustrado na Figura 2.11.

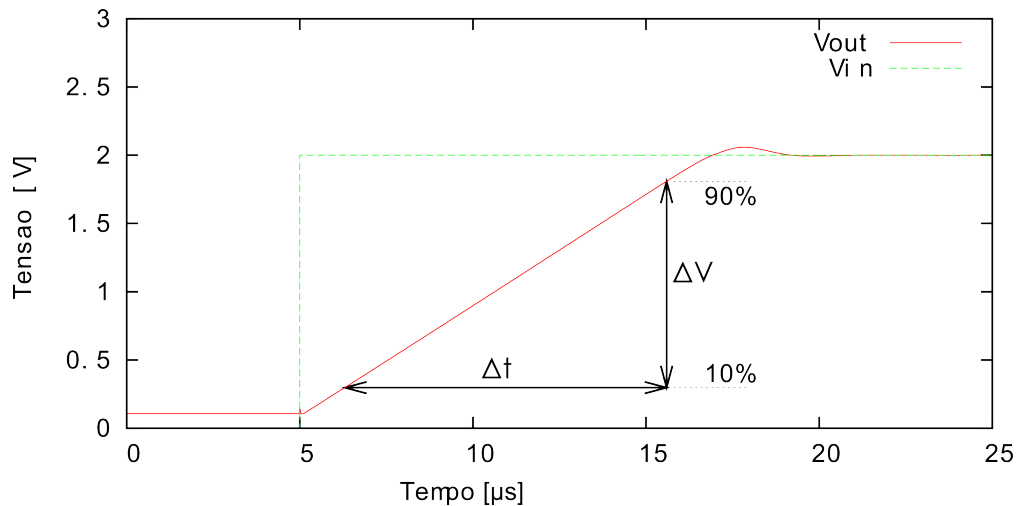


Figura 2.11: Resposta à função degrau de grandes sinais utilizada para a extração do *Slew Rate*.

2.4 O ciclo manual de projetos

Hjalmarson (2003) divide o desenvolvimento eletrônico em três níveis:

1. Componente;

2. Circuito (ou célula);
3. Sistema.

O projeto do OTA encontra-se ao nível de Circuito e requer semanas para ser executado (HJALMARSON, 2003). Dentro do contexto de sistemas *Mixed-Signal*, o desenvolvimento de células analógicas é um gargalo considerável. Podem existir dezenas de métricas de desempenho e o projetista precisa conhecer o efeito dos parâmetros de dimensionamento do circuito sobre estas métricas. Mesmo conhecendo todas as relações é difícil para o ser humano identificar o resultado que uma sequência de ajustes de parâmetros irá causar (HJALMARSON, 2003). O ciclo manual de projetos, com seus muitos ciclos de revisão, é ilustrado na Figura 2.12, onde a região assinalada mostra o escopo de otimização adotado neste trabalho, com foco no dimensionamento de componentes.

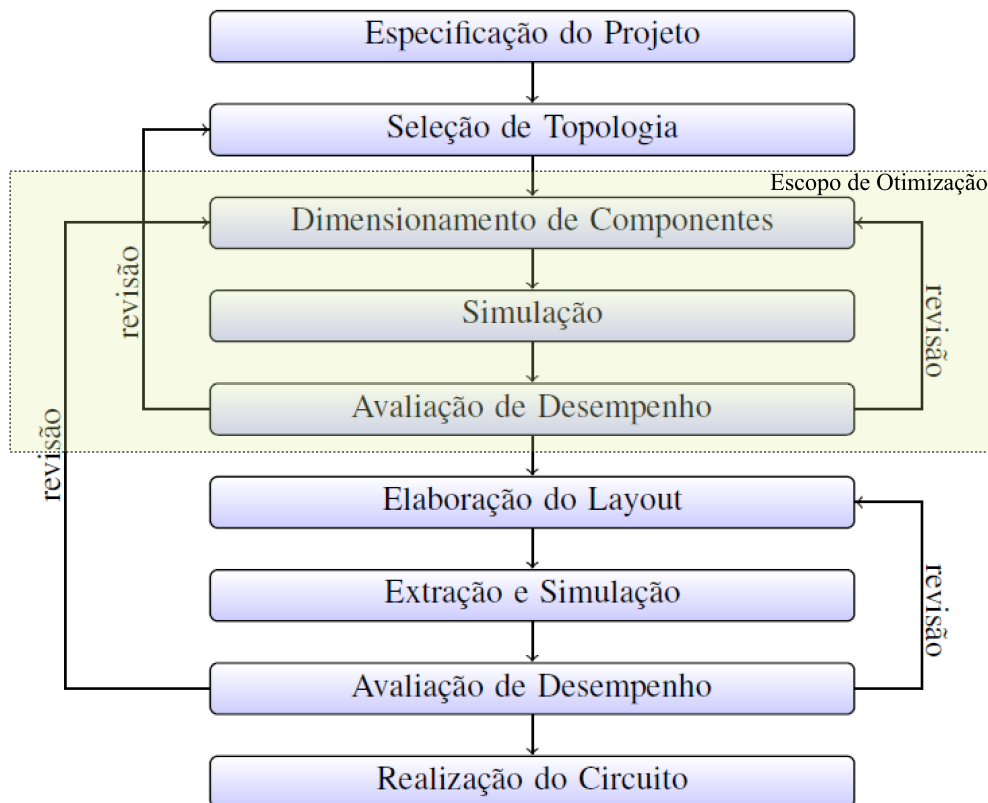


Figura 2.12: Fluxo de projeto manual de circuitos integrados analógicos e o escopo de otimização adotado neste trabalho, adaptado de Hjalmarson (2003).

A *Simulação* SPICE é utilizada como etapa de verificação, não como ferramenta de otimização. O projetista dispõe de simplificações, equações de primeira ordem, para fazer o ajuste de parâmetros do projeto do OTA. Segundo Hjalmarson (2003) outra questão fundamental é o desempenho do processo de produção: as variações de processo precisam ser consideradas dentro da simulação

com o método de Monte Carlo, ou o resultado pode não ser adequado⁵. Ainda segundo Hjalmarson (2003), os principais inconvenientes do projeto manual são:

1. Demorado e portanto caro;
2. Exploração insuficiente do espaço de busca (baixa utilização da tecnologia existente de processo);
3. Baixo reaproveitamento de projetos anteriores;
4. Alto risco de introdução de erros;
5. Variações de processo não são consideradas na fase de projeto.

A abordagem desenvolvida neste trabalho engloba os quatro primeiros itens desta lista, sendo o quinto item uma questão a ser abordada em trabalhos futuros.

⁵Variações de Processo não são consideradas neste trabalho, mas colocadas como uma questão para trabalhos futuros.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONTEXTUALIZAÇÃO

“There is the genetical or evolutionary search by which a combination of genes is looked for, the criterion being the survival value. The remarkable success of this search confirms to some extent the idea that intellectual activity consists mainly of various kinds of search.”

Intelligent Machines
Alan Turing, 1942

3.1 Algoritmos Evolucionários

O termo *Computação Evolucionária*, relativamente novo, foi criado em 1991, e representa os esforços de unificação entre as três linhas principais de pesquisa em *Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms - GA)*, *Estratégias de Evolução (Evolution Strategies - ES)* e *Programação Evolucionária (Evolutionary Programming - EP)*(FOGEL, 1994). Atribui-se aos seguintes autores o pioneirismo em cada uma destas linha de pesquisa:

- a) GA: John Holland, 1967;
- b) ES: Ingo Rechenberg, 1965;
- c) EP: Lawrence Fogel, 1966.

O termo *Algoritmos Evolucionários (Evolutionary Algorithms - EA)* aplica-se igualmente a GA, ES e EP e às variações destes algoritmos que seguem o paradigma computacional *neo-darwiniano* de simulação computacional da evolução de sistemas naturais. Este paradigma, conforme Bäck, Hammel e Schwefel (1997), se baseia nos princípios de evolução natural de Darwin que são *reprodução, variação e seleção*. Os EAs são algoritmos estocásticos porque a variação aleatória é um aspecto importante deste paradigma computacional. A estrutura básica de um EA é dada pelo Algoritmo 1, onde t é número da geração e $P(t)$ é a população da geração t .

Conforme o autor De Jong (2002, pg.23), pode-se encontrar nas idéias influentes de Sewall Wright (1932) a conexão entre o processo evolutivo e a *otimização*. Sendo o genótipo o espaço

Algoritmo 1: Algoritmo Evolucionário

início

```

  t := 0
  inicialize[P(t)]
  avalie[P(t)]
  enquanto ¬termino faça
    P'(t) := variação[P(t)]
    avalie[P'(t)]
    P[(t+1)] := selecione[P'(t)]
    t := t + 1

```

de busca e a *função de aptidão* uma convolução do genótipo ao fenótipo, Wright visualizava um sistema evolucionário explorando o espaço de genótipos em busca de picos de uma *função de aptidão* multi-modal. A busca pela sobrevivência leva as populações a se aglomerarem em regiões próximas aos picos, formando nichos e especiação. A função de Schwefel na Figura 3.1 é um exemplo de paisagem artificial dada por uma *função de aptidão*.

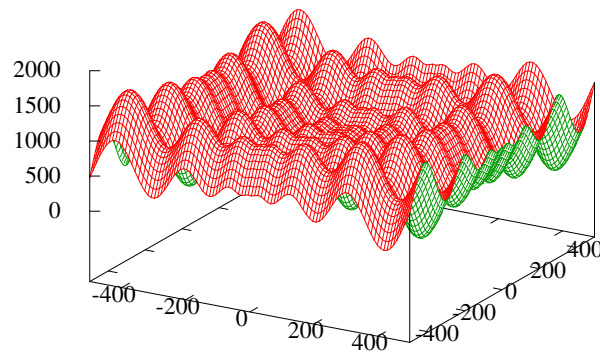


Figura 3.1: Função de aptidão artificial de Schwefel dada pela equação

$$f(x) = 418.9829 \cdot n - \sum_{i=1}^n \sin\left(\sqrt{|x_i|}\right).$$

O processo de evolução simulado por computador e aplicado a problemas de otimização resulta em uma técnica de otimização estocástica eficiente em problemas complexos (FOGEL, 1994). Contudo, o Teorema da Inexistência do Almoço Grátis (*There is No Free Lunch - NFL*) (WOLPERT; MACREADY, 1997) determina que a superioridade relativa de desempenho de um algoritmo em uma determinada classe de problemas implica em uma compensação de ineficiência relativa em outras classes. Schwefel (1997) considera que, para um determinado domínio de problemas, na existência de algoritmos tradicionais os EAs não devem ser utilizados devido às implicações do NFL. Os EAs são, no entanto, uma excelente alternativa quando depara-se com problemas *não diferenciáveis*, *descontínuos*, *multimodais*, *ruidosos* ou com múltiplos objetivos.

3.1.1 Representação Genética

A representação é um aspecto fundamental dos EAs. A sua escolha correta deve permitir a codificação de parâmetros e a avaliação das soluções. Segundo De Jong (2002, p. 185), as propriedades de uma boa representação são: a) deve capturar as características importantes do domínio de aplicação que são necessárias para a solução efetiva de problemas e; b) deve permitir a utilização de operadores de reprodução efetivos. Estes operadores de reprodução são *cruzamento* e *mutação* (GOLDBERG, 1989).

Os sistemas biológicos possuem sua codificação através das cadeias de DNA e RNA, chamadas de *cromossomos*. O espaço de soluções possíveis de sistemas biológicos chama-se *genoma* e a sua realização *genótipo*. Antes de manifestar as características do *fenótipo*, relacionadas aos sistemas artificiais com a *função de aptidão*, os indivíduos biológicos passam por um processo de desenvolvimento chamado *ontogenia* até manifestar as características de indivíduos adultos (BANZHAF et al., 1998). Na Tabela 3.1 apresenta-se a comparação da terminologia Biológica e a correspondência em GAs.

Tabela 3.1: Terminologia Biológica e os significados correspondentes em GAs (GOLDBERG, 1989, p. 22).

Biologia	Algoritmos Genéticos
cromossomo	cadeia de caracteres
gene	característica
alelo	valor da característica
locus	posição na cadeia de caracteres
genótipo	estrutura/conjunto de parâmetros
fenótipo	decodificação da estrutura/parâmetros
epístase	não linearidade

Os sistemas de evolução artificial, os EAs, não obrigatoriamente necessitam da simulação do processo de *ontogenia*, segundo Banzhaf et al. (1998). Os aspectos necessários à evolução apontados por este autor são:

- a) Uma população de indivíduos capazes de se reproduzir;
- b) Variação de indivíduos, afetando a probabilidade de sobrevivência;
- c) Hereditariedade na reprodução;
- d) Competição pela sobrevivência.

Os operadores de reprodução, *cruzamento* e *mutação*, correspondem respectivamente às habilidades de *aproveitamento* (exploit) e *exploração* (explore) dos EAs. Ainda, segundo De Jong (2002), o operador de *cruzamento* deve ser pensado como um meio de aproveitamento de características interessantes de duas ou mais soluções da população para uma nova solução¹. O operador de *mutação*, por sua vez, deve ser pensado como um operador de *perturbação*, permitindo a busca nas vizinhanças da solução.

As representações comuns de EAs são:

- a) Sequência Binária;
- b) Vetores de Números Reais;
- c) Sequências de Números Inteiros;
- d) Estruturas de Grafos e Árvores;
- e) Representações Híbridas.

Para o problema de otimização apresentado neste trabalho as representações adequadas são *Sequência Binária* e *Vetores de Números Reais*. Os demais tipos de representação encontram aplicação em problemas combinatoriais (Sequências de Números Inteiros) e topológicos (Grafos e Árvores), como no caso específico de Programação Genética (*Genetic Programming* - GP) aplicado à evolução de topologias de circuitos eletrônicos.

3.1.2 O Algoritmo Genético Canônico

Os GAs, conforme Goldberg (1989, p. 7), possuem as seguintes características:

- a) GAs trabalham com codificações de parâmetros, não com os parâmetros diretamente;
- b) GAs trabalham com populações de pontos (soluções codificadas), não com um único ponto;
- c) GAs utilizam informação da *função de aptidão*, não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- d) GAs utilizam regras de transição probabilísticas, não regras determinísticas.

¹Esta troca de segmentos de informação é particularmente difícil em estruturas complexas como grafos (EP desenvolvida sobre Máquinas de Estado Finito é um bom exemplo: utiliza apenas *mutação*)

Os parâmetros no GA original são representados por uma cadeia de bits ou por caracteres de um alfabeto finito². O GA canônico é apresentado no Algoritmo 2, que é inicializado com uma população formada aleatoriamente dentro do espaço de busca, então cada indivíduo da população é avaliado por uma *função de aptidão* e selecionados para a reprodução através de *cruzamento* e *mutação*, formando a população descendente que será novamente avaliada e selecionada em um ciclo geracional até que atinja-se um critério de término. O critério de término pode ser, por exemplo, um determinado número de gerações ou um nível de aptidão escolhido previamente.

Algoritmo 2: O Algoritmo Genético Canônico.

início

$t = 0$

inicialize aleatoriamente $P(t)$

enquanto \neg *término* **faça**

para cada $i, 1 \leq i \leq n$

/* $n = \langle$ tamanho da população \rangle */

faça

 ▮ avalie a aptidão $f_i(x_i), x_i \in P(t)$

para cada $i, 1 \leq i \leq n$ **faça**

 ▮ obtenha através de seleção proporcional $x_{sel} \in P(t)$ e armazene em $O(t)$

para cada $i, 0 \leq i \leq (\frac{n}{2} - 1)$ **faça**

 ▮ com probabilidade p_{cross} aplique cruzamento em $x_{2i+1}, x_{2i+2} \in O(t)$

 ▮ com probabilidade p_{mut} aplique mutação em $x_{2i+1}, x_{2i+2} \in O(t)$

$P(t+1) = O(t)$

$t = t + 1$

O primeiro passo do GA é criar uma população aleatória de soluções e obter a avaliação de cada solução (*função de aptidão*).

O segundo passo é fazer a seleção dos indivíduos mais aptos para a geração seguinte. No GA canônico isto é feito estocasticamente através da *seleção proporcional* ou *método da roleta*. Indivíduos são selecionados com probabilidade proporcional à sua *aptidão*, até que a população de descendentes tenha o mesmo tamanho da população de ancestrais. A amostragem é feita com reposição, isto significa que o mesmo indivíduo pode ser selecionado mais de uma vez.

O passo seguinte do GA é realizar o *cruzamento* e *mutação* dos indivíduos selecionados. Por exemplo, supondo que o processo de *Seleção* produziu uma cópia do indivíduo A_1 duas cópias do indivíduo A_2 e uma cópia do indivíduo A_4 , os pares para cruzamento são selecionados aleatoriamente com uma probabilidade de cruzamento escolhida como parâmetro do GA. O cruzamento de um ponto é ilustrado na Tabela 3.2, tendo a função de fragmentar o cromossomo de cada ascendente e recombiná-los para produzir os descendentes.

²O Teorema dos Esquemas de Holland implica que alfabetos de baixa cardinalidade produzem melhor desempenho nos GAs. Esta implicação é objeccionada por Altenberg (1994), como será discutido adiante.

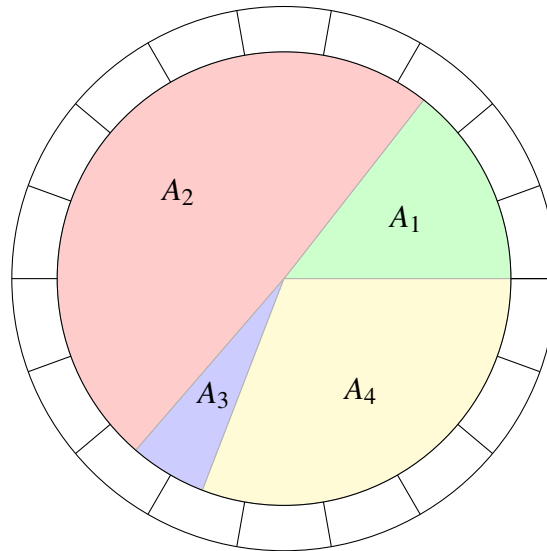


Figura 3.2: Método da Roleta ou Seleção Proporcional adaptado de Goldberg (1989).

Tabela 3.2: Exemplo de cruzamento em um GA simples ($t=0$) (GOLDBERG, 1989).

Seleção	Cruzamento	Ponto de Cruzamento	Novo Indivíduo	x	Aptidão $f(x)$
0110 1	A_2	4	01100	12	144
1100 0	A_1	4	11001	25	625
11 000	A_4	2	11011	27	729
10 011	A_2	2	10000	16	256
Total					1754

Após realizado o cruzamento dos indivíduos, aplica-se o operador de *mutação* que consiste em alterar estes indivíduos aleatoriamente com uma baixa probabilidade. O processo é repetido até que atinja-se um critério de término do algoritmo.

Segundo De Jong (2002, p. 68–69) não há uma regra explícita para os mecanismos de reprodução, estes operadores devem ser utilizados através de um balanço adequado entre *aproveitamento* (*exploit*) e *exploração* (*explore*) para produzir uma boa evolução da *aptidão* da população, conforme mencionado anteriormente.

3.1.2.1 Módulos de População

O modelo apresentado de GA chama-se *Geracional*, onde entre duas gerações a população de ascendentes é substituída completamente pela população de descendentes. Os módulos de população podem ser os seguintes (De Jong, 2002):

- a) *Geracional*: a população de descendentes substitui completamente a população de ascendentes;
- b) *Elitismo*: os k melhores indivíduos são copiados para a população de descendentes, geralmente

$k = 1$ (De Jong, 2002);

- c) *Estática (Steady State)*: os piores ascendentes são substituídos por novos descendentes, em algumas implementações a seleção é probabilística. Neste caso perde-se o conceito de geração;
- d) *Estratégia ($\mu + \lambda$)*: introduzido pelas Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies - ES*), a população de ascendentes de tamanho μ gera λ descendentes e a seleção é feita sobre a união das duas populações de tamanho $\mu + \lambda$;

3.1.3 Teorema dos Esquemas de Holland

A prova da convergência dos GAs é um dos pontos centrais da teoria dos EAs e foi originalmente feita através do teorema aqui apresentado. Através deste teorema justifica-se a aplicabilidade dos GAs como algoritmos de otimização.

O Teorema dos Esquemas de Holland, conforme os autores Langdon e Poli (2002, p. 33), aplica-se somente ao contexto dos GAs mais simples que utilizam representação binária, seleção proporcional, mutação de bits e cruzamento de um único ponto. Fora deste contexto a utilidade do Teorema dos Esquemas é questionável (ALTENBERG, 1994). Apesar disto estes autores esclarecem que não há exatamente um problema com o teorema, mas na sua superinterpretação: uma das suas *consequências* é que os alfabetos de baixa cardinalidade promovem a reprodução dos esquemas favoráveis mais rapidamente do que alfabetos de alta cardinalidade, sugerindo que a representação binária é superior para a convergência do que a representação em ponto flutuante. Hoje muitos EAs utilizam representação em ponto flutuante com excelente desempenho. Conforme LANGDON; POLI a maior utilidade do Teorema dos Esquemas é sua forma concisa de descrever o funcionamento dos GAs.

Um esquema (ou padrão de similaridade), no contexto dos GAs mais simples, consiste em uma sequência de símbolos do conjunto $\{0, 1, *\}$, onde $*$ significa “não importa”, ou seja: pode assumir qualquer valor. Por exemplo um esquema $*10*1$ representa igualmente: 01001, 01011, 11001 e 11011. O número de elementos diferentes de $*$ em um esquema é chamado de *ordem* do esquema e é representado por $\mathcal{O}(H)$. A maior distância entre dois elementos diferentes de $*$ é chamada de *comprimento* do esquema e é representada por $\mathcal{L}(H)$. O número esperado de cromossomos em uma população pertencendo ao esquema H então é (LANGDON; POLI, 2002):

$$E[m(H, t + 1)] \geq m(H, t) \cdot \frac{f(H, t)}{\bar{f}(t)} \cdot (1 - p_m)^{\mathcal{O}(H)} \cdot \left[1 - p_{xo} \frac{\mathcal{L}(H)}{N - 1} \left(1 - \frac{m(H, t)f(H, t)}{M\bar{f}(t)} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde,

- a) $m(H, t)$ = Número de sequências que pertencem ao esquema H na geração t ;
- b) $f(H, t)$ = Função de aptidão média das sequências que pertencem ao esquema H ;
- c) $\bar{f}(t)$ = Função de aptidão média da população;
- d) p_m = Probabilidade de mutação (por bit);
- e) p_{xo} = Probabilidade de cruzamento;
- f) N = Número de bits dos cromossomos;
- g) M = Número de indivíduos na população;
- h) $E[m(H, t + 1)]$ = Número esperado de sequências pertencentes ao esquema H na próxima geração.

Os efeitos da seleção correspondem ao termo $\frac{f(H,t)}{\bar{f}(t)}$ que corresponde à probabilidade de seleção do esquema H , os efeitos da mutação são contabilizados por $(1 - p_m)^{\ell(H)}$ e corresponde à probabilidade do esquema H não sofrer mutação e os efeitos do cruzamento são contabilizados por $\left[1 - p_{xo} \frac{\mathcal{L}(H)}{N-1} \left(1 - \frac{m(H,t)f(H,t)}{M\bar{f}(t)}\right)\right]$ e correspondem à probabilidade do esquema H não ser dividido pela operação de cruzamento. O Teorema dos Esquemas evita a ambiguidade dos eventos aleatórios de seleção, recombinação e mutação utilizando a média da ocorrência destes eventos.

A Equação (3.1) sugere que os esquemas com melhor *aptidão* são preservados para a próxima geração baseados na pressão seletiva e considera de forma pessimista os efeitos de variação causada pelo *cruzamento* e *mutação*, considerando como efeito possível somente o rompimento do esquema.

3.1.4 Teorema da Seleção e Covariância de Price

Altenberg (1994) demonstrou que o Teorema dos Esquemas de Holland pode ser derivado do Teorema da Seleção e Covariância de Price. O autor critica o Teorema dos Esquemas porque ele falha em capturar o conceito de desempenho dos GAs, onde descendentes com *aptidão* acima da média podem ser produzidos pela recombinação de ascendentes também com *aptidão* acima da média. O Teorema de Price preenche esta lacuna porque mostra como as propriedades macroscópicas de uma população podem ser derivadas da dinâmica microscópica do GA, combinadas com uma métrica apropriada: a *aptidão*³. Quando a métrica é a *aptidão*, obtém-se a evolução da *aptidão*

³A *aptidão* está diretamente relacionada com *seleção* e *reprodução*. Indivíduos com maior *aptidão* são capazes de gerar mais descendentes. Na equação de Price, a quantidade de descendentes z está diretamente relacionada com a *aptidão*.

sobre uma geração, quando a métrica é a frequência de um *esquema*, obtém-se a evolução de um *esquema* sobre uma geração. Desta forma, mudando a métrica do Teorema de Price para frequências de *esquemas* o Teorema de Price expressa o Teorema dos Esquemas.

O Teorema da Seleção e Covariância de Price, conforme o original e Altenberg (1994), Langdon e Poli (2002) aplica-se à toda sorte de sistemas evolutivos em particular aos *Algoritmos Genéticos* (GA).

“Gene frequency change is the basic event in biological evolution. The following equation, which gives frequency change under selection from one generation to the next for a single gene or for any linear function of any number of genes at any number of loci, holds for any sort of dominance or epistasis, for sexual or asexual reproduction, for random or nonrandom mating, for diploid, haploid or polyploid species, and even for imaginary species with more than two sexes.”

Price (1970)

O Teorema da Seleção e Covariância é formulado por,

$$\Delta Q = \frac{cov(z, q)}{\bar{z}} + \frac{\sum z_i q_i}{N\bar{z}}, \quad (3.2)$$

onde ΔQ é a variação da frequência de um gene A entre as populações de ascendentes P_1 e descendentes P_2 , z é o número de descendentes na população P_2 que possuem o gene A , z_i é o número de descendentes do indivíduo i , q é a frequência do gene A nos descendentes z , q_i é a frequência do gene A nos descendentes de z_i , N é o número de indivíduos na população P_1 e \bar{z} é a média de descendentes gerados entre P_1 e P_2 .

O termo $\frac{\sum z_i q_i}{N\bar{z}}$ refere-se à *deriva genética* causada pelos operadores de recombinação e mutação. Se estes operadores são aleatórios a respeito do gene A , então em grandes populações este termo tende à zero (PRICE, 1970). Neste caso, temos

$$\Delta Q = \frac{cov(z, q)}{\bar{z}}. \quad (3.3)$$

Conforme De Jong (2002, p. 162–163), o Teorema de Price oferece uma heurística para o desenho de EAs, com objetivo no desempenho da evolução. Apesar de Price focar-se na frequência de genes, a equação é mais geral e pode ser utilizada para qualquer característica mensurável entre as populações de ascendentes e descendentes. Se estamos interessados na variação da aptidão média entre as populações, o termo da covariância na Equação (3.2) representa a contribuição feita pela seleção. O segundo termo representa a contribuição feita pelos operadores de reprodução.

A perspectiva de Price permite avaliar o impacto das combinações entre os métodos de seleção e reprodução para o desempenho evolutivo dos EAs (De Jong, 2002).

3.1.5 Codificação Genética por números Reais

Em espaços de busca contínuos, são encontrados alguns problemas com a representação binária (DEB, 2001). Dentre eles temos os abismos de Hamming (por exemplo entre as sequências 01111 e 10000) onde para uma transição vizinha no espaço real necessitamos a alteração de muitos bits. Os abismos de Hamming impedem a busca gradual no espaço contínuo. Outra dificuldade causada pela representação binária é a impossibilidade de alcançar uma precisão arbitrária para a solução ótima, a granulação do espaço de busca binário é determinada a priori em GAs.

Por outro lado, a representação através de números reais possui implicações quanto ao processamento de perturbações, sejam mutações ou cruzamentos (DEB, 2001). Enquanto a representação binária requer a simples inversão de bits para mutação e cópia de segmentos para o cruzamento, GAs com representação real requerem tratamento especial.

GOLDBERG introduziu o conceito de alfabetos virtuais criados pelo mecanismo de seleção de GAs. O argumento de GOLDBERG é que soluções acima da média, sobreviventes do processo de seleção, concentram-se em sub-regiões do espaço de decisão criando *caracteres virtuais* de um alfabeto finito. Após algumas gerações de codificação real tratam o espaço de busca contínuo como se fosse um espaço de busca discreto, atuando da mesma maneira que GAs binários (Figura 3.3).

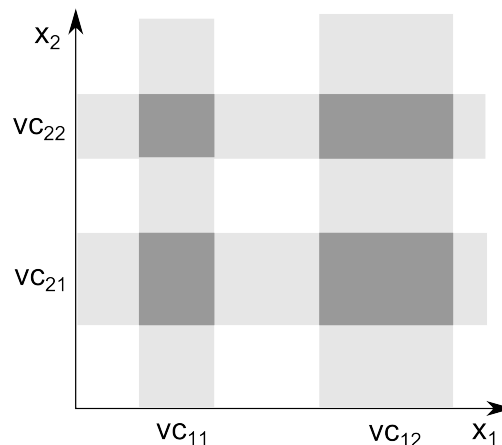
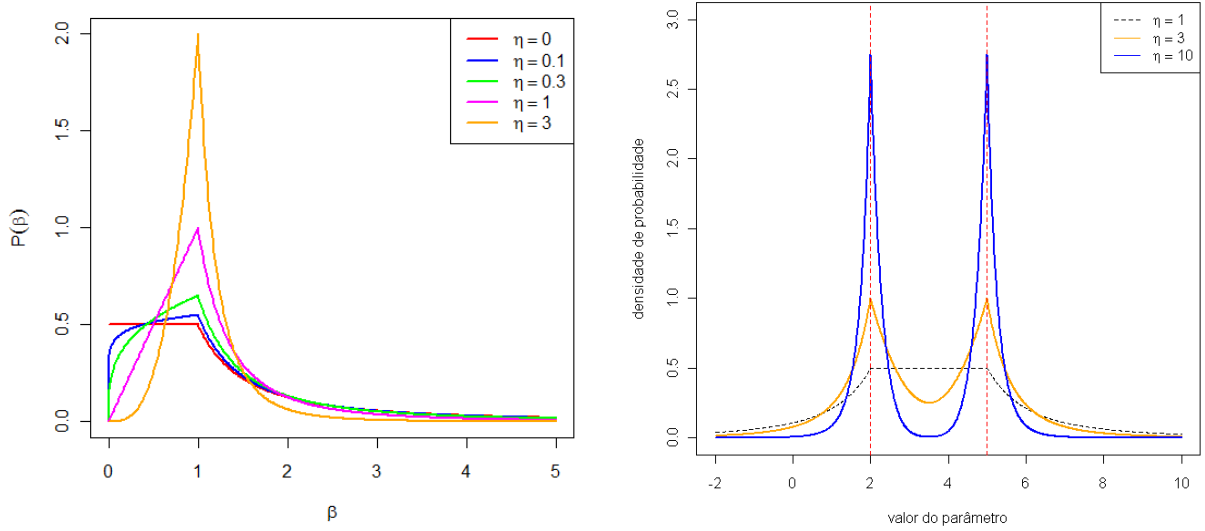


Figura 3.3: Caracteres virtuais em um espaço contínuo de busca de 2 variáveis (GOLDBERG, 1990).

3.1.5.1 Cruzamento Binário Simulado (SBX)

Dentre os vários métodos de cruzamento para GAs com representação através de vetores de números reais, destaca-se o Cruzamento Binário Simulado (SBX) (DEB; AGRAWAL, 1994). Como seu nome indica, este operador simula o cruzamento de um ponto entre sequências binárias. O conceito básico deste operador é respeitar os intervalos entre *schemata* preservando-os nos descendentes.



(a) Distribuição probabilística do operador SBX em função de β para vários valores de η .

(b) Exemplo da distribuição probabilística do operador SBX, para cruzamento de pais com valores 2.0 e 5.0 e vários valores de η .

Figura 3.4: Distribuição probabilística do operador SBX.

Sejam $x_i^{(1,t)}$ e $x_i^{(2,t)}$ os valores do i -ésimo parâmetro de dois vetores selecionados para cruzamento na geração t . O fator β_i é definido como a razão absoluta entre a diferença dos i -ésimos valores entre descendentes e pais,

$$\beta_i = \left| \frac{x_i^{(2,t+1)} - x_i^{(1,t+1)}}{x_i^{(2,t)} - x_i^{(1,t)}} \right|. \quad (3.4)$$

Os descendentes de uma operação de cruzamento através do operador SBX são determinados pela função probabilística

$$P(\beta_i) = \begin{cases} 0.5(\eta_c + 1)\beta_i^{\eta_c}, & \text{se } \beta_i \leq 1; \\ 0.5(\eta_c + 1)\frac{1}{\beta_i^{\eta_c+2}}, & \text{em outro caso,} \end{cases} \quad (3.5)$$

ilustrada na Figura 3.4(a) e exemplificada na Figura 3.4(b).

3.1.5.2 Mutação Polinomial

A *Mutação Polinomial* foi utilizada pela primeira vez no algoritmo *GeneAS*, introduzido por Deb e Goyal (1996), para a utilização em conjunto do operador SBX. É dada pela função probabilística

$$P(\delta) = 0.5(\eta_m + 1)(1 - |\delta|)^{\eta_m}, \quad (3.6)$$

onde:

$$\delta = \begin{cases} (2r)^{1/(\eta_m+1)} - 1, & \text{se } r < 0.5 \\ 1 - [2(1-r)]^{1/(\eta_m+1)}, & \text{se } r \geq 0.5 \end{cases}, \quad (3.7)$$

e r é um número aleatório de distribuição uniforme no intervalo $0 \leq r < 1$.

3.2 Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos

Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos (*Multi-Objective Evolutionary Algorithms* MOEA), de acordo com Coello (2006), surgiram pela primeira vez em 1983 por David Schaffer através de seu *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (VEGA), Algoritmo 3. Este MOEA consiste de um GA com um mecanismo de seleção modificado: A cada geração sub-populações são criadas para cada objetivo e sobre estas sub-populações é aplicada seleção proporcional. Estas sub-populações são embaralhadas após a seleção e então aplica-se *cruzamento* e *mutação* de modo usual. VEGA possui a habilidade de reter soluções acima da média e boas candidatas à *Frenteira de Pareto*, mas conforme GOLDBERG as soluções extremas de cada objetivo são perdidas, restando somente as soluções próximas ao centro da *Frenteira de Pareto*. Nesta crítica ao VEGA, Goldberg (1989, p. 199–201) propõe originalmente a utilização de *dominância Pareto* para MOEAs aplicados a problemas de múltiplos objetivos.

Algoritmo 3: *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (SCHAFER, 1984 apud DEB, 2001, p. 179–184)

início

$t = 0$

para cada $i, 1 \leq i \leq n$ **faça**

 inicialize $x_i \in P(t)$

 /* $n = \langle \text{tamanho da população} \rangle$ */

$q = n/m$

 /* $m = \langle \text{número de objetivos} \rangle$ */

enquanto \neg *término* **faça**

 embaralhe $P(t)$

 divida $P(t)$ em q subpopulações

para cada $j, 1 \leq j \leq q$ **faça**

para cada $i, 1 \leq i \leq q$ **faça**

 avale a aptidão $f_i^j(x_i)$

 faça seleção proporcional em $P^j(t)$ armazenando em $O^j(t)$

$O(t) = \bigcup_{j=1}^q O^j(t)$

 aplique cruzamento e mutação em $O(t)$

$P(t+1) = O(t)$

$t = t + 1$

Conforme Coello (2006), por muitos anos após a introdução do VEGA, os pesquisadores adotaram soluções como: funções de agregação lineares, funções de agregação não-lineares e ordenação lexicográfica. Na perspectiva deste autor, os verdadeiros MOEAs surgiram entre 1989 e 1998 e compõem a primeira geração. Estes MOEAs seguem basicamente as idéias de Goldberg (1989, p. 199) utilizando a ordenação por *dominância Pareto* e uma técnica de manutenção da diversidade para evitar a convergência em um único ponto. As principais técnicas de tratamento de objetivos são mostradas na Figura 3.5. As técnicas principais de manutenção da diversidade utilizadas nos MOEAs são *Modelo de Apinhamento* e *Compartilhamento de Aptidão*.

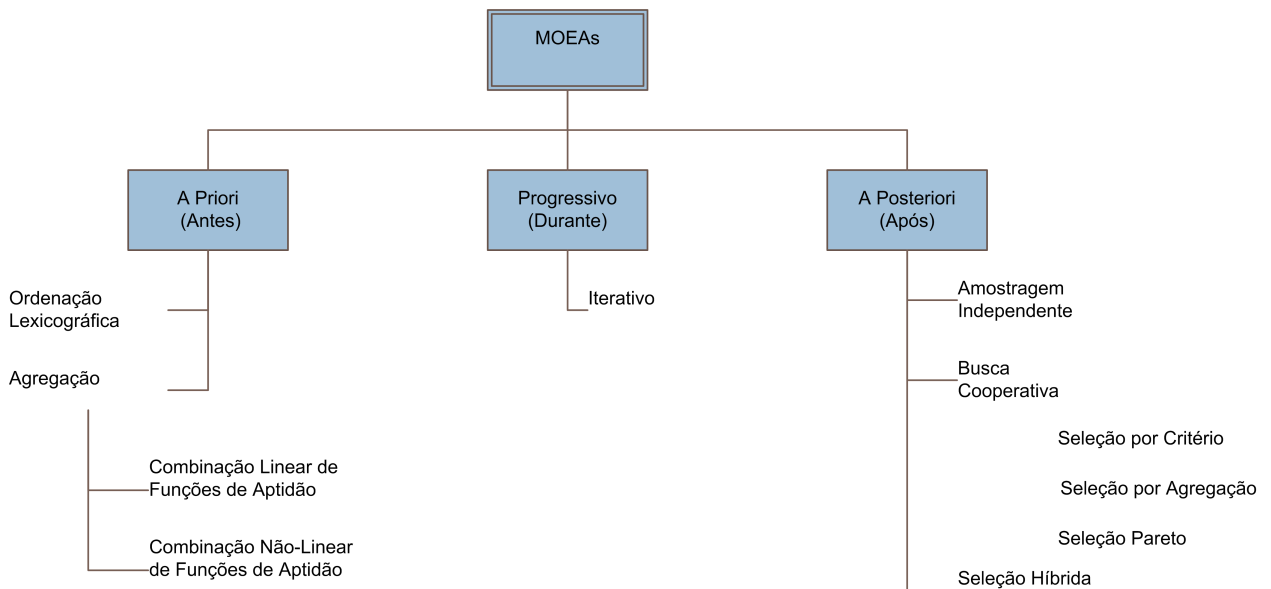


Figura 3.5: Classificação de MOEAs quanto ao tratamento de relações de compromisso entre os objetivos (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2006).

3.2.1 Modelo de Apinhamento

Conforme Deb (2001, p. 149), esta técnica foi introduzida por De Jong (1975) em sua tese de doutorado. Como o nome sugere, esta técnica desfavorecia o *apinhamento* de soluções em qualquer região do espaço de objetivos. No GA de De Jong, somente uma proporção da população era permitida reproduzir a cada geração. Soluções com um *fator de apinhamento* escolhido aleatoriamente eram comparadas com o novo descendente e este substituiu a solução com maior similaridade, desta forma a diversidade era preservada. A principal contribuição da tese de De Jong foi a sugestão de substituição de uma solução por outra similar na manutenção de soluções ótimas em problemas multi-modais.

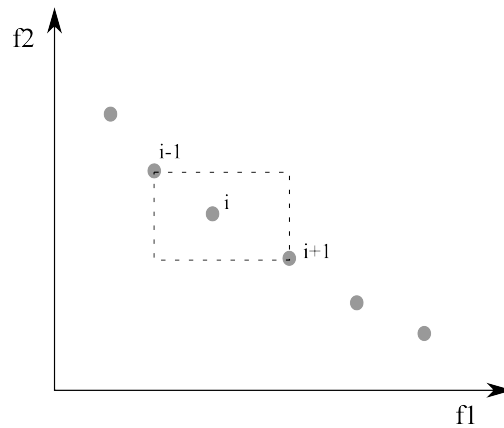


Figura 3.6: Distância de apinhamento, adaptado de Deb (2001).

A métrica *distância de apinhamento*, descrita em detalhes no algoritmo 6, é a implementação deste modelo. A figura 3.6 ilustra o conceito de distância de apinhamento, dada pelo semiperímetro normalizado formado pelas soluções vizinhas e no caso de soluções extremas, é atribuído um valor infinito. Para evitar-se o efeito de magnitudes diferentes entre os objetivos, as distâncias devem ser normalizadas.

3.2.2 Modelo de Compartilhamento de Aptidão

Goldberg e Richardson (1987) apud (DEB, 2001, p. 149), sugeriram que ao invés de substituir uma solução por outra similar, deveria-se degradar a aptidão de soluções similares. Este modelo foi utilizado na maioria dos estudos subsequentes de GAs envolvendo problemas multimodais. Neste cenário o interesse é encontrar q soluções ótimas, correspondentes aos picos da função de aptidão multimodal, utilizando-se uma população de tamanho N . Se $q \ll N$, o EA para trabalhar adequadamente com cada q (nicho) precisa de uma subpopulação de tamanho adequado. Sendo m_i o tamanho da subpopulação i e f_i a aptidão da solução ótima i , $i \in 1 \dots q$, então,

$$\frac{f_1}{m_1} = \frac{f_2}{m_2} = \dots = \frac{f_q}{m_q} \quad (3.8)$$

apesar do princípio ser razoável para manter a diversidade de uma população ele esbarra em um problema prático que é o conhecimento de antemão sobre as soluções ótimas verdadeiras. De acordo com Deb (2001) a solução é utilizar uma estratégia adaptativa onde o compartilhamento de aptidão é utilizado para estimar o número de soluções pertencentes a cada ótimo.

3.3 Múltiplos Objetivos e Dominância Pareto

A *Dominância Pareto* aplica-se aos problemas de otimização de múltiplos objetivos quando estes são conflitantes e não estabelecemos preferências *à priori*. Quando os objetivos não são conflitantes, a cardinalidade do conjunto Pareto ótimo (\mathcal{PF}^*) reduz-se a uma única solução no espaço de objetivos. A Figura 3.7 ilustra o contexto do mapeamento do *espaço de decisão* ao *espaço de objetivos*.

Os conceitos e definições apresentados a seguir, comuns a diversos autores da área de Algoritmos Evolucionários de Múltiplos Objetivos (MOEAs), são baseados nos trabalhos de Knowles, Thiele e Zitzler (2006) e Zitzler et al. (2002).

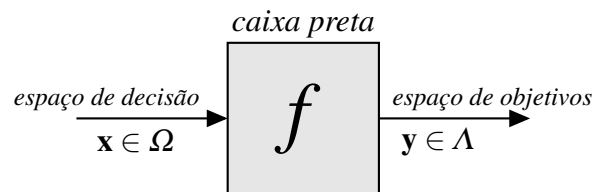


Figura 3.7: Função de mapeamento do *espaço de decisão* ao *espaço de objetivos*. Adaptado de (ZITZLER et al., 2002)

Definição 1. Um problema de otimização consiste em encontrar o vetor ótimo do espaço de decisão $\mathbf{x}^* \in \Omega$ que minimize (ou maximize) a sua avaliação correspondente $\mathbf{y}^* \in \Lambda$ mapeada pela função $f : \Omega \rightarrow \Lambda$ tal que $\forall \mathbf{x} \in \Omega : f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x})$ (no caso de minimização) (Figura 3.7).

Quando o resultado da avaliação é um número escalar, ou seja: $\Lambda \subseteq \mathfrak{R}^m$ e $m = 1$, o conceito de ótimo é trivial conforme a definição 1. Quando a função de avaliação retorna um vetor do *espaço de objetivos*, $\Lambda \subseteq \mathfrak{R}^m$ e $m > 1$, a comparação escalar não é mais possível. Para definir um problema de múltiplos objetivos precisamos recorrer às relações de *Dominância Pareto*.

3.3.1 Relações Binárias Pareto

As relações binárias Pareto aplicam-se a vetores do *espaço de objetivos* e a conjuntos destes vetores, chamados de *conjuntos de aproximação Pareto*. Estas relações, no caso particular de vetores, estão ilustradas na Figura 3.8. Em seguimento são apresentadas as definições de cada relação.

Observa-se na Figura 3.8, para dois objetivos a serem minimizados, que a possui pelo menos um dos componentes melhor do que b ou c , portanto $a \prec b$ e $a \prec c$. O vetor a possui todos os componentes melhores que d , portanto $a \prec\prec d$. Os vetores b e c são melhores em objetivos distintos, portanto são incomparáveis $b \parallel c$ pois não há preferências estabelecidas entre os objetivos.

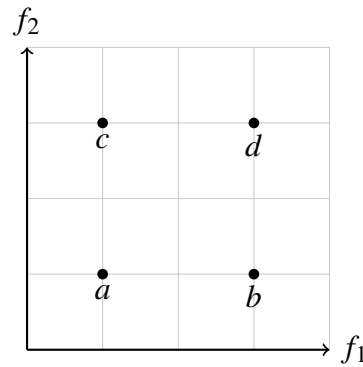


Figura 3.8: Relações binárias Pareto, considerando *minimização* dos objetivos f_1 e f_2 , verifica-se que: $a \prec b$, $a \prec c$, $a \prec d$, $a \ll d$, $a \preceq a$, $a \preceq b$, $a \preceq c$, $a \preceq d$, $b \prec d$, $b \preceq b$, $b \parallel c$, $c \prec d$, $c \preceq c$ e $c \parallel b$.

Quando são comparados vetores contendo múltiplos objetivos, as seguintes relações Pareto são aplicáveis (ZITZLER et al., 2002)(Tabela 3.3):

Tabela 3.3: Relações Pareto binárias para vetores objetivo.

relação	notação
dominância estrita	$u \ll v$
dominância	$u \prec v$
dominância fraca	$u \preceq v$
incomparável	$u \parallel v$

Definição 2. Dominância Pareto Estrita: Um vetor $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ domina estritamente outro vetor $v = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T$, denotado por $u \ll v$, se e somente se todos os componentes vetoriais de u são melhores que os componentes vetoriais correspondentes de v .

Definição 3. Dominância Pareto: Um vetor $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ domina outro vetor $v = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T$, denotado por $u \prec v$, se e somente se não existe componente vetorial em v melhor do que o correspondente em u e existe pelo menos um componente vetorial em u melhor do que seu correspondente em v .

Definição 4. Dominância Pareto Fraca: Um vetor $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ domina fracamente outro vetor $v = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T$, denotado por $u \preceq v$, se e somente se não existe componente vetorial em v melhor do que o correspondente em u .

Definição 5. Incomparabilidade Pareto: Um vetor $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ é incomparável a outro vetor $v = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T$, denotado por $u \parallel v$, se e somente se não $u \preceq v$ e não $v \preceq u$.

3.3.2 Conjunto Pareto e Fronteira de Pareto Ótimos

O *Conjunto Pareto Ótimo*, denotado por \mathcal{P}^* , é um conjunto de soluções no espaço de decisão Ω , que resultam na *Fronteira de Pareto Ótima*, denotada por \mathcal{PF}^* , quando mapeadas ao espaço de

objetivos Λ por uma função de avaliação $\mathbf{f} : \Omega \rightarrow \Lambda$ (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2006).

Definição 6. Conjunto Pareto Ótimo

$$\mathcal{PF}^* = \{x \in \Omega \mid \nexists x' \in \Omega : \mathbf{f}(x') \preceq \mathbf{f}(x)\}.$$

Definição 7. Fronteira de Pareto Ótima

$$\mathcal{PF}^* = \{y = \mathbf{f}(x) \mid \forall x \in \mathcal{PF}^*\}.$$

3.3.3 Conjuntos de Aproximação Pareto

Os resultados obtidos através dos MOEAs são conjuntos de aproximação à *Fronteira de Pareto* \mathcal{PF}^* . Estes conjuntos possuem propriedades conforme a Definição 8.

Definição 8. Conjunto de Aproximação Pareto: *Seja $\mathcal{A} \subseteq \Lambda$ um conjunto de vetores no espaço de objetivos. \mathcal{A} é chamado de Conjunto de Aproximação Pareto se $\forall y \in \mathcal{A} \mid \nexists y' \in \mathcal{A} : y \preceq y'$.*

As relações entre os *Conjuntos de Aproximação Pareto*, visualizadas na Figura 3.9, são definidas na Tabela 3.4 (ZITZLER et al., 2002).

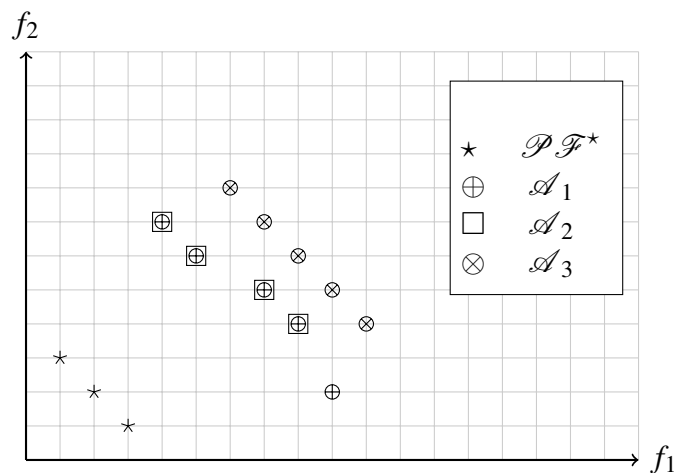


Figura 3.9: Relações entre Conjuntos de Aproximação para um problema de minimização de dois objetivos f_1 e f_2 . Observa-se que $\mathcal{A}_1 \prec \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_1 \prec \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_2 \prec \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_1$. $\mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_2$, $\mathcal{A}_1 \preceq \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_2 \preceq \mathcal{A}_2$, $\mathcal{A}_2 \preceq \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_3 \preceq \mathcal{A}_3$, $\mathcal{A}_1 \triangleleft \mathcal{A}_2$, $\mathcal{A}_1 \triangleleft \mathcal{A}_3$ e $\mathcal{A}_2 \triangleleft \mathcal{A}_3$.

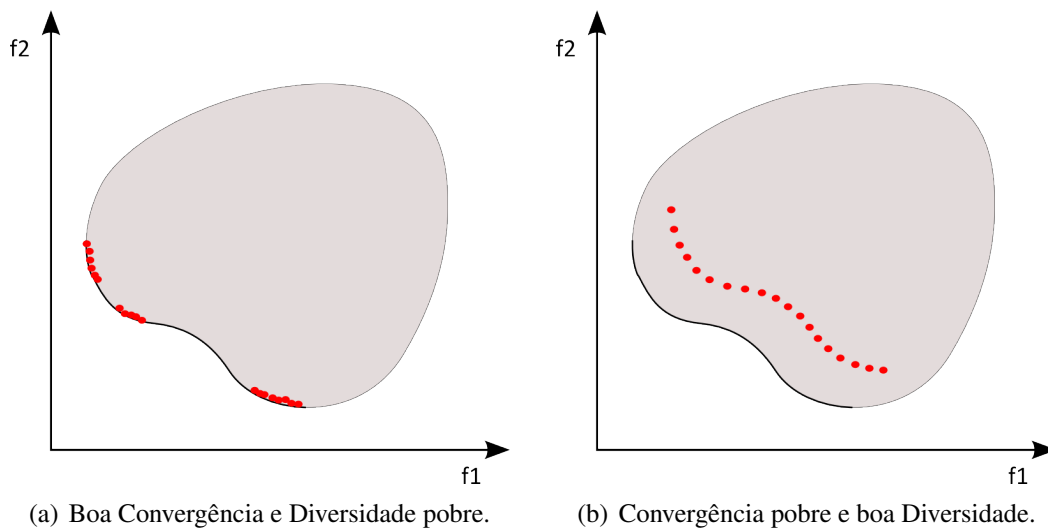
3.3.4 Indicadores de Qualidade para Conjuntos de Aproximação Pareto

Uma das questões centrais ao estudo de MOEAs é a comparação entre os resultados obtidos entre as variantes de algoritmos. De acordo com Deb (2001) os MOEAs possuem dois critérios básicos para a obtenção do Conjunto de Aproximação Pareto resultante da otimização:

Tabela 3.4: Relações entre Conjuntos de Aproximação Pareto.

relação	notação	condição
dominância estrita	$\mathcal{A} \prec\prec \mathcal{B}$	$\forall y' \in \mathcal{B} \exists y \in \mathcal{A} : y \prec\prec y'$
dominância	$\mathcal{A} \prec \mathcal{B}$	$\forall y' \in \mathcal{B} \exists y \in \mathcal{A} : y \prec y'$
melhor	$\mathcal{A} \triangleleft \mathcal{B}$	$\forall y' \in \mathcal{B} \exists y \in \mathcal{A} : y \preceq y' \wedge \mathcal{A} \neq \mathcal{B}$
dominância fraca	$\mathcal{A} \preceq \mathcal{B}$	$\forall y' \in \mathcal{B} \exists y \in \mathcal{A} : y \preceq y'$
incomparável	$\mathcal{A} \parallel \mathcal{B}$	$\mathcal{A} \not\preceq \mathcal{B} \wedge \mathcal{B} \not\preceq \mathcal{A}$

- a) Obter um conjunto de soluções no espaço de objetivos o mais próximo possível da Fronteira de Pareto Ótima (\mathcal{PF}^*) (Figura 3.10(a));
- b) Obter um conjunto de soluções no espaço de objetivos o mais diverso possível (maior cobertura à Fronteira de Pareto, Figura 3.10(b)).

**Figura 3.10:** Deficiências na obtenção de Conjuntos de Aproximação Pareto.

Os autores Zitzler et al. (2002) demonstram que não é possível determinar se um Conjunto de Aproximação \mathcal{A} é melhor do que outro conjunto \mathcal{B} utilizando-se um número finito de indicadores de qualidade unários, por exemplo um para convergência e um para a diversidade. A comparação deve incluir indicadores de qualidade binários. A seguir são descritos quatro indicadores (DEB, 2001).

3.3.4.1 Distância Geracional (Veldhuinzer, 1999)

Este indicador unário encontra a distância média de soluções no conjunto de aproximação \mathcal{A} em relação à $\mathcal{P}\mathcal{F}^*$ e é calculado por

$$I_{g\mathcal{D}}(\mathcal{A}) = \frac{(\sum_{i=1}^{|\mathcal{A}|} d_i^2)^{\frac{1}{2}}}{|\mathcal{A}|}, \quad (3.9)$$

onde d_i é a distância euclidiana entre a solução $y_i \in \mathcal{A}$ e o elemento mais próximo de $\mathcal{P}\mathcal{F}^*$:

$$d_i = \min_{k=1}^{|\mathcal{P}\mathcal{F}^*|} \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_j^{(i)} - y_j^{*(k)})^2}. \quad (3.10)$$

O parâmetro $y_j^{*(k)}$ é o j-ésimo valor do k-ésimo vetor de $\mathcal{P}\mathcal{F}^*$ e o parâmetro $y_j^{(i)}$ é o j-ésimo valor do i-ésimo vetor de \mathcal{A} .

3.3.4.2 Espalhamento (Deb et al., 2000)

A métrica unária criada por Deb (2001) utiliza a medida de distância d_i que pode ser tanto uma distância euclidiana como a *distância de apinhamento*, que é descrita na abordagem sobre o algoritmo NSGA-II utilizado neste trabalho, tal que

$$I_{\Delta}(\mathcal{A}) = \frac{\sum_{j=1}^m d_j^e + \sum_{i=1}^{|\mathcal{A}|} |d_i - \bar{d}|}{\sum_{j=1}^m d_j^e + |\mathcal{A}| \bar{d}}. \quad (3.11)$$

O parâmetro d_j^e é a distância entre os vetores extremos de $\mathcal{P}\mathcal{F}^*$ e \mathcal{A} correspondentes ao j-ésimo objetivo. O parâmetro \bar{d} é a média das distâncias entre $x_i \in \mathcal{A}$ e $x_j \in \mathcal{P}\mathcal{F}^*$.

3.3.4.3 Hipervolume (Veldhuinzer, 1999)

A métrica unária de Hipervolume necessita a normalização dos valores das funções objetivo para evitar os efeitos das diferentes magnitudes entre os objetivos. Esta métrica também necessita de um ponto de referência chamado *nadir*, que é construído a partir dos piores valores das funções objetivo no conjunto da *Frenteira de Pareto*. A Figura 3.11 ilustra o conceito de hipervolume para a minimização de dois objetivos.

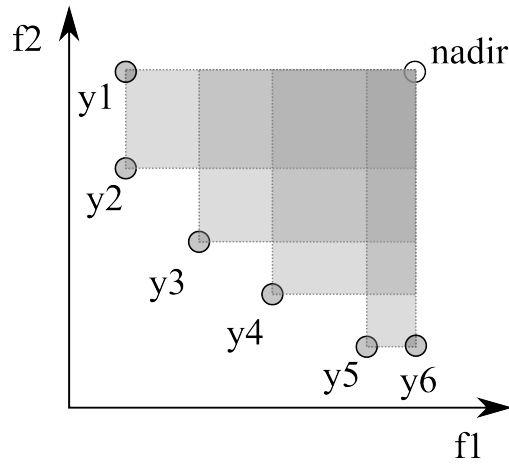


Figura 3.11: O Hipervolume, exemplificado para o caso de minimização de dois objetivos, corresponde a área delimitada pelos pontos da *Fronteira de Pareto* e o ponto de referência nadir.

Matematicamente, para cada solução $y_i \in \mathcal{A}$ um hipercubo v_i é construído sobre o ponto de referência *nadir*. A união dos volumes dos hipercubos dá o resultado final, ou seja,

$$I_{\mathcal{H}\mathcal{V}}(\mathcal{A}) = \text{volume}\left(\bigcup_{i=1}^{|\mathcal{A}|} v_i\right). \quad (3.12)$$

O cálculo desta métrica é bastante custoso computacionalmente. Um dos algoritmos mais rápidos para o seu cálculo exato é denominado Hipervolume por Divisão de Objetivos (*Hypervolume by Slicing Objectives* - HSO)(BRADSTREET; WHILE; BARONE, 2008). A complexidade computacional do HSO é $\mathcal{O}(n^{m-1})$ no pior caso e no melhor $\mathcal{O}(n \log n + n^{m/2})$, onde $n = |\mathcal{A}|$ e m a cardinalidade do espaço de objetivos.

3.3.4.4 Cobertura do Conjunto (Zitzler, 1999)

A métrica binária $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ calcula a proporção de vetores em \mathcal{B} que são dominados fracamente pelos vetores em \mathcal{A} da seguinte forma:

$$I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \frac{|\{y^{(b)} \in \mathcal{B} | \exists y^{(a)} \in \mathcal{A} : y^{(a)} \preceq y^{(b)}\}|}{|\mathcal{B}|}. \quad (3.13)$$

Esta métrica não é simétrica, portanto o cálculo de ambos $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ e $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{B}, \mathcal{A})$ é necessário. Se $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = 1$ significa que todos os vetores de \mathcal{B} são dominados fracamente por \mathcal{A} , também verifica-se que $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = 1 \Leftrightarrow \mathcal{A} \triangleleft \mathcal{B}$. Por outro lado, se $I_{\mathcal{C}}(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = 0$, nenhum vetor de \mathcal{B} é dominado fracamente por \mathcal{A} .

3.4 Eletrônica Evolucionária

A *Eletrônica Evolucionária* (*Evolutionary Electronics* - EE) foi formalmente estabelecida como área de pesquisa em 1997 na Universidade de Napier, Escócia, englobando *Computação Evolucionária* e *Eletrônica* (ZEBULUM; PACHECO; VELLASCO, 2001, p. 1). A expansão da EE ocorreu fortemente na década de 1990 por dois motivos: a) surgimento da idéia de evoluir o circuito como um todo, desde a topologia, *layout*, roteamento e dimensionamento de componentes, como em Bennett III et al. (2000); b) surgimento de dispositivos eletrônicos reconfiguráveis como *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA).

A *Evolução de Circuitos Eletrônicos* possui uma grande variedade de abordagens. Dentro da taxonomia de EE podemos classificar os trabalhos sobre *circuitos integrados analógicos*, *circuitos integrados digitais* e *mixed-signal*. Outra classificação considera as abordagens que utilizam simuladores como o SPICE, chamada de *evolução extrínseca*, e aquelas que utilizam dispositivos eletrônicos reconfiguráveis, chamada de *evolução intrínseca* (ZEBULUM; PACHECO; VELLASCO, 2001).

Greenwood e Tyrrel (2007, p. 9) fazem a distinção entre *Hardware Evoluído* e *Hardware Evoluível*, respectivamente relacionados à *evolução extrínseca* e *evolução intrínseca*. No primeiro caso a evolução ocorre até a obtenção de uma boa solução, após isto a realização é estática, imutável. No segundo caso a evolução é contínua, durante a operação: encontrando uma falha o sistema muda rapidamente sua configuração, guiado pelo algoritmo genético e submetido a alterações de ambiente - temperatura, radiação, falha de sensores - e adapta-se às novas condições.

3.4.1 Hardware Evolucionário - EHW

Segundo Higuchi et al. (2006) o paradigma chamado Hardware Evolucionário (*Evolvable Hardware* - EHW), e conforme Zebulum, Pacheco e Vellasco (2001, p. 205), consiste na aplicação de *Computação Evolucionária* em conjunção com dispositivos reprogramáveis como *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA), *Field Programmable Analog Arrays* (FPAA), *Field Programmable Transistor Arrays* (FPTA), *Programmable Logic Devices* (PLD) e *Programmable Transistor Array* (PTA) para a obtenção de sistemas com capacidade de reconfiguração *autônoma*.

A conexão entre *Algoritmos Genéticos* (*Genetic Algorithms* - GA) e *Hardware Reconfigurável* são os cromossomos do GA, as cadeias de bits, que atuam como parâmetros de configuração do dispositivo. Através de uma *função de aptidão* capaz de avaliar o correto funcionamento do circuito, o GA torna-se um meio de reconfiguração automática (HIGUCHI et al., 2006). Esta característica permite a construção de sistemas capazes de operar em ambientes extremos com capacidade de

recuperação de falhas como demonstrado por Stoica et al. (2006).

EHW possui vantagens sobre a evolução *extrínseca*, como demonstrado por STOICA et al. na evolução de um circuito Gaussiano que utiliza ao mesmo tempo o SPICE e um FPGA. Os resultados obtidos através de evolução *extrínseca* demonstraram que a evolução em hardware nem sempre é equivalente à evolução realizada por software (STOICA et al., 1999). Entretanto, EHW possui outras dificuldades de ordem prática, como por exemplo a necessidade de uma plataforma reconfigurável como FPGA.

3.4.2 Evolução Extrínseca de Circuitos Analógicos

A abordagem deste trabalho foca a evolução *extrínseca* de circuitos analógicos. A seguir são apresentados alguns trabalhos de destaque nesta sub-área da *Eletrônica Evolucionária*.

3.4.2.1 A abordagem de ZEBULUM; PACHECO; VELLASCO: *Energy Minimization Strategy*

Zebulum, Pacheco e Vellasco (2001, p. 91–107) demonstram a *evolução extrínseca* de três topologias distintas de OTAs: *OTA Miller*, *OTA Simples* e *OTA “Cascade”*.

A abordagem desta implementação de GA consiste na utilização de uma *função de aptidão* que agrega múltiplos objetivos na forma $f(x) = \sum w_i \cdot f_i(x)$, onde w_i e f_i são respectivamente o peso e a *função de aptidão* normalizada do i -ésimo objetivo. Os autores utilizam uma estratégia de atualização iterativa dos pesos de objetivos w_i onde os mesmos são inversamente proporcionais ao atendimento dos objetivos correspondentes, fazendo com que os pesos para os objetivos menos atendidos dominem a equação.

A atualização dos pesos é feita por: $w_{i,t+1} = k_1 \cdot \alpha \cdot w_{i,t} + k_2(1 - \alpha)e_{i,t}$, onde $w_{i,t}$ é o peso do objetivo i no tempo t , α é uma constante no intervalo $(0, 1]$ ou *momentum*, $e_{i,t}$ é o erro entre a especificação do objetivo i desejado e a média das soluções obtidas no instante t e k_1 e k_2 são constantes de normalização.

Os parâmetros de largura (W_i) e comprimento (L_i) de canal compõem os cromossomos dos indivíduos na população do GA e estes são decodificados na forma de uma linguagem de descrição de circuitos para avaliação das *funções de aptidão*. Estas são obtidas pelo simulador comercial SMASH, baseado no SPICE. Os resultados do GA de Zebulum, Pacheco e Vellasco (2001) convergem para um único ponto no espaço de objetivos e seus resultados são comparáveis aos de projetistas humanos.

Esta abordagem é bastante prática na obtenção de um único objetivo que atenda as preferências entre objetivos estabelecidos *a priori*.

3.4.2.2 A abordagem de KRUIKAMP; LEENAERTS: “DARWIN”

Kruiskamp e Leenaerts (1995) desenvolveram uma ferramenta para síntese de Amplificadores Operacionais em tecnologia CMOS chamada “DARWIN”, capaz de otimizar a topologia e o dimensionamento de componentes ao mesmo tempo utilizando um GA. A topologia do Amplificador Operacional nesta abordagem é separada em três blocos de construção:

- a) um estágio amplificador de entrada;
- b) um estágio amplificador intermediário (opcional);
- c) um estágio amplificador de saída (opcional).

Por meio de uma matriz de construção, ilustrada na Tabela 3.5, identifica-se uma topologia válida para o amplificador. A marcação X na posição (i, j) significa que o bloco i deve ser sucedido pelo bloco j .

Tabela 3.5: Matriz de construção de topologias de amplificadores operacionais utilizada por Kruiskamp e Leenaerts (1995).

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	X	X	X	X									1.entrada
2						X			X			X	2.nMOS par dif. (simples)
3					X					X		X	3.pMOS par dif. (simples)
4							X			X		X	4.nMOS folded cascode
5								X	X			X	5.pMOS foldec cascode
6									X	X	X	X	6.nMOS CS
7									X	X	X	X	7.pMOS CS
8									X	X	X	X	8.nMOS CS (level shift)
9									X	X	X	X	9.pMOS CS (level shift)
10												X	10.nMOS source follower
11												X	11.pMOS source follower
12												X	12.classe AB buffer saída
													13.saída

Após a determinação da topologia, “DARWIN” realiza uma verificação de violação de restrições: transistores em saturação, ganho mínimo, margem de fase, *slew rate* mínimo e frequência de ganho unitário mínima. Estas restrições são utilizadas para construir analiticamente uma equação linearizada da topologia do amplificador operacional, utilizando como variáveis os parâmetros de largura (W_i) e comprimento (L_i) de canal. Esta equação, chamada de vetor α , satisfaz a todas as restrições para valores de α_i não negativos. Limitando o espaço de busca, o algoritmo utiliza somente os valores '0' e '1', que constituem a representação binária de um GA. A Equação 3.14 mostra como exemplo uma saída do modelo e um vetor α para um bloco de construção de um OTA,

e a Equação 3.15 mostra o cálculo dos parâmetros W_i e L_i a partir da representação binária utilizada no GA.

$$\begin{pmatrix} W_i \\ L_i \end{pmatrix} = \frac{\alpha_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha_2 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha_3 \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix} + \alpha_4 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix} + \alpha_5 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}}{\sum_i \alpha_i} \quad (3.14)$$

$$\alpha = (0, 1, 1, 1, 0) \Rightarrow \begin{pmatrix} W_i \\ L_i \end{pmatrix} = \left(3\frac{1}{3}, 3\frac{1}{3} \right) \quad (3.15)$$

Na inicialização do algoritmo genético de KRUISKAMP; LEENAERTS, topologias aleatórias baseadas na Tabela 3.5 são geradas somente para a população inicial, não existindo operações que permitam a alteração de topologia durante a evolução. A representação genética de cada solução é uma sequência de vetores α e a operação de cruzamento é permitida somente entre blocos equivalentes. A *função de aptidão* é calculada analiticamente e é baseada na dissipação de potência do circuito e há também a penalização proporcional sobre a violação de restrições.

A abordagem de KRUISKAMP; LEENAERTS permite a síntese de amplificadores operacionais utilizando equações de primeira ordem, minimizando a potência de dissipação do circuito e lidando com as demais características como restrições. O espaço de busca é restringido devido às limitações da representação e o modelo linearizado não utiliza a precisão do SPICE.

3.4.2.3 A abordagem de KOZA et al.: *Genetic Programming*

Koza et al. (1999, p. 383-390, 391-513) desenvolveram uma metodologia utilizando Programação Genética (*Genetic Programming* - GP) capaz de realizar a evolução da topologia e dimensionamento de circuitos analógicos. Utilizando um circuito *embrionário* como ilustrado na Figura 3.12 que consiste em uma ou mais conexões modificáveis, uma representação de programas para a construção de circuitos elétricos, ilustrado na Figura 3.13, os autores demonstraram a evolução de vários tipos de circuitos analógicos como filtros, amplificadores e geradores de funções especiais. Koza et al. (1999) demonstraram também que esta metodologia é competitiva com projetistas humanos, através da reinvenção de circuitos eletrônicos pelo GP.

A representação de circuitos ilustrada na Figura 3.13 utiliza funções de criação de componentes, funções de alteração de topologia e terminais para o dimensionamento de componentes. A sua decodificação, que é a execução do programa que representa, altera as conexões embrionárias Z_1 e Z_2 da Figura 3.12 criando uma listagem para simulação SPICE e obtenção da *função de aptidão*.

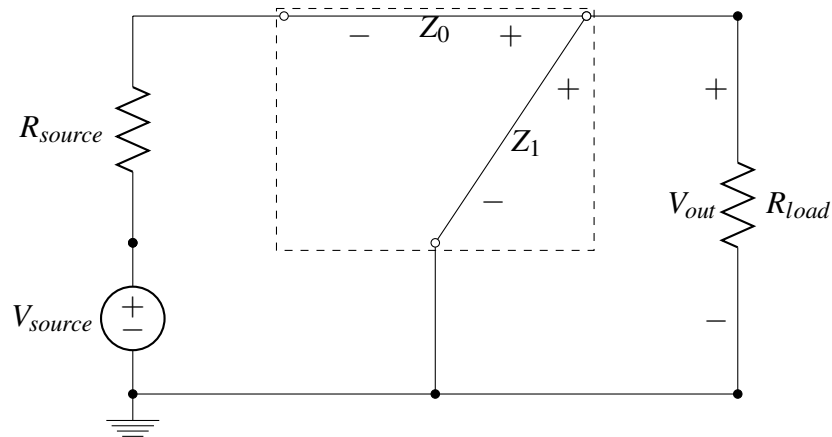


Figura 3.12: Circuito Embrionário de Koza et al. (1999, p. 403).

Durante o processo evolucionário esta estrutura pode utilizar os operadores de GA comuns como *cruzamento*, realizado através da troca de ramos de árvore entre indivíduos ou *mutação*, realizada através da reconstrução de um ramo da árvore.

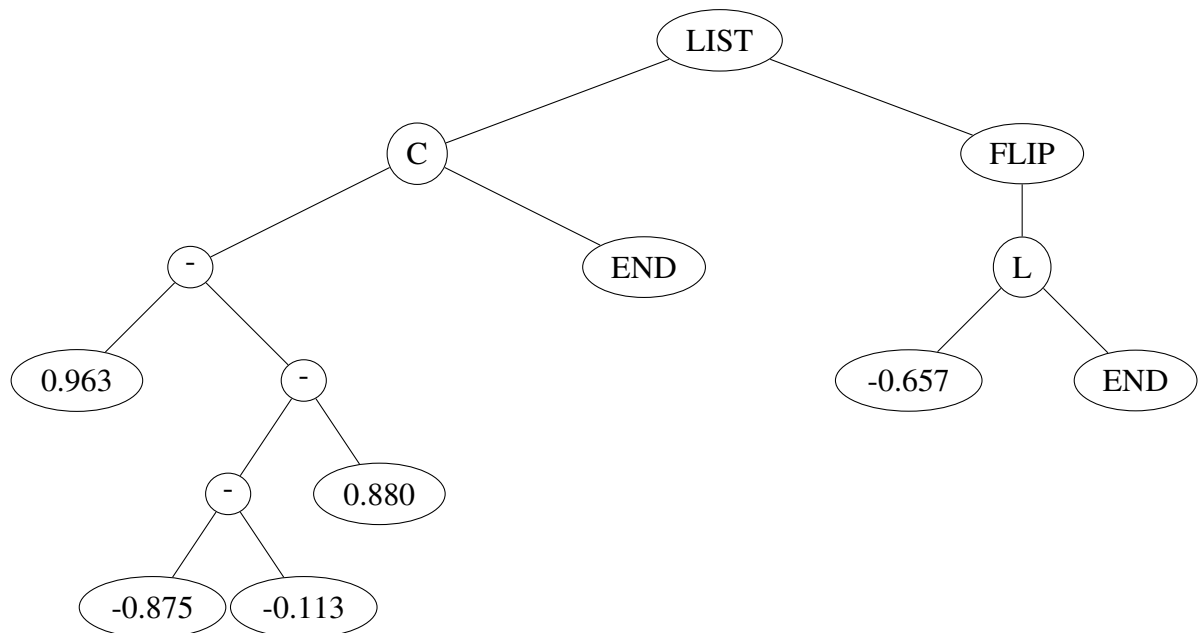


Figura 3.13: Exemplo de programa GP para a construção de um circuito eletrônico(KOZA et al., 1999)

3.4.2.4 A abordagem de MATTIUSSI; FLOREANO: *Analog Genetic Encoding*

A abordagem de Mattiussi e Floreano (2004, 2007), chamada *Analog Genetic Encoding* (AGE), assim como o GP, é capaz de evoluir ao mesmo tempo a topologia e o dimensionamento de circuitos eletrônicos analógicos. Contudo, ao invés de evoluir programas com instruções explícitas de

construção de circuitos como o GP, o AGE utiliza o mecanismo de Redes de Regulagem Genética⁴ (*Genetic Regulatory Networks - GRNs*) inspirado na biologia (Figura 3.14). AGE utiliza um *cromossomo* de tamanho variável construído a partir de um alfabeto finito para representar as soluções.

A decodificação do *cromossomo* é feita pela leitura de toda a sua extensão. Encontrando uma sequência de ativação os componentes com seus respectivos parâmetros e conexões são criados e adicionados ao circuito. Esta decodificação imita a *regulagem genética* biológica que produz proteínas para interação indireta entre os genes. Existem regiões dos cromossomas chamadas de *introns* que não codificam quaisquer parâmetros, assim como nos cromossomas biológicos.

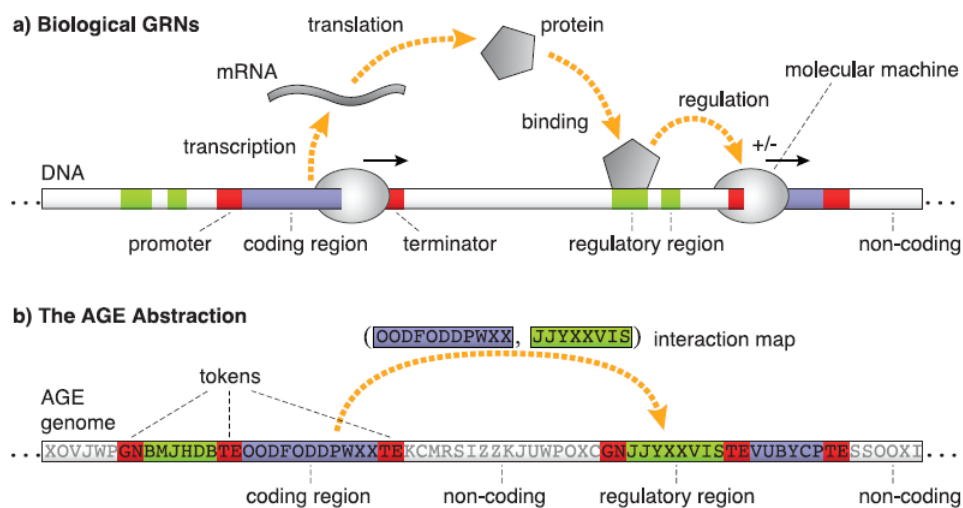


Figura 3.14: A abstração do AGE comparada ao mecanismo biológico equivalente, adaptado de Mattiussi et al. (2008).

Mattiussi e Floreano (2007) demonstraram que a eficiência do AGE para síntese de circuitos analógicos é equivalente ao GP.

⁴GRN é uma coleção de segmentos de DNA de uma célula que interagem uns com os outros indiretamente através de seu RNA e expressão de proteínas.

4 MÉTODOS

“Essentially, all models are wrong, but some are useful.”

George Edward Pelham Box, 1987

Revisitando a proposta fundamental do trabalho de otimização evolucionária extrínseca do OTA de uma saída e único estágio, tem-se o objetivo desdobrado em duas metas principais:

- a) *Otimização Evolucionária*: Obtenção de uma aproximação da *Frenteira de Pareto*;
- b) *Extração de Conhecimento*: Exploração do conjunto de dados formado pela *Frenteira de Pareto*.

Para alcançar a primeira meta, propõe-se a utilização do conhecido algoritmo NSGA-II (DEB, 2001). A precisão adequada das avaliações é garantida pela utilização do simulador SPICE. A segunda meta é alcançada através da exploração da *Frenteira de Pareto* por análise exploratória de dados e técnicas de Aprendizagem de Máquina como: Agrupamentos de Variáveis (*Variable Clustering*), Agrupamentos de Observações (*Clustering*), Árvores de Regressão e Classificação (*Classification and Regression Trees*).

4.1 Otimização Evolucionária

O projeto de um OTA visa maximizar e minimizar objetivos que são conflitantes. O ganho de um amplificador operacional ideal é infinito, portanto devemos maximizar A_{v0} . A frequência de ganho unitário f_T determina o limite de frequência para a aplicação do OTA, portanto é interesse maximizá-la. O *Slew Rate* é um parâmetro de velocidade do OTA, quanto maior *SR*, melhor o OTA responderá a variações da entrada. Qualquer sistema de engenharia deve ser projetado para consumir a menor quantidade de energia possível, portanto a potência dissipada P_{wr} deve ser minimizada. A área de portas *Area* deve ser minimizada para a economia de material (silício) e miniaturização do circuito.

4.1.1 Formulação do Problema

O Problema de Otimização de Múltiplos Objetivos da topologia do OTA de interesse, mostrada anteriormente na Figura 2.6, foi formulado da seguinte forma:

Encontrar:

$$x^* = [V_{in}^*, I_{abc}^*, W_1^*, \dots, W_{10}^*, L_1^*, \dots, L_{10}^*]^T, \quad (4.1)$$

onde x^* é o vetor ótimo de parâmetros, V_{in}^* é a tensão de polarização do par diferencial ótima, $I_{abc}^* = i_{pol}^*$ é a corrente de polarização ótima, W_i^* e L_i^* são a largura e comprimento de canal ótimos do MOSFET i .

Maximizando:

$$f_1(x) = A_{v0}(x), \quad f_2(x) = f_T(x) \text{ e } f_3(x) = SR(x), \quad (4.2)$$

onde A_{v0} é o ganho de tensão em malha aberta em baixas frequências, f_T é a frequência do ganho de tensão unitário e SR é o *Slew Rate*.

Minimizando:

$$f_4(x) = Pwr(x) \text{ e } f_5(x) = Area(x), \quad (4.3)$$

onde Pwr é a potência dissipada e $Area$ é a área de silício da região de porta do OTA.

Sujeito às Restrições:

$$\left| V_{out} - \frac{V_{dd}}{2} \right| < 0.3, \quad V_{DS}^{<i>} - V_{GS}^{<i>} + V_{TH}^{<i>} > 0 \quad (i = 1 \dots 10) \text{ e } 45^\circ < \varphi_M(x) < 75^\circ, \quad (4.4)$$

onde V_{out} é a tensão *bias* de saída, V_{dd} é a tensão de alimentação, $V_{DS}^{<i>}$, $V_{GS}^{<i>}$ e $V_{TH}^{<i>}$ a tensão de dreno-fonte, tensão porta-fonte e tensão *threshold* do MOSFET i e φ a Margem de Fase.

$$W_1 = W_2, W_3 = W_4, W_5 = W_6, W_7 = W_8, L_1 = L_2, L_3 = L_4, L_5 = L_6, L_7 = L_8 \quad (4.5)$$

$$0.5\mu\text{m} \leq w_k \leq 100\mu\text{m} \text{ e } 0.5\mu\text{m} \leq l_k \leq 100\mu\text{m}, \quad (k = 1 \dots 10) \quad (4.6)$$

$$0.7\text{V} \leq v_{in} \leq 2.3\text{V} \text{ e } 0.1\mu\text{A} \leq i_{pol} \leq 100\mu\text{A} \quad (4.7)$$

O vetor ótimo x^* na Equação (4.1) é um vetor ideal que maximiza a Equação (4.2) e minimiza a Equação (4.3). O Vetor do Espaço de Decisão $x = [V_{in}, I_{abc}, W_1, \dots, W_{10}, L_1, \dots, L_{10}]^T$ é composto por:

a) Tensão de polarização do par diferencial (V_{in});

b) Corrente de Polarização (I_{abc});

- c) Largura de Canal do Transistor MOS ($W_i, i = 1...10$);
- d) Comprimento de Canal do Transistor MOS ($L_i, i = 1...10$).

As funções nas Equações 4.2 e 4.3 mapeiam o vetor x do espaço de decisão (Ω) para o espaço de objetivos (Λ), e são obtidas utilizando as análises .OP, .AC e .TRAN da simulação SPICE. As restrições das inequações 4.4 são obtidas da mesma forma. As restrições da Equação 4.5 e inequações 4.6 e 4.7 são mapeadas diretamente do vetor do espaço de decisão x . As variáveis do espaço de objetivos são:

- a) $f_1(x) = A_{v0}(x)$, Ganho de tensão em malha aberta (análise SPICE .AC);
- b) $f_2(x) = f_T(x)$, Frequência de ganho tensão unitário (análise SPICE .AC);
- c) $f_3(x) = SR(x)$, *Slew Rate* (análise SPICE .TRAN);
- d) $f_4(x) = Pwr(x)$, Potência dissipada do OTA (análise SPICE .OP);
- e) $f_5(x) = Area(x)$, Área de silício da região de porta, a soma de $w_i \cdot l_i$;
- f) $V_{out_{bias}}$, nível de tensão DC na saída (análise SPICE .OP)¹;
- g) $V_{DS}^i - V_{GS}^i + V_{TH}^i > 0$, condição de saturação do MOSFET (análise SPICE .OP)²;
- h) $45^\circ < \varphi_M(x) < 75^\circ$, margem de fase (análise SPICE .AC)³.

Outras restrições: Nas Equações 4.5 os pares de MOSFETs: $[(M_1, M_2), (M_3, M_4), (M_5, M_6), (M_7, M_8)]$ possuem restrições de terem as mesmas larguras e comprimentos de canais⁴. Na Inequação (4.6) os limites de dimensionamento dos canais são estabelecidos de acordo com a tecnologia CMOS $0.5\mu\text{m}$. Nas inequações 4.7 são estabelecidos os limites da tensão de entrada⁵ e os limites da corrente de polarização.

4.1.2 *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II)

O NSGA-II utiliza como função de aptidão a ordenação por dominância Pareto seguida por distância de apinhamento. Estes dois parâmetros são utilizados em um torneio do tipo “todos contra todos”

¹Quando $V_{out} = \frac{V_{dd}}{2}$ temos a máxima excursão do sinal de saída.

²Se esta condição é violada, o Transistor está operando em modo Triodo, o que é indesejável.

³A margem de fase entre 45° e 75° é um critério de estabilidade do OTA.

⁴ M_9 e M_{10} não formam pares com outros transistores.

⁵No mínimo $0,7V$ dos limites Gnd e V_{dd} são mantidos para permitir certa excursão do sinal de entrada.

onde o resultado é uma lista ordenada de indivíduos, primeiro em relação à dominância Pareto e depois em relação à distância de apinhamento (DEB, 2001).

Conforme Coello (2006), Deb (2001) o NSGA-II pertence a segunda geração de MOEAs, que surgiu quando o *elitismo* se tornou um mecanismo padrão. Uma das variações de elitismo que surgiram na segunda geração foi a incorporação de um arquivo auxiliar externo para manter as melhores soluções. Segundo os autores, o uso do elitismo é um requisito teórico para garantir a convergência de um MOEA.

O NSGA-II de Deb et al. (2000) é um MOEA elitista que introduz o conceito de *Distância de Apinhamento* para a manutenção da diversidade. Ainda conforme Deb (2001) o NSGA-II, em muitos aspectos, não possui similaridade com o NSGA, mantendo o nome NSGA-II devido apenas a uma perspectiva sobre sua origem.

Algoritmo 4: *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

início

```

Inicialize Aleatoriamente a População  $P, |P| = N$ 
Crie uma população de descendentes  $O, |O| = N$  usando cruzamento e
mutação sobre  $P$ 
enquanto  $\neg$  término faça
     $R \leftarrow P \cup O, |R| = 2N$ 
    ordene  $R$  pela não-dominância pareto e operador  $<_c$ 
     $P \leftarrow \emptyset$ 
     $P \leftarrow P \cup R_i, i = 1 \dots N$ 
    Crie uma população de descendentes  $O, |O| = N$  usando cruzamento e
    mutação sobre  $P$ 

```

No NSGA-II (Algoritmo 4) a seleção é realizada sobre a união da população de ascendentes e descendentes, como na *Estratégia de Evolução* $(\mu + \lambda)$ -ES⁶, formando uma população de tamanho $2N$ ($\mu = \lambda = N$). O mecanismo de preservação de diversidade criado por Deb et al. (2000) é a *Distância de Apinhamento* (Algoritmo 6), em substituição ao *Compartilhamento de Aptidão* predominante nos demais MOEAs. Outra inovação do NSGA-II foi a introdução da ordenação Pareto com complexidade $\mathcal{O}(mn^2)$ (Algoritmo 5).

Deb et al. (2000) utilizam um operador específico para considerar a não-dominância pareto e a distância de apinhamento. Este operador chama-se “*Crowded Tournament Selection Operator*” e denota-se $<_c$. Utilizando a classificação de não-dominância pareto r , onde $r = 0$ corresponde às soluções não-dominadas por nenhuma outra na população (melhor fronteira de pareto), e d é a distância de apinhamento onde $d = \infty$ corresponde às soluções extremas,

⁶As Estratégias de Evolução (ES) utilizam a nomenclatura $(\mu + \lambda)$ -ES para denominar um algoritmo ES cuja população de μ ascendentes compete com λ descendentes e (μ, λ) -ES para o modelo geracional.

Algoritmo 5: *Non-dominated Sorting* de complexidade $\mathcal{O}(mn^2)$ (DEB et al., 2000)

```

início
  para cada  $p \in \mathcal{P}$  faça
    para cada  $q \in \mathcal{P}, p \neq q$  faça
      se  $p \prec q$  então
         $\mathcal{S}_p = \mathcal{S}_p \cup \{q\}$ 
      senão se  $q \prec p$  então
         $n_p = n_p + 1$ 
      se  $n_p = 0$  então
         $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\}$ 
   $i = 1$ 
  enquanto  $\mathcal{F}_i \neq \emptyset$  faça
    para cada  $p \in \mathcal{P}_i$  faça
      para cada  $q \in \mathcal{S}_p$  faça
         $n_q = n_q - 1$ 
        se  $n_q = 0$  então
           $\mathcal{H} = \mathcal{H} \cup \{q\}$ 
       $i = i + 1$ 
     $\mathcal{F}_i = \mathcal{H}$ 

```

Definição 9. Operador de Seleção por Torneio de Apinhamento ($<_c$): *Uma solução i vence o torneio sobre outra solução j se quaisquer das condições abaixo forem verdadeiras:*

1. *Se a solução i tem melhor classificação Pareto, ou seja: $r_i < r_j$;*
2. *Se i e j possuem a mesma classificação Pareto, mas i possui melhor distância de apinhamento que j , ou seja: $d_i > d_j$.*

4.1.3 Tratamento de Restrições

O espaço de decisão, ou *espaço de busca* (Ω), para o problema de otimização do OTA é severamente reduzido pelas restrições impostas no espaço de objetivos (Λ). Conforme Deb (2001) as restrições dividem o espaço de busca em uma região factível e uma região infactível que podem ou não ser contínuas. As restrições frequentemente impõe limitações à Fronteira de Pareto, portanto o tratamento adequado de restrições deve ser considerado no algoritmo de busca.

Existem diversas abordagens para o tratamento de restrições em algoritmos evolucionários (EAs) (COELLO, 1999), sendo a abordagem mais simples ignorar soluções não factíveis seguida pela penalização desta soluções. Deb (2001) enfatiza que no primeiro caso, a exemplo do problema

Algoritmo 6: Distância de Apinhamento (DEB et al., 2000)

```

início
   $\mathcal{F} \leftarrow x \in \mathcal{P}$ 
  para cada  $i \in 1 \dots |\mathcal{F}|$  faça
     $d_i = 0$ 
    para cada  $j \in 1 \dots m$  /*  $m = \langle \text{número de objetivos} \rangle$  */
    faça
      ordene  $\mathcal{F}$  do pior ao melhor objetivo
       $d_1 = d_{|\mathcal{F}|} = \infty$ 
      para cada  $i \in 2 \dots (|\mathcal{F}| - 1)$  faça
         $d_i = d_i + \frac{x_{i+1}^{(j)} - x_{i-1}^{(j)}}{\max x^{(j)} - \min x^{(j)}}$ 
  
```

do OTA, na maioria dos problemas reais encontrar soluções factíveis (que satisfazem a todas as restrições) é o maior problema, tornando-se uma grande dificuldade para o EA convergir ao ótimo. No caso da penalização e algoritmos de múltiplos objetivos, encontra-se maior dificuldade na determinação de equações de penalização para os diversos objetivos e restrições. Encontrar equações adequadas, visto que a Fronteira de Pareto não é conhecida *a priori*, torna-se um problema complexo.

Entre os métodos recomendados por Deb (2001), encontramos o método de Jiménez-Verdegay-Gómez-Skarmeta que consiste em incluir de forma sistemática as restrições no critério de dominância. Esta inclusão de restrições, possui a seguinte forma:

Definição 10. Dominância Pareto modificada: *Uma solução i domina outra solução j se e somente se:*

1. i satisfaz todas as restrições e j não;
2. i e j satisfazem todas as restrições e $y_i \prec y_j$ no espaço de objetivos;
3. i e j não satisfazem uma ou mais restrições e $z_i \prec z_j$ no espaço de restrições.

4.2 Extração de Conhecimentos

O processo de extração de conhecimento de um conjunto de dados envolve a utilização de técnicas e ferramentas das áreas de Aprendizagem de Máquina (*Machine Learning* - ML) e Estatística. A seguir apresenta-se uma breve discussão sobre as técnicas aqui utilizadas.

4.2.1 O Mapa de Aquecimento (*Heatmap*)

O Mapa de Aquecimento é uma forma gráfica engenhosa para mostrar relações de agrupamento (*clustering*) e é o gráfico mais utilizado em ciências biológicas (FRIENDLY, 2009). A Figura 4.1 ilustra um exemplo de Mapa de Aquecimento.

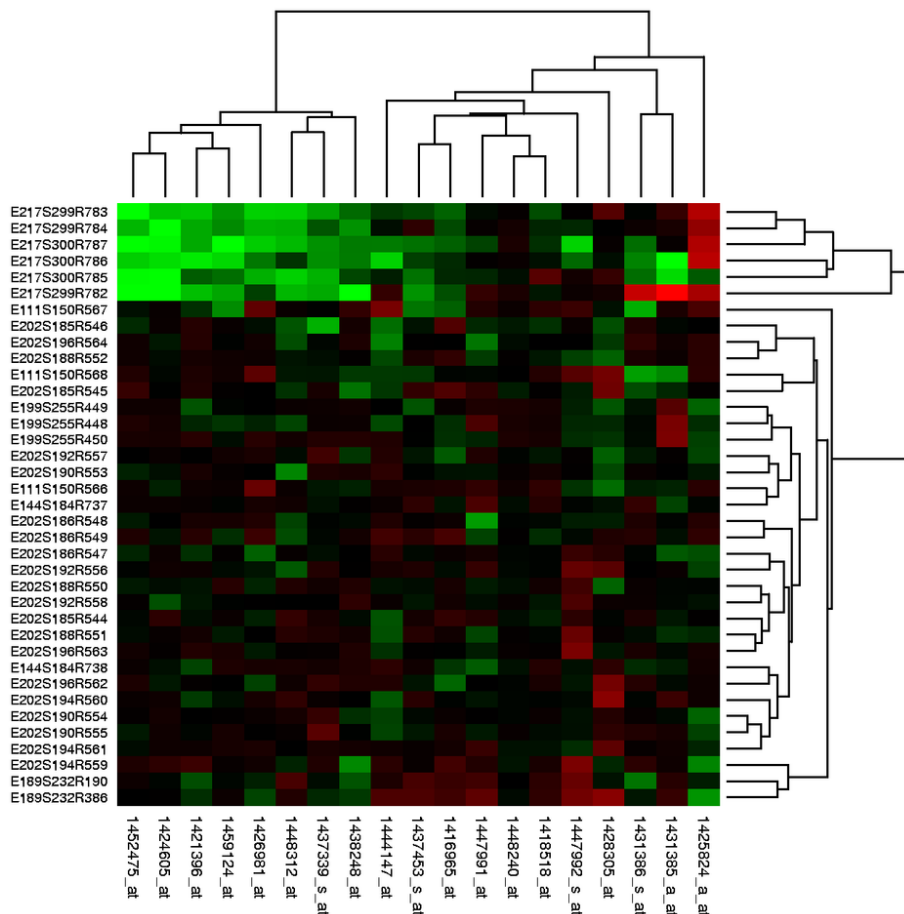


Figura 4.1: Heatmap de Andrade (2008) utilizado para exemplificação por Friendly (2009). As linhas (ou colunas) representam os genes e as colunas (ou linhas) representam as amostras. Os gradientes de cores representam a intensidade da expressão do gene na amostra. Os dendrogramas lateral e superior representam os *Agrupamentos* entre genes e entre amostras.

No caso do problema apresentado neste trabalho, queremos descobrir relações entre objetivos e parâmetros. Estas relações podem ser reveladas pelo *Agrupamento de Variáveis*, o que é feito através da correlação de Spearman ao quadrado (ρ^2) discutida a seguir.

4.2.1.1 Correlação de Spearman

A correlação é uma métrica entre variáveis aleatórias, que assume valores contínuos no intervalo $[-1, 1]$, conhecida em sua forma mais comum pela correlação de Pearson. A correlação de Spearman

(ρ) é um caso especial da correlação de Pearson (\mathbf{r}) (CHEN; POPOVICH, 2002). Pela definição clássica, a correlação de Pearson para duas variáveis X e Y é dada pela covariância normalizada,

$$\mathbf{r} = \frac{\sum \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n}}{s_X s_Y}, \quad (4.8)$$

onde n é o número de observações (pares X e Y) e s_X e s_Y são os desvios padrão de X e Y (CHEN; POPOVICH, 2002).

Para o cálculo da correlação de Spearman, ao invés de utilizar-se diretamente os valores de X e Y , utiliza-se os índices da ordenação de X e Y , assim temos

$$\rho = 1 - \frac{6(\sum(\text{Ordem}(X_i) - \text{Ordem}(Y_i)))^2}{n^3 - n}. \quad (4.9)$$

Enquanto a correlação de Pearson mede a força das relações lineares entre variáveis, a correlação de Spearman mede a força das relações monotônicas entre variáveis (CHEN; POPOVICH, 2002). Assim como no *Agrupamento de Observações (Clustering)* utilizamos uma métrica de distância (ou similaridade) entre observações, para o *Agrupamento de Variáveis (Variable Clustering)*, utilizamos a correlação ao quadrado como métrica.

4.2.2 Agrupamento de Observações (*Clustering*)

O *Agrupamento de Observações*, ou simplesmente *Clustering*, consiste na partição de um conjunto de dados em classes. Existem inúmeras técnicas de *clustering*, mas não há uma descrição universalmente aceita sobre o que é um *cluster*, mas pode-se dizer que um *cluster* é um conjunto de entidades similares. Neste trabalho utiliza-se o algoritmo *K-medoids* que baseia-se no conhecido algoritmo *K-means*, contudo menos sensível a *outliers* e ruído (XU; WUNSCH, 2008).

Algoritmo 7: *k-means clustering*

início

Atribua aleatoriamente aos K clusters C_i , $i = 1, 2, \dots, K$ valores do conjunto de dados;

repita

para cada ponto do conjunto de dados faça

┌ Atribua para o ponto do conjunto de dados o *cluster* C_i mais próximo através de
└ uma métrica de dissimilaridade;

para cada atribuição de cluster C_i faça

┌ Atualize o valor do *cluster* C_i pela média do conjunto de pontos atribuídos ao
└ *cluster*;

até até não houver variação dos C_i

Os algoritmos *k-means* e *k-medoids* pressupõe que o conhecimento do número de K *clusters* é conhecido. O Algoritmo 7 *k-means* é iniciado com uma atribuição aleatória dos *clusters* dentro do conjunto de dados e então segue-se um processo iterativo de atribuições de *clusters* para cada ponto e cálculo dos novos *clusters*. O Algoritmo 8 *k-medoids* diferencia-se do *k-means* porque ao invés de calcular a média para os *clusters*, utiliza o *medoid*, ou o ponto do conjunto de dados com menor dissimilaridade aos demais pontos (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2003).

Algoritmo 8: *k-medoids clustering*

início

Atribua aleatoriamente aos K *clusters* C_i , $i = 1, 2, \dots, K$ valores do conjunto de dados;

repita

para cada atribuição de cluster C_i faça

Encontre a observação que minimiza a distância total aos outros pontos

pertencentes ao *cluster* e atualize C_i com o novo *medoid*;

até até não houver variação dos C_i

A métrica de dissimilaridade comumente utilizada é a distância euclidiana e os vetores precisam ser normalizados para evitar o efeito de diferentes magnitudes (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2003).

4.2.3 Árvores de Classificação e Regressão

Árvores de Classificação e Regressão ("Classification and Regression Trees- CART) são algoritmos recursivos de construção de árvores binárias para as tarefas de classificação e regressão. CART particiona o espaço de variáveis em regiões e ajustando um modelo simples (como uma constante) a cada uma (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2003).

Neste trabalho utiliza-se o algoritmo *party* (HOTHORN et al., 2006), cuja implementação é disponível como biblioteca no software "R" (R Development Core Team, 2011). Seu algoritmo de recursão é baseado em relações de regressão sobre o modelo de distribuição condicional $D(Y|X) = D(Y|f(X_1, X_2, \dots, X_m))$ onde Y é a resposta e $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ é um vetor de m covariáveis.

Para um conjunto de n exemplos de aprendizagem ($\mathcal{L}_i = \{(Y_i|X_{1i}, \dots, X_{mi}), 1, \dots, n\}$) e uma representação vetorial ($\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_n)$) para cada nó da árvore, onde $w_i \in \{0, 1, \dots\}$ é um para as observações correspondentes ao nó, temos os seguintes passos de recursão (HOTHORN et al., 2006):

1. Para um dado vetor \mathbf{w} , teste a hipótese de independência $H_0 = \bigcap_{j=1}^m H_0^j : D(Y|X) = D(Y)$ entre todas as m covariáveis de interesse. Se H_0 não puder ser rejeitada em um nível de significância α pré estabelecido, pare o algoritmo. Senão escolha a j -ésima covariável X_{j^*}

com a associação mais forte a Y .

2. Escolha um conjunto $A^* \subset X_{j^*}$ para que divida X_{j^*} em dois subconjuntos denotados pelos vetores $\mathbf{w}_{esquerdo}$ e $\mathbf{w}_{direito}$, que representam os nós filhos do nó em uso.
3. Repita recursivamente os passos 1 e 2 para os vetores $\mathbf{w}_{esquerdo}$ e $\mathbf{w}_{direito}$.

4.3 Implementação

Para a implementação do algoritmo evolucionário de otimização de múltiplos objetivos MOEA, utiliza-se a linguagem C++ e a biblioteca “Shark”(IGEL et al., 2008). O programa Spice OPUS (TUMA; BÜRMEIN, 2009), é executado em *batch* a partir do programa escrito em C++ a cada geração do MOEA, executando a simulação sobre os arquivos de *netlist* (ou arquivos de SPICE) configurados pelos vetores de parâmetros de cada indivíduo da geração. Os arquivos de resultado das simulações são lidos pelo programa e os vetores de objetivos e restrições atribuídos aos indivíduos correspondentes da população do MOEA. Então o MOEA executa os operadores evolucionários de seleção, cruzamento e mutação para gerar uma nova população. Este processo é ilustrado na Figura 4.2 e o arquivo *netlist* é apresentado no Apêndice A.1.

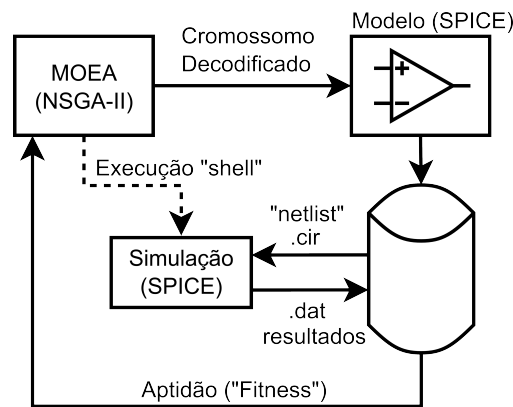


Figura 4.2: Integração do MOEA ao SPICE.

A Figura 4.3 ilustra a metodologia computacional proposta neste trabalho: Otimização Evolucionária Extrínseca seguida de Agrupamento de Variáveis, Agrupamento de Observações e Árvores de Regressão e Classificação para a extração de conhecimentos. Portanto, em linhas gerais, a Figura 4.3 representa a proposta central deste trabalho.

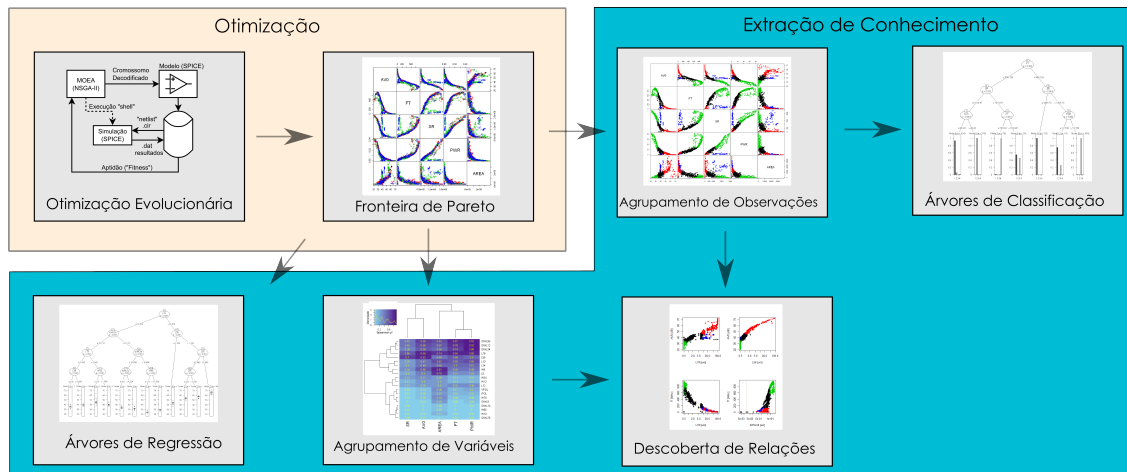


Figura 4.3: Processo proposto por este trabalho: Otimização e Extração de Conhecimentos.

Observa-se na Figura 4.3 a sequência de cada passo envolvido no processo:

1. Otimização Evolucionária utilizando-se o algoritmo NSGA-II integrado ao Spice OPUS para o cálculo dos objetivos e violações, o resultado é uma aproximação da fronteira de Pareto;
2. O *heatmap*, que é uma análise de sensibilidade global, é criado através do cálculo da correlação de Spearman ao quadrado;
3. A fronteira de Pareto é particionada pelo algoritmo *k-medoids* em um número *K* de *clusters* escolhido manualmente;
4. Os objetivos e parâmetros com alta correlação de Spearman são analisados por gráficos e pelos *clusters*;
5. A fronteira de Pareto com *clusters* calculados é analisada através de Árvores de Classificação para a descoberta de relações entre as categorias (*clusters*) e parâmetros;
6. A fronteira de Pareto é analisada através de Árvores de Regressão para a descoberta de relações a partir dos parâmetros aos objetivos.

O resultado destas análises é um conjunto de informações a respeito do dimensionamento da topologia escolhida do OTA que pode ser re-utilizado em novos projetos.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

“All our knowledge begins with the senses, proceeds then to the understanding, and ends with reason. There is nothing higher than reason.”

*Critique of Pure Reason
Immanuel Kant, 1781*

A seleção do NSGA-II não foi resultado de uma análise teórica através da pesquisa bibliográfica, mas resultado de uma série de experimentos com ajustes de parâmetros, representação, tratamento de violações das restrições e da utilização de um segundo algoritmo, descrito no Capítulo 3, chamado VEGA. Tanto o NSGA-II quanto o VEGA não foram desenvolvidos para problemas com o tratamento de restrições, foi necessário inseri-lo no NSGA-II com o método de Jiménez-Verdegay-Gómez-Skarmeta, descrito na sub-seção 4.1.3, e no VEGA com o método de Recozimento Simulado das penalizações de Carlson e Shonkwiler (1998).

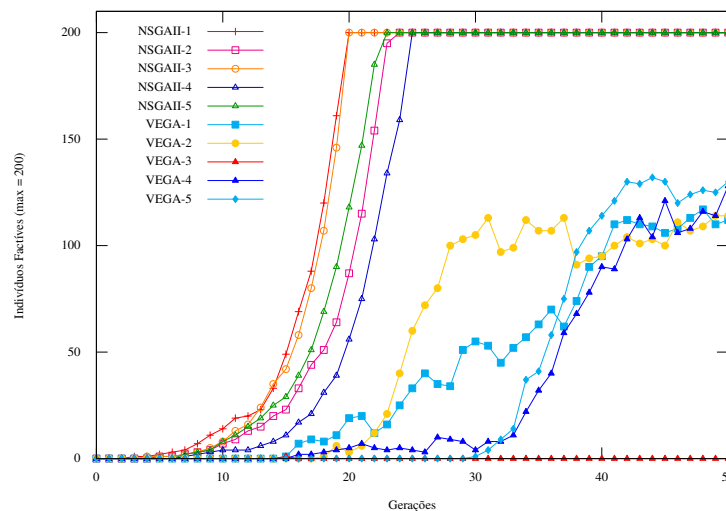


Figura 5.1: Quantidade de indivíduos factíveis obtidos com VEGA e NSGA-II.

Os resultados com o VEGA foram bastante insatisfatórios. Além de não atingir um número razoável de soluções factíveis (Figura 5.1), apresentou o problema descrito por Goldberg (1989, p. 199–201) de não espalhamento de soluções ao longo da fronteira de Pareto e conseqüentemente uma convergência pobre.

5.1 Parametrizações

O OTA de único estágio e única saída foi configurado com $V_{dd} = 3V$ e $C_L = 3pF$. Os modelos de transistores MOSFET utilizados são de tecnologia AMS $0,5\mu m$ SCN05 (MOSIS)¹.

A configuração do algoritmo NSGA-II de codificação genética por números reais (ponto flutuante), cruzamento binário simulado SBX e mutação polinomial, foram determinadas empiricamente e apresentam-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parametrização do Algoritmo

Tamanho da População (N)	200
Número de Gerações (t)	6000
Probabilidade de Cruzamento (p_c)	0,8
Probabilidade de Mutação (p_m)	0,07
SBX (η_c)	20,0
Mutação Polinomial (η_m)	12,0

Para os experimentos com NSGA-II, utiliza-se diferentes inicializações da função geradora de números pseudo-aleatórios.

A nomenclatura dos símbolos utilizados nos gráficos deste capítulo é apresentada na Tabela 5.2.

5.2 Factibilidade dos Resultados Experimentais

Para avaliar a capacidade de convergência do método proposto, pode-se comparar os resultados obtidos com uma amostragem aleatória de 200400 soluções. Somente as soluções factíveis foram preservadas, onde somente 6 soluções factíveis foram obtidas (Tabela 5.3). Estima-se que a probabilidade de obter-se uma solução factível ao acaso é $\hat{p} = 0,0000299$ com intervalo de confiança de 95% entre $0,00000598 \leq \hat{p} \leq 0,00005389$ (HINES; MONTGOMERY, 1990, p. 273–274). Todos os 5 experimentos com NSGA-II apresentaram 100% da população de pais $N = 200$ satisfazendo a todas restrições próximos da centésima geração. A proporção da população contida na primeira fronteira de Pareto $r = 1$ também sobe rapidamente após atingir 100% de satisfação das restrições, sendo o resultado final um conjunto de 200 soluções não-dominadas ($r = 1$).

¹Para todas os experimentos é utilizado o modelo BSIM3v3.1 para simulação SPICE com os parâmetros MOSIS da tecnologia SCN05 CMOS de $0.5\mu m$ disponível em: <http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/ami-c5/t99j-params.txt>, anexos A.2 e A.3

Tabela 5.2: Simbologia utilizada nos gráficos dos resultados experimentais

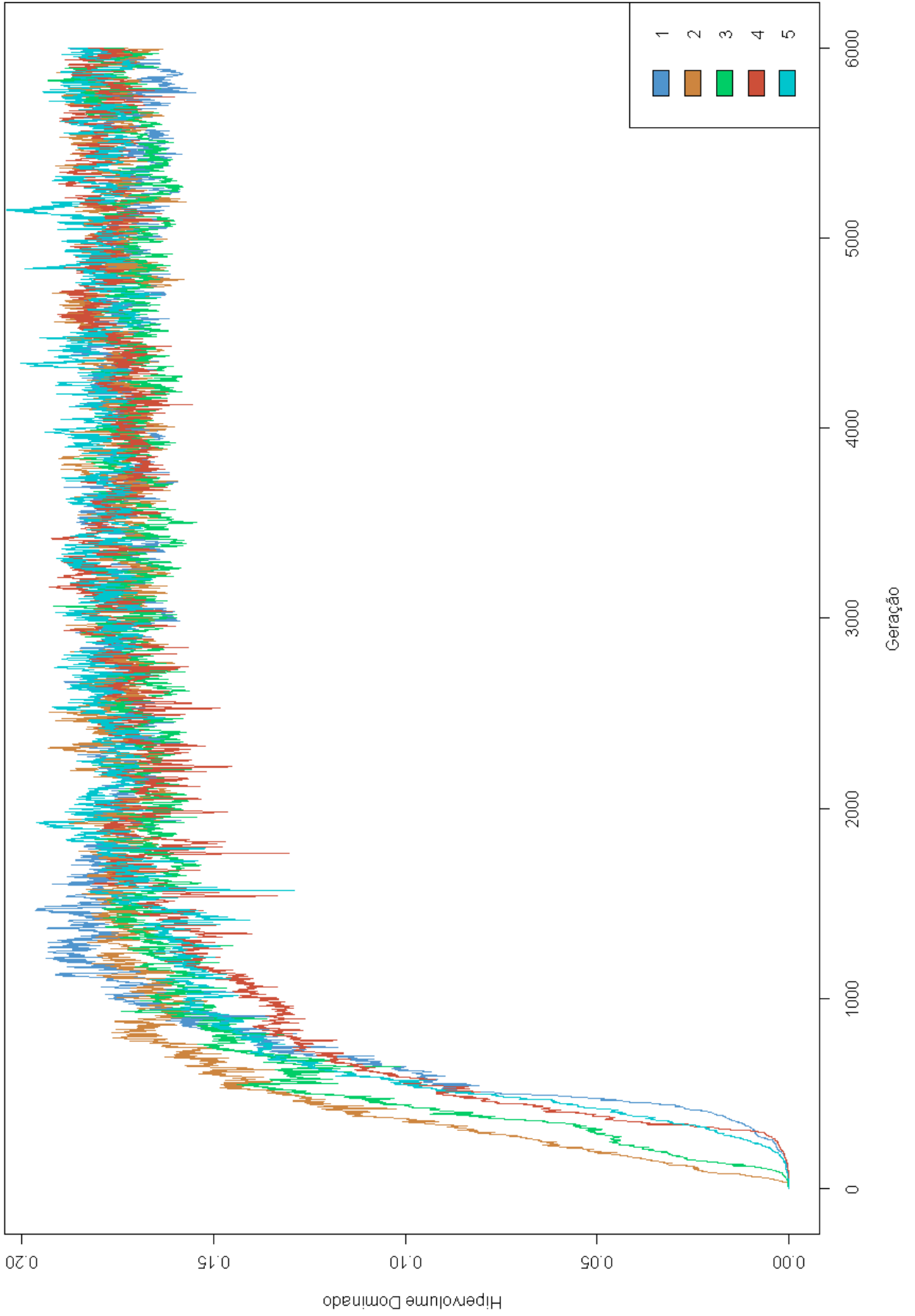
Símbolo	Transistor	Significado	Unidade
AV0	OTA	Ganho de tensão em malha aberta	dB
FT	OTA	Frequência de ganho de tensão unitário	MHz
SR	OTA	<i>Slew rate</i>	$V/\mu s$
PWR	OTA	Potência Dissipada	mW
AREA	OTA	Área de silício da região de portas	μm^2
IPOL	Dreno de M_9	Corrente de Polarização	μA
VPOL	Porta de M_1 e M_2	Tensão de Polarização	V
W12	M_1 e M_2	Largura de Canal	μm
W34	M_3 e M_4	Largura de Canal	μm
W56	M_5 e M_6	Largura de Canal	μm
W78	M_7 e M_8	Largura de Canal	μm
W9	M_9	Largura de Canal	μm
W10	M_{10}	Largura de Canal	μm
L12	M_1 e M_2	Comprimento de Canal	μm
L34	M_3 e M_4	Comprimento de Canal	μm
L56	M_5 e M_6	Comprimento de Canal	μm
L78	M_7 e M_8	Comprimento de Canal	μm
L9	M_9	Comprimento de Canal	μm
L10	M_{10}	Comprimento de Canal	μm
IDWL12	M_1 e M_2	Corrente de Inversão	μA
IDWL34	M_3 e M_4	Corrente de Inversão	μA
IDWL56	M_5 e M_6	Corrente de Inversão	μA
IDWL78	M_7 e M_8	Corrente de Inversão	μA
IDWL9	M_9	Corrente de Inversão	μA
IDWL10	M_{10}	Corrente de Inversão	μA

Tabela 5.3: Resultados do experimento de busca aleatória.

A_{v0} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/ μ s)	Pwr (mW)	$Area$ (μ m ²)
58,78	6,00	12,00	0,15	7940
55,64	3,25	5,55	0,06	11300
45,06	0,98	4,11	0,08	11600
56,51	1,32	2,56	0,17	13300
54,18	1,75	3,43	0,15	15200
49,04	1,60	3,96	0,25	14100

O hipervolume dominado pelo conjunto de resultados do experimento aleatório é $I_{\mathcal{H}\mathcal{V}} = 1,68E - 5$, enquanto os demais experimentos com algoritmo NSGA-II apresentaram 100% da população de pais $N = 200$ satisfazendo a todas restrições próximos da centésima geração. A proporção da população com $r = 1$ também sobe rapidamente após atingir 100% de satisfação das restrições, sendo o resultado final um conjunto de 200 soluções não-dominadas ($r = 1$). Na Figura 5.2 ilustra-se a evolução do hipervolume para os 5 experimentos com NSGA-II.

Nota-se que o hipervolume, a única métrica monotônica para conjuntos Pareto (ZITZLER et al., 2002), não converge para um valor estável, mas oscila em um limite máximo. Este efeito deve-se ao critério *distância de apinhamento*, observável em gerações avançadas da população onde a sua totalidade pertence a uma única fronteira de Pareto, sendo a *distância de apinhamento* a única métrica para a seleção, e esta não é monotônica em relação ao hipervolume.



O conjunto final de 1000 soluções dos 5 experimentos apresentou para as restrições da condição de Saturação de Transistores, Tensão *Bias* de Saída e Margem de Fase (φ_M), as distribuições conforme a Figura 5.3, ou seja: atendendo às restrições. A factibilidade para uma solução é um critério extremamente difícil de ser alcançado, entretanto o tratamento de restrições proposto alcança resultados bastante satisfatórios.

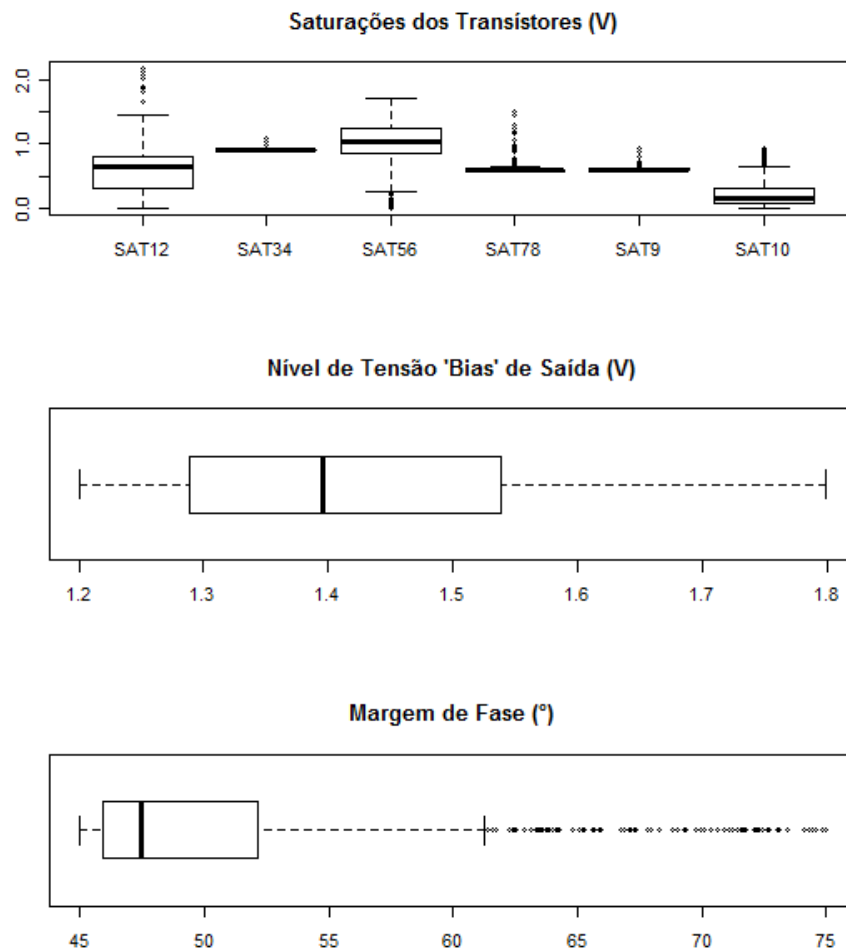


Figura 5.3: Saturação ($SAT = V_{DS} - V_{GS} + V_{TH}$), Tensão *Bias* de Saída ($\left| \frac{V_{dd}}{2} - V_{out} \right| \leq 0,1 \cdot V_{dd}$) e Margem de Fase ($45^\circ \leq \varphi_M \leq 75^\circ$).

O atendimento à restrição de uma janela de resposta transiente é ilustrado na Figura 5.4. Esta janela impõe condição de factibilidade da realização do OTA em resposta à função degrau, garantindo desta forma, níveis mínimos e máximos de excursão do sinal de saída.

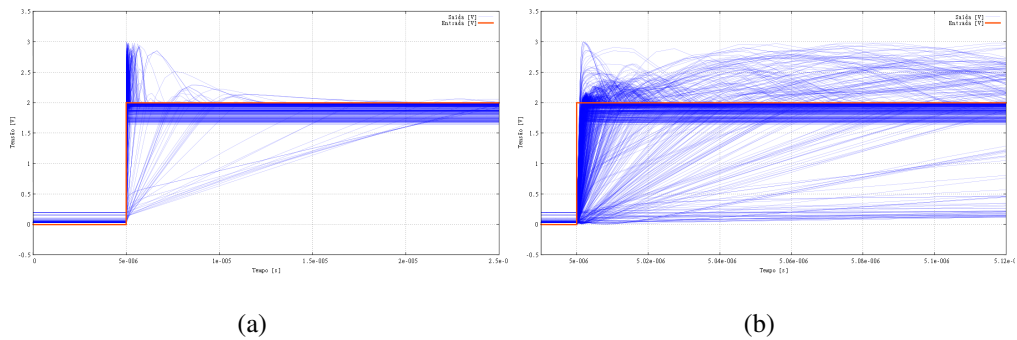


Figura 5.4: Resposta Transiente das soluções obtidas no Apêndice B.

A validade de realizações de OTAs também pode ser verificada através da inspeção visual do Diagrama de Bode. SANSSEN, por exemplo, utiliza esta representação gráfica para verificar diversas anormalidades que podem estar presentes em amplificadores. A Figura 5.5 apresenta o Diagrama de Bode das 1000 soluções encontradas nas 5 rodadas do algoritmo NSGA-II.

Verifica-se para as curvas de ganho que não existem picos ao final da Largura de Banda², e o decréscimo, a partir desta frequência é constante. As curvas de fase, apesar de serem mais úteis quando utilizadas em pares com suas curvas de ganho correspondentes, apresentam o comportamento esperado.

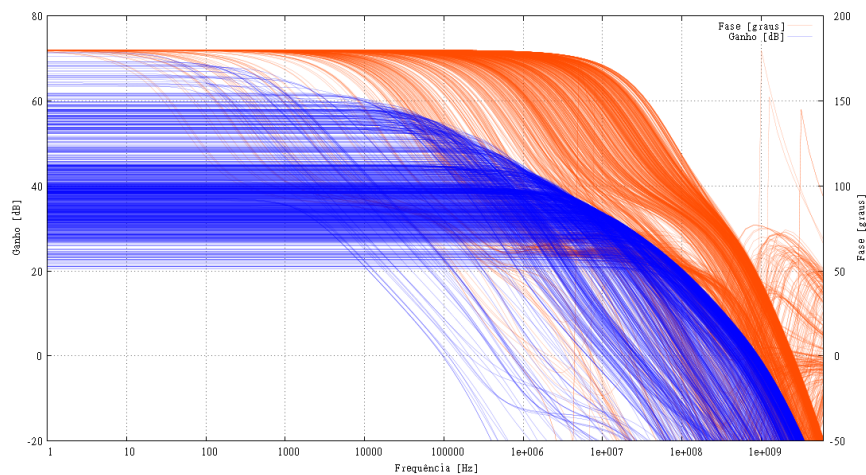


Figura 5.5: Diagrama de Bode das soluções obtidas do Apêndice B.

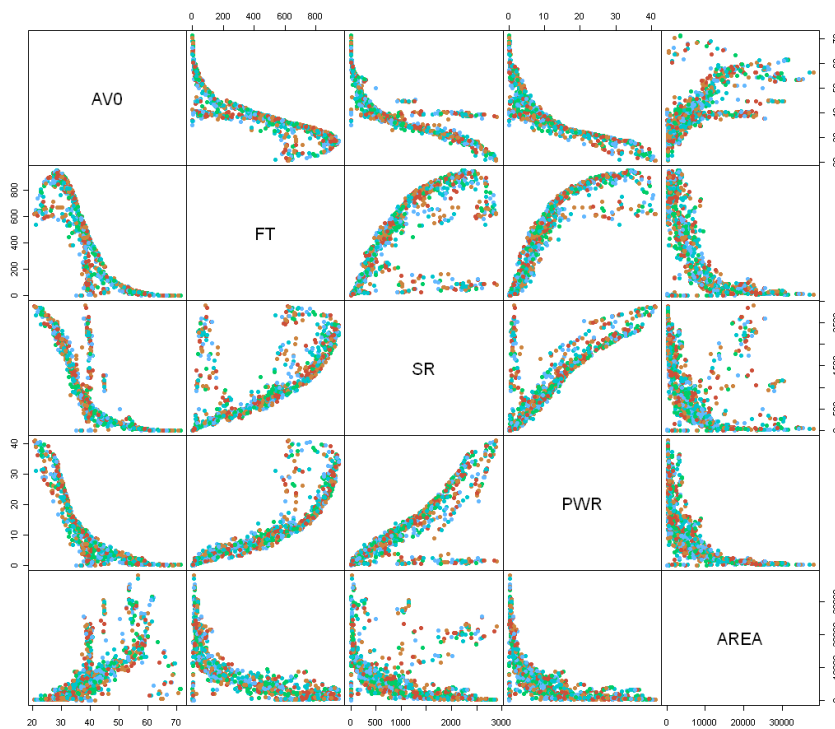
5.3 Fronteira de Pareto

Os limites mínimos e máximos das aproximações da Fronteira de Pareto obtidas nos 5 experimentos com NSGA-II são apresentados na Tabela 5.4 e Figura 5.6 e suas projeções na Figura 5.6.

²Largura de Banda, é a frequência onde o ganho decresce $-3dB$ a partir do ganho em baixas frequências (A_{V0}).

Tabela 5.4: Limites máximos e mínimos obtidos para os 5 experimentos.

Objetivo	Mínimo	Máximo
A_{v0} (dB)	20,59	71,38
f_T (MHz)	0,978	949,0
SR (V/ μ s)	0,0886	2900,0
Pwr (mW)	0,000585	40,99
$Area$ (μ m ²)	4,63	38100,0

**Figura 5.6:** Projeções das aproximações da Fronteira de Pareto resultantes dos 5 experimentos com NSGA-II para cada par de objetivos: A_{v0} [dB], f_T [MHz], SR [V/ μ s], Pwr [mW] e $Area$ [μ m²].

Os resultados dos 5 experimentos, através da métrica de Hipervolume e comparação gráfica, podem ser considerados como equivalentes.

Observa-se na Figura 5.6 comportamentos entre objetivos, conhecidos intuitivamente pelos projetistas de CIs analógicos: A_{v0} decresce com o aumento de f_T , f_T e Pwr possuem uma grande correlação positiva, f_T e SR possuem correlação positiva mas uma bifurcação mostra um comportamento distinto que pode ser esclarecido com o Agrupamento de Variáveis.

5.4 Extração de Conhecimentos

A extração de conhecimentos proposta é iniciada pela realização do Mapa de Aquecimento ou *Heatmap* 5.7, utilizando-se a correlação de Spearman ao quadrado (ρ^2) para o Agrupamento de Variáveis. A correlação de Spearman também pode ser vista como uma análise de sensibilidade global. Apesar de não constituir prova de relação causal, este mapeamento estatístico pode ser utilizado como guia de configuração do OTA (LEME; GIMENEZ; TOMAZ, 2011).

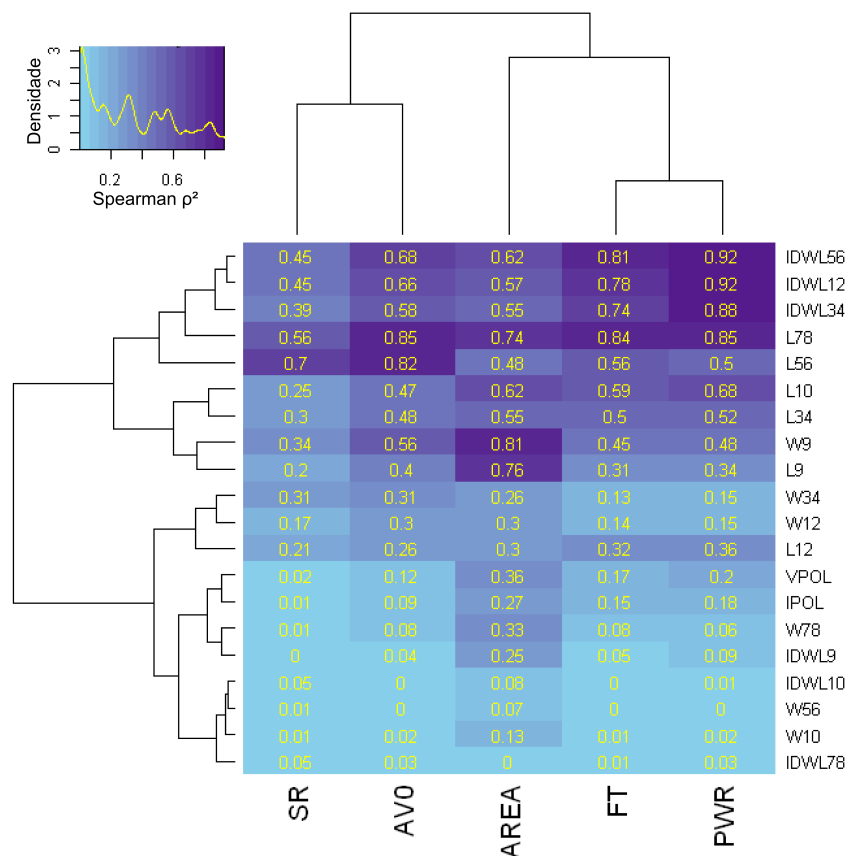


Figura 5.7: *Heatmap* e dendrogramas da correlação de Spearman ao quadrado (ρ^2) entre os parâmetros e os objetivos. IDWL [$I_{DS}/(W/L)$] é a medida da região de inversão do MOSFET.

O *Heatmap* mostra quais são as variáveis com maior correlação. Entre parâmetros e objetivos pelo mapa de cores e entre objetivos e entre parâmetros pelos dendrogramas superior e lateral respectivamente. A observação destas correlações leva a conclusões interessantes como por exemplo a correlação entre a corrente de inversão do par de entrada $I_{DS}/(W/L)$ (IDWL12), Potência dissipada Pwr e Frequência de ganho unitário f_T : é prática comum colocar o par diferencial em inversão forte para atingir-se altos f_T , o *Heatmap* mostra que a maior correlação desta ação é um efeito indesejado de aumento da Potência dissipada. Para maximizar f_T o projetista deve olhar primeiro para o comprimento de canal (L78) do par M_7-M_8 .

O segundo passo da proposta de extração de conhecimento é o Agrupamento de Observações (*Clustering*) das observações de vetor de objetivos (Λ), onde observações são agrupadas por similaridade. A escolha do número de clusters é feita empiricamente, neste caso quatro grupos de observações foram estabelecidos. Estes quatro agrupamentos caracterizam classes conhecidas dentro do jargão de microeletrônica como: OTAs de Alto Ganho, OTAs de Alta Frequência, OTAs de Micropotência, OTAs de uso geral. A Figura 5.8 ilustra estas divisões do espaço de objetivos (Λ).

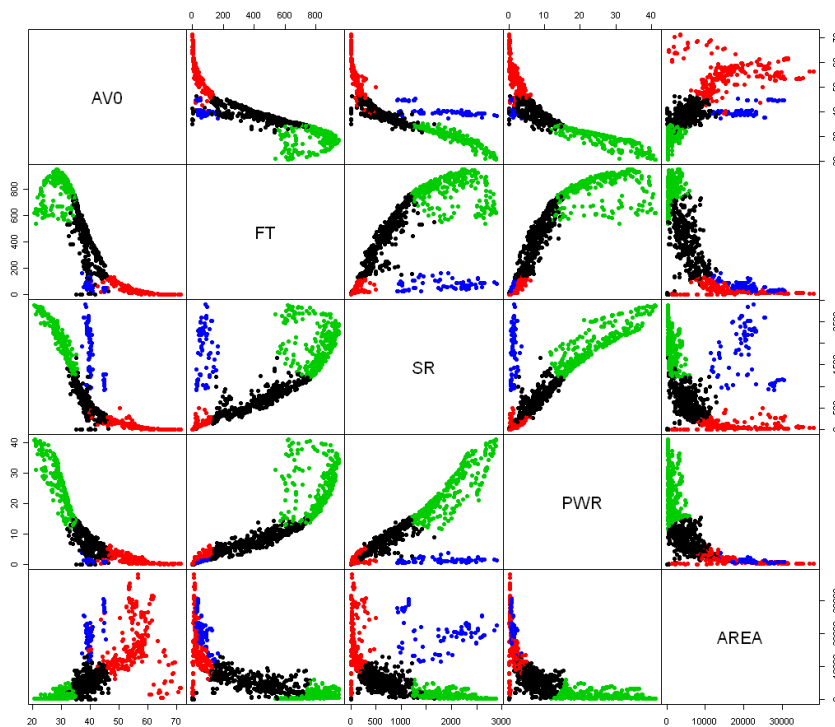


Figura 5.8: Agrupamento de Observações das Fronteiras de Pareto (\mathcal{PF}^*) das soluções obtidas no Apêndice B. (1) Preto: *Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos*, (2) Vermelho: *Alto Ganho*, (3) Verde: *Alta Frequência*, (4) Azul: *Baixa Potência*.

Com os agrupamentos de variáveis e observações, torna-se possível a investigação aprofundada das relações entre objetivos e parâmetros. Observa-se no *Heatmap*, nas regiões em vermelho, as variáveis com maior correlação. A investigação desta correlação é desdobrada através de gráficos como ilustrado na Figura 5.9, onde temos pares de variáveis (objetivo/parâmetro) de alta correlação segmentados pelo agrupamento de observações.

Através dos *clusters* é possível revelar questões importantes da fronteira de Pareto. Por exemplo, na bifurcação no gráfico SR-FT encontramos a categoria (4) Azul: *Baixa Potência* que possui comportamento distinto das demais soluções. Esta observação é esclarecedora quanto a natureza da bifurcação, de fato uma relação modal como observado no artigo Leme, Gimenez e Tomaz (2011).

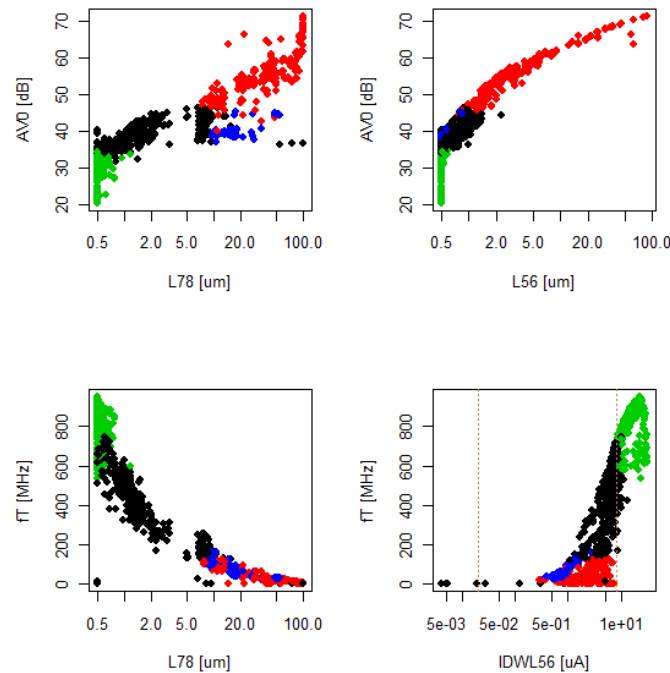
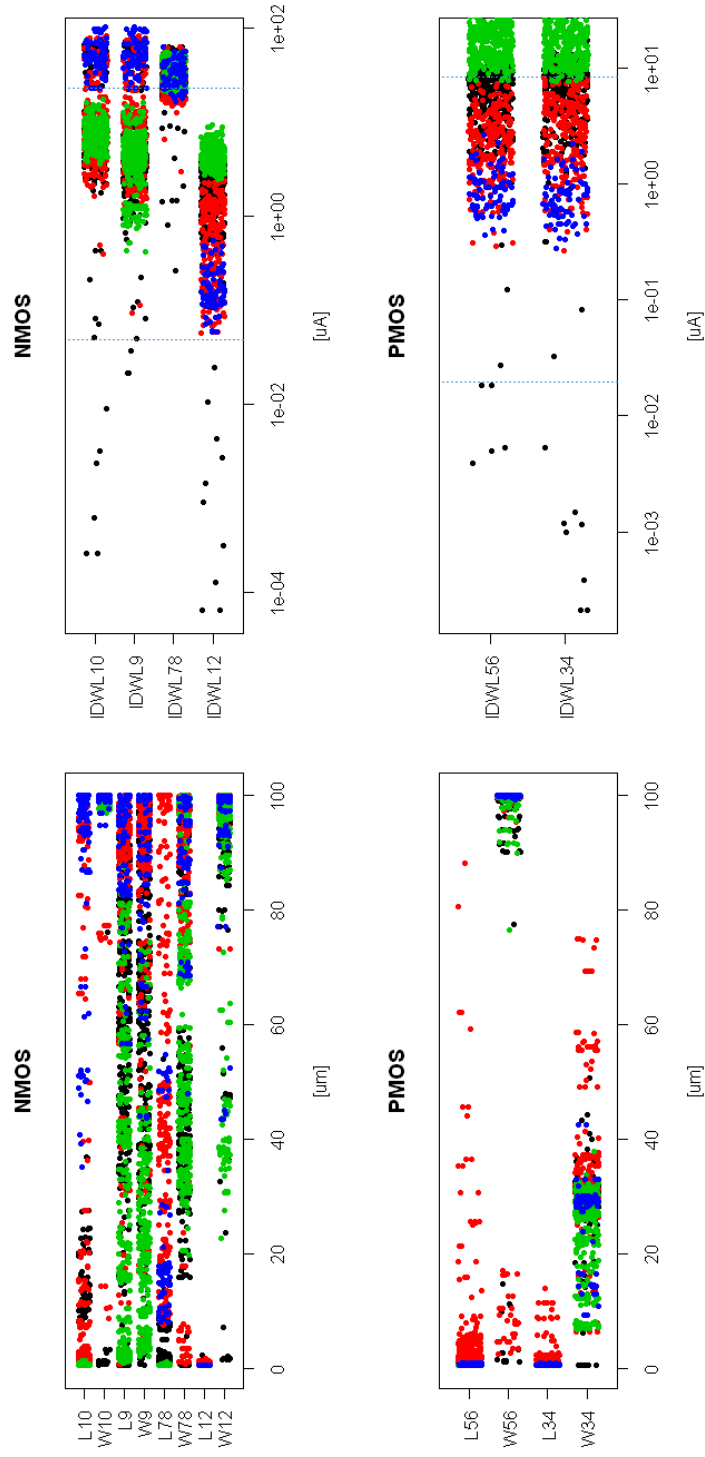


Figura 5.9: Exemplos de relações extraídas da observação do *Heatmap* e Agrupamento de Observações.

Os parâmetros de configuração direta dos MOSFET são apresentados na Figura 5.10(a) e os parâmetros indiretos (regime de inversão) são apresentados na Figura 5.10(b). A observação destes parâmetros mostra relações de interesse do projetista de CIs analógicos. Observa-se para toda solução ótima, um valor constante do comprimento de canal do par de entrada (L_{12}) igual a $0,5\mu m$, segue a observação de L_{34} que possui uma dispersão um pouco maior, mas pode ser considerada constante para a maioria das soluções ótimas, também com valor de $0,5\mu m$. L_{56} possui uma dispersão maior que os parâmetros anteriores especialmente para soluções da classe Alto Ganho (cor vermelha) que possuem dispersão em valores mais altos. Esta observação corrobora com resultados de otimização manual no artigo de Gimenez et al. (2005), onde o OTA otimizado possui comprimento de canal mínimo para todos os MOSFET exceto o par M_7 e M_8 que possui um valor ligeiramente superior aos parâmetros anteriores. Observa-se, de fato, que para L_{78} as soluções ótimas exigem valores mais altos.

Os regimes de inversão ilustrados na Figura 5.10(b) também contém informações de projeto importantes. Por exemplo, observa-se que o par de entrada em todas as configurações ótimas não precisa estar na região de inversão forte, a região de inversão moderada é suficiente. Esta observação é contra-intuitiva ao procedimento de iniciar-se o projeto configurando os MOSFET na região de inversão forte (STEFANOVIĆ; KAYAL, 2008).



(a) Larguras (W) e Comprimentos (L) de canal dos Transistores MOS- (b) Inversão ($I_{DS}(W/L)$) dos Transistores MOSFET. As linhas verticais delimitam a transição das regiões de Inversão Fraca-Moderada e Inversão Moderada-Forte.

Figura 5.10: Parâmetros dos Transistores MOSFET. (1) Preto: *Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos*, (2) Vermelho: *Alto Ganho*, (3) Verde: *Alta Frequência*, (4) Azul: *Baixa Potência*.

5.4.1 Automação da Extração de Conhecimentos

As árvores de regressão e classificação constituem uma proposta de automação da extração de conhecimento pela indução de *Regras* a partir das fronteiras de Pareto. A Figura 5.11 ilustra uma árvore de classificação com regras induzidas no espaço de parâmetros (Ω). A expansão da árvore foi limitada à mínima divisão de nós com 200 exemplos e as folhas representam a probabilidade condicional da solução pertencer a uma das quatro classes (1-*Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos*, 2-*Alto Ganho*, 3-*Alta Frequência* ou 4-*Baixa Potência*) dada a configuração do espaço de parâmetros (Ω).

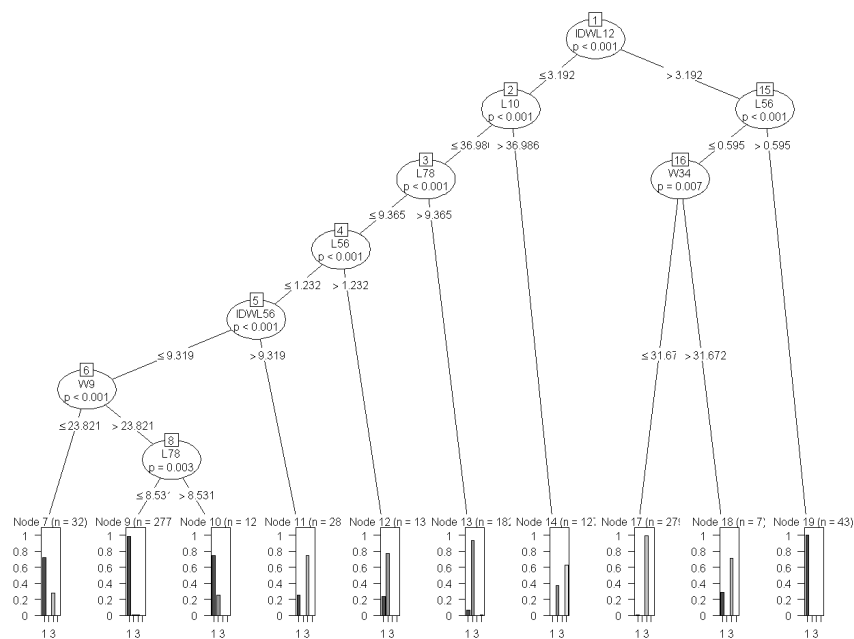
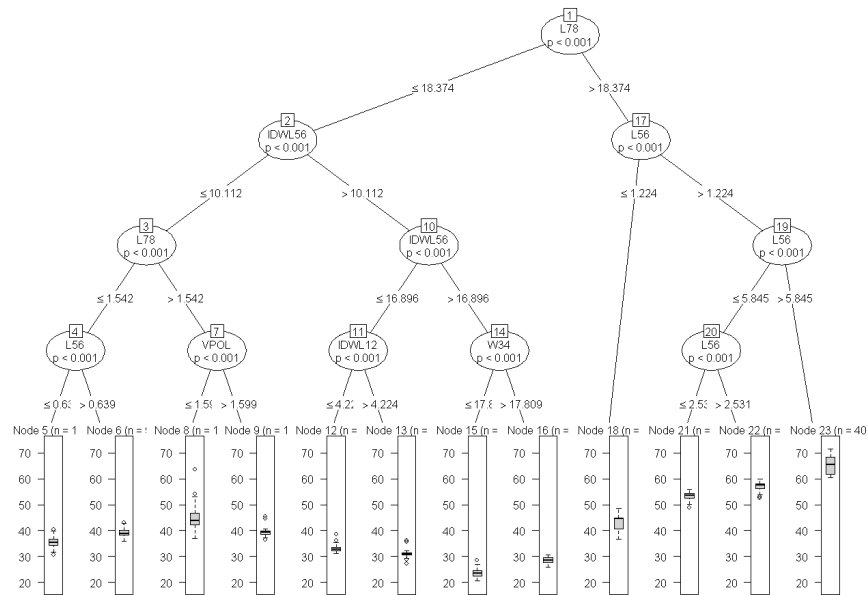
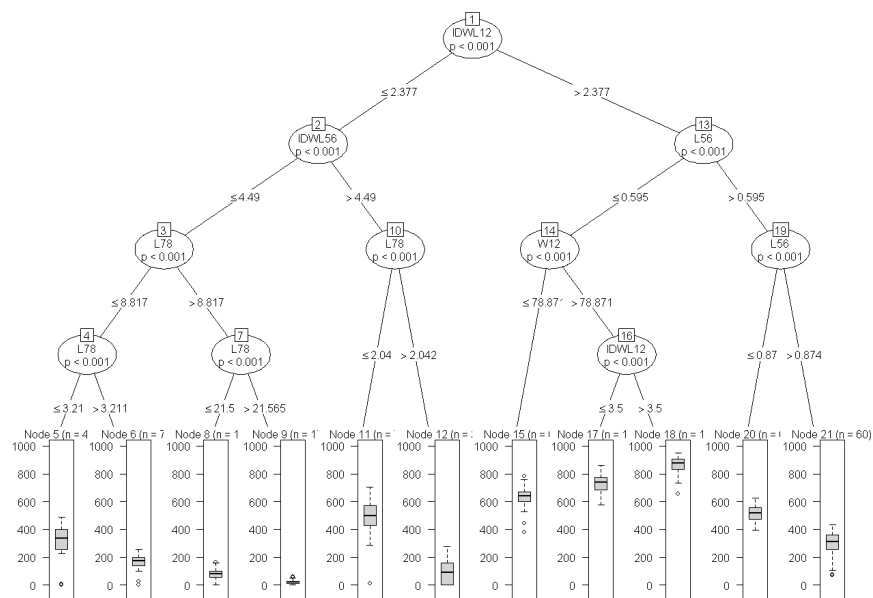


Figura 5.11: Árvore de Classificação para as Classes: (1) Preto: *Soluções de Médio Compromisso entre Objetivos*, (2) Vermelho: *Alto Ganho*, (3) Verde: *Alta Frequência*, (4) Azul: *Baixa Potência*.

A Árvore de Classificação da Figura 5.11 deve ser interpretada a partir do nó raiz até a folha com a classe de interesse correspondente. Por exemplo, observamos que para a classe (3) *Alta Frequência*, a folha ou nó 17, apresenta a maior probabilidade de realizações de OTAs pertencentes a esta classe. Os parâmetros $IDWL12 > 3.192\mu A$, $L56 < 0.595\mu m$ e $W34 < 31.67\mu m$ são as configurações que levam a obtenção da classe *Alta Frequência* dentro das relações de otimalidade da aproximação da fronteira Pareto.

De maneira similar à Árvore de Classificação, temos na Figura 5.12 as Árvores de Regressão para o objetivo A_{v0} (Figura 5.12(a)) e f_T (Figura 5.12(b)).

(a) Árvore de Regressão para o Objetivo A_{v0} .(b) Árvore de Regressão para o Objetivo f_T .**Figura 5.12:** Árvores de Regressão.

As Árvores de Classificação permitem observar relações quantitativas entre os parâmetros e objetivos. Estas são construídas individualmente para cada objetivo e as folhas apresentam a probabilidade posterior do objetivo, dados os parâmetros na forma gráfica de *boxplot*. Por exemplo para a configuração $L_{78} > 18,374\mu\text{m}$ (Nó 1), $L_{56} > 1,224\mu\text{m}$ (Nó 17) e $L_{56} > 5,845\mu\text{m}$ (Nó 19) temos a folha do Nó 23 com A_{v0} distribuído entre aproximadamente 60dB e 70dB . Esta

probabilidade condicional está ilustrada na Figura 5.13.

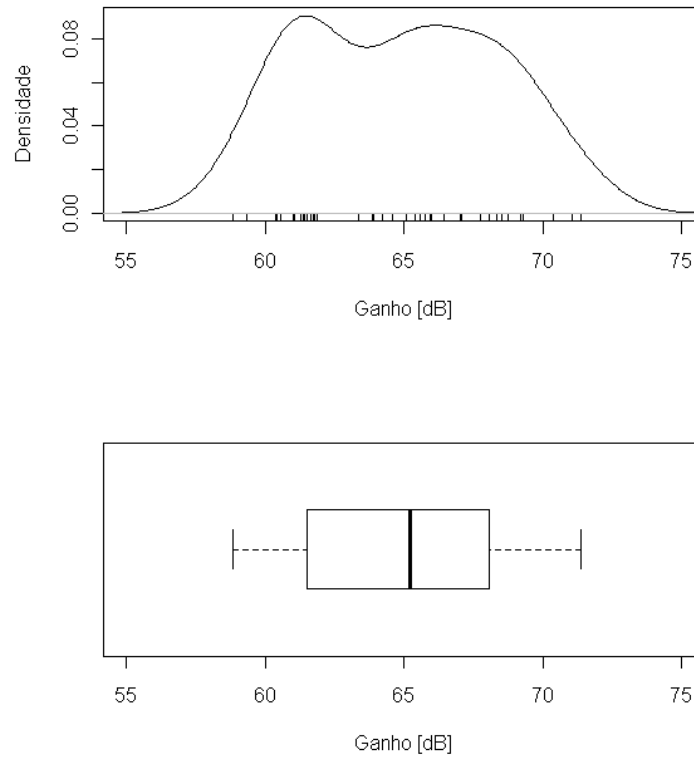


Figura 5.13: Densidade de A_{v0} (Nó 23) para soluções restritas pelas inequações $L_{78} > 18,374\mu m$ (Nó 1), $L_{56} > 1,224\mu m$ (Nó 17) e $L_{56} > 5,845\mu m$ (Nó 19) da árvore de regressão de A_{v0} .

Para a obtenção de uma realização de OTA com A_{v0} entre $60dB$ e $70dB$, na condição de otimalidade da fronteira de Pareto, podemos dizer que o OTA deve ser configurado com $L_{78} > 18,374\mu m$, $L_{56} > 1,224\mu m$ e $L_{56} > 5,845\mu m$.

6 CONCLUSÃO

“There is no true interpretation of anything; interpretation is a vehicle in the service of human comprehension. The value of interpretation is in enabling others to fruitfully think about an idea.”

Andreas Buja

Sendo a Fronteira de Pareto o conjunto das melhores relações de compromisso entre os objetivos, a observação e extração de conhecimentos a partir desta, tem o significado de extração de conhecimento sobre a condição de otimalidade. Os resultados experimentais, ainda que a fronteira de Pareto não tenha sido explorada completamente, demonstram que os métodos apresentados constituem um importante guia para o dimensionamento de OTAs aprimorados. A principal constatação é que o processo de busca evolucionário pode prover não somente resultados equiparáveis a projetistas humanos (ZEBULUM; PACHECO; VELLASCO, 2001; KOZA et al., 1999), mas através das Fronteiras de Pareto, relações antes desconhecidas até mesmo aos projetistas de CIs analógicos mais experientes.

Enquanto obter uma única solução ótima tem as suas vantagens de ordem prática, o custo computacional extra para a obtenção da Fronteira de Pareto compensa-se pelo conhecimento tácito que pode ser extraído destas. Este conhecimento também pode levantar questões relevantes de pesquisa na área de Microeletrônica.

O processo evolucionário não é limitado pelas regras de projeto convencionais, mas pelo princípio de sobrevivência do mais apto, desta forma explora-se regiões do espaço de busca antes inexploradas pelos projetistas humanos e permitindo o surgimento de soluções não convencionais (THOMPSON; LAYZELL, 1999). Aliado à condição de otimalidade da Fronteira de Pareto, pode-se dizer que é possível obter-se relações de otimalidade não convencionais, ou mesmo desconhecidas dentro da metodologia convencional.

O processo de exploração de dados manual está bem sedimentado sobre o *Heatmap* (Agrupamento de Variáveis) e *Clusters* (Agrupamento de Observações), permitindo a extração de relações importantes, mas as árvores de regressão e classificação possuem um grande potencial de automação, capazes de extrair a totalidade de regras do conjunto de dados da Fronteira de Pareto. Este conjunto

de regras pode ser utilizado para a síntese automática de sistemas analógicos (HJALMARSON, 2003).

A metodologia deste trabalho apresenta resultados interessantes, entretanto existem certas deficiências a serem abordadas em trabalhos futuros, dentre elas podemos citar:

- a) A instabilidade da convergência do Hipervolume: O critério de distância de apinhamento deve ser re-avaliado. Uma proposta é inserir a métrica *Contribuição de Hipervolume* de maior custo computacional, entretanto com grande probabilidade de resolver o problema;
- b) O custo computacional do experimento é elevado. São necessárias duas semanas em um computador equipado com CPU Intel i5 de 2.3 GHz para os 5 experimentos com 6000 gerações cada. Propõe-se utilizar aproximações (*surrogates*) das funções de aptidão baseadas como Redes Neurais, Regressões Polinomiais ou Kriging com o objetivo de acelerar este processo;
- c) As variações de processo são um aspecto fundamental quando transita-se em direção a nanoescala (HJALMARSON, 2003). Estas variações necessitam ser consideradas para a obtenção soluções robustas e também necessárias devido ao avanço tecnológico. Uma proposta plausível é utilizar métodos de Monte Carlo para o tratamento destas variações;
- d) A indução de regras através de árvores de regressão e classificação é apenas um dos métodos possíveis de extração automática de conhecimentos. A utilização de outros algoritmos como MARS (*Multiple Adaptive Regression Splines*) e PRIM (*Patient Rule Induction*) são alternativas para estudo. (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2003).
- d) Somente uma tecnologia CMOS e uma topologia de OTA foi abordada neste experimento. Propõe-se estender este estudo para outras topologias e outras tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ALTENBERG, L. The schema theorem and price's theorem. In: WHITLEY, L. D.; VOSE, M. D. (Ed.). **Foundations of Genetic Algorithms**. Estes Park, Colorado, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994. p. 23–49. ISBN 1-55860-356-5.
- BÄCK, T.; HAMMEL, U.; SCHWEFEL, H. P. An introduction to simulated evolutionary optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 3–17, 1997.
- BANDARU, S.; DEB, K. Automated discovery of vital knowledge from pareto-optimal solutions: First results from engineering design. In: **Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on**. Barcelona, Spain: [s.n.], 2010. p. 1–8.
- BANZHAF, W. et al. **Genetic Programming: An Introduction**. San Francisco, California, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.
- Bennett III, F. H. et al. Automatic synthesis, placement, and routing of an amplifier circuit by means of genetic programming. In: MILLER, J. et al. (Ed.). **Evolvable Systems: From Biology to Hardware**. [S.l.]: Springer, 2000. (Lecture Notes in Computer Science, v. 1801), p. 1–10.
- BRADSTREET, L.; WHILE, R. L.; BARONE, L. A fast incremental hypervolume algorithm. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 12, n. 6, p. 714–723, 2008.
- CARLSON, S. E.; SHONKWILER, R. Annealing a genetic algorithm over constraints. In: **in Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**. [s.n.], 1998. p. 3931–3936. Disponível em: <<http://vlead.mech.virginia.edu/publications/shekpaper/shenkpaper.html>>.
- CHEN, P. Y.; POPOVICH, P. M. **Correlation: parametric and nonparametric measures**. Thousand Oaks, CA, USA, 2002. (SAGE University Papers).
- COELLO, C. A. C. **A Survey of Constraint Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms**. [S.l.], 1999.
- COELLO, C. A. C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. **Computational Intelligence Magazine, IEEE**, v. 1, n. 1, p. 28–36, 2006.
- COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic and Evolutionary Computation)**. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN 0387332545.
- De Jong, K. A. **Evolutionary Computation: A Unified Approach**. 1st. ed. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, 2002. ISBN 0262041944.
- DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. 1. ed. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 978-0-470-74361-4 (P/B).
- DEB, K.; AGRAWAL, R. B. **Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space**. [S.l.], 1994. v. 9, 1–34 p.

DEB, K. et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm: Nsga-ii. In: **Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI (PPSN-VI)**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 849–858.

DEB, K.; GOYAL, M. A combined genetic adaptive search (geneas) for engineering design. **Computer Science and Informatics**, v. 26, p. 30–45, 1996.

DEB, K.; SRINIVASAN, A. **Innovization: Innovative Design Principles Through Optimization**. Kanpur, India, 2005.

FOGEL, D. B. An introduction to simulated evolutionary optimization. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 1, p. 3–14, 1994.

FRIENDLY, M. The history of the cluster heat map. **The American Statistician**, 2009.

GENTINNE, B. **A study of the potential of SOI technology for analog applications**. Tese (Doutorado) — Université catholique de Louvain, 1996.

GIMENEZ, S. P. et al. Potential of Improved Gain in Operational Transconductance Amplifier using 0.5 mm graded-channel SOI nMOSFET for Applications in the Gigahertz Range. In: SBMICRO 2005 - 20TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES. Florianópolis, SC. **Microelectronics Technology and Devices - SBMICRO 2005**. Pennington, NJ, USA: The Electrochemical Society, Inc., 2005. v. 2005-8, p. 502–511.

GLISSON, J. T. H. **Introduction to Circuit Analysis and Design**. Raleigh, NC, USA: Springer, 2011. ISBN 978-90-481-9442-1.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0201157675.

GOLDBERG, D. E. Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets, and blocking. **Complex Systems**, v. 5, p. 139–167, 1990.

GREENWOOD, G. W.; TYRREL, A. M. **Introduction to Evolvable Hardware: A Practical Guide for Designing Self-Adaptive Systems**. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2007.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2003. Hardcover. ISBN 0387952845.

HIGUCHI, T. et al. Introduction to evolvable hardware. In: _____. **Evolvable Hardware**. USA: Springer, 2006. (Genetic and Evolutionary Computation), cap. 1.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C. **Probability and Statistics in Engineering and Management Science**. 3. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1990.

HJALMARSON, E. **STUDIES ON DESIGN AUTOMATION OF ANALOG CIRCUITS: THE DESIGN FLOW**. Dissertação (Mestrado) — Linköpings universitet, SE-581 83 Linköping, Sweden, 2003.

HOTHORN, T. et al. **party: A Laboratory for Recursive Partytioning**. 2006.

IBS Corporation. **industry reports**. 2002.

IGEL, C. et al. Shark. **Journal of Machine Learning**, v. 9, 2008.

- KNOWLES, J.; THIELE, L.; ZITZLER, E. **A Tutorial on the Performance Assessment of Stochastic Multiobjective Optimizers**. [S.l.], Fev. 2006.
- KOZA, J. R. et al. **Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving**. San Francisco, California, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
- KRUISKAMP, W.; LEENAERTS, D. Darwin: Cmos opamp synthesis by means of a genetic algorithm. **Design Automation Conference**, IEEE Computer Society, v. 0, p. 433–438, 1995.
- LANGDON, W. B.; POLI, R. **Foundations of Genetic Programming**. 1. ed. Berlim, Germany: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3540424512.
- LEME, A. P. M.; GIMENEZ, S. P.; TOMAZ, C. E. Desvendando os limites de otimização de um ota cmos por meio da eletrônica evolucionária extrínseca. In: X SBAI - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMACÃO INTELIGENTE. UFSJ, São João Del Rei, MG, 2011.
- LIU, W. et al. **BSIM 3v3.2 MOSFET Model Users' Manual**. [S.l.], 1998. Disponível em: <<http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1998/3486.html>>.
- MATTIUSI, C.; FLOREANO, D. Evolution of analog networks using local string alignment on highly reorganizable genomes. **Evolvable Hardware, NASA/DoD Conference on**, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 0, p. 30, 2004.
- MATTIUSI, C.; FLOREANO, D. Analog genetic encoding for the evolution of circuits and networks. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 11, n. 5, p. 596–607, Oct. 2007.
- MATTIUSI, C. et al. The Age of Analog Networks. **AI Magazine**, v. 29, n. 3, p. 63–76, 2008.
- MCCONAGHY, T. et al. **Variation-Aware Analog Structural Synthesis: A Computational Intelligence Approach**. Dordrecht, Holland: Springer, 2009. (Analog Circuits and Signal Processing). ISBN 9789048129058.
- MISHRA, U. K.; SINGH, J. **SEMICONDUCTOR DEVICE PHYSICS AND DESIGN**. [S.l.]: Springer, 2008.
- NAGEL, L. W. **The Life of SPICE, A talk given at BCTM'96**. Jan. 2008. Disponível em: <<http://www.designers-guide.org/Perspective/life-of-spice.pdf>>.
- PRICE, G. R. Selection and covariance. **Nature**, v. 227, p. 520–521, 1970.
- R Development Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2011. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.
- SANSEN, W. M. C. **Analog Design Essentials (The International Series in Engineering and Computer Science)**. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN 0387257462.
- SANTOS, L. et al. **Electronic System Level Design: An Open-Source Approach**. [S.l.]: Springer, 2011.
- SCHAFFER, J. D. **Some Experiments in Machine Learning Using Vector Evaluated Genetic Algorithms**. Tese (Doutorado) — Nashville, TN: Vanderbilt University, 1984.

- SCHAUMANN, R. The Electrical Engineering Handbook. In: _____. [S.l.]: Elsevier, 2004. cap. Active Filters, p. 127–138.
- SCHWEFEL, H. P. Handbook of evolutionary computation. In: _____. [S.l.]: IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997. cap. Advantages (and disadvantages) of evolutionary computation over other approaches.
- SILVEIRA, F.; FLANDRE, D.; JESPERS, P. G. A. A g_m/i_d based methodology for the design of cmos analog circuits and its application to the synthesis of a silicon-on-insulator micropower ota. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 31, n. 9, 1996.
- STEFANOVIĆ, D.; KAYAL, M. **Structured Analog CMOS Design**. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland: Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8572-7.
- STOICA, A. et al. Reconfigurable electronics for extreme environments. In: _____. **Evolvable Hardware**. [S.l.]: Springer, 2006. (Genetic and Evolutionary Computation), cap. 8.
- STOICA, A. et al. Evolution of CMOS circuits in simulations and directly in hardware on a programmable chip. In: BANZHAF, W. et al. (Ed.). **Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference**. Orlando, Florida, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. v. 2, p. 1198–1203. Disponível em: <<http://www.cs.bham.ac.uk/wbl/biblio/gecco1999/GP-440.ps>>.
- THOMPSON, A.; LAYZELL, P. Analysis of unconventional evolved electronics. **Commun. ACM**, ACM, New York, NY, USA, v. 42, n. 4, p. 71–79, 1999. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/299157.299174>>.
- TUMA, T.; BÜRMENT, A. **Circuit Simulation with SPICE OPUS: Theory and Practice**. 1st. ed. Berlim, Germany: Birkhäuser Basel, 2009. ISBN 0817648666.
- WOLPERT, D. H.; MACREADY, W. G. No free lunch theorems for optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 67–82, 1997.
- XU, R.; WUNSCH, D. **Clustering (IEEE Press Series on Computational Intelligence)**. illustrated edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2008. Hardcover. ISBN 0470276800.
- ZEBULUM, R. S.; PACHECO, M. A.; VELLASCO, M. M. B. **Evolutionary Electronics: Automatic Design of Electronic Circuits and Systems by Genetic Algorithms**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2001. ISBN 0849308658.
- ZITZLER, E. et al. **Performance Assessment of Multiobjective Optimizers: An Analysis and Review**. Zurich, Switzerland, Jun 2002.

APÊNDICE A – LISTAGENS SPICE

A.1 Listagem para SIMULAÇÃO

```

*OTA optimization - Spice netlist - Leme, 2010
Vsrc (src 0) 3
Cload (4 0) 3p
Ipol (0 3) dc=<TOKEN::IPOL>u
.netclass otasim openloop
Vpol (2 0) dc=<TOKEN::VPOL>
Vac (1 2) dc=0 acmag=1
X0 (0 src 1 2 3 4) OTAMOSFET
.endn
.netclass otasim closedloop
Vpulse (2 0) dc=0 pulse=(0.0 2.0 5u 1p)
X0 (0 src 5 2 3 4) OTAMOSFET
RL (4 5) 0.001
Vupr (upr 0) pw1=(0 0.2 4.99u 0.2 5u 3.0 25u 3.0)
Vlwr (lwr 0) pw1=(0 0.00 20u 0.00 20.01u 1.6 25u 1.6)
.endn
.subckt OTAMOSFET gnd vdd inn inp ipol out
X1 (n01 inn n02 n02) nMOSFET w=<TOKEN::W1&2>u l=<TOKEN::L1&2>u
X2 (n03 inp n02 n02) nMOSFET w=<TOKEN::W1&2>u l=<TOKEN::L1&2>u
X3 (n01 n01 vdd vdd) pMOSFET w=<TOKEN::W3&4>u l=<TOKEN::L3&4>u
X4 (n03 n03 vdd vdd) pMOSFET w=<TOKEN::W3&4>u l=<TOKEN::L3&4>u
X5 (n04 n01 vdd vdd) pMOSFET w=<TOKEN::W5&6>u l=<TOKEN::L5&6>u
X6 (out n03 vdd vdd) pMOSFET w=<TOKEN::W5&6>u l=<TOKEN::L5&6>u
X7 (n04 n04 gnd gnd) nMOSFET w=<TOKEN::W7&8>u l=<TOKEN::L7&8>u
X8 (out n04 gnd gnd) nMOSFET w=<TOKEN::W7&8>u l=<TOKEN::L7&8>u
X9 (ipol ipol gnd gnd) nMOSFET w=<TOKEN::W9>u l=<TOKEN::L9>u

```

```

X10 (n02 ipol gnd gnd) nMOSFET w=<TOKEN::W10>u l=<TOKEN::L10>u
.ends
.subckt nMOSFET drain gate source bulk param: w l m=1
m0 (drain gate source bulk) nmosmod w={w} l={l} m={m}
+ ad={w*0.5u} as={w*0.5u}
+ pd={2*(w+0.5u)} ps={2*(w+0.5u)}
+ nrd={0.5u/w} nrs={0.5u/w}
.ends
.subckt pMOSFET drain gate source bulk param: w l m=1
m0 (drain gate source bulk) pmosmod w={w} l={l} m={m}
+ ad={w*0.5u} as={w*0.5u}
+ pd={2*(w+0.5u)} ps={2*(w+0.5u)}
+ nrd={0.5u/w} nrs={0.5u/w}
.ends
.include nmosmod.mod
.include pmosmod.mod
.control
set noconviter = 1
set units = degrees
set numdigit = 18
set width = 80
set forcebuild = 1
netclass select otasim::openloop
netclass rebuild
op
let vbias = V(4)
let pwr = -i(Vsrc)*V(src)
let area = 2*@x1:x0[w]*@x1:x0[l]+2*@x3:x0[w]*@x3:x0[l]
+ +2*@x5:x0[w]*@x5:x0[l]+2*@x7:x0[w]*@x7:x0[l]
+ +@x9:x0[w]*@x9:x0[l]+@x10:x0[w]*@x10:x0[l]
let id12 = @m0:x1:x0[id]
let id34 = @m0:x3:x0[id]
let id56 = @m0:x5:x0[id]
let id78 = @m0:x7:x0[id]
let id9 = @m0:x9:x0[id]
let id10 = @m0:x10:x0[id]

```

```

let sat12 = @m0:x1:x0[vds]-@m0:x1:x0[vgs]+@m0:x1:x0[vth]
let sat34 = @m0:x3:x0[vds]-@m0:x3:x0[vgs]+@m0:x3:x0[vth]
let sat56 = @m0:x5:x0[vds]-@m0:x5:x0[vgs]+@m0:x5:x0[vth]
let sat78 = @m0:x7:x0[vds]-@m0:x7:x0[vgs]+@m0:x7:x0[vth]
let sat9 = @m0:x9:x0[vds]-@m0:x9:x0[vgs]+@m0:x9:x0[vth]
let sat10 = @m0:x10:x0[vds]-@m0:x10:x0[vgs]+@m0:x10:x0[vth]
print vbias, pwr, area, id12, id34, id56, id78,
+ id9, id10, sat12, sat34, sat56, sat78,
+ sat9, sat10 > <TOKEN::OUTPUT>
ac dec 5 10 1g
let gainvec= mag(V(4)/V(1))
let av0= gainvec[0]
let cur=0
cursor cur right gainvec 1
let fT=real(frequency[%cur])
let p=unwrap(phase(V(4)/V(1)))
let pm=p[%cur]
print av0, fT, pm >> <TOKEN::OUTPUT>
netclass select otasim::closedloop
netclass rebuild
tran 0.1us 25us
let tupr = v(4) gt v(upr)
let tlwr = v(4) lt v(lwr)
if (tupr | tlwr)
    let sr = -sum(abs(v(4)*tupr) + abs(v(4)*tlwr))*1E6
else
    let out10=0.3
    let out90=1.5
    let c1=0
    let c2=0
    cursor c1 right V(4) out10 1
    cursor c2 right V(4) out90 1
    let trise=time[%c2]-time[%c1]
    let sr=(out90-out10)/trise
end
print sr >> <TOKEN::OUTPUT>

```

```
.endc
.end
```

A.2 Modelo nMOSFET

```
* T99J SPICE BSIM3 VERSION 3.1 PARAMETERS
* DATE: Dec 22/09
* LOT: T99J                WAF: 7101
* TECHNOLOGY: SCN05
* URL: http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/
* ami-c5/t99j-params.txt
.model nmosmod nMOS
+ Level = 53
+ VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 1.42E-8
+ XJ = 1.5E-7 NCH = 1.7E17 VTH0 = 0.6066706
+ K1 = 0.8916583 K2 = -0.0984787 K3 = 23.6382023
+ K3B = -8.4234075 W0 = 3.807398E-8 NLX = 1.509888E-9
+ DVTOW = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0
+ DVT0 = 0.7849492 DVT1 = 0.3994002 DVT2 = -0.5
+ U0 = 452.2685957 UA = 1E-13 UB = 1.176277E-18
+ UC = -5.73121E-14 VSAT = 1.841184E5 A0 = 0.5371856
+ AGS = 0.0886407 B0 = 1.957761E-6 B1 = 5E-6
+ KETA = -2.530193E-3 A1 = 7.230825E-5 A2 = 0.315185
+ RDSW = 1.081837E3 PRWG = 0.112333 PRWB = -1.908309E-4
+ WR = 1 WINT = 1.761404E-7 LINT = 9.06256E-8
+ XL = 1E-7 XW = 0 DWG = -1.191345E-9
+ DWB = 5.413496E-8 VOFF = -1.406284E-4 NFACTOR = 0.8085791
+ CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0
+ CDSCB = 0 ETA0 = 1.449343E-3 ETAB = 1
+ DSUB = 0.0129169 PCLM = 2.2363819 PDIBLC1 = 1.729314E-4
+ PDIBLC2 = 1.682325E-3 PDIBLCB = -0.5 DROUT = 1.01633E-4
+ PSCBE1 = 2.511791E9 PSCBE2 = 1E-3 PVAG = 0
+ DELTA = 0.01 RSH = 84.4 MOBMOD = 1
+ PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11
+ KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9
+ UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4
```

```

+ WL = 0 WLN = 1 WW = 0
+ WWN = 1 WWL = 0 LL = 0
+ LLN = 1 LW = 0 LWN = 1
+ LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5
+ CGDO = 1.82E-10 CGSO = 1.82E-10 CGBO = 1E-9
+ CJ = 4.14902E-4 PB = 0.839007 MJ = 0.429248
+ CJSW = 3.600151E-10 PBSW = 0.8 MJSW = 0.2047744
+ CJSWG = 1.64E-10 PBSWG = 0.8 MJSWG = 0.2047744
+ CF = 0 PVTH0 = -0.0632742 PRDSW = 203.232232
+ PK2 = -0.07324 WKETA = 2.457772E-3 LKETA = -6.437462E-3

```

A.3 Modelo pMOSFET

```

* T99J SPICE BSIM3 VERSION 3.1 PARAMETERS
* DATE: Dec 22/09
* LOT: T99J                WAF: 7101
* TECHNOLOGY: SCN05
* URL: http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/
* ami-c5/t99j-params.txt
.model pmosmod pMOS
+ Level = 53
+ VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 1.42E-8
+ XJ = 1.5E-7 NCH = 1.7E17 VTH0 = -0.9152268
+ K1 = 0.553472 K2 = 7.871921E-3 K3 = 6.2769786
+ K3B = -0.4898254 W0 = 1.23924E-7 NLX = 1.141647E-7
+ DVTOW = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0
+ DVT0 = 0.9353874 DVT1 = 0.3671023 DVT2 = -0.1875761
+ U0 = 201.3603195 UA = 2.408572E-9 UB = 1E-21
+ UC = -1E-10 VSAT = 1.202516E5 A0 = 0.8828557
+ AGS = 0.088966 B0 = 5.175071E-7 B1 = 0
+ KETA = -4.865785E-3 A1 = 1.370912E-4 A2 = 0.4773832
+ RDSW = 3E3 PRWG = -0.0281209 PRWB = -0.0479695
+ WR = 1 WINT = 2.309781E-7 LINT = 1.226577E-7
+ XL = 1E-7 XW = 0 DWG = -5.470108E-9
+ DWB = -1.983267E-8 VOFF = -0.0625678 NFACTOR = 1.1137245
+ CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0

```

```

+ CDSCB = 0 ETA0 = 0 ETAB = -0.2
+ DSUB = 1 PCLM = 2.3939111 PDIBLC1 = 0.0494294
+ PDIBLC2 = 3.663793E-3 PDIBLCB = -0.0364718 DR0UT = 0.2462657
+ PSCBE1 = 1E8 PSCBE2 = 3.359223E-9 PVAG = 0.0150055
+ DELTA = 0.01 RSH = 105.9 MOBMOD = 1
+ PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11
+ KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9
+ UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4
+ WL = 0 WLN = 1 WW = 0
+ WWN = 1 WWL = 0 LL = 0
+ LLN = 1 LW = 0 LWN = 1
+ LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5
+ CGD0 = 2.3E-10 CGS0 = 2.3E-10 CGB0 = 1E-9
+ CJ = 7.238228E-4 PB = 0.8735391 MJ = 0.4909204
+ CJSW = 2.545206E-10 PBSW = 0.8 MJSW = 0.1987115
+ CJSWG = 6.4E-11 PBSWG = 0.8 MJSWG = 0.1987115
+ CF = 0 PVTH0 = 5.98016E-3 PRDSW = 14.8598424
+ PK2 = 3.73981E-3 WKETA = 0.0104146 LKETA = -8.958097E-3

```

A.4 Extração de g_m/I_{ds} (NMOS)

```

*nMOSFET gm/Ids extraction - Leme, 2010
vds 1 0 dc = 1.5
vgs 2 0 dc = 0
x1 (1 2 0 0) nMOSFET w=10u l=10u
.subckt nMOSFET drain gate source bulk param: w l m=1
m0 (drain gate source bulk) nmosmod w={w} l={l} m={m}
+ ad={w*0.5u} as={w*0.5u}
+ pd={2*(w+0.5u)} ps={2*(w+0.5u)}
+ nrd={0.5u/w} nrs={0.5u/w}
.ends
.include nmosmod.mod
.control
dc vgs 0.38 10 lin 500
let gmids=deriv(ln(-i(vds)))
let ma = max(gmids)

```



```

let mi = min(gmids)
let wi=ma-(ma-mi)*0.1
let si=mi+(ma-mi)*0.1
let c=0
cursor c right gmids wi
let weakinv = -i(vds)[%c]
let c=0
cursor c right gmids si
let stronginv = -i(vds)[%c]
print weakinv, stronginv > nmosinv.txt
print -i(vds), gmids > nmosgmids.txt
.endc
.end

```

A.5 Extração de g_m/I_{ds} (PMOS)

```

*pMOSFET gm/Ids extraction - Leme, 2010
vds 1 0 dc = -1.5
vgs 2 0 dc = 0
x1 (1 2 0 0) pMOSFET w=10u l=10u
.subckt pMOSFET drain gate source bulk param: w l m=1
m0 (drain gate source bulk) pmosmod w={w} l={l} m={m}
+ ad={w*0.5u} as={w*0.5u}
+ pd={2*(w+0.5u)} ps={2*(w+0.5u)}
+ nrd={0.5u/w} nrs={0.5u/w}
.ends
.include pmosmod.mod
.control
dc vgs -0.65 -10 lin 500
let gmids=-deriv(ln(i(vds)))
let ma = max(gmids)
let mi = min(gmids)
let wi=ma-(ma-mi)*0.1
let si=mi+(ma-mi)*0.1
let c=0
cursor c right gmids wi

```

```
let weakinv = i(vds)[%c]
let c=0
cursor c right gmids si
let stronginv = i(vds)[%c]
print weakinv, stronginv > pmosinv.txt
print i(vds), gmids > pmosgmids.txt
.endc
.end
```

APÊNDICE B – LISTA DE SOLUÇÕES ($\mathcal{P}\mathcal{F}^*$)

Tabela B.1: Lista de Soluções ($\mathcal{P}\mathcal{F}^*$)

N.	Semente	$A_{\nu 0}$ (dB)	f_T (MHz)	SR (V/ μ s)	P_{avr} (mW)	Area (μ m ²)	I_{pot} (μ A)	V_{pot} (V)	$W_{1,2}$ (μ m)	$L_{1,2}$ (μ m)	$W_{3,4}$ (μ m)	$L_{3,4}$ (μ m)	$W_{5,6}$ (μ m)	$L_{5,6}$ (μ m)	$W_{7,8}$ (μ m)	$L_{7,8}$ (μ m)	W_9 (μ m)	L_9 (μ m)	W_{10} (μ m)	L_{10} (μ m)
1	1241	36,653	0,87268	0,614295	0,004818	4,6197	0,15	0,70	1,64	0,50	0,50	0,56	1,33	0,50	0,50	0,50	0,61	0,50	0,55	0,52
2	1241	36,5827	0,128321	0,095705	0,000736	218,703	4,69	0,70	1,64	0,52	14,18	1,66	14,70	0,50	0,79	54,05	12,23	1,47	3,31	15,78
3	1241	71,37731	0,161687	0,107571	0,108153	3499,47	33,92	1,32	99,96	0,56	16,20	4,75	3,47	88,29	1,07	100,00	30,19	11,53	74,44	27,66
4	1241	28,63933	948,15	2218,06	33,2845	2772,5	6,59	1,33	99,98	0,50	22,53	0,50	100,00	0,50	99,73	0,50	43,89	54,59	99,99	0,54
5	1241	21,00357	643,652	2855,96	39,7756	279,613	3,38	1,24	44,83	0,50	7,81	0,50	100,00	0,50	72,55	0,50	3,48	1,31	99,70	0,50
6	1241	56,39467	21,8401	36,9574	0,560333	19618	11,74	1,65	99,15	0,50	35,42	1,39	100,00	2,58	98,57	41,98	97,70	93,24	100,00	15,21
7	1241	22,42778	760,713	2826,6	40,4505	298,471	3,37	1,22	60,48	0,50	7,81	0,50	99,99	0,50	75,72	0,50	3,48	1,31	99,70	0,50
8	1241	27,13019	926,007	2365,05	35,5179	1317,56	3,10	1,32	95,97	0,50	18,20	0,50	99,99	0,50	74,83	0,50	22,65	43,21	99,88	0,50
9	1241	23,36006	706,537	2839,02	37,8074	275,567	3,05	1,22	38,54	0,50	7,81	0,50	99,99	0,50	74,77	0,50	3,48	1,31	99,69	0,50
10	1241	21,00365	643,652	2855,96	39,7753	279,612	3,38	1,24	44,83	0,50	7,81	0,50	100,00	0,50	72,55	0,50	3,48	1,31	99,70	0,50
11	1241	28,26553	918,146	2255,98	32,4645	1378,91	3,37	1,33	98,82	0,50	24,44	0,50	100,00	0,50	75,66	0,50	21,89	47,02	99,99	0,50
12	1241	23,35462	682,439	2825,75	36,4961	266,711	3,07	1,22	35,69	0,50	8,03	0,50	99,99	0,50	68,55	0,50	3,48	1,31	99,69	0,50
13	1241	24,25297	860,022	2420,87	36,0066	1333,76	2,93	1,32	96,42	0,50	16,83	0,50	100,00	0,50	53,66	0,51	21,92	46,27	99,96	0,52
14	1241	24,12486	670,15	2696,74	31,7017	266,166	1,81	1,32	42,48	0,50	12,53	0,50	99,97	0,50	54,44	0,50	3,06	2,17	99,71	0,50
15	1241	28,70044	931,469	2204,68	31,6663	2630,88	6,60	1,33	97,25	0,50	22,53	0,50	100,00	0,50	69,46	0,50	43,89	52,12	99,69	0,54
16	1241	33,61445	779,202	1334,42	16,1532	1668,64	2,89	1,32	96,81	0,50	30,62	0,50	99,71	0,53	49,32	0,55	33,00	40,37	99,82	0,50
17	1241	28,80439	917,888	2208,04	30,9426	1290,41	3,37	1,34	95,77	0,50	24,44	0,50	100,00	0,50	75,72	0,50	21,89	43,14	99,99	0,50
18	1241	29,72946	896,447	2092,34	27,8679	1126,07	3,35	1,32	98,57	0,50	28,42	0,50	100,00	0,50	69,36	0,55	19,53	39,56	99,99	0,50
19	1241	25,98579	903,274	2411,98	37,2239	1408,95	3,10	1,32	99,02	0,50	18,20	0,50	99,99	0,50	74,77	0,50	22,65	47,09	99,88	0,50
20	1241	30,76627	904,233	1927,95	25,1237	1293,68	3,09	1,32	98,34	0,50	28,20	0,50	99,99	0,50	69,57	0,50	22,87	41,40	99,88	0,50
21	1241	21,20247	648,118	2854,78	39,8534	281,235	3,38	1,24	44,21	0,50	7,81	0,50	100,00	0,50	74,79	0,50	3,48	1,31	99,70	0,50
22	1241	24,49139	659,411	2674,83	30,791	263,38	1,80	1,32	40,21	0,50	12,53	0,50	99,84	0,50	54,44	0,50	3,06	2,05	99,71	0,50
23	1241	33,67119	768,131	1481,74	15,5361	700,541	3,02	1,28	97,00	0,50	30,36	0,50	100,00	0,51	32,61	0,52	19,35	19,93	99,98	0,51
24	1241	32,11754	862,975	1738,06	20,4678	886,047	2,16	1,28	98,01	0,50	30,22	0,50	99,98	0,50	53,93	0,51	16,68	33,15	99,98	0,50
25	1241	30,17103	810,903	2233,15	21,403	333,769	2,57	1,24	91,65	0,50	28,25	0,50	99,99	0,50	29,32	0,50	5,11	6,70	99,88	0,50
26	1241	31,93467	874,673	1679,77	21,8661	2509,68	3,11	1,32	99,06	0,50	30,30	0,50	99,98	0,50	72,02	0,59	36,30	59,11	99,98	0,50
27	1241	24,07306	621,783	2652,24	29,2145	255,839	1,65	1,32	37,22	0,50	12,52	0,50	99,84	0,50	46,79	0,50	3,48	2,62	99,72	0,50
28	1241	32,55641	832,307	1604,07	18,6694	909,615	2,15	1,28	97,95	0,50	31,57	0,50	100,00	0,51	54,39	0,51	17,28	33,15	99,98	0,51

N.	Semente	A_{10} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/ μ s)	P_{WV} (mW)	Area (μ m ²)	I_{pol} (μ A)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μ m)	$L_{1,2}$ (μ m)	$W_{3,4}$ (μ m)	$L_{3,4}$ (μ m)	$W_{5,6}$ (μ m)	$L_{5,6}$ (μ m)	$W_{7,8}$ (μ m)	$L_{7,8}$ (μ m)	W_9 (μ m)	L_9 (μ m)	W_{10} (μ m)	L_{10} (μ m)
29	1241	33,89144	785,697	1256,92	15,8686	5856,13	3,75	1,28	97,98	0,50	30,94	0,50	99,99	0,52	53,53	0,59	68,20	80,73	99,99	0,55
30	1241	31,41511	851,165	1949,34	22,5882	519,013	3,13	1,36	95,65	0,50	29,12	0,50	99,85	0,52	71,08	0,56	10,48	15,35	99,95	0,51
31	1241	27,19895	599,499	2545,22	20,9827	227,52	0,69	1,17	30,59	0,50	11,51	0,50	99,35	0,50	31,05	0,50	2,74	1,67	99,87	0,50
32	1241	25,25476	602,037	2585,91	26,4126	247,95	1,65	1,32	30,94	0,50	12,13	0,50	99,84	0,50	46,84	0,50	3,68	2,24	99,70	0,50
33	1241	35,27904	596,868	837,633	10,1627	1946,26	3,06	1,32	99,82	0,50	41,00	0,50	100,00	0,51	47,80	0,76	44,34	35,61	99,99	0,52
34	1241	33,9654	772,079	1228,83	15,2094	3270,51	6,20	1,27	97,16	0,50	30,42	0,50	99,99	0,52	48,44	0,53	72,77	40,35	99,98	0,50
35	1241	22,70825	808,873	2467,43	37,339	1354,35	2,93	1,32	96,42	0,50	16,83	0,50	99,99	0,50	53,58	0,50	22,05	47,05	99,81	0,50
36	1241	22,42778	760,713	2826,6	40,4505	298,471	3,37	1,22	60,48	0,50	7,81	0,50	99,99	0,50	75,72	0,50	3,48	1,31	99,70	0,50
37	1241	29,48977	925,084	2139,79	29,3989	1277,76	3,07	1,34	97,33	0,50	24,53	0,50	100,00	0,50	70,62	0,50	21,68	43,11	99,99	0,50
38	1241	29,39641	885,892	2221,99	28,3661	537,705	3,38	1,32	93,60	0,50	26,39	0,50	100,00	0,51	70,31	0,51	10,45	18,50	99,90	0,50
39	1241	32,5622	735,212	1977,39	16,6171	329,774	2,87	1,24	91,57	0,50	30,70	0,50	99,89	0,52	31,30	0,65	4,23	3,23	99,89	0,50
40	1241	31,29242	778,943	1905,19	19,1647	472,038	2,47	1,24	87,02	0,50	30,22	0,50	99,70	0,50	31,66	0,50	10,59	16,37	99,82	0,50
41	1241	33,94377	765,067	1313,48	14,7975	1883,69	3,14	1,21	96,68	0,50	29,74	0,50	97,88	0,50	32,48	0,58	40,07	39,21	99,98	0,50
42	1241	40,08522	397,872	623,787	9,14029	7751,08	6,82	1,33	99,69	0,50	31,06	0,51	100,00	0,90	54,13	1,65	89,34	80,54	100,00	0,65
43	1241	33,07033	804,075	1410,73	17,8824	2137,71	2,89	1,36	99,49	0,50	30,65	0,50	99,99	0,53	49,32	0,54	33,00	54,39	99,98	0,54
44	1241	38,92946	317,464	277,632	3,201	6214,06	2,41	1,09	96,96	0,50	30,14	0,50	97,82	0,52	27,82	1,44	94,01	61,87	99,97	0,88
45	1241	32,1491	843,009	1635,81	19,7232	976,525	2,60	1,33	99,75	0,50	32,34	0,50	100,00	0,50	54,56	0,51	19,31	33,03	99,98	0,51
46	1241	30,53064	901,761	1944,9	25,5869	1331,86	3,05	1,32	97,22	0,50	28,48	0,50	99,98	0,50	75,12	0,50	22,65	43,28	99,98	0,50
47	1241	31,86446	876,592	1690,71	22,1309	2480,36	3,11	1,32	99,20	0,50	30,12	0,50	99,98	0,50	73,02	0,58	35,75	59,16	99,98	0,50
48	1241	27,84564	890,247	2247,96	30,2606	1051,02	3,02	1,32	96,64	0,50	23,85	0,50	99,86	0,50	48,66	0,51	18,32	39,89	99,48	0,50
49	1241	31,32691	877,072	2129,73	23,8469	414,981	3,13	1,36	98,15	0,50	27,62	0,50	100,00	0,52	74,56	0,56	6,34	8,17	99,89	0,51
50	1241	37,58812	492,97	770,881	10,9847	6719,73	5,88	1,36	97,99	0,50	31,48	0,51	95,83	0,79	44,37	1,04	82,11	76,60	99,99	0,57
51	1241	28,53078	938,628	2195,85	32,9814	2850,32	6,59	1,36	99,54	0,50	22,53	0,50	100,00	0,50	99,78	0,50	45,37	54,54	99,98	0,54
52	1241	26,74503	611,747	2536,98	24,4807	247,915	1,65	1,32	30,65	0,50	12,14	0,50	99,84	0,50	49,43	0,50	3,39	1,63	99,70	0,50
53	1241	26,65632	660,518	2587,46	26,0273	253,664	1,65	1,32	37,22	0,50	12,52	0,50	99,84	0,50	46,79	0,50	3,48	2,00	99,72	0,50
54	1241	34,42881	730,23	1229,51	13,6507	2107,26	2,28	1,17	97,02	0,50	30,33	0,50	98,66	0,51	30,34	0,54	37,42	47,98	99,98	0,50
55	1241	35,2302	687,089	1086,13	12,1563	2206,66	3,14	1,21	96,96	0,50	29,77	0,50	97,97	0,51	32,51	0,66	47,77	39,45	99,98	0,52
56	1241	35,4309	585,645	1077,44	14,3927	3710,83	3,68	1,34	98,23	0,50	30,70	0,50	100,00	0,70	43,81	0,99	41,84	78,77	99,99	0,60
57	1241	32,18489	837,437	1617,8	19,5366	1006,09	2,59	1,33	99,10	0,50	32,34	0,50	99,99	0,50	54,60	0,51	19,78	33,76	99,99	0,51
58	1241	45,59908	138,106	230,031	3,63859	10560,5	11,23	1,33	99,34	0,50	32,19	0,51	100,00	0,96	95,71	8,55	94,55	88,86	100,00	1,98
59	1241	26,85003	612,492	2527,96	24,2221	250,451	1,65	1,32	30,79	0,50	12,13	0,50	99,84	0,50	48,10	0,50	4,10	2,26	99,70	0,50
60	1241	31,04017	880,652	2069,02	23,3699	495,62	2,53	1,32	88,36	0,50	26,40	0,50	99,99	0,50	70,31	0,50	10,08	15,85	99,94	0,50
61	1241	23,36606	706,537	2839,02	37,8074	275,567	3,05	1,22	38,54	0,50	7,81	0,50	99,99	0,50	74,77	0,50	3,48	1,31	99,69	0,50
62	1241	34,61602	736,282	1079,08	13,3952	5987,59	2,97	1,28	97,79	0,50	30,93	0,50	99,99	0,52	44,29	0,56	69,94	80,80	99,99	0,55
63	1241	27,68101	880,762	2238,55	29,9061	1055,35	3,02	1,32	96,63	0,50	23,98	0,50	99,86	0,50	48,66	0,55	18,32	39,89	99,49	0,50
64	1241	35,84492	630,189	908,405	10,5333	3207,62	3,73	1,28	97,03	0,50	30,49	0,50	100,00	0,51	32,61	0,67	72,23	39,90	99,98	0,52
65	1241	31,84442	773,629	1849,26	18,1287	463,743	2,47	1,24	87,02	0,50	30,22	0,50	99,72	0,50	31,75	0,51	10,46	15,60	99,97	0,52
66	1241	24,5622	629,747	2649,41	28,7791	253,255	1,65	1,32	37,96	0,50	12,52	0,50	99,84	0,50	46,75	0,51	3,02	1,89	99,72	0,50
67	1241	29,92938	908,662	2042,54	27,6298	1413,58	3,10	1,32	99,62	0,50	28,33	0,50	100,00	0,50	73,42	0,51	22,29	47,57	99,98	0,50
68	1241	26,15236	646,642	2604,56	26,6285	253,168	1,66	1,32	36,10	0,50	12,17	0,50	99,84	0,50	46,70	0,50	3,68	2,24	99,73	0,50
69	1241	34,06901	762,595	1185,94	14,9405	5490,2	3,89	1,32	96,15	0,50	30,94	0,50	99,99	0,52	53,58	0,59	71,18	72,24	100,00	0,55
70	1241	30,19109	910,913	2011,45	27,0217	1452,36	3,10	1,32	99,74	0,50	28,34	0,50	100,00	0,50	74,77	0,51	23,08	47,57	99,98	0,50
71	1241	30,70178	895,635	1916,29	24,8798	1304,99	3,10	1,32	96,23	0,50	28,33	0,50	99,99	0,50	69,48	0,50	23,07	41,64	99,88	0,50
72	1241	36,00656	543,056	752,286	7,96942	4195,63	2,14	1,17	95,60	0,50	29,65	0,50	97,81	0,52	17,68	0,96	73,81	52,61	99,98	0,51
73	1241	29,56232	896,742	2220,35	28,4296	540,591	3,38	1,32	96,47	0,50	26,39	0,50	100,00	0,51	70,31	0,51	10,45	18,50	99,94	0,50
74	1241	41,83475	275,019	499,737	8,75797	8412,61	6,09	1,32	99,50	0,50	33,29	0,51	99,86	1,25	51,18	2,82	82,33	93,30	99,99	0,60
75	1241	40,87997	377,083	540,204	7,73871	8465,83	6,71	1,24	99,01	0,50	31,03	0,50	98,97	0,91	54,17	1,61	99,21	79,79	99,89	0,66

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{avr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pod} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)	
76	1241	37,67312	477,09	507,54	5,6766	3400,96	2,22	1,22	96,88	0,50	30,69	0,52	99,76	0,52	32,03	0,81	89,44	34,26	99,99	0,52	
77	1241	30,19166	909,363	2000,84	26,8488	1439,86	3,10	1,32	99,02	0,50	28,34	0,50	99,99	0,50	74,77	0,50	23,08	47,10	99,88	0,50	
78	1241	35,06404	691,665	1293,45	11,45228	569,095	2,15	1,19	97,95	0,50	30,70	0,50	100,00	0,50	32,01	0,51	17,28	14,87	99,98	0,51	
79	1241	27,46177	874,599	2241,67	29,7933	1019,89	3,01	1,32	96,78	0,50	23,96	0,50	99,87	0,50	47,88	0,57	17,46	39,67	99,99	0,52	
80	1241	23,40635	619,827	2797,94	35,6223	264,659	3,10	1,24	27,53	0,50	7,24	0,50	99,99	0,50	74,79	0,50	3,98	1,31	99,72	0,50	
81	1241	30,7056	855,003	2161,28	23,8951	386,567	3,13	1,36	98,68	0,50	27,38	0,50	99,85	0,52	47,50	0,56	6,33	8,43	99,89	0,51	
82	1241	31,55078	860,539	2067,15	23,1636	417,706	3,13	1,36	98,15	0,50	27,62	0,50	100,00	0,53	74,56	0,56	6,34	8,17	99,89	0,51	
83	1241	32,60015	799,831	1551,1	17,5835	3201,46	3,14	1,28	96,66	0,50	30,56	0,50	100,00	0,51	32,84	0,62	72,53	39,69	99,98	0,52	
84	1241	65,9525	0,502634	0,411963	0,115783	13137	18,39	1,28	99,90	0,51	13,29	3,86	2,50	15,91	2,05	92,07	99,01	98,64	74,72	36,24	
85	1241	32,78754	787,247	1483,53	16,9096	2414,71	3,68	1,20	98,22	0,50	30,70	0,50	100,00	0,50	31,85	0,64	41,84	50,01	99,98	0,52	
86	1241	36,30225	606,927	1003,08	12,5081	3689,6	5,13	1,28	98,20	0,50	30,70	0,50	100,00	0,62	46,91	0,96	67,89	48,53	99,98	0,51	
87	1241	37,41629	569,299	807,426	9,93071	3713,5	3,60	1,27	98,22	0,50	31,07	0,50	100,00	0,62	47,80	0,97	68,91	48,13	99,95	0,50	
88	1241	38,42254	503,053	651,897	8,30972	4899,03	2,71	1,32	99,68	0,50	32,34	0,51	100,00	0,67	31,30	0,98	73,02	61,90	99,98	0,51	
89	1241	32,70217	793,594	1526,46	17,2225	1586,54	3,16	1,20	96,84	0,50	30,69	0,50	99,71	0,50	31,27	0,56	31,55	40,37	99,99	0,51	
90	1241	23,22772	579,684	2633,16	28,7735	247,217	1,65	1,32	30,66	0,50	12,12	0,50	99,84	0,50	46,76	0,50	3,31	2,26	99,70	0,50	
91	1241	30,01425	911,061	2030,19	27,4281	1435,26	3,10	1,32	99,55	0,50	28,33	0,50	99,99	0,50	75,05	0,50	22,65	47,76	99,98	0,50	
92	1241	27,84564	890,247	2247,96	30,2606	1051,02	3,02	1,32	96,64	0,50	23,85	0,50	99,86	0,50	48,66	0,51	18,32	39,89	99,48	0,50	
93	1241	38,52799	492,295	639,398	8,12704	4975,41	2,66	1,32	98,96	0,50	32,53	0,51	100,00	0,67	31,22	1,06	73,64	62,35	99,98	0,51	
94	1241	32,31639	854,081	1592,08	20,0713	2288,39	2,90	1,32	99,17	0,50	30,12	0,50	99,98	0,50	49,33	0,54	35,75	54,68	99,98	0,50	
95	1241	31,65113	776,508	1884,13	18,5497	454,906	2,46	1,24	87,02	0,50	30,22	0,50	99,89	0,50	31,75	0,51	10,02	15,36	99,97	0,52	
96	1241	39,17284	438,367	506,011	6,466482	6293,1	2,71	1,33	99,54	0,50	32,40	0,51	99,91	0,67	30,69	0,98	94,98	62,27	99,90	0,53	
97	1241	40,64577	322,856	316,882	3,856885	4644,2	2,39	1,19	96,93	0,50	31,43	0,50	99,88	0,70	27,14	1,14	89,54	47,54	99,97	0,58	
98	1241	31,81608	855,741	1759,56	21,2377	941,945	2,60	1,32	99,83	0,50	30,64	0,50	100,00	0,50	49,69	0,55	18,38	32,98	99,99	0,50	
99	1241	45,11023	153,424	264,18	4,09372	9996,66	3,00	1,32	97,65	0,50	32,21	0,50	99,91	0,96	92,92	6,88	94,62	88,02	99,99	0,67	
100	1241	41,89808	279,794	435,331	7,13968	8247,37	6,44	1,43	99,67	0,50	36,57	0,52	100,00	0,99	53,66	3,16	95,58	78,55	99,99	0,65	
101	1241	28,45416	671,626	2501,14	22,9901	252,459	1,64	1,32	37,20	0,50	12,98	0,50	99,71	0,50	46,60	0,50	3,44	1,62	99,72	0,50	
102	1241	17,05645	0,184278	0,122438	0,112638	3539,74	33,92	1,32	99,96	0,62	16,20	4,75	3,47	80,67	1,07	100,00	30,19	11,53	77,40	27,66	
103	1241	38,60794	453,875	696,355	9,50178	5438,23	6,50	1,32	97,74	0,50	30,24	0,50	99,99	0,83	25,61	1,06	82,33	61,12	99,98	0,58	
104	1241	40,66445	362,156	411,108	5,35245	3282,48	3,71	1,33	97,78	0,50	31,72	0,50	99,94	0,77	30,63	1,15	78,17	36,78	99,99	0,54	
105	1241	28,53078	938,628	2195,85	32,9814	2850,32	6,59	1,36	99,54	0,50	22,53	0,50	100,00	0,50	99,78	0,50	45,37	54,54	99,98	0,54	
106	1241	42,61568	208,547	446,577	6,69777	8164,8	2,97	1,32	97,68	0,50	31,90	0,50	99,91	0,96	93,08	6,87	79,63	81,76	99,99	0,54	
107	1241	28,63862	948,113	2218,12	33,2842	2772,49	6,59	1,33	99,97	0,50	22,53	0,50	100,00	0,50	99,73	0,50	43,89	54,59	99,99	0,54	
108	1241	46,34547	109,148	202,726	2,93451	6045,32	3,13	1,32	98,44	0,50	30,56	0,52	100,00	0,97	91,64	11,14	95,20	38,03	99,99	0,59	
109	1241	36,44331	579,172	977,638	12,9297	6799,41	6,16	1,27	99,77	0,50	31,77	0,51	100,00	0,70	43,46	0,90	73,93	86,36	100,00	0,64	
110	1241	32,59757	800,274	1552,57	17,5981	1518,13	3,14	1,21	96,95	0,50	29,76	0,50	97,97	0,50	32,72	0,58	30,55	39,45	99,98	0,50	
111	1241	34,69806	737,094	1127,68	13,8901	6069,5	3,14	1,28	97,78	0,50	30,95	0,50	99,95	0,52	44,25	0,66	69,94	81,84	99,99	0,55	
112	1241	35,70371	527,781	1038,38	14,1862	7398,79	6,09	1,27	99,00	0,50	30,64	0,51	100,00	0,78	48,44	1,54	83,79	82,49	99,99	0,50	
113	1241	31,41494	790,531	2102,33	19,2447	337,525	2,60	1,24	91,45	0,50	30,44	0,50	99,99	0,50	30,59	0,51	5,38	6,34	99,89	0,50	
114	1241	32,33115	847,364	1563,76	20,2131	2548,9	3,11	1,32	99,00	0,50	31,65	0,50	100,00	0,51	72,48	0,59	36,90	59,11	99,98	0,51	
115	1241	39,48337	237,061	225,965	2,46596	5326,73	2,08	1,17	95,57	0,50	30,30	0,50	99,48	0,55	15,88	2,23	94,11	52,47	99,90	0,82	
116	1241	39,52432	422,65	549,996	7,39494	3893,4	3,71	1,33	98,25	0,50	31,71	0,50	100,00	0,76	49,11	1,15	69,86	49,30	99,99	0,54	
117	1241	38,6929	428,098	766,398	11,2763	6915,68	6,07	1,27	99,20	0,50	31,53	0,51	100,00	0,95	56,60	1,38	82,47	77,45	99,99	0,52	
118	1241	31,87037	845,445	1660,61	20,3457	1059,04	2,60	1,33	99,03	0,50	32,34	0,50	99,99	0,50	54,56	0,50	19,96	36,18	99,88	0,51	
119	1241	46,09442	132,023	136,566	1,96277	3321,61	3,63	1,32	99,26	0,50	30,64	0,51	100,00	0,96	32,39	5,04	41,81	59,37	99,99	1,90	
120	1241	41,96761	255,861	470,949	8,47301	8453,91	6,47	1,43	99,50	0,50	33,28	0,51	99,86	1,25	53,79	3,18	82,13	93,30	99,99	0,65	
121	1241	44,02953	139,96	157,643	1,87192	2033,02	3,56	1,32	99,26	0,50	30,63	0,50	99,74	0,78	32,84	5,12	32,35	37,68	99,98	1,92	

N.	Semene	A_{10} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{WV} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
123	1241	31,38132	853,121	1963,64	22,7412	516,935	3,13	1,36	95,34	0,50	28,82	0,50	99,85	0,52	71,08	0,56	10,44	15,26	99,95	0,51
124	1241	29,09623	888,254	2137,17	27,2655	978,165	3,02	1,32	94,38	0,50	24,16	0,50	99,86	0,50	47,31	0,55	18,87	34,83	99,99	0,50
125	1241	36,46748	517,303	904,344	11,942	2970,1	3,69	1,32	98,17	0,50	30,68	0,51	100,00	0,77	28,78	1,09	43,19	59,50	99,97	0,54
126	1241	36,19693	529,9	951,462	12,703	3013,48	3,67	1,32	99,39	0,50	30,73	0,51	100,00	0,77	31,85	1,10	43,64	59,73	99,98	0,52
127	1241	45,29518	124,922	173,426	2,60652	9700,62	6,85	1,41	99,31	0,50	31,05	0,51	100,00	0,90	54,63	8,95	89,88	91,39	100,00	1,97
128	1241	30,48816	903,828	1953,17	25,8218	1332,32	3,09	1,34	98,33	0,50	28,16	0,50	99,99	0,50	70,63	0,50	22,85	43,09	99,88	0,50
129	1241	44,08821	132,011	142,876	1,70831	2049,29	3,56	1,32	99,26	0,50	30,63	0,50	99,74	0,78	32,84	5,12	32,35	37,68	99,98	2,08
130	1241	40,44246	391,687	588,502	8,54582	7835,62	6,33	1,32	99,73	0,50	31,08	0,51	99,95	0,90	53,09	1,63	90,09	80,87	100,00	0,65
131	1241	30,75845	899,067	1915,76	24,8926	1305,98	3,10	1,32	97,21	0,50	28,33	0,50	99,99	0,50	69,48	0,50	23,07	41,64	99,88	0,50
132	1241	33,68766	675,501	1335,2	13,1835	623,442	3,36	1,21	96,88	0,50	37,93	0,50	99,71	0,50	30,34	0,50	18,56	16,60	99,99	0,51
133	1241	53,05148	54,0542	103,864	1,30967	14395,7	20,28	1,32	99,63	0,50	32,66	1,27	100,00	1,75	97,51	28,49	87,15	79,79	100,00	13,53
134	1241	32,67484	788,022	1483,53	17,0785	2414,71	3,68	1,22	98,22	0,50	30,70	0,50	100,00	0,50	31,85	0,64	41,84	50,01	99,98	0,52
135	1241	30,53454	884,527	1944,84	25,6613	1454,17	3,11	1,32	99,06	0,50	30,24	0,50	99,99	0,50	74,40	0,59	23,08	47,10	99,98	0,50
136	1241	41,86304	155,945	378,572	6,87709	7309,47	3,11	1,27	99,73	0,50	50,71	0,50	99,99	0,94	93,37	6,82	68,31	82,67	99,99	0,50
137	1241	59,78601	9,50069	17,4366	0,358283	26568,3	14,65	1,37	99,43	0,50	32,01	1,38	100,00	5,74	98,89	72,56	99,43	90,02	99,99	19,33
138	1241	48,5172	70,4914	129,271	2,12765	12982,7	7,11	1,39	99,79	0,50	31,65	0,58	100,00	1,15	96,94	21,02	91,32	91,02	99,99	2,28
139	1241	52,64058	59,8894	125,43	1,56997	16020,1	25,11	1,42	99,62	0,50	35,47	1,39	100,00	1,80	97,11	28,23	91,22	92,59	100,00	15,32
140	1241	32,80804	825,111	1516,03	18,3253	1581,09	3,14	1,33	96,69	0,50	30,21	0,50	99,85	0,50	46,97	0,58	31,86	39,21	99,98	0,50
141	1241	34,39945	758,978	1156,44	14,3138	5680,36	3,60	1,25	97,97	0,50	31,01	0,50	99,99	0,52	50,87	0,58	69,94	76,26	99,99	0,55
142	1241	36,53647	569,438	1004,88	12,7623	3821,33	3,42	1,24	98,21	0,50	30,69	0,50	100,00	0,70	45,13	1,19	42,99	78,77	99,89	0,60
143	1241	38,91282	370,575	411,911	4,28471	2005,78	1,93	1,21	95,66	0,50	30,27	0,52	97,72	0,55	19,58	1,23	42,55	38,66	99,90	0,78
144	1241	37,08063	529,831	872,151	12,0268	6406,07	6,02	1,32	97,77	0,50	31,88	0,51	100,00	0,77	43,57	1,00	75,62	79,03	99,99	0,60
145	1241	45,84166	124,835	177,023	2,70681	6735,62	11,30	1,33	99,28	0,50	31,53	0,51	100,00	0,95	56,40	8,53	87,66	59,93	100,00	1,98
146	1241	42,84165	194,957	358,697	4,87398	7940,24	6,64	1,31	97,89	0,50	29,53	0,51	100,00	0,79	96,70	8,08	73,83	80,69	99,93	1,33
147	1241	38,42105	433,57	787,055	11,6596	7444,67	6,07	1,27	99,17	0,50	31,53	0,51	100,00	0,95	56,43	1,35	83,89	82,49	99,99	0,52
148	1241	41,57334	303,962	476,126	7,57238	8203,8	6,07	1,32	99,67	0,50	36,58	0,52	100,00	0,99	51,05	2,80	95,77	78,55	99,99	0,60
149	1241	38,21252	453,921	660,709	9,31593	5454,67	6,50	1,32	99,78	0,50	30,24	0,50	99,97	0,87	24,65	0,61	82,15	61,62	99,98	0,58
150	1241	35,79202	570,486	855,389	8,70425	1866,33	2,05	1,18	95,71	0,50	30,18	0,50	97,71	0,52	15,88	0,66	43,22	36,24	99,90	0,52
151	1241	54,54256	45,9463	89,1128	1,13681	13360,6	25,18	1,42	99,28	0,50	30,64	1,29	100,00	2,03	97,87	27,98	90,47	64,73	100,00	14,44
152	1241	51,0773	73,3477	153,742	4,17526	10340,1	2,54	1,44	99,67	0,50	32,17	0,51	99,89	2,32	92,42	10,82	88,30	87,12	100,00	0,52
153	1241	32,8083	824,889	1515,42	18,3188	1581,04	3,14	1,33	96,69	0,50	30,21	0,50	99,81	0,50	46,97	0,58	31,86	39,21	99,98	0,50
154	1241	34,16138	744,253	1451,3	14,0314	638,898	3,16	1,21	96,84	0,50	30,65	0,50	99,71	0,50	30,34	0,58	19,65	16,60	99,99	0,51
155	1241	35,23578	695,355	1049,99	12,5159	2281,21	3,14	1,32	96,97	0,50	30,69	0,50	99,72	0,53	48,97	0,66	47,82	40,40	99,98	0,52
156	1241	33,13118	781,527	1563,27	16,7136	700,424	3,05	1,28	97,02	0,50	30,36	0,50	100,00	0,51	31,80	0,52	18,21	21,20	99,98	0,51
157	1241	31,04017	880,652	2069,01	23,3699	495,62	2,53	1,32	88,36	0,50	26,40	0,50	99,99	0,50	70,31	0,50	10,08	15,85	99,94	0,50
158	1241	37,12115	486,846	578,77	6,32838	5385,99	2,14	1,17	95,45	0,50	29,72	0,50	97,72	0,52	17,07	0,96	95,77	52,98	99,90	0,53
159	1241	44,91514	219,81	285,875	5,04966	4756,38	6,47	1,45	99,42	0,50	33,34	0,51	99,99	1,25	31,85	3,06	82,23	50,01	99,99	0,65
160	1241	30,54626	909,658	1959,39	25,9124	1333,18	3,10	1,32	99,06	0,50	28,33	0,50	99,99	0,50	75,05	0,50	22,65	43,28	99,98	0,50
161	1241	46,74231	107,276	285,731	6,16646	10501,6	3,57	1,44	99,39	0,50	32,28	0,52	100,00	1,77	92,20	10,75	88,29	90,38	99,99	0,52
162	1241	32,99145	380,359	817,724	6,99373	810,63	0,13	1,17	36,41	0,50	30,64	0,50	100,00	0,50	31,18	0,69	9,16	59,43	99,88	0,55
163	1241	52,37886	45,476	88,87	0,989645	14583,2	24,84	1,42	97,23	0,50	39,27	1,40	100,00	1,52	98,65	23,73	91,22	78,73	99,99	22,08
164	1241	30,70755	798,946	2042,23	22,0279	410,48	2,97	1,50	97,69	0,50	27,39	0,50	99,85	0,52	47,44	0,69	7,22	8,97	99,89	0,51
165	1241	36,91867	514,602	611,557	6,75933	5223,65	2,21	1,17	95,53	0,50	30,29	0,50	97,65	0,52	15,88	0,66	94,07	52,34	99,90	0,52
166	1241	44,30635	95,5051	202,737	3,10766	12954,5	9,87	1,57	99,97	0,50	31,63	0,51	99,97	0,90	97,66	21,56	90,41	90,74	99,99	2,27
167	1241	39,35993	240,056	443,892	5,2056	92144,8	4,51	1,32	98,53	0,50	25,01	0,50	100,00	0,56	99,02	8,63	82,70	86,29	99,99	1,34
168	1241	39,3988	419,483	631,535	9,29277	7508,92	6,79	1,32	99,74	0,50	31,47	0,51	99,99	0,91	54,00	1,18	81,76	85,59	99,99	0,70
169	1241	36,79171	548,994	674,187	7,54853	4607,56	2,25	1,17	99,67	0,50	30,03	0,51	97,70	0,53	15,88	0,53	82,34	52,28	99,89	0,52

N.	Semene	A ₁₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{avr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
170	1241	46,27979	115,143	185,824	3,0104	10367,4	9,87	1,44	99,34	0,50	31,63	0,51	99,97	0,97	97,66	9,48	88,22	90,25	99,99	2,27
171	1241	37,18159	557,842	754,427	9,643	4812,67	3,51	1,32	98,23	0,50	29,86	0,51	100,00	0,67	31,25	0,60	72,88	61,16	99,98	0,54
172	1241	34,98387	651,993	1748,25	11,7849	307,631	2,45	1,20	92,73	0,50	29,14	0,50	100,00	0,52	24,37	0,61	2,87	1,01	99,93	0,50
173	1241	42,94653	156,261	272,034	3,7578	6684,26	6,83	1,41	97,27	0,50	31,06	0,52	99,99	0,81	58,80	8,91	64,62	79,87	99,98	1,84
174	1241	38,90489	442,791	596,942	7,40265	4514,12	2,66	1,32	98,96	0,50	32,53	0,51	100,00	0,67	31,22	1,62	73,64	55,61	99,98	0,51
175	1241	35,97787	608,93	828,581	9,79777	3272,57	3,45	1,27	97,16	0,50	30,39	0,50	99,99	0,55	31,43	0,53	72,66	40,61	99,98	0,50
176	1241	41,62529	341,015	374,202	5,29128	6266,02	3,33	1,29	97,78	0,50	30,65	0,51	99,96	0,87	31,31	1,22	78,07	74,54	100,00	0,67
177	1241	31,85566	861,757	1745,19	21,073	938,139	2,60	1,32	99,84	0,50	30,52	0,50	100,00	0,50	49,69	0,50	18,38	32,98	99,99	0,51
178	1241	48,4843	72,4584	134,456	2,19117	12987,8	7,08	1,39	99,82	0,50	31,61	0,57	100,00	1,15	98,22	20,70	91,32	90,93	99,99	2,21
179	1241	29,12477	889,066	2137,04	27,2822	978,558	3,02	1,32	94,38	0,50	24,16	0,50	99,86	0,50	47,66	0,55	18,87	34,83	99,99	0,50
180	1241	52,33413	60,886	129,942	1,63089	15971,3	25,87	1,60	99,60	0,50	35,47	1,39	100,00	1,79	96,40	28,23	91,22	92,59	100,00	15,26
181	1241	43,74325	157,647	182,67	2,33406	3285,65	3,63	1,32	99,26	0,50	30,64	0,51	100,00	0,78	32,39	5,04	41,81	59,37	99,99	1,90
182	1241	33,20649	795,846	1364,56	17,15	3281,37	7,58	1,32	97,04	0,50	30,42	0,50	99,99	0,52	44,77	0,53	72,75	40,57	99,98	0,51
183	1241	40,93957	373,601	448,814	5,73554	4016,83	3,10	1,25	97,71	0,50	30,25	0,51	99,95	0,80	30,15	1,15	78,93	45,69	99,90	0,52
184	1241	39,87544	224,046	380,58	4,52074	9313,55	4,38	1,32	98,53	0,50	24,97	0,50	100,00	0,56	99,33	8,82	83,27	86,19	99,99	1,49
185	1241	47,16574	105,539	278,762	5,9734	10851,4	6,69	1,43	99,43	0,50	29,98	0,50	99,99	1,78	93,42	11,03	95,99	85,82	99,99	0,67
186	1241	53,75823	55,5328	111,305	1,4156	14764,4	25,20	1,47	99,77	0,50	32,00	1,33	100,00	1,96	98,41	27,40	91,00	80,65	100,00	14,56
187	1241	60,36918	3,94258	6,7817	0,164102	2371	6,08	1,23	99,60	0,50	31,53	1,45	100,00	8,03	56,33	90,08	98,25	98,25	99,96	17,74
188	1241	31,48227	894,712	1789,95	22,846	1426,18	2,96	1,32	97,27	0,50	28,33	0,50	99,91	0,50	69,57	0,50	25,57	42,26	99,98	0,50
189	1241	63,91406	0,95446	0,647934	0,218857	11625,1	18,39	1,28	99,16	0,50	13,82	1,38	5,39	15,91	2,48	40,98	97,84	98,64	75,18	19,45
190	1241	28,81522	918,036	2207,04	30,9194	1290,44	3,37	1,34	95,77	0,50	24,44	0,50	100,00	0,50	75,72	0,50	21,89	43,14	99,99	0,50
191	1241	35,12338	682,365	1272,36	11,2017	578,1	2,21	1,19	97,97	0,50	31,07	0,50	100,00	0,50	32,90	0,51	18,30	14,46	99,95	0,50
192	1241	26,58885	608,557	2538,15	24,3693	245,309	1,67	1,32	30,65	0,50	12,14	0,50	99,84	0,50	46,75	0,50	3,39	1,62	99,70	0,50
193	1241	49,02762	95,4571	208,099	4,39607	11523,7	3,41	1,43	99,88	0,50	32,20	0,52	100,00	1,67	92,03	10,88	95,88	93,81	99,99	0,61
194	1241	56,0232	39,0335	76,9884	1,12604	17019,5	24,88	1,42	99,93	0,50	35,35	1,39	100,00	2,58	98,35	28,23	99,54	92,63	100,00	15,32
195	1241	38,37171	490,921	723,436	9,62557	8635,02	4,26	1,29	97,79	0,50	31,50	0,52	99,44	0,76	31,53	1,13	94,92	86,68	99,99	0,55
196	1241	32,31639	854,081	1592,08	20,0713	2288,39	2,90	1,32	99,17	0,50	30,12	0,50	99,98	0,50	49,33	0,54	35,75	54,68	99,98	0,50
197	1241	64,23026	0,220681	0,14678	0,084699	2172,37	15,41	1,26	99,18	0,62	13,10	1,52	2,78	13,64	1,09	90,39	30,99	12,78	75,17	17,85
198	1241	43,66898	276,885	341,316	5,12577	7580,34	3,40	1,28	97,79	0,50	31,90	0,53	100,00	1,05	31,30	2,17	82,17	85,63	100,00	0,67
199	1241	37,57096	556,585	777,814	9,80763	3821,23	3,62	1,33	98,22	0,50	31,08	0,50	100,00	0,64	47,85	0,98	69,86	48,94	99,97	0,50
200	1241	59,17261	8,58546	15,8107	0,306621	23891,8	7,17	1,23	97,26	0,50	31,21	1,25	99,94	5,14	98,46	81,30	64,61	79,43	99,98	15,47
201	1242	40,28108	5,03495	4,69649	0,025163	4,98077	0,10	0,72	1,64	0,50	0,50	0,50	1,25	0,50	0,50	0,50	1,01	0,50	1,16	0,50
202	1242	37,01256	0,097793	0,088643	0,000585	18,5974	0,10	0,70	1,64	0,50	0,51	0,50	2,63	0,50	0,62	9,26	2,54	0,53	1,25	0,76
203	1242	21,13718	625,369	2876,27	38,8704	267,476	0,92	1,23	37,68	0,50	7,61	0,50	100,00	0,50	69,49	0,50	2,20	1,24	99,86	0,50
204	1242	28,66784	946,6	2,251,8	33,1996	1338,01	0,93	1,33	100,00	0,50	22,59	0,50	100,00	0,50	100,00	0,50	11,99	80,54	98,39	0,50
205	1242	69,27702	0,469429	0,406755	0,186147	11332,7	2,01	1,38	99,16	0,51	37,17	8,72	4,62	45,58	2,15	97,97	98,14	95,70	99,82	3,49
206	1242	36,84261	572,652	872,069	10,7799	3481,45	1,42	1,31	99,58	0,50	32,33	0,50	99,99	0,61	39,65	1,15	39,08	78,96	98,80	0,51
207	1242	61,7252	6,49963	11,1241	0,33255	31668,1	5,59	1,64	99,84	0,50	36,96	1,56	100,00	9,14	96,98	97,68	99,50	99,70	100,00	7,57
208	1242	22,02786	644,944	2844,93	39,6487	291,327	1,22	1,23	37,00	0,50	7,08	0,50	99,91	0,50	83,42	0,50	3,69	3,18	98,86	0,53
209	1242	37,01256	0,097793	0,088643	0,000585	18,5974	0,10	0,70	1,64	0,50	0,51	0,50	2,63	0,50	0,62	9,26	2,54	0,53	1,25	0,76
210	1242	54,45977	11,3277	19,4263	0,250765	27904,5	3,56	1,50	99,85	0,50	37,16	1,56	100,00	2,05	97,25	85,18	95,29	97,80	99,97	13,95
211	1242	61,51028	6,74504	11,4093	0,341406	30545,4	5,60	1,64	99,97	0,50	36,80	1,49	100,00	8,73	94,41	95,62	98,58	99,32	99,99	7,44
212	1242	54,36495	27,9662	49,1318	0,647745	21276,3	3,36	1,49	99,73	0,50	32,91	1,51	100,00	1,98	94,53	62,18	88,46	94,30	99,97	5,82
213	1242	27,70602	645,904	2774,93	36,2037	301,322	0,87	1,23	36,51	0,50	7,13	0,50	99,91	0,51	76,44	0,62	3,45	3,10	96,97	0,51
214	1242	27,92894	923,018	2332,85	33,3847	866,816	0,92	1,33	99,83	0,50	22,51	0,50	99,99	0,50	71,29	0,50	9,02	57,89	99,88	0,50
215	1242	59,65861	12,5741	21,4924	0,417667	21961,7	3,87	1,51	99,73	0,50	33,01	1,56	100,00	5,20	94,19	62,57	88,26	94,49	100,00	5,92
216	1242	54,37156	13,1473	21,7107	0,284943	23394	3,36	1,49	99,82	0,50	36,69	1,51	100,00	2,00	97,91	64,14	93,68	96,61	99,98	11,73

N.	Semente	A ₁₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
217	1242	26,96653	711,113	2554,74	26,0905	268,497	0,94	1,30	44,59	0,50	14,20	0,50	99,68	0,50	44,02	0,50	3,60	4,57	97,92	0,50
218	1242	27,50709	852,457	2207,37	28,3474	909,68	0,95	1,30	93,07	0,50	22,75	0,50	99,99	0,51	54,55	0,78	9,92	56,14	99,59	0,50
219	1242	56,29894	28,1307	53,2838	1,09862	19939,2	3,76	1,54	99,73	0,50	32,49	0,90	100,00	3,02	96,23	59,94	78,35	94,38	99,97	2,45
220	1242	28,54082	930,62	2285,73	32,2462	915,549	0,96	1,33	99,90	0,50	22,51	0,50	99,99	0,50	71,90	0,52	9,80	57,95	99,88	0,50
221	1242	54,48296	11,7342	19,3139	0,257272	26759	3,56	1,50	98,24	0,50	36,78	1,56	100,00	2,05	96,26	81,00	93,54	97,80	99,95	13,95
222	1242	65,07282	0,357763	0,306367	0,226755	444,261	0,72	0,87	73,27	0,50	7,79	0,54	4,62	18,69	1,17	57,11	6,43	0,84	97,56	0,52
223	1242	68,35093	0,836588	0,842501	0,161364	11075	2,03	1,54	99,69	0,51	35,83	8,95	7,70	35,27	3,42	99,05	97,98	89,21	97,44	3,82
224	1242	59,82276	16,686	30,7625	0,633752	19285,1	3,62	1,55	99,71	0,50	32,93	1,49	100,00	5,37	80,01	59,39	88,09	92,61	100,00	3,52
225	1242	27,73429	884,896	2276,96	29,9588	872,714	0,96	1,31	92,85	0,50	22,50	0,50	99,98	0,50	51,23	0,57	9,81	55,87	99,41	0,50
226	1242	61,87914	7,45028	11,7678	0,366032	31273,2	5,85	1,64	99,81	0,50	36,99	1,57	100,00	9,07	95,52	97,55	99,49	99,38	99,99	7,21
227	1242	58,15876	23,1583	45,7458	1,34306	18552,7	6,43	1,69	99,92	0,50	34,15	0,91	99,98	4,85	92,78	47,22	88,44	95,11	99,99	2,47
228	1242	30,83426	904,123	1923,06	25,2751	1564,77	0,96	1,29	97,53	0,50	27,37	0,50	99,90	0,51	71,81	0,50	14,71	82,68	99,77	0,50
229	1242	23,85598	845,076	2697,57	39,2555	361,959	0,93	1,31	98,45	0,50	14,63	0,50	99,99	0,50	72,21	0,50	3,18	8,36	99,64	0,50
230	1242	57,16947	28,357	61,1447	1,8371	17264,5	3,25	1,49	99,67	0,50	32,67	0,77	100,00	4,41	91,32	38,99	92,81	97,07	99,96	1,01
231	1242	39,17195	383,18	674,464	10,6322	6464,25	3,44	1,31	99,58	0,50	31,48	0,50	100,00	1,06	53,77	1,27	60,13	98,66	99,73	0,52
232	1242	54,64989	20,4255	32,316	0,575727	15360,3	2,50	1,49	99,72	0,50	28,12	0,72	100,00	2,04	70,17	41,94	95,27	90,82	99,97	2,74
233	1242	31,87566	827,177	1696,81	20,5979	1137,02	1,11	1,31	95,89	0,50	30,18	0,50	99,98	0,52	46,00	0,56	13,79	58,34	99,93	0,52
234	1242	54,49232	29,6219	55,3502	1,06702	13746,6	3,51	1,27	99,38	0,50	31,69	0,68	99,97	2,05	93,32	40,99	95,38	56,81	99,40	1,26
235	1242	33,42899	796,215	1355,46	16,488	3162,25	2,49	1,26	99,11	0,50	31,40	0,51	99,97	0,51	37,13	0,53	42,67	66,53	99,81	0,51
236	1242	30,73866	585,738	1997,06	15,1064	292,606	0,93	1,20	43,78	0,50	22,62	0,50	99,97	0,51	37,65	0,53	5,09	6,72	99,62	0,50
237	1242	59,68086	13,0888	22,477	0,42859	21865,9	3,87	1,54	99,73	0,50	32,91	1,60	100,00	5,16	94,14	62,13	88,31	94,47	99,97	5,87
238	1242	31,75687	800,237	1727,62	19,4906	715,964	0,96	1,33	97,55	0,50	31,38	0,50	99,91	0,51	38,02	0,62	9,86	39,39	99,74	0,50
239	1242	57,37617	27,6958	60,281	1,83009	16746,1	4,01	1,39	99,78	0,50	32,30	0,76	100,00	4,58	87,88	38,87	99,55	87,86	99,83	1,02
240	1242	34,36635	751,561	1142,37	14,1951	4618,14	2,94	1,30	96,76	0,50	31,42	0,50	99,96	0,51	50,86	0,60	64,75	66,04	99,29	0,51
241	1242	43,55067	239,425	378,412	7,06968	9659	3,88	1,30	99,76	0,50	32,69	0,50	100,00	1,40	71,07	2,40	90,79	97,52	99,74	0,52
242	1242	64,57283	0,529248	0,43045	0,276202	423,038	0,78	0,87	73,27	0,50	7,90	0,53	5,23	18,69	1,17	38,44	5,84	0,84	97,53	0,52
243	1242	34,08392	761,931	1219,66	15,5867	5293,67	2,91	1,30	99,41	0,50	31,43	0,50	99,97	0,53	49,09	0,60	62,07	79,70	99,78	0,51
244	1242	52,47683	55,6306	116,941	2,64214	10126,6	3,84	1,41	99,12	0,50	32,71	0,57	99,99	2,05	87,55	19,63	90,31	67,20	99,82	0,75
245	1242	32,12057	811,678	1644,83	20,0784	1139,42	1,11	1,31	95,89	0,50	30,18	0,50	99,98	0,53	46,00	0,56	13,79	58,34	99,93	0,52
246	1242	22,33999	640,22	2827,85	37,4612	281,689	1,23	1,24	34,98	0,50	6,71	0,50	99,91	0,50	72,72	0,54	3,69	2,70	97,00	0,53
247	1242	34,63711	727,794	1425,41	13,4988	553,722	0,14	1,25	96,82	0,50	30,62	0,50	99,70	0,51	36,49	0,60	4,99	46,34	97,45	0,50
248	1242	58,04699	17,1254	32,6002	0,987022	14294,8	4,82	1,26	99,38	0,50	31,42	0,71	99,97	4,25	93,19	40,74	98,09	56,81	98,02	1,36
249	1242	32,07933	858,288	1643,76	21,2653	2316,29	1,41	1,30	99,89	0,50	31,65	0,50	99,99	0,51	73,95	0,60	22,11	87,82	99,80	0,53
250	1242	57,86069	22,1831	42,0625	1,28101	14637,7	2,61	1,41	99,37	0,50	31,67	0,72	99,98	4,29	79,53	37,18	94,43	80,75	99,93	0,98
251	1242	33,1298	804,924	1542,12	16,9668	839,535	0,45	1,27	98,25	0,50	31,27	0,50	99,98	0,50	36,94	0,53	9,06	57,45	99,02	0,50
252	1242	21,13642	625,206	2876,16	38,8652	267,417	0,92	1,23	37,62	0,50	7,61	0,50	100,00	0,50	69,49	0,50	2,20	1,24	99,86	0,50
253	1242	54,83186	18,7597	31,2865	0,423738	24240,7	3,56	1,39	99,85	0,50	37,22	1,58	100,00	2,05	97,25	69,01	95,25	98,22	99,97	8,37
254	1242	68,35093	0,836588	0,842501	0,161364	11075	2,03	1,54	99,69	0,51	35,83	8,95	7,70	35,27	3,42	99,05	97,98	89,21	97,44	3,82
255	1242	61,62752	6,5358	11,3164	0,330734	30837,9	5,56	1,68	99,20	0,50	35,88	1,56	99,84	9,08	94,06	97,28	98,58	99,05	98,72	7,59
256	1242	32,08383	832,27	1626,83	19,6434	1064,49	0,93	1,38	98,72	0,50	30,17	0,50	99,92	0,50	38,73	0,50	13,67	54,52	99,74	0,50
257	1242	26,8264	672,401	2507,26	23,6155	253,951	0,89	1,31	46,50	0,50	15,45	0,50	99,74	0,50	33,45	0,50	2,90	2,85	98,76	0,50
258	1242	54,45492	11,1675	19,0677	0,248272	24769,5	3,70	1,50	99,79	0,50	37,17	1,52	100,00	2,06	97,24	70,25	95,24	95,36	99,98	14,01
259	1242	43,95851	170,726	356,767	5,85608	7991,45	1,69	1,56	99,61	0,50	32,52	0,52	99,99	1,06	91,27	7,54	68,46	90,86	99,36	0,51
260	1242	61,27207	9,7103	17,1696	0,484703	23977,7	3,69	1,54	99,82	0,50	37,09	1,49	99,98	7,88	79,60	81,50	96,42	91,96	99,99	3,50
261	1242	57,76167	24,1539	50,5629	1,48912	15824,3	2,15	1,48	99,72	0,50	30,40	0,73	100,00	4,34	94,21	42,36	74,09	90,82	99,99	1,00
262	1242	42,80991	182,665	404,332	6,68616	5058,93	2,22	1,36	99,28	0,50	36,13	0,51	99,99	1,09	72,62	7,06	45,48	79,67	99,79	0,56
263	1242	23,38167	678,047	2821,68	37,5084	280,232	1,22	1,23	34,74	0,50	7,08	0,50	99,91	0,50	76,44	0,50	3,69	2,94	97,01	0,53

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
264	1242	44,71759	221,469	296,466	5,43813	6763,41	3,88	1,28	99,12	0,50	32,71	0,50	99,99	1,40	50,51	2,30	90,31	67,20	99,74	0,51
265	1242	33,29033	777,504	1353,89	15,4913	1397,78	1,03	1,26	98,32	0,50	31,35	0,50	99,90	0,51	36,89	0,56	18,90	56,89	99,03	0,51
266	1242	31,12907	812,12	1814,64	22,9706	907,586	0,97	1,33	97,73	0,50	31,38	0,50	99,99	0,70	61,68	0,62	9,82	55,48	99,74	0,50
267	1242	37,19171	536,141	775,343	9,76328	4906,46	2,51	1,20	98,33	0,50	31,57	0,50	99,95	0,50	29,50	0,62	58,98	77,13	99,62	0,51
268	1242	56,27243	27,4079	57,5605	1,3974	14858,1	2,52	1,34	99,69	0,50	32,84	0,72	100,00	3,14	87,85	46,57	87,62	66,34	99,82	0,89
269	1242	26,82778	672,475	2507,26	23,6163	253,942	0,89	1,31	46,50	0,50	15,45	0,50	99,74	0,50	33,45	0,50	2,90	2,85	98,76	0,50
270	1242	39,17867	396,271	699,034	10,1026	6640,84	3,05	1,31	97,62	0,50	32,83	0,50	100,00	0,87	59,07	1,91	62,97	96,22	99,96	0,53
271	1242	46,41995	120,372	255,046	4,11797	5949,45	1,37	1,33	98,39	0,50	30,38	0,50	99,75	1,22	69,74	11,04	49,28	80,75	99,74	0,57
272	1242	35,59852	655,019	986,33	11,4492	1835,3	0,90	1,33	98,10	0,50	30,57	0,50	99,71	0,53	38,94	0,62	24,79	60,52	99,22	0,52
273	1242	31,11429	861,904	1867,18	22,2749	937,48	0,96	1,29	97,55	0,50	27,38	0,50	99,90	0,51	37,80	0,51	11,50	54,11	98,76	0,51
274	1242	39,2871	452,734	625,331	7,7913	2649,83	1,70	1,20	99,61	0,50	30,78	0,51	99,98	0,78	37,64	0,88	38,93	57,66	99,66	0,51
275	1242	48,73613	69,4322	205,511	4,72942	13396,3	3,60	1,32	99,76	0,50	32,29	0,53	99,98	2,04	92,83	20,52	94,40	95,21	99,97	0,57
276	1242	57,9604	20,9038	39,7856	1,21118	15147,2	2,61	1,41	99,37	0,50	31,57	0,72	100,00	4,36	79,53	40,23	94,42	80,81	99,93	1,02
277	1242	38,25716	480,257	799,346	11,097	3295,61	1,68	1,29	99,34	0,50	31,27	0,50	99,90	0,83	72,36	1,30	33,39	82,70	99,76	0,50
278	1242	31,16303	900,063	1860,58	24,2476	1568,01	0,96	1,29	99,08	0,50	28,25	0,50	99,93	0,51	71,81	0,50	14,71	82,68	99,77	0,51
279	1242	38,01781	501,749	868,862	10,8657	2092,98	1,55	1,20	99,12	0,50	31,39	0,50	99,97	0,78	38,21	1,23	25,01	66,44	99,37	0,51
280	1242	32,71191	813,08	1511,4	18,3673	1736,51	1,42	1,31	98,93	0,50	31,65	0,50	99,99	0,51	43,06	0,59	22,11	63,47	100,00	0,50
281	1242	38,82841	466,495	701,443	9,60729	3546,68	1,70	1,30	99,59	0,50	31,42	0,50	99,99	0,81	52,55	1,15	39,29	78,43	99,71	0,50
282	1242	34,12095	698,714	1455,38	14,1026	580,073	0,16	1,25	97,58	0,50	30,26	0,50	99,70	0,53	29,04	0,72	4,88	52,07	99,10	0,51
283	1242	34,38299	739,013	1187,82	14,5481	3834,35	1,87	1,25	97,68	0,50	31,43	0,50	99,96	0,53	49,09	0,60	43,64	79,94	99,80	0,51
284	1242	34,0569	753,184	1268,41	16,0592	4958,54	2,89	1,30	99,45	0,50	31,50	0,50	99,99	0,53	49,09	0,74	57,52	79,93	99,80	0,51
285	1242	55,1902	29,8188	68,1005	2,34763	1589,97	3,59	1,53	99,60	0,50	32,84	0,55	100,00	3,34	77,94	37,76	93,55	97,50	99,99	0,86
286	1242	53,18933	65,6126	140,457	2,39675	12743,2	1,45	1,32	99,92	0,50	32,06	0,91	99,98	2,31	92,80	19,64	88,41	95,11	99,99	0,69
287	1242	51,43981	56,7273	114,758	2,22026	12030,9	1,42	1,19	98,83	0,50	31,06	0,52	99,98	1,61	74,82	18,61	96,43	90,57	99,54	0,59
288	1242	40,73713	357,249	569,095	8,8186	4714,22	3,04	1,31	97,68	0,50	31,02	0,50	99,98	1,08	50,93	1,56	52,03	79,90	99,67	0,54
289	1242	56,49969	32,4369	73,0071	2,19869	17459,9	3,97	1,49	99,78	0,50	32,86	0,77	100,00	4,40	94,53	38,64	92,91	97,11	99,96	1,01
290	1242	58,89793	18,8644	34,536	1,06221	17652,4	6,33	1,57	99,90	0,50	34,25	0,92	99,98	5,32	70,95	49,61	95,75	95,17	99,97	2,74
291	1242	47,80602	109,972	210,775	3,57017	8761,4	1,87	1,25	99,61	0,50	30,76	0,50	99,98	1,23	79,51	9,92	73,26	92,06	99,68	0,62
292	1242	36,2573	608,953	996,583	9,9314	976,012	0,25	1,31	95,89	0,50	30,20	0,51	99,70	0,52	31,35	0,81	10,85	59,23	99,19	0,52
293	1242	43,16315	286,772	378,304	5,52025	3758,96	1,70	1,21	99,67	0,50	32,63	0,51	99,99	1,04	48,33	1,93	48,74	65,22	99,87	0,51
294	1242	42,28488	268,334	484,567	8,69982	7530,77	3,88	1,31	98,95	0,50	31,98	0,50	99,99	1,35	71,34	2,40	70,16	96,01	99,72	0,52
295	1242	32,8481	812,674	1495,25	18,1425	1723,32	1,41	1,31	99,73	0,50	31,65	0,50	99,99	0,51	42,93	0,60	22,11	62,82	99,62	0,50
296	1242	57,62579	10,6878	18,3834	0,302631	26637,7	3,51	1,51	99,86	0,50	37,20	1,56	100,00	3,40	99,26	78,87	95,25	97,17	99,97	8,27
297	1242	36,50681	598,126	1029,94	9,60344	6921,44	0,11	1,29	96,89	0,50	31,06	0,50	99,72	0,55	37,92	0,70	6,30	55,80	99,54	0,50
298	1242	31,01479	903,348	1894,83	24,77	1565,55	0,96	1,29	97,53	0,50	27,37	0,50	99,90	0,51	71,81	0,50	14,71	82,68	99,77	0,51
299	1242	44,0227	144,388	272,363	3,92661	7318,94	1,62	1,32	99,65	0,50	32,66	0,51	99,97	0,89	72,20	9,91	70,87	77,86	99,88	0,59
300	1242	55,4408	32,1372	62,4228	1,44911	12503,1	1,73	1,46	99,40	0,50	32,53	0,73	99,99	2,84	76,68	40,23	72,47	76,30	99,95	0,88
301	1242	43,55081	262,046	355,961	5,59778	5535,79	2,64	1,28	99,77	0,50	32,71	0,50	99,99	1,08	51,01	2,29	72,98	67,17	99,75	0,51
302	1242	56,74994	31,3717	69,2936	2,04094	16240,4	4,01	1,41	99,78	0,50	32,30	0,76	100,00	4,41	86,63	38,87	93,00	90,03	99,83	1,02
303	1242	48,00983	72,451	151,241	2,53851	12327,1	1,37	1,33	98,83	0,50	31,12	0,53	99,75	1,22	74,43	20,91	96,95	90,57	99,74	0,59
304	1242	28,03015	885,892	2259,44	29,7275	877,98	0,96	1,31	92,99	0,50	22,97	0,50	99,99	0,50	52,51	0,57	9,81	56,15	99,74	0,50
305	1242	41,98083	334,918	464,977	6,98838	4379,1	1,78	1,27	99,60	0,50	31,53	0,51	99,95	1,06	51,35	1,61	47,52	80,36	99,39	0,51
306	1242	57,9904	15,6945	30,4952	0,875859	11475,7	1,24	1,40	99,78	0,50	32,12	0,73	99,99	4,24	78,14	39,25	74,17	57,55	99,93	0,78
307	1242	36,83197	549,017	958,973	12,2459	2218,4	1,68	1,27	99,12	0,50	31,43	0,50	99,99	0,72	40,09	1,08	27,11	66,64	99,68	0,50
308	1242	26,98166	840,168	2237,77	28,9034	927,67	0,95	1,30	90,89	0,50	22,74	0,50	99,99	0,51	55,05	0,78	9,94	58,00	99,54	0,50
309	1242	53,6074	42,74	77,1432	1,79527	13047,7	1,60	1,48	99,76	0,50	32,87	0,58	100,00	2,04	83,00	18,83	96,20	96,72	99,96	0,71
310	1242	57,5579	12,7859	21,2777	0,355105	25044,3	3,59	1,53	100,00	0,50	36,45	1,48	100,00	3,30	97,31	71,84	96,42	98,28	99,99	7,18

N.	Semene	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
311	1242	57,55589	12,9748	21,6559	0,360348	25806,5	3,63	1,52	100,00	0,50	36,45	1,48	100,00	3,28	97,31	75,73	96,50	98,28	99,99	7,18
312	1242	42,43382	266,645	474,228	8,54524	7723,6	3,84	1,31	99,76	0,50	32,11	0,50	100,00	1,35	71,70	2,40	71,55	96,80	99,74	0,52
313	1242	38,34888	508,385	717,82	9,00641	5436,81	2,51	1,20	98,96	0,50	31,76	0,50	99,95	0,70	38,33	0,97	65,04	77,49	99,62	0,51
314	1242	55,92988	31,93	71,426	2,17947	16361,8	3,86	1,66	99,61	0,50	32,81	0,76	100,00	4,40	77,36	38,16	93,42	99,82	99,92	1,02
315	1242	46,66225	131,736	285,194	5,14975	10196,9	2,56	1,30	99,69	0,50	32,28	0,52	100,00	1,40	78,49	9,23	93,04	89,03	99,94	0,51
316	1242	38,58712	494,647	694,791	8,42619	2761,32	1,55	1,20	98,96	0,50	31,76	0,50	99,95	0,70	38,21	0,97	37,74	62,65	99,98	0,51
317	1242	57,63011	11,168	18,1139	0,309979	25250,2	3,59	1,52	99,85	0,50	37,22	1,58	100,00	3,40	94,65	74,78	95,25	98,22	99,99	8,41
318	1242	61,377	6,61662	10,8761	0,326879	31504,5	5,87	1,64	99,97	0,50	37,21	1,56	100,00	8,59	99,31	95,47	98,48	99,31	99,99	8,27
319	1242	33,89663	746,357	1233,84	14,6987	1643,3	1,03	1,32	97,05	0,50	32,23	0,50	99,99	0,52	41,78	0,54	21,19	62,06	99,59	0,51
320	1242	36,99285	541,566	922,514	11,8501	2375,51	1,71	1,28	99,48	0,50	32,47	0,50	99,99	0,72	40,08	1,07	28,65	68,54	99,72	0,51
321	1242	43,80226	162,522	356,131	5,84501	8212,02	1,74	1,56	99,90	0,50	32,46	0,52	100,00	1,05	91,42	8,20	70,64	89,46	100,00	0,51
322	1242	43,52495	239,935	377,688	7,08325	9581,85	3,88	1,32	99,76	0,50	32,67	0,50	100,00	1,40	69,87	2,39	90,79	96,75	99,75	0,52
323	1242	33,67077	770,05	1293,75	15,281	1628,75	1,03	1,32	97,05	0,50	32,24	0,50	100,00	0,50	41,78	0,56	21,16	61,51	100,00	0,51
324	1242	41,15811	346,994	498,704	7,79652	6958,02	2,51	1,31	99,76	0,50	32,11	0,50	100,00	1,04	54,69	1,52	66,11	96,81	99,74	0,52
325	1242	38,73159	484,541	661,442	8,07674	2903	1,55	1,20	98,96	0,50	31,76	0,50	99,95	0,70	38,21	0,97	40,00	62,65	99,98	0,51
326	1242	58,03714	21,308	41,3424	1,32977	17919,8	2,58	1,49	99,76	0,50	32,33	0,73	100,00	4,51	95,76	42,04	95,98	90,83	99,99	1,01
327	1242	34,94329	716,538	1176,39	12,9411	1735,38	1,04	1,14	99,09	0,50	31,47	0,50	99,99	0,53	42,01	0,57	22,87	61,26	99,61	0,50
328	1242	58,83413	14,4932	24,5909	0,446973	18248,5	5,56	1,28	99,23	0,50	32,27	1,56	99,84	4,62	94,06	42,12	92,93	90,96	98,72	7,59
329	1242	57,44771	25,0391	54,9762	1,67855	14296,6	8,36	1,26	99,38	0,50	31,42	0,71	99,97	4,25	93,19	40,74	98,09	56,81	99,38	1,36
330	1242	33,87869	754,882	1280,05	15,4166	2000,71	0,82	1,34	97,65	0,50	30,72	0,50	99,72	0,52	38,05	0,67	21,30	78,37	99,18	0,50
331	1242	40,05222	412,195	582,678	7,33381	2668,09	1,67	1,20	99,67	0,50	31,43	0,50	99,98	0,78	39,23	1,23	39,03	57,19	99,66	0,51
332	1242	38,36637	517,699	767,011	9,20622	2157,35	1,55	1,20	99,69	0,50	31,35	0,50	99,95	0,70	37,60	0,99	30,98	56,82	99,62	0,51
333	1242	42,80928	308,413	425,759	6,2595	3111	1,46	1,29	99,05	0,50	31,45	0,51	99,99	1,05	41,90	1,99	38,54	66,24	99,80	0,51
334	1242	32,27128	561,894	1770,93	11,9297	2777,2	0,90	1,33	45,93	0,50	23,22	0,50	99,92	0,53	37,88	0,50	4,15	3,36	98,40	0,52
335	1242	39,65785	439,275	639,38	8,0683	2967,91	1,55	1,20	99,13	0,50	31,39	0,50	99,98	0,78	38,21	1,23	38,17	66,44	99,72	0,51
336	1242	58,00595	19,1018	36,6577	1,10358	13573,1	4,82	1,26	99,39	0,50	31,33	0,70	99,98	4,25	92,87	40,80	86,57	56,23	98,13	1,36
337	1242	47,29068	114,915	208,048	3,68421	8482,13	1,71	1,52	99,60	0,50	32,48	0,52	99,98	1,21	80,16	9,70	70,60	91,93	99,68	0,62
338	1242	69,17783	0,483843	0,419424	0,186262	11319,7	2,01	1,38	99,16	0,51	37,17	8,72	4,62	44,18	2,15	97,97	98,14	95,70	99,82	3,49
339	1242	39,98074	426,096	613,031	7,65926	2719,53	1,70	1,20	99,67	0,50	31,41	0,51	99,98	0,79	37,64	1,23	39,02	58,59	99,66	0,51
340	1242	30,77117	569,532	1925,81	14,3866	294,148	0,93	1,20	43,78	0,50	24,16	0,50	99,97	0,51	37,65	0,53	5,09	6,72	99,62	0,50
341	1242	35,30164	676,608	1052,06	12,2126	1764,64	0,91	1,33	97,65	0,50	30,65	0,50	99,71	0,53	38,82	0,62	24,21	59,14	99,19	0,50
342	1242	53,662	41,0681	76,5688	1,77512	13203,7	1,60	1,48	99,74	0,50	32,85	0,58	100,00	2,04	82,98	20,08	95,21	97,17	99,96	0,73
343	1242	27,94708	871,057	2224,77	29,2473	877,868	0,97	1,31	92,84	0,50	22,48	0,50	99,99	0,51	52,53	0,62	9,82	55,48	99,74	0,50
344	1242	33,1298	804,924	1542,12	16,9668	839,535	0,45	1,27	98,25	0,50	31,27	0,50	99,98	0,50	36,94	0,53	9,06	57,45	99,02	0,50
345	1242	32,77605	550,461	1802,31	11,5579	318,657	0,90	1,32	45,82	0,50	23,22	0,50	99,92	0,50	38,17	0,96	5,21	4,68	99,04	0,52
346	1242	58,73335	9,26782	15,659	0,306279	26300,5	3,87	1,66	99,85	0,50	36,92	1,50	100,00	4,54	95,77	77,31	96,30	99,70	99,96	7,74
347	1242	53,77674	47,865	114,069	3,15286	11704,9	3,22	1,37	99,60	0,50	27,96	0,56	99,98	3,18	75,95	22,56	85,31	87,26	99,93	0,68
348	1242	54,41116	12,3185	20,6601	0,265772	23787,8	3,56	1,51	99,82	0,50	37,03	1,56	100,00	2,02	97,26	65,30	92,48	98,26	99,96	13,80
349	1242	54,19242	37,1823	60,7066	1,69877	10497	1,55	1,32	99,86	0,50	32,07	0,50	99,98	2,33	38,21	18,20	88,59	95,28	99,99	0,69
350	1242	61,39869	6,58156	10,7814	0,325522	31115,4	5,87	1,64	97,90	0,50	37,64	1,55	100,00	8,56	99,31	95,23	97,24	97,21	99,93	8,20
351	1242	43,42874	191,5	354,751	5,12341	6111,97	1,60	1,36	99,32	0,50	31,57	0,50	99,97	0,92	72,43	7,08	58,37	80,81	99,79	0,56
352	1242	56,74717	29,4941	65,8284	1,91369	12714	3,95	1,41	99,78	0,50	32,12	0,73	100,00	4,24	79,48	39,28	94,83	56,92	99,93	0,78
353	1242	48,18158	93,8702	150,744	2,77666	8496,44	1,73	1,53	99,60	0,50	33,02	0,50	99,98	1,20	80,16	9,50	71,04	91,93	99,68	0,71
354	1242	36,78225	580,964	897,188	11,0176	3476,09	1,42	1,30	99,58	0,50	31,43	0,50	99,99	0,61	39,65	1,15	39,29	78,43	98,80	0,50
355	1242	58,56794	10,3492	18,3005	0,345473	25448	8,41	1,49	99,85	0,50	41,37	1,59	100,00	4,25	97,11	68,87	98,00	97,80	99,95	14,05
356	1242	35,66682	621,434	1326,37	9,88945	437,817	0,14	1,25	92,95	0,50	30,62	0,50	99,70	0,50	35,80	0,61	5,14	23,67	97,50	0,50
357	1242	43,96616	182,684	322,265	4,66937	5576,06	1,60	1,36	99,31	0,50	31,55	0,50	99,97	0,92	72,42	6,90	57,38	73,30	99,79	0,57

N.	Semene	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{avr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
358	1242	49,60092	92,6708	159,293	2,8261	10371,2	2,57	1,17	99,61	0,50	30,77	0,52	99,97	1,40	79,77	9,47	94,30	88,87	99,95	0,69
359	1242	41,68859	340,089	499,824	7,5035	4147,58	1,48	1,30	99,05	0,50	31,47	0,51	99,99	1,05	34,88	1,74	40,38	90,01	99,32	0,51
360	1242	57,94701	23,8619	48,5064	1,41438	18490,3	6,35	1,71	99,92	0,50	34,50	0,91	99,99	4,77	92,86	46,70	86,54	97,73	99,99	2,44
361	1242	42,36139	322,9	457,287	6,92906	5654,97	2,58	1,29	99,12	0,50	31,45	0,51	99,99	1,05	41,69	2,00	65,82	77,42	99,94	0,51
362	1242	45,02108	150,055	305,37	4,93864	6508,82	1,72	1,56	99,89	0,50	32,42	0,52	99,99	1,06	92,24	8,42	68,82	66,24	99,79	0,50
363	1242	42,04545	329,878	452,081	6,79984	4307,78	1,77	1,27	99,60	0,50	31,90	0,51	99,99	1,06	51,35	1,61	47,87	78,28	99,74	0,51
364	1242	44,15533	128,496	247,863	3,41384	7785,21	1,64	1,31	99,65	0,50	29,44	0,51	99,96	0,88	71,99	12,94	70,78	78,42	99,89	0,66
365	1242	34,51533	732,776	1176,39	13,9318	1735,38	1,04	1,31	99,09	0,50	31,47	0,50	99,99	0,53	42,01	0,57	22,87	61,26	99,61	0,50
366	1242	59,06728	19,1268	34,1183	1,15665	19790,1	6,44	1,70	99,92	0,50	17,26	0,50	99,99	4,80	99,40	46,32	98,61	93,99	99,99	2,36
367	1242	50,87421	78,2745	151,779	3,31792	9529,49	1,67	1,33	99,72	0,50	32,32	0,54	100,00	1,84	74,54	12,38	88,62	80,46	99,94	0,51
368	1242	49,43862	95,4586	161,727	2,98706	10315,7	2,57	1,30	99,85	0,50	30,96	0,52	99,98	1,40	80,10	9,23	94,03	88,87	99,95	0,68
369	1242	48,94297	101,971	197,525	3,49097	10938,8	3,04	1,17	99,58	0,50	31,02	0,52	99,98	1,41	79,54	9,22	93,16	96,50	99,94	0,69
370	1242	29,85987	815,516	1923,56	24,2604	922,612	0,95	1,38	98,92	0,50	30,31	0,50	99,99	0,51	54,31	0,77	9,92	56,16	99,75	0,50
371	1242	47,8642	78,7542	169,41	2,72364	11919,6	1,41	1,20	99,98	0,50	30,66	0,52	99,98	1,22	74,94	19,69	94,29	90,52	99,74	0,57
372	1242	52,9924	50,7593	105,382	2,6004	9401,39	1,35	1,33	99,42	0,50	31,10	0,52	99,99	2,16	76,48	19,17	66,52	87,90	99,86	0,59
373	1242	41,40512	313,409	492,977	8,15383	4016,4	2,00	1,55	99,81	0,50	32,50	0,51	99,99	1,10	50,39	2,27	44,38	76,26	99,73	0,50
374	1242	34,99307	680,335	1520,14	12,0951	420,209	0,20	1,25	92,82	0,50	30,53	0,50	99,71	0,51	35,05	0,64	4,65	21,95	97,50	0,50
375	1242	52,40097	47,227	119,416	3,64568	11823,5	3,22	1,65	99,60	0,50	31,53	0,57	99,98	3,18	75,90	22,56	86,69	87,26	99,93	0,62
376	1242	35,12449	705,283	1242,85	11,7699	651,408	0,14	1,26	99,48	0,50	30,55	0,50	99,72	0,51	39,86	0,54	6,32	51,75	99,21	0,50
377	1242	45,6648	144,493	265,263	4,45592	6086,47	1,65	1,37	99,32	0,50	31,50	0,51	99,97	1,22	50,96	8,19	59,63	80,85	99,79	0,55
378	1242	42,85667	303,492	393,64	5,75245	3393,96	1,56	1,30	97,53	0,50	30,24	0,50	99,98	1,04	49,32	1,80	46,10	61,39	99,72	0,50
379	1242	58,65779	15,095	26,5925	0,7307	18256,6	3,34	1,57	99,67	0,50	32,62	0,91	99,98	4,74	91,39	46,46	88,44	95,11	99,98	2,47
380	1242	41,56711	212,718	453,833	6,39506	6174,57	1,60	1,36	97,93	0,50	30,24	0,50	99,97	0,92	72,20	7,52	58,50	80,81	99,79	0,51
381	1242	40,69257	352,239	534,482	8,30827	4936,99	3,45	1,28	99,11	0,50	31,49	0,50	99,99	1,09	50,51	1,30	60,87	72,37	99,74	0,51
382	1242	42,02511	204,644	431,835	6,14638	6196,84	1,55	1,35	97,95	0,50	30,17	0,50	99,95	0,94	70,78	7,65	58,50	81,14	99,80	0,51
383	1242	59,84524	17,0169	31,3177	0,640854	19545,3	3,68	1,54	99,73	0,50	32,72	1,49	100,00	5,37	79,80	61,49	88,03	92,09	100,00	3,54
384	1242	40,86599	354,59	569,106	8,81126	4725,89	3,04	1,31	97,68	0,50	31,02	0,50	99,98	1,08	50,93	1,67	52,03	79,90	99,67	0,54
385	1242	49,15812	96,3539	165,445	3,19275	10631	2,57	1,55	99,90	0,50	30,96	0,52	99,99	1,40	91,32	9,25	94,03	90,00	99,97	0,68
386	1242	38,88115	444,398	713,91	10,3317	7160,06	3,58	1,31	99,73	0,50	31,57	0,50	99,99	0,87	57,65	1,30	70,18	94,76	99,78	0,53
387	1242	44,0111	158,619	352,258	5,77595	8252,69	1,74	1,56	99,90	0,50	32,45	0,52	99,99	1,06	91,42	8,18	70,67	90,01	99,59	0,51
388	1242	57,86084	21,9541	42,6508	1,32399	17881,7	2,53	1,50	99,76	0,50	32,33	0,73	100,00	4,29	95,51	42,19	95,98	90,81	99,98	1,01
389	1242	35,42146	626,789	948,51	11,1383	1825,46	0,91	1,33	97,67	0,50	33,19	0,50	99,71	0,53	38,82	0,62	25,14	59,28	98,33	0,50
390	1242	69,26182	0,477393	0,413453	0,191103	11319,3	2,01	1,38	99,11	0,51	37,23	8,65	4,62	45,58	2,15	97,97	98,13	95,70	99,85	3,40
391	1242	48,42316	113,698	212,483	3,92157	7502,24	1,75	1,30	99,40	0,50	32,28	0,51	100,00	1,43	78,49	8,42	74,68	76,46	99,94	0,52
392	1242	57,89475	19,2213	37,483	1,20929	19486	6,34	1,96	99,91	0,50	34,19	0,83	100,00	4,85	89,76	47,25	97,48	98,77	99,99	2,48
393	1242	38,88115	444,398	713,91	10,3317	7160,06	3,58	1,31	99,73	0,50	31,57	0,50	99,99	0,87	57,65	1,30	70,18	94,76	99,78	0,53
394	1242	49,67987	86,9359	197,434	4,39644	9229,62	3,22	1,35	99,92	0,50	29,48	0,51	99,98	1,99	73,83	12,95	71,97	93,43	99,96	0,66
395	1242	43,98671	121,694	239,867	3,37088	7922,65	1,63	1,31	99,65	0,50	32,67	0,54	99,96	0,89	71,87	13,87	70,77	78,43	99,88	0,66
396	1242	31,04104	831,495	1735,46	21,9518	2269,13	1,41	1,31	99,73	0,50	31,65	0,50	99,99	0,51	42,93	0,60	22,11	87,51	99,62	0,50
397	1242	37,10922	574,305	890,005	10,9951	2023,41	1,42	1,33	99,15	0,50	31,51	0,50	99,99	0,64	52,57	1,06	28,54	56,19	99,72	0,50
398	1242	48,61697	96,7856	220,186	3,76425	6333,86	1,37	1,19	98,39	0,50	30,32	0,50	99,98	1,39	85,65	11,28	48,76	80,73	99,54	0,57
399	1242	42,20688	325,632	432,499	6,53406	5353,88	1,78	1,27	99,60	0,50	31,54	0,51	99,95	1,06	51,98	1,60	55,60	86,20	99,39	0,51
400	1242	57,42069	24,2966	40,1738	1,57137	16565,6	4,89	1,41	99,73	0,50	31,68	0,70	99,99	4,22	79,74	41,23	99,17	89,41	99,95	1,36
401	1243	39,27747	3,26367	2,68323	0,015463	4,84838	0,10	0,70	1,55	0,50	0,50	0,50	1,51	0,50	0,62	0,50	0,66	0,51	0,66	0,51
402	1243	41,50568	0,118992	0,088647	0,000656	25,3399	0,58	0,70	1,55	0,50	0,52	0,50	3,36	0,83	0,64	8,24	5,70	1,07	1,17	0,92
403	1243	51,48113	23,7441	39,5669	0,753337	15288	3,49	1,35	99,76	0,50	31,58	0,56	99,78	1,40	90,23	36,70	95,12	84,22	99,98	2,39
404	1243	20,59271	618,942	2877,83	40,8651	279,139	3,37	1,21	38,28	0,50	6,95	0,51	100,00	0,50	78,84	0,50	3,74	1,30	100,00	0,50

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _W (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
405	1243	28,47229	949,109	2240,63	33,8568	3291,37	3,58	1,33	99,90	0,50	22,14	0,50	100,00	0,50	99,99	0,50	37,67	77,47	99,85	0,51
406	1243	68,04506	1,26888	1,44656	0,211317	5442,04	15,59	1,10	99,63	0,53	29,26	6,16	10,45	30,77	6,38	99,96	63,34	30,24	99,99	11,41
407	1243	20,75514	621,434	2876,37	40,9919	281,459	3,37	1,21	38,28	0,50	6,95	0,51	100,00	0,50	81,15	0,50	3,74	1,30	100,00	0,50
408	1243	27,14936	928,922	2,332,2	36,4679	3231,42	3,60	1,32	99,30	0,50	20,13	0,51	99,99	0,50	93,28	0,50	37,49	76,45	100,00	0,51
409	1243	22,69268	688,344	2846,83	39,5475	285,812	3,36	1,21	38,74	0,50	6,88	0,51	100,00	0,50	81,15	0,50	4,88	1,74	99,98	0,50
410	1243	21,07171	535,489	2667,19	31,053	249,09	2,98	1,28	22,65	0,50	7,88	0,50	98,10	0,50	48,10	0,50	6,99	3,26	97,66	0,50
411	1243	26,14611	850,833	2517,01	29,8944	331,277	2,33	1,32	96,26	0,50	22,81	0,50	99,82	0,50	37,93	0,50	3,83	6,56	97,74	0,50
412	1243	28,37611	924,863	2527,16	32,9898	380,185	3,26	1,34	96,20	0,50	22,77	0,51	99,98	0,50	90,95	0,53	3,58	4,09	99,99	0,50
413	1243	31,12537	887,848	1851,92	24,2092	2430,41	2,44	1,28	98,55	0,50	27,63	0,50	99,88	0,52	56,19	0,50	29,61	70,76	99,75	0,50
414	1243	30,0303	877,736	1942,13	25,8808	2428,31	2,98	1,33	97,98	0,50	29,68	0,50	99,99	0,50	55,47	0,52	30,84	67,86	99,94	0,50
415	1243	22,69268	688,344	2846,83	39,5475	285,812	3,36	1,21	38,74	0,50	6,88	0,51	100,00	0,50	81,15	0,50	4,88	1,74	99,98	0,50
416	1243	28,24229	901,835	2207,8	32,468	1550,64	5,57	1,35	96,37	0,50	26,09	0,52	100,00	0,50	99,31	0,53	29,39	39,78	100,00	0,51
417	1243	30,96997	888,365	1876,94	24,5971	2377,25	2,44	1,28	98,55	0,50	27,63	0,50	99,88	0,52	56,19	0,50	28,85	70,76	99,75	0,50
418	1243	28,70822	913,386	2192,5	31,692	1500,18	5,57	1,35	97,88	0,50	26,42	0,51	99,98	0,50	99,37	0,55	28,82	38,71	100,00	0,51
419	1243	31,33417	878,253	1758,44	23,2281	2887,55	3,05	1,32	96,49	0,50	27,96	0,50	98,17	0,51	67,23	0,54	37,63	67,52	99,87	0,50
420	1243	33,06749	818,579	1379,85	17,3602	2806,17	2,00	1,32	96,59	0,50	30,56	0,50	99,79	0,51	55,47	0,52	36,74	67,21	99,85	0,50
421	1243	33,24174	799,093	1477,08	16,6202	1256,84	1,77	1,22	96,32	0,50	30,45	0,50	99,00	0,50	36,21	0,53	21,92	42,96	99,85	0,50
422	1243	31,24176	845,26	1768,93	21,6191	2169,49	2,33	1,25	96,37	0,50	30,06	0,50	99,98	0,50	40,03	0,54	27,79	66,54	99,39	0,51
423	1243	31,53981	853,01	1687,47	21,9103	2784,01	2,93	1,32	97,39	0,50	30,55	0,50	99,79	0,51	55,92	0,54	36,37	67,21	99,85	0,50
424	1243	29,93383	920,84	2002,43	28,1812	3729,11	3,72	1,34	98,30	0,50	26,86	0,52	99,98	0,50	81,46	0,51	43,56	77,34	99,98	0,51
425	1243	30,24926	923,977	1989,85	27,5077	3694,85	3,72	1,31	98,27	0,50	27,13	0,51	99,95	0,50	81,46	0,51	43,12	77,34	99,94	0,51
426	1243	61,05311	8,96926	16,7369	0,317988	30487,6	12,34	1,57	99,96	0,50	31,53	1,87	99,99	7,10	96,66	87,60	97,57	99,67	99,94	21,92
427	1243	33,85035	658,599	2734,73	34,1855	262,325	3,05	1,28	34,76	0,50	8,38	0,50	98,17	0,50	67,23	0,50	3,53	1,28	97,76	0,50
428	1243	32,47904	829,798	1607,76	18,8258	1406,4	2,95	1,24	97,42	0,50	30,39	0,50	99,79	0,50	38,95	0,54	27,25	39,90	99,28	0,50
429	1243	30,39464	891,022	1942,37	26,8544	3292,59	3,58	1,32	99,90	0,50	30,31	0,50	99,94	0,50	98,63	0,63	37,32	77,35	99,85	0,51
430	1243	29,24988	910,286	2073,8	29,5278	3343,84	3,62	1,33	98,17	0,50	27,37	0,51	98,99	0,50	79,95	0,51	38,47	77,64	100,00	0,51
431	1243	31,69558	868,842	1733,36	23,1233	3560,12	3,26	1,30	99,21	0,50	31,60	0,51	99,98	0,51	92,06	0,65	39,91	79,03	99,99	0,52
432	1243	32,41802	840,758	1503,51	19,4847	4803,42	3,75	1,31	98,73	0,50	31,67	0,51	99,96	0,50	50,50	0,54	56,50	79,00	99,94	0,53
433	1243	31,43071	858,62	1734,23	22,5649	3450,24	3,22	1,29	98,65	0,50	30,57	0,50	99,98	0,51	56,75	0,56	39,99	77,61	99,94	0,52
434	1243	31,5446	846,331	1723,69	21,0605	2255,65	2,33	1,25	96,37	0,50	30,06	0,50	99,98	0,50	40,03	0,52	29,11	66,54	99,39	0,51
435	1243	28,8833	916,08	2175,69	31,3146	1507,8	5,49	1,35	97,95	0,50	26,38	0,51	99,98	0,50	99,19	0,55	29,04	38,69	100,00	0,51
436	1243	32,03338	833,894	2155,87	19,7797	323,044	2,33	1,25	96,37	0,50	30,06	0,50	99,63	0,50	38,52	0,50	3,14	2,87	97,68	0,50
437	1243	27,44616	932,613	2318,09	35,8211	3110,77	3,58	1,32	97,15	0,50	20,12	0,51	99,99	0,50	93,32	0,50	37,24	73,79	100,00	0,51
438	1243	29,48109	908,072	2039,62	28,9763	3867,65	3,74	1,35	98,12	0,50	27,37	0,51	99,98	0,50	80,60	0,52	43,20	81,18	99,99	0,51
439	1243	31,82761	846,995	1602,98	20,578	2056,76	1,71	1,37	96,61	0,50	30,56	0,50	99,78	0,50	53,92	0,51	25,73	67,01	99,86	0,50
440	1243	32,07068	841,459	1630,82	20,1075	4896,49	3,74	1,23	98,50	0,50	30,11	0,50	99,91	0,51	39,11	0,52	56,39	81,13	99,61	0,51
441	1243	32,82196	828,248	2053,27	18,3815	347,123	2,33	1,25	98,76	0,50	31,77	0,50	99,97	0,50	49,91	0,54	3,14	2,87	99,97	0,53
442	1243	26,00456	893,088	2592,59	34,6821	370,471	2,99	1,33	98,02	0,50	18,74	0,50	99,91	0,50	55,66	0,50	5,65	8,43	99,94	0,50
443	1243	29,7773	914,271	2021,66	28,4616	3975,12	3,68	1,34	98,46	0,50	25,64	0,51	99,91	0,51	70,77	0,52	44,67	81,15	99,65	0,51
444	1243	30,43999	883,383	1907,06	26,391	3400,44	3,62	1,33	99,60	0,50	30,44	0,50	99,00	0,50	98,13	0,63	38,49	77,85	99,89	0,51
445	1243	30,3086	850,095	2314,41	22,4644	313,746	2,32	1,25	96,37	0,50	26,50	0,50	99,64	0,50	31,55	0,50	3,15	3,30	97,68	0,50
446	1243	35,76885	626,952	1107,62	13,9603	5922,08	4,04	1,25	98,65	0,50	30,55	0,50	99,99	0,62	56,07	1,01	71,30	77,21	99,91	0,51
447	1243	27,6236	826,365	2398,6	25,9189	315,177	3,28	1,30	97,35	0,50	26,50	0,50	99,64	0,50	31,48	0,50	3,15	3,30	97,70	0,50
448	1243	29,4882	908,588	2056,66	28,9101	3856,65	3,73	1,35	98,14	0,50	27,37	0,51	99,98	0,50	79,34	0,51	43,20	80,98	100,00	0,51
449	1243	37,35139	541,636	1074,32	11,6357	694,267	3,05	1,24	98,20	0,50	30,60	0,50	99,79	0,73	42,69	1,17	13,65	19,45	99,65	0,55
450	1243	28,19133	947,227	2267,79	34,5821	3235,96	3,58	1,33	99,35	0,50	21,24	0,50	100,00	0,50	98,80	0,50	37,67	76,07	100,00	0,51
451	1243	33,28517	805,072	1446,13	17,7858	1733,03	3,29	1,30	97,58	0,50	30,41	0,50	99,69	0,52	54,23	0,61	32,72	42,29	99,47	0,51

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
452	1243	33,76676	734,695	1463,02	14,247	555,437	2,87	1,24	96,68	0,50	33,83	0,50	99,80	0,50	33,97	0,52	15,17	15,74	98,92	0,51
453	1243	35,03012	673,988	1060,02	11,9969	1613,61	4,68	1,41	97,54	0,50	30,44	0,50	99,79	0,51	29,93	0,68	53,12	24,36	99,25	0,50
454	1243	31,44095	839,393	1645,25	20,9853	4778,03	3,75	1,31	96,33	0,50	29,99	0,50	99,63	0,50	39,11	0,50	56,50	79,00	97,65	0,50
455	1243	29,89797	901,761	1981,77	27,2167	3805,75	3,60	1,34	97,19	0,50	25,46	0,51	99,90	0,51	57,00	0,52	44,65	77,75	99,63	0,51
456	1243	32,00595	850,538	1608,62	20,3667	2063,92	1,72	1,32	96,59	0,50	30,56	0,56	99,78	0,50	55,18	0,52	25,73	67,21	99,85	0,50
457	1243	53,81682	45,5132	101,199	3,06684	13493,3	16,16	1,64	99,67	0,50	30,56	0,56	99,95	3,03	93,23	20,05	95,98	91,59	99,98	2,24
458	1243	27,73886	931,026	2277,88	35,1143	3036,79	3,53	1,33	95,77	0,50	19,50	0,50	99,80	0,50	96,70	0,50	37,21	71,80	99,84	0,51
459	1243	33,01479	774,294	1765,38	18,7444	489,714	5,79	1,24	98,52	0,50	31,11	0,52	99,86	0,72	39,05	1,19	63,76	82,00	99,85	0,62
460	1243	37,81002	531,158	817,276	10,6192	5657,23	4,12	1,27	98,54	0,50	31,25	0,51	99,97	0,50	50,17	0,64	12,74	10,55	99,77	0,50
461	1243	35,52823	662,806	1035,7	13,4513	7052,12	4,02	1,33	98,68	0,50	30,27	0,50	99,88	0,59	56,17	0,76	70,89	93,94	99,91	0,62
462	1243	43,81257	238,405	253,869	3,73471	7655,92	3,20	1,40	99,50	0,50	31,86	0,51	99,84	0,89	36,62	2,72	93,04	76,02	99,94	0,73
463	1243	33,50053	786,693	1429,24	15,8594	1189,88	1,76	1,22	96,27	0,50	30,39	0,50	98,98	0,50	34,74	0,53	21,99	39,90	99,28	0,50
464	1243	43,66186	245,052	272,208	4,00034	7918,25	3,20	1,40	99,75	0,50	31,86	0,51	100,00	0,89	38,50	2,72	94,19	77,79	99,96	0,71
465	1243	35,93423	620,2	885,953	9,85345	1779,37	3,30	1,40	97,59	0,50	30,40	0,50	99,79	0,50	30,25	0,68	55,19	26,45	99,24	0,51
466	1243	33,53342	799,684	1294,34	16,2463	4340,46	3,24	1,31	98,73	0,50	31,63	0,51	99,86	0,51	46,98	0,54	56,51	70,86	99,75	0,53
467	1243	49,08268	96,9997	187,337	3,40732	12047,2	11,31	1,52	99,98	0,50	30,79	0,60	99,78	1,48	85,87	12,72	96,72	95,35	99,85	2,07
468	1243	30,5962	882,681	1936,45	26,5133	3326,86	3,55	1,32	99,90	0,50	30,31	0,50	99,94	0,50	96,71	0,72	37,64	77,22	99,73	0,51
469	1243	27,41489	934,569	2317,11	36,0865	3234,03	3,60	1,33	99,22	0,50	20,26	0,50	100,00	0,50	96,58	0,50	37,49	76,46	100,00	0,51
470	1243	29,50249	918,368	2083,66	29,648	1750,66	5,51	1,35	96,37	0,50	26,09	0,52	100,00	0,50	99,41	0,54	34,00	40,26	99,88	0,51
471	1243	42,19994	313,482	356,742	5,35396	6504,75	3,35	1,60	99,07	0,50	31,51	0,51	99,86	0,88	37,98	2,04	72,11	82,77	99,96	0,74
472	1243	33,56837	800,791	1395,99	16,4618	1412,86	2,68	1,31	97,45	0,50	30,66	0,50	99,78	0,50	39,47	0,51	25,34	42,85	99,74	0,58
473	1243	27,68517	937,263	2302,74	35,44	3113,38	3,58	1,33	97,07	0,50	20,26	0,50	100,00	0,50	96,61	0,50	37,24	73,80	100,00	0,51
474	1243	30,97007	888,365	1876,63	24,5968	2377,25	2,44	1,28	98,55	0,50	27,63	0,50	99,88	0,52	56,19	0,50	28,85	70,76	99,75	0,50
475	1243	36,11529	610,583	940,328	12,4837	5636,02	3,04	1,44	99,32	0,50	30,65	0,51	99,78	0,62	46,51	0,82	56,97	92,05	100,00	0,61
476	1243	38,96163	468,405	677,646	8,98266	4773,31	3,25	1,24	98,50	0,50	31,63	0,51	99,86	0,78	46,82	1,12	61,65	70,20	99,75	0,54
477	1243	35,29485	690,521	1422,31	13,3009	513,192	3,73	1,24	98,57	0,50	31,37	0,51	99,97	0,55	51,02	0,70	14,53	10,39	99,77	0,50
478	1243	35,56543	642,066	994,213	13,0896	6683,35	4,02	1,41	98,76	0,50	30,44	0,50	99,87	0,59	56,02	0,76	70,89	88,73	99,91	0,62
479	1243	34,83008	714,029	1078,32	12,3814	2468,03	2,98	1,24	98,49	0,50	30,77	0,50	99,79	0,50	29,56	0,53	52,53	41,07	99,63	0,50
480	1243	40,03364	414,5	515,544	6,75031	7340,54	2,64	1,25	98,67	0,50	30,83	0,50	99,76	0,73	40,80	1,34	83,32	82,81	99,65	0,57
481	1243	37,07752	575,283	780,865	10,1112	4379,29	3,04	1,44	98,49	0,50	30,66	0,51	99,78	0,62	40,05	0,81	56,97	70,20	99,75	0,61
482	1243	41,29373	363,141	457,708	6,6076	7482,56	3,47	1,33	98,67	0,50	30,84	0,50	99,99	0,87	56,29	1,66	72,25	95,81	99,91	0,70
483	1243	34,50268	731,485	1169,23	15,2386	8833,24	3,75	1,35	98,20	0,50	31,58	0,52	99,98	0,55	56,95	0,70	92,58	91,40	99,97	0,51
484	1243	55,0243	30,9266	48,0764	1,22273	11301,7	4,69	1,31	98,56	0,50	35,54	0,64	99,98	2,47	56,95	21,16	90,34	89,24	100,00	1,90
485	1243	34,42764	738,054	1219,91	15,4243	3631,85	3,19	1,33	99,91	0,50	31,18	0,50	99,85	0,54	49,09	0,76	42,80	76,06	99,84	0,62
486	1243	38,31466	495,252	838,448	7,35944	660,8	3,13	1,24	96,06	0,50	31,71	0,50	99,74	0,60	34,50	1,15	20,86	13,32	99,01	0,56
487	1243	44,77346	225,882	244,879	4,13133	5310,82	3,28	1,39	99,28	0,50	31,78	0,51	99,84	1,17	35,17	2,04	66,28	71,36	99,94	0,72
488	1243	40,83054	366,373	527,031	7,17933	2149,36	3,13	1,24	97,45	0,50	30,44	0,50	99,75	0,97	39,41	1,15	38,03	44,21	99,64	0,57
489	1243	44,53004	147,172	312,101	5,10123	10222,8	8,94	1,28	99,96	0,50	40,05	0,59	99,92	1,05	91,92	9,31	90,06	89,22	100,00	1,18
490	1243	27,78913	879,84	2487,54	28,3508	317,972	3,03	1,30	97,35	0,50	22,66	0,50	99,59	0,50	38,53	0,50	3,15	3,26	97,70	0,50
491	1243	39,15624	150,979	230,322	2,67262	9850,97	3,82	1,31	98,27	0,50	27,13	0,55	99,95	0,51	81,45	10,68	96,96	79,03	99,97	2,19
492	1243	32,04663	828,986	1655,22	19,4857	1492,66	2,96	1,24	97,48	0,50	30,45	0,50	99,81	0,50	36,21	0,54	27,36	42,96	99,86	0,50
493	1243	32,76625	821,679	1594,4	18,1724	913,53	2,60	1,26	97,63	0,50	30,68	0,50	99,85	0,51	39,96	0,50	16,88	34,67	99,83	0,59
494	1243	67,76732	0,813043	0,838292	0,128377	5424,87	9,41	1,10	99,63	0,53	29,26	5,86	10,45	30,77	6,38	99,96	63,34	30,24	99,99	11,41
495	1243	27,7089	930,952	2281,88	35,2033	3036,57	3,53	1,33	95,77	0,50	19,50	0,50	99,92	0,50	96,70	0,50	37,21	71,80	99,84	0,51
496	1243	35,35358	663,913	923,665	10,9047	4598,52	1,89	1,24	96,63	0,50	30,55	0,50	99,71	0,51	36,14	0,55	64,62	66,23	99,88	0,50
497	1243	36,30764	608,441	902,407	11,2869	5606,28	3,56	1,29	98,24	0,50	30,73	0,50	99,06	0,59	36,60	0,76	66,46	78,91	99,63	0,60
498	1243	32,77645	819,427	1568,85	18,0606	917,395	2,61	1,30	97,61	0,50	30,66	0,50	99,78	0,50	39,97	0,52	17,24	34,14	99,62	0,59

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{avr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
499	1243	21,71844	607,766	2762,79	36,0766	262,911	3,05	1,28	33,59	0,50	8,18	0,50	98,16	0,50	67,23	0,50	3,95	1,64	97,75	0,50
500	1243	35,84639	546,945	982,176	12,7563	5653,09	5,38	1,27	96,57	0,50	31,10	0,52	99,86	0,73	34,43	1,19	63,77	82,12	99,84	0,62
501	1243	35,49389	639,076	1249,62	10,3516	515,476	1,79	1,24	96,36	0,50	30,05	0,50	98,99	0,50	29,91	0,54	15,86	13,08	98,95	0,51
502	1243	34,16689	741,227	1371,76	13,7173	764,096	1,64	1,19	94,16	0,50	30,40	0,50	99,78	0,50	30,67	0,50	17,26	26,54	99,24	0,51
503	1243	47,29222	113,669	243,848	4,28521	11523,3	11,42	1,53	98,96	0,50	30,79	0,60	99,78	1,46	84,79	12,72	96,47	90,96	99,85	1,64
504	1243	38,21833	512,064	773,48	10,4568	4083,89	3,26	1,32	98,50	0,50	30,78	0,52	99,98	0,78	46,75	1,06	44,19	82,20	99,96	0,66
505	1243	42,68208	315,965	416,294	6,43008	5408,74	3,35	1,38	99,19	0,50	30,82	0,51	99,83	1,06	37,22	1,94	67,14	72,44	99,93	0,59
506	1243	33,74915	655,868	1727,62	15,5486	339,917	2,96	1,26	96,21	0,50	30,52	0,50	99,74	0,59	28,86	0,62	3,27	2,43	99,84	0,51
507	1243	40,02039	398,063	627,638	8,55444	6207,61	3,40	1,23	98,21	0,50	30,92	0,50	99,86	0,87	37,67	1,45	74,52	77,08	99,64	0,51
508	1243	51,14422	48,7149	81,7191	1,50044	11216,8	4,70	1,40	99,45	0,50	35,53	0,63	99,98	1,45	79,33	21,16	86,09	84,01	100,00	1,93
509	1243	34,70171	721,041	1140,82	14,7411	8541,5	3,75	1,34	98,57	0,50	31,36	0,52	99,98	0,55	51,02	0,70	92,07	88,82	99,98	0,51
510	1243	38,16189	531,135	747,424	9,59499	5826,04	3,04	1,27	98,58	0,50	30,86	0,51	99,79	0,69	39,45	1,05	65,87	82,25	99,61	0,57
511	1243	38,91234	467,846	663,84	8,77423	4575,62	3,25	1,24	98,52	0,50	32,16	0,51	99,86	0,76	47,06	1,12	62,17	66,48	99,79	0,54
512	1243	34,29987	758,535	1281,82	13,7251	1320,33	1,80	1,14	96,29	0,50	30,44	0,50	99,03	0,50	37,72	0,51	23,82	42,07	99,85	0,54
513	1243	36,93814	597,404	837,133	10,1789	5173,78	2,99	1,24	98,49	0,50	30,28	0,50	99,88	0,59	39,29	0,79	66,24	72,59	99,93	0,57
514	1243	54,74263	39,7593	83,1317	2,48402	13077,3	12,67	1,61	99,68	0,50	29,11	0,56	99,94	3,03	93,44	20,09	92,69	90,19	99,98	2,26
515	1243	34,31074	747,28	1227,5	14,4513	1870,51	3,00	1,25	97,40	0,50	30,61	0,50	99,95	0,53	44,75	0,54	37,11	41,40	99,63	0,51
516	1243	33,85401	768,057	1331,25	14,6975	1402,91	1,71	1,19	94,02	0,50	30,49	0,50	99,78	0,50	36,08	0,51	25,43	42,92	99,65	0,50
517	1243	33,95151	772,928	1269,85	14,9354	2730,72	1,99	1,22	96,55	0,50	30,50	0,50	99,79	0,51	36,37	0,52	36,45	66,14	99,85	0,53
518	1243	44,42385	93,4384	128,808	1,68559	11813,1	3,34	1,55	98,98	0,50	34,93	0,71	100,00	0,78	81,33	11,42	97,90	96,21	99,94	2,33
519	1243	38,69438	486,194	710,266	9,42754	4049,44	2,85	1,32	97,47	0,50	30,78	0,52	99,96	0,78	34,87	1,06	44,19	82,02	99,96	0,66
520	1243	65,97344	0,789166	0,775217	0,089921	5363,6	6,27	1,34	98,46	0,53	30,14	0,50	100,00	0,50	96,61	0,50	37,24	73,80	100,00	0,51
521	1243	27,68517	937,263	2302,74	35,44	3113,38	3,58	1,33	97,07	0,50	20,26	0,50	100,00	0,50	96,61	0,50	37,24	73,80	100,00	0,51
522	1243	42,68265	298,041	418,635	6,92341	6696,81	3,09	1,38	99,19	0,50	31,68	0,51	99,83	1,16	37,22	1,97	67,14	91,28	99,93	0,58
523	1243	39,53758	430,823	751,574	7,78664	719,062	3,25	1,24	98,21	0,50	31,65	0,51	99,99	0,78	46,81	1,14	16,33	16,34	99,76	0,59
524	1243	33,73885	789,498	1364,55	15,6959	1399,55	2,68	1,25	97,49	0,50	30,66	0,50	99,78	0,51	39,47	0,53	25,48	42,03	99,63	0,58
525	1243	39,23356	451,872	619,151	8,21216	4735,71	3,17	1,24	98,30	0,50	31,29	0,51	99,83	0,78	46,24	1,06	61,65	69,66	99,75	0,57
526	1243	38,63442	485,1	599,455	7,58782	9420,33	3,38	1,23	94,27	0,50	30,80	0,50	99,78	0,66	44,45	1,09	96,72	93,12	99,01	0,62
527	1243	37,25856	519,655	858,987	11,4942	4023,41	2,85	1,32	97,57	0,50	30,78	0,51	99,83	0,77	34,87	1,09	43,89	82,21	99,93	0,57
528	1243	32,89155	812,932	1499,02	17,5641	2000,75	1,71	1,22	96,55	0,50	30,49	0,50	99,78	0,50	36,08	0,52	25,44	66,14	99,90	0,53
529	1243	40,30376	393,009	583,253	8,01358	6583,79	3,38	1,25	98,21	0,50	31,00	0,50	99,86	0,87	37,06	1,37	74,26	82,47	99,62	0,55
530	1243	41,31704	362,553	487,096	6,25002	2127,8	1,60	1,22	96,55	0,50	30,52	0,50	99,77	0,86	37,90	1,45	24,89	66,14	99,91	0,72
531	1243	35,69082	640,516	993,394	12,8361	7179,77	4,01	1,33	98,70	0,50	31,00	0,50	99,89	0,59	56,19	0,76	72,71	93,31	99,92	0,62
532	1243	39,25823	203,161	319,033	3,60353	7267,44	1,73	1,23	96,30	0,50	30,37	0,50	99,02	0,51	96,78	7,58	95,13	57,87	99,84	0,69
533	1243	44,2849	243,967	300,345	4,80766	8064,57	4,65	1,40	99,75	0,50	31,86	0,51	100,00	1,06	39,26	2,72	95,59	77,79	99,96	0,71
534	1243	65,58275	0,611119	0,59936	0,069569	4869,88	6,27	1,34	98,46	0,53	30,14	0,50	99,83	1,16	37,22	1,97	67,14	91,28	99,93	0,58
535	1243	44,71945	163,866	300,504	4,49865	10349,6	3,17	1,35	99,46	0,50	31,25	0,52	99,83	0,94	96,34	7,47	95,13	89,57	99,96	0,69
536	1243	34,85163	701,555	1246,94	12,166	709,385	3,23	1,24	96,63	0,50	30,91	0,50	99,79	0,51	34,40	0,53	24,12	16,34	98,94	0,50
537	1243	63,85074	0,749272	0,881031	0,527102	2595,37	3,59	1,10	99,10	0,50	22,33	0,52	17,14	15,52	5,01	96,85	38,90	21,38	99,93	1,39
538	1243	36,44859	605,903	882,99	11,0216	5607,45	3,50	1,29	98,20	0,50	30,53	0,50	99,06	0,59	37,29	0,76	67,40	77,82	99,63	0,60
539	1243	37,36621	558,122	851,585	11,4159	7278,55	4,04	1,33	98,68	0,50	30,93	0,51	99,78	0,70	56,11	1,11	70,95	96,16	99,91	0,62
540	1243	50,3069	78,5734	143,073	2,92861	12260,5	11,69	1,55	99,98	0,50	36,27	0,60	99,98	1,59	91,38	13,28	98,99	92,54	99,99	2,11
541	1243	61,77732	1,55822	1,94674	0,253906	4428,42	13,14	1,10	99,63	0,50	27,05	1,99	7,91	6,95	7,78	85,54	50,42	33,20	99,42	11,12
542	1243	33,53342	799,684	1294,34	16,2463	4340,46	3,24	1,31	98,73	0,50	31,63	0,51	99,86	0,51	46,98	0,54	56,51	70,86	99,75	0,53
543	1243	34,31074	747,28	1227,5	14,4513	1870,51	3,00	1,25	97,40	0,50	30,61	0,50	99,95	0,53	44,75	0,54	37,11	41,40	99,63	0,51
544	1243	33,0393	831,569	1440,96	17,5612	1710,47	2,94	1,30	97,41	0,50	30,39	0,50	99,56	0,50	54,21	0,52	33,26	41,40	99,27	0,50
545	1243	42,6491	298,159	420,207	6,98048	6788,81	3,09	1,38	99,19	0,50	31,68	0,51	99,83	1,16	50,46	1,97	67,14	91,87	99,93	0,58

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{avr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
546	1243	33,79069	775,032	1548,78	14,9814	544,35	2,86	1,24	96,80	0,50	30,74	0,50	99,81	0,50	34,09	0,50	15,17	15,28	98,97	0,51
547	1243	42,85848	192,631	410,827	6,00948	9997,92	8,49	1,34	99,96	0,50	31,81	0,59	99,92	0,99	91,41	9,05	89,13	88,52	99,98	1,17
548	1243	40,52731	376,069	567,235	7,77518	2146,74	3,13	1,24	97,45	0,50	30,44	0,50	99,75	0,97	39,41	1,15	38,03	44,21	99,64	0,54
549	1243	40,29856	394,449	591,39	8,10194	6465,46	3,35	1,25	98,19	0,50	30,69	0,50	99,86	0,88	37,06	1,38	72,81	82,47	99,62	0,55
551	1243	38,95633	479,977	558,302	7,28503	5444,39	3,27	1,33	99,99	0,50	31,18	0,51	99,86	0,66	49,71	1,13	65,02	76,85	99,88	0,72
552	1243	40,38557	355,853	585,047	9,14492	6092,45	4,70	1,38	99,45	0,50	30,75	0,51	99,83	1,06	39,25	2,03	65,82	84,01	99,93	0,60
553	1243	51,85024	69,4285	114,498	2,8252	9238,12	9,76	1,45	99,95	0,50	36,42	0,60	99,89	2,18	92,76	9,64	69,82	95,12	99,99	2,30
554	1243	38,63442	485,1	599,455	7,58782	9420,33	3,38	1,23	94,27	0,50	30,80	0,50	99,78	1,66	44,45	1,09	96,72	93,12	99,01	0,62
555	1243	48,68438	99,9705	203,173	3,53787	11903,4	11,42	1,53	99,97	0,50	30,79	0,63	99,78	1,47	84,79	12,72	96,47	94,41	99,85	2,07
555	1243	38,41851	514,788	723,493	9,29431	5873,33	3,01	1,27	98,52	0,50	31,09	0,51	99,78	0,70	39,14	1,18	66,31	82,25	99,61	0,57
556	1243	60,56907	9,33425	17,5014	0,325409	29040,6	12,51	1,58	99,09	0,50	31,60	1,76	99,99	6,39	96,63	85,21	97,74	92,41	100,00	20,52
557	1243	38,97211	458,439	631,306	8,40414	4764,36	3,25	1,24	98,50	0,50	31,63	0,51	99,98	0,78	46,82	1,00	61,65	70,20	99,75	0,56
558	1243	35,04798	671,737	960,511	12,1142	7414,51	3,20	1,40	99,50	0,50	33,67	0,51	98,99	0,51	36,32	0,69	93,04	76,07	99,94	0,52
559	1243	56,94202	28,5568	53,9251	1,05608	15767,4	9,95	1,39	99,94	0,50	34,21	0,99	99,84	3,15	98,03	37,18	69,51	99,64	99,94	7,54
560	1243	35,26931	674,32	942,389	11,1294	4626,03	1,91	1,24	96,65	0,50	30,55	0,51	99,71	0,51	36,06	0,54	64,91	66,37	99,85	0,50
561	1243	29,60997	892,609	2007,64	27,3906	3459,45	3,63	1,33	98,79	0,50	27,20	0,50	98,99	0,50	56,32	0,53	40,34	77,44	100,00	0,51
562	1243	30,25513	921,689	1956,34	27,3303	3824,61	3,71	1,34	98,28	0,50	26,87	0,51	99,95	0,50	81,46	0,51	44,80	77,34	99,94	0,51
563	1243	55,63964	34,2601	805,2195	2,41523	14095	9,93	1,29	99,09	0,50	31,71	0,66	99,85	3,87	89,04	37,03	69,88	90,86	99,98	2,36
564	1243	37,26304	564,129	805,16	9,70122	4701,28	2,86	1,24	96,62	0,50	30,92	0,50	99,78	0,61	34,43	1,00	61,65	70,20	99,75	0,56
565	1243	50,18432	80,7286	146,728	2,98908	12216,8	11,95	1,55	99,98	0,50	36,49	0,61	99,98	1,58	94,47	12,93	98,99	91,97	100,00	2,11
566	1243	38,91342	493,227	660,761	8,31202	5121,98	3,01	1,24	98,49	0,50	30,94	0,51	99,78	0,70	39,23	1,14	66,31	70,97	99,76	0,57
567	1243	43,29734	261,238	351,487	5,85976	8426,84	3,68	1,25	97,67	0,50	31,76	0,51	99,91	1,24	40,47	1,66	88,19	89,12	99,93	0,57
568	1243	44,59804	165,998	307,632	4,6097	10536,3	3,17	1,35	99,46	0,50	31,29	0,52	99,83	0,94	96,78	7,58	95,13	91,26	99,96	0,69
569	1243	59,1178	16,7305	32,739	0,472555	24477,2	12,42	1,38	99,19	0,50	31,69	1,96	100,00	4,12	99,42	58,45	97,96	99,86	100,00	20,25
570	1243	41,50042	342,263	391,214	5,4647	5763,66	3,27	1,48	99,07	0,50	31,53	0,51	99,84	0,79	39,98	2,04	68,97	75,95	99,94	0,74
571	1243	41,61029	352,269	439,895	6,11564	6445,76	3,35	1,25	97,03	0,50	30,68	0,50	99,86	0,88	37,98	1,60	72,06	82,66	99,64	0,65
572	1243	38,94494	475,041	790,412	9,17347	958,889	3,13	1,27	98,56	0,50	31,72	0,52	99,98	0,78	45,83	1,15	20,86	24,43	99,76	0,56
573	1243	57,04291	21,8855	39,0452	0,920857	19112,9	9,65	1,40	99,96	0,50	31,53	0,76	99,99	3,14	99,71	46,99	94,21	89,86	100,00	5,01
574	1243	52,56038	54,5827	104,015	2,0479	14767,1	7,29	1,38	99,97	0,50	31,68	0,65	99,85	1,84	96,66	25,01	96,60	95,41	99,98	2,08
575	1243	33,48583	786,287	1488,78	15,7685	906,053	1,64	1,19	94,17	0,50	30,49	0,50	99,78	0,50	36,57	0,51	17,34	34,21	99,65	0,51
576	1243	33,70085	738,054	1863,94	15,1312	316,452	3,29	1,26	96,24	0,50	30,41	0,50	99,69	0,52	28,46	0,52	3,24	1,60	99,45	0,51
577	1243	35,32448	683,915	1022,84	12,976	8616,28	3,19	1,30	97,30	0,50	30,64	0,50	99,85	0,55	54,72	0,70	92,36	89,33	99,89	0,51
578	1243	57,07709	27,1816	52,1172	0,962031	16297,1	9,66	1,33	99,98	0,50	23,00	0,77	99,89	3,08	93,08	45,90	69,63	89,86	99,99	7,45
579	1243	46,27334	123,238	282,278	4,89622	9450,32	11,17	1,53	99,92	0,50	31,61	0,60	99,75	1,43	91,54	12,63	67,58	96,30	99,83	2,07
580	1243	59,06653	13,2766	22,6721	0,699506	21089,4	11,57	1,55	99,98	0,50	40,36	1,04	99,98	5,42	98,46	48,98	97,33	97,14	100,00	7,22
581	1243	43,86589	175,249	384,235	5,63725	10151	8,44	1,28	99,96	0,50	31,63	0,59	99,92	1,05	91,42	9,29	90,06	88,69	99,98	1,17
582	1243	41,5724	76,9754	115,131	1,36663	8669,85	1,97	1,30	99,54	0,50	31,34	0,55	100,00	0,60	86,26	15,34	70,33	79,00	99,97	2,14
583	1243	55,42522	33,8018	61,3976	1,94325	13438,8	10,27	1,64	99,99	0,50	30,56	0,56	99,95	3,11	88,86	20,65	95,95	91,59	99,98	2,25
584	1243	38,88175	126,659	203,108	2,29256	8700,81	1,97	1,30	98,62	0,50	23,09	0,55	100,00	0,50	87,23	15,34	70,66	79,00	99,97	2,19
585	1243	28,82614	861,092	2394,84	26,4672	322,253	3,28	1,30	97,35	0,50	26,50	0,50	99,64	0,50	38,53	0,50	3,15	3,30	97,70	0,50
586	1243	38,35918	519,818	693,254	8,66059	5392,02	3,27	1,25	98,39	0,50	30,80	0,51	99,71	0,66	34,58	1,13	64,91	76,88	99,93	0,63
587	1243	48,92552	97,6566	193,394	3,43369	11902,1	11,42	1,53	99,97	0,50	30,79	0,60	99,78	1,47	84,79	12,72	96,47	94,41	99,85	2,07
588	1243	46,81443	111,306	240,795	4,68252	10892,8	9,72	1,45	99,98	0,50	40,12	0,59	99,92	1,35	92,64	11,01	90,14	92,15	99,98	1,28
589	1243	56,51416	24,761	50,0512	0,626663	23065,7	12,21	1,57	96,78	0,50	31,87	1,86	100,00	2,64	93,88	58,70	93,13	99,52	99,99	20,35
590	1243	40,12187	355,692	592,74	9,35215	6114,94	4,77	1,41	99,56	0,50	30,92	0,51	99,83	1,06	39,28	2,05	65,67	84,53	99,92	0,60
591	1243	44,76725	140,709	292,994	4,93905	10241,3	8,84	1,28	99,99	0,50	40,13	0,56	99,92	1,04	97,46	9,37	89,61	88,68	99,98	1,16
592	1243	54,33909	45,1267	93,4303	2,19858	14432,3	7,29	1,38	98,97	0,50	31,68	0,65	99,84	2,53	96,66	25,01	96,60	90,98	99,98	1,64

N.	Semente	A_{v0} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{avr} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
593	1243	36,57098	583,503	905,991	10,9065	4081,86	2,86	1,24	96,57	0,50	30,92	0,50	99,78	0,61	34,43	1,00	52,63	70,46	98,97	0,56
594	1243	36,68764	594,726	916,994	11,1147	4085,64	2,88	1,24	98,52	0,50	30,92	0,50	99,78	0,60	39,05	1,00	52,63	70,34	98,97	0,56
595	1243	43,10417	185,113	324,195	4,38982	9734,63	2,84	1,33	97,47	0,50	30,78	0,52	99,96	0,78	98,89	7,64	96,19	81,82	99,96	0,69
596	1243	48,01376	106,873	165,149	2,77244	8199,92	8,54	1,54	99,20	0,50	30,78	0,55	100,00	1,17	85,24	8,74	82,61	74,50	99,97	1,89
597	1243	44,19261	179,161	340,087	5,04882	10518,9	3,69	1,35	99,49	0,50	31,37	0,52	99,83	0,94	97,19	7,53	96,92	89,42	99,96	0,69
598	1243	55,8307	19,5968	36,8791	0,424784	20342	9,42	1,57	99,76	0,50	31,60	1,91	99,99	2,30	87,59	58,77	95,37	77,07	99,99	20,15
599	1243	52,99882	61,7825	101,12	2,29033	8946,3	8,28	1,33	99,93	0,50	31,55	0,60	99,89	2,23	81,23	11,01	70,57	89,84	99,97	2,34
600	1243	51,5568	61,0653	94,4024	1,83963	11758,9	5,50	1,38	99,97	0,50	33,68	0,61	99,98	1,58	89,82	12,29	96,58	92,37	99,99	1,73
601	1244	35,06135	0,27402	0,176081	0,001579	4,77999	1,56	0,70	1,72	0,50	0,52	0,56	1,07	0,50	0,50	0,50	0,80	0,50	0,68	0,74
602	1244	36,82357	0,10024	0,09359	0,000607	198,214	1,41	0,70	2,02	0,59	6,21	2,31	9,83	0,50	0,82	75,25	32,90	0,87	3,30	1,70
603	1244	68,74924	0,599197	0,5696	0,080378	7930,75	41,59	1,43	99,99	0,55	29,21	14,02	5,98	36,56	3,52	100,00	33,79	17,56	77,38	68,07
604	1244	28,37179	946,194	2449,73	34,0434	427,55	33,66	1,33	100,00	0,50	21,97	0,50	99,99	0,50	99,94	0,50	15,58	3,44	99,92	0,52
605	1244	32,16862	815,958	1583,85	19,8247	1494,01	20,70	1,42	89,19	0,50	29,03	0,50	100,00	0,50	68,49	0,68	48,19	22,87	99,99	0,80
606	1244	38,29159	83,0462	2904,23	1,41442	22574,9	30,74	2,28	43,57	0,50	9,36	0,53	100,00	0,50	68,66	17,64	100,00	100,00	100,00	100,00
607	1244	56,41897	9,09216	29,8985	0,271198	38149,9	41,18	2,29	98,79	1,23	69,30	2,36	100,00	3,01	99,90	89,70	99,61	96,11	100,00	94,82
608	1244	53,30811	11,9863	48,5417	0,301159	33687,8	40,96	2,28	98,53	1,11	74,72	2,08	100,00	1,86	98,36	73,89	100,00	89,59	99,99	92,92
609	1244	53,26486	24,8899	299,284	0,725126	30745,2	77,15	2,29	99,55	1,29	56,08	2,32	100,00	2,03	99,98	49,92	99,17	99,94	100,00	99,30
610	1244	56,38038	8,99067	29,2965	0,264217	37219,4	41,55	2,27	98,71	1,19	69,26	2,33	100,00	2,98	98,73	89,18	97,96	91,34	100,00	95,09
611	1244	53,6535	12,363	51,2116	0,326015	35366	40,96	2,29	98,80	1,23	75,06	2,09	100,00	1,96	99,90	75,90	99,61	99,98	100,00	92,92
612	1244	53,28754	27,7032	292,14	0,778409	26787,8	81,26	2,29	99,23	1,26	58,67	2,36	100,00	2,02	98,04	32,62	98,43	99,80	100,00	96,37
613	1244	55,26125	20,7527	106,571	0,64921	25903	49,64	2,29	99,56	1,17	55,57	2,24	99,99	2,73	98,91	49,03	63,97	98,58	100,00	88,70
614	1244	39,90626	38,8528	2294,62	0,662068	23244,3	30,74	2,26	45,13	0,50	14,54	0,51	100,00	0,56	70,06	26,87	99,33	94,83	99,98	98,90
615	1244	53,92295	23,1258	138,237	0,605664	24847,5	38,87	2,27	99,55	1,19	56,03	2,30	99,98	2,03	96,68	47,13	70,60	95,80	99,99	80,69
616	1244	21,76804	739,161	2761,65	40,0674	316,312	12,81	1,27	72,59	0,50	11,52	0,50	100,00	0,50	71,51	0,50	6,22	1,72	99,92	0,50
617	1244	38,45483	65,6089	1027,35	1,33784	17296,7	41,03	2,24	77,05	0,53	33,08	0,53	100,00	0,50	92,11	21,19	84,60	95,39	99,99	51,07
618	1244	39,2232	86,8842	1428,73	1,48963	16123,6	40,59	2,23	98,91	0,53	33,04	0,58	100,00	0,52	90,65	13,14	86,34	96,64	99,97	51,52
619	1244	55,22948	18,7467	125,013	0,579961	28068,6	77,47	2,27	99,59	1,59	56,85	2,34	100,00	2,85	98,83	35,90	98,67	99,74	100,00	99,77
620	1244	40,74343	52,8387	1739,39	0,92881	19379,6	49,21	2,25	92,99	0,50	29,46	0,53	100,00	0,58	88,59	18,22	62,45	94,95	100,00	99,82
621	1244	50,21639	38,6104	499,63	0,946061	24933	51,12	2,26	99,29	0,90	50,37	2,09	100,00	1,39	99,41	39,79	83,30	99,69	100,00	80,49
622	1244	53,32004	13,1888	58,2714	0,335483	34728,3	40,96	2,28	98,54	1,11	74,72	2,08	100,00	1,86	98,36	73,89	100,00	99,99	100,00	92,92
623	1244	63,38585	3,44129	8,31706	0,195409	17903,6	70,60	1,90	96,62	1,09	29,74	8,99	16,37	12,35	23,77	98,05	64,69	40,91	99,31	95,12
624	1244	39,36441	89,9584	2183,52	1,63128	20168,6	75,81	2,23	99,39	0,54	29,33	0,54	100,00	0,52	98,92	14,57	72,30	98,12	100,00	99,51
625	1244	39,39761	142,393	1621,19	2,26352	12332,3	49,21	2,11	94,10	0,50	29,19	0,52	100,00	0,51	88,05	8,21	62,45	92,28	100,00	48,96
626	1244	37,10441	397,622	758,119	6,73484	5192,68	43,22	2,08	86,75	0,51	25,91	0,50	100,00	0,57	43,80	1,88	49,21	73,05	99,99	12,04
627	1244	37,8849	391,07	581,372	5,74928	6865,61	38,56	2,06	91,05	0,50	29,11	0,52	100,00	0,56	44,57	1,73	64,19	83,69	99,98	11,07
628	1244	35,96634	557,493	904,464	8,19334	3398,94	48,25	1,90	91,08	0,50	28,11	0,50	99,99	0,50	27,05	0,71	42,25	50,31	99,96	10,15
629	1244	40,27292	60,4925	1859,37	1,03188	18742,6	51,22	2,24	99,15	0,53	29,04	0,54	99,68	0,55	88,75	14,87	76,83	93,56	99,99	86,69
630	1244	36,98991	442,745	670,784	6,02225	5780,49	47,49	2,08	91,06	0,50	29,40	0,51	100,00	0,52	47,08	1,16	60,17	69,16	100,00	12,85
631	1244	51,22038	31,4643	164,419	0,65075	18372,8	51,22	2,03	98,58	0,90	55,51	2,73	95,36	1,36	98,91	39,64	74,28	43,65	99,99	65,48
632	1244	40,30979	99,8708	983,344	1,61003	14267,3	24,16	2,22	99,00	0,51	16,68	0,51	100,00	0,53	89,41	10,72	89,34	96,46	99,92	35,11
633	1244	39,93078	81,8505	947,15	1,39389	16002,5	41,66	2,23	99,16	0,53	33,04	0,58	100,00	0,55	90,44	13,14	86,34	96,64	99,97	50,30
634	1244	39,29113	118,044	2527,76	2,18876	21603,4	77,34	2,27	98,91	0,54	16,53	0,54	100,00	0,52	99,50	14,61	86,36	98,07	100,00	99,99
635	1244	38,85921	69,1443	2317,41	1,24411	21998,7	68,97	2,23	98,97	0,50	30,09	0,54	100,00	0,50	82,19	17,56	96,95	98,58	100,00	93,21
636	1244	57,50987	2,84128	6,02076	0,112711	17544,7	38,22	1,89	98,45	1,32	29,49	2,57	16,37	2,86	32,67	84,11	64,69	38,94	99,14	91,03
637	1244	40,05645	133,672	1344,49	2,10558	11989	48,67	2,10	93,81	0,57	29,28	0,53	100,00	0,55	87,54	8,14	57,51	91,04	100,00	50,82
638	1244	55,9161	13,2549	59,9224	0,354919	29760,1	47,83	2,29	97,74	1,23	55,61	2,21	99,99	2,78	98,57	46,81	98,79	97,59	99,98	98,52
639	1244	53,42212	13,8135	67,5595	0,345196	34090,6	45,77	2,28	98,55	1,11	69,42	2,07	100,00	1,87	99,90	74,02	99,62	89,73	99,98	94,82

N.	Semente	$A_{\lambda 0}$ (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{avr} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
640	1244	38,49446	213,302	581,02	3,88124	7560,87	42,67	2,06	91,48	0,50	28,85	0,50	100,00	0,51	85,78	7,35	55,55	73,24	99,94	20,10
641	1244	36,33279	313,835	609,917	4,58157	3830,47	22,50	2,00	56,01	0,50	27,00	0,51	99,99	0,50	37,24	3,21	32,58	61,50	99,97	14,04
642	1244	37,20632	161,298	1928,78	3,64254	13918,8	55,77	2,29	99,30	0,52	30,19	0,68	100,00	0,50	99,48	10,75	78,35	95,26	100,00	40,71
643	1244	23,17328	782,08	2760,44	38,455	304,701	11,65	1,27	63,77	0,50	11,07	0,50	99,99	0,50	69,64	0,50	6,20	1,66	99,84	0,50
644	1244	39,2359	259,416	312,37	2,9791	7683,15	41,86	2,14	91,18	0,50	28,98	0,50	99,99	0,55	47,22	2,18	83,59	69,11	99,97	14,70
645	1244	54,51604	22,0236	216,611	0,63872	30253,8	76,87	2,29	98,90	1,30	56,09	2,29	100,00	2,36	98,78	47,21	99,51	99,98	100,00	99,93
646	1244	39,17969	123,934	2518,33	2,31556	21080,9	77,34	2,27	98,91	0,54	16,53	0,54	100,00	0,52	99,50	14,61	81,03	98,07	100,00	99,99
647	1244	38,88572	85,9026	1027,25	1,39406	15436,9	41,03	2,24	77,05	0,53	33,08	0,53	100,00	0,50	92,11	11,09	84,60	95,39	100,00	51,07
648	1244	35,56423	509,479	877,134	7,53123	2929,38	36,34	1,93	76,58	0,50	27,75	0,51	100,00	0,50	22,30	0,84	34,11	48,55	100,00	10,31
649	1244	31,55976	861,83	1901,92	22,7381	658,012	37,68	1,38	98,11	0,50	29,14	0,50	100,00	0,50	67,82	0,68	29,65	8,79	99,98	0,77
650	1244	38,16186	348,801	499,627	4,26978	7103,25	39,23	2,01	91,05	0,50	29,68	0,52	100,00	0,56	16,39	1,43	64,19	83,69	99,98	14,51
651	1244	38,05916	194,781	761,51	3,57865	12802	53,13	2,28	98,97	0,52	28,09	0,53	100,00	0,51	86,72	7,45	92,23	95,79	100,00	24,40
652	1244	40,04056	107,335	2339,21	2,01554	21481,7	78,41	2,29	99,15	0,54	16,53	0,54	100,00	0,55	99,29	14,61	86,36	98,07	100,00	98,77
653	1244	38,73173	46,1396	2339,83	0,729086	22320,9	39,80	2,25	93,07	0,50	29,66	0,50	100,00	0,50	68,60	17,73	99,99	98,99	100,00	97,65
654	1244	38,80868	188,023	329,185	2,80354	8128,36	21,72	2,01	91,40	0,50	28,82	0,50	100,00	0,52	49,05	6,85	61,31	92,53	99,97	15,59
655	1244	38,55325	252,717	280,075	2,73576	6393,74	15,60	2,13	91,51	0,50	28,88	0,50	99,99	0,50	27,59	2,06	58,33	82,88	100,00	12,25
656	1244	34,32883	546,433	1107,08	9,69909	4755,81	40,90	2,07	80,13	0,50	25,91	0,50	100,00	0,50	54,49	0,95	43,18	76,00	99,99	11,65
657	1244	37,61575	247,147	699,299	5,31094	8814,52	42,96	2,05	91,54	0,50	29,05	0,51	100,00	0,52	86,72	6,72	62,30	93,49	99,99	15,99
658	1244	39,71267	89,7185	2097,49	1,33669	19100,7	73,99	2,26	99,70	0,50	29,82	0,50	100,00	0,52	96,30	9,15	79,32	96,89	99,96	94,23
659	1244	40,2221	55,9216	1923,48	0,904739	20658,3	53,93	2,27	99,15	0,53	29,05	0,54	99,99	0,55	88,84	14,87	94,79	95,56	100,00	87,12
660	1244	27,25805	903,126	2471,96	34,1767	401,848	34,56	1,36	98,59	0,50	22,04	0,50	99,99	0,50	72,88	0,50	15,83	3,53	99,98	0,52
661	1244	35,81977	485,845	801,534	6,96585	3118,24	36,31	1,98	77,05	0,50	27,84	0,51	100,00	0,50	22,30	0,86	37,38	49,27	100,00	10,32
662	1244	38,29766	224,102	672,11	4,29707	9294,01	42,86	2,06	94,31	0,50	28,85	0,50	100,00	0,51	88,05	7,36	62,32	92,44	99,94	20,11
663	1244	67,02382	0,78924	0,842164	0,071761	10407,6	45,24	1,43	99,99	0,55	29,27	11,40	8,24	25,03	7,10	98,60	34,49	19,82	75,95	93,93
664	1244	27,79186	840,131	1986,02	25,5015	1594,47	34,24	1,44	92,85	0,50	21,55	0,50	99,98	0,50	33,09	0,51	67,09	18,97	99,98	0,74
665	1244	39,92068	176,288	503,746	3,32539	9779,76	43,22	2,08	85,89	0,51	28,82	0,50	100,00	0,57	87,36	7,42	62,92	95,03	99,99	22,73
666	1244	23,9601	863,897	2680,15	39,3096	341,08	11,64	1,28	100,00	0,50	11,08	0,50	99,99	0,50	69,62	0,50	6,23	1,66	99,85	0,50
667	1244	38,23723	289,476	358,265	3,14556	2724,74	15,79	2,13	91,51	0,50	27,60	0,50	99,99	0,50	27,30	2,06	30,79	42,26	99,98	10,92
668	1244	67,07167	0,775179	0,825517	0,071618	10415,5	45,24	1,43	99,99	0,55	29,27	11,40	8,24	25,51	7,10	98,60	34,49	19,82	75,95	93,93
669	1244	54,84485	15,5968	81,9281	0,503484	29159,4	58,58	2,29	96,59	1,75	53,06	2,04	99,99	2,65	98,55	48,22	98,67	99,66	100,00	87,37
670	1244	37,54629	215,351	709,381	4,46621	10639,6	51,32	2,24	98,97	0,52	27,96	0,53	99,69	0,54	82,84	7,45	76,97	93,59	99,99	19,62
671	1244	65,75389	1,76835	3,37184	0,207402	15113,9	54,28	1,90	99,99	0,91	49,12	11,48	16,52	25,69	17,87	99,99	45,39	38,47	99,35	76,85
672	1244	38,86111	204,848	869,847	3,61389	10105,2	47,70	2,03	99,74	0,52	28,00	0,51	99,99	0,50	94,37	7,61	64,41	88,26	100,00	27,51
673	1244	38,72264	209,595	936,977	3,76374	10102,4	49,93	2,03	97,06	0,52	28,00	0,51	99,99	0,50	94,37	7,61	64,41	88,26	100,00	27,51
674	1244	39,58762	56,4758	2191,93	0,908671	21111,8	42,96	2,28	98,89	0,54	27,35	0,54	100,00	0,52	99,45	14,83	80,96	97,94	100,00	99,92
675	1244	38,4463	222,461	663,67	4,28173	9358,4	42,97	2,05	91,54	0,50	29,04	0,51	100,00	0,52	88,04	7,34	62,32	93,48	99,98	20,15
676	1244	34,5882	481,025	1041,23	8,16962	2617,82	29,99	1,98	47,78	0,50	18,39	0,50	100,00	0,50	33,94	1,17	34,01	42,14	100,00	9,38
677	1244	38,84283	62,7162	2344,35	1,15552	22862,6	67,25	2,27	99,16	0,50	30,08	0,54	100,00	0,50	82,70	17,89	99,58	99,66	100,00	97,46
678	1244	55,98425	15,4307	80,8462	0,458061	29558	58,79	2,29	99,55	1,27	56,07	2,34	99,99	2,85	96,17	49,73	99,88	96,46	100,00	92,74
679	1244	31,68495	823,708	1672,19	20,1634	1114,54	16,27	1,40	91,45	0,50	28,28	0,50	100,00	0,50	43,04	0,56	34,85	21,92	99,97	0,82
680	1244	31,79361	529,085	1404,7	11,4888	2056,23	24,11	1,98	47,25	0,50	15,49	0,50	99,97	0,50	29,75	0,81	25,35	41,02	99,97	8,05
681	1244	34,5282	695,761	1114,79	12,2094	947,085	17,09	1,46	86,69	0,50	28,32	0,50	100,00	0,50	42,96	0,55	30,80	17,90	99,96	1,33
682	1244	36,58557	458,625	781,56	7,80389	3977,18	43,22	2,01	86,75	0,51	28,21	0,50	99,97	0,58	43,80	1,40	43,77	61,65	99,99	9,25
683	1244	32,66056	532,578	1362,44	10,8207	2122,3	23,93	1,98	47,25	0,50	15,13	0,50	99,98	0,50	29,75	0,81	25,41	41,01	99,97	8,69
684	1244	33,27034	760,085	1464,39	16,0852	865,457	11,11	1,41	86,23	0,50	28,39	0,50	100,00	0,50	45,12	0,70	22,06	21,66	99,97	1,10
685	1244	38,12598	324,398	387,297	3,79013	7095,25	39,23	2,01	91,05	0,50	36,32	0,52	100,00	0,56	16,39	0,98	64,19	83,69	99,98	14,51
686	1244	55,80062	17,1236	79,4437	0,523517	28359,6	58,79	2,29	99,55	1,27	56,07	2,34	99,99	2,85	96,17	49,73	98,06	96,46	100,00	82,52

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
687	1244	38,81864	171,977	406,551	3,09342	8326,21	65,65	2,07	96,69	0,50	36,72	0,51	100,00	0,51	87,72	7,22	74,20	62,67	100,00	21,73
688	1244	53,64384	12,1893	49,7706	0,314428	34387	40,96	2,26	99,91	1,22	73,50	2,08	100,00	1,95	98,63	74,63	99,51	94,84	99,98	92,92
689	1244	36,72585	429,821	776,887	7,14124	5069,39	43,24	2,09	86,75	0,51	25,89	0,50	100,00	0,57	43,80	1,43	49,21	72,62	99,99	11,42
690	1244	39,26585	148,195	228,25	1,97143	8486,92	16,14	1,99	91,99	0,50	28,24	0,50	100,00	0,52	46,13	6,80	63,88	93,06	99,95	16,93
691	1244	40,57248	42,7423	2194,46	0,657217	22148,5	30,74	2,26	44,47	0,50	14,56	0,53	100,00	0,58	68,93	18,37	99,51	94,87	99,98	100,00
692	1244	32,92545	805,367	1483,03	17,4118	1127,27	16,27	1,40	91,45	0,50	28,28	0,50	100,00	0,50	43,04	0,56	34,85	21,92	99,97	0,95
693	1244	28,33684	942,577	2443,81	33,9138	428,32	33,00	1,34	99,86	0,50	22,13	0,50	99,99	0,50	99,65	0,50	15,59	3,50	99,99	0,52
694	1244	56,04317	13,7229	47,1865	0,373536	28719,9	49,22	2,29	99,48	1,28	57,05	2,34	100,00	2,84	95,71	47,72	99,41	93,44	100,00	92,07
695	1244	38,10271	362,45	492,942	4,73691	6215,05	47,35	2,14	91,13	0,50	29,10	0,50	99,99	0,56	47,06	1,54	66,56	68,69	100,00	12,66
696	1244	27,20918	877,589	2253,89	32,6482	989,593	21,03	1,44	98,68	0,50	20,80	0,50	99,99	0,50	70,31	0,78	31,78	19,52	99,94	0,78
697	1244	40,24409	62,7697	1842,03	1,11596	18068,6	52,65	2,24	97,81	0,53	29,04	0,54	99,68	0,55	89,04	14,87	71,01	91,64	100,00	86,69
698	1244	65,39759	1,81247	3,44381	0,22153	14627,1	54,28	1,90	99,99	0,91	49,12	11,48	16,52	25,69	17,87	99,99	45,39	38,47	99,35	71,95
699	1244	31,86997	794,259	1574,13	19,0775	1455,27	20,91	1,42	91,40	0,50	29,03	0,50	100,00	0,50	43,04	0,69	47,81	22,87	99,97	0,82
700	1244	34,02683	715,69	1167,56	13,3101	1403,53	13,49	1,46	86,67	0,50	27,90	0,50	100,00	0,50	30,72	0,50	34,85	29,33	99,94	1,36
701	1244	37,46596	248,463	706,933	5,3281	8750,18	42,86	2,06	94,31	0,50	28,85	0,50	100,00	0,51	86,73	6,74	62,30	92,46	99,93	15,95
702	1244	40,25194	108,791	1266,63	1,92023	13317,3	46,88	2,23	99,11	0,53	28,67	0,53	100,00	0,56	90,21	10,46	66,56	96,22	100,00	47,79
703	1244	39,2058	115,552	1777,83	1,79208	13464	49,25	2,26	98,71	0,51	29,72	0,54	99,97	0,51	83,54	8,83	63,97	87,77	100,00	61,39
704	1244	38,61749	213,534	688,144	3,9	9068,63	42,87	2,06	94,30	0,50	28,85	0,50	100,00	0,51	87,99	7,37	62,22	94,25	99,94	22,84
705	1244	23,12559	692,772	2694,42	31,3751	260,262	11,59	1,27	46,84	0,50	11,82	0,50	99,99	0,50	43,00	0,50	6,01	1,39	99,91	0,50
706	1244	39,77236	106,37	1668,54	1,68024	13755,5	53,13	2,26	98,79	0,51	29,73	0,54	100,00	0,53	83,53	8,84	66,56	87,79	100,00	61,96
707	1244	34,62815	488,011	1013,97	8,18382	2349,51	23,88	1,98	48,07	0,50	18,46	0,50	100,00	0,50	32,09	1,03	29,87	42,14	99,96	8,58
708	1244	27,79186	840,131	1986,02	25,5015	1594,47	34,24	1,44	92,85	0,50	21,55	0,50	99,98	0,50	33,09	0,51	67,09	18,97	99,98	0,74
709	1244	40,00538	107,838	1226,93	1,95773	13199,8	47,35	2,29	99,11	0,55	29,10	0,53	100,00	0,56	90,24	10,39	66,56	96,22	100,00	46,69
710	1244	39,3866	89,6373	376,266	1,32898	14737,6	30,41	2,21	95,15	0,52	28,20	0,53	100,00	0,51	87,54	9,92	93,62	94,06	100,00	39,65
711	1244	37,40951	414,966	652,786	5,4533	3094,12	37,33	2,00	84,29	0,50	28,27	0,51	99,68	0,51	44,62	1,37	34,40	42,78	99,98	12,86
712	1244	29,31167	669,928	2136,73	20,6651	300,683	11,53	1,28	62,51	0,50	28,75	0,50	99,99	0,50	46,08	0,51	6,00	1,99	99,85	0,51
713	1244	32,22731	787,837	1529,03	18,0959	1288,64	17,09	1,46	86,69	0,50	28,32	0,50	100,00	0,50	42,96	0,55	30,80	28,99	99,96	1,33
714	1244	24,0375	588,998	2486,12	28,0297	269,859	11,18	1,36	39,63	0,50	17,80	0,50	99,99	0,50	48,02	0,50	6,72	2,16	99,21	0,50
715	1244	38,83387	200,195	575,276	3,49834	7754,45	42,45	2,06	89,82	0,50	28,25	0,50	100,00	0,51	88,74	7,34	54,93	72,17	99,94	22,69
716	1244	53,66116	11,109	43,2978	0,292645	34329,4	40,96	2,28	98,79	1,23	73,06	2,09	100,00	1,96	99,90	75,90	99,61	89,58	99,99	92,92
717	1244	31,41553	611,235	1634,68	14,9664	491,726	11,54	1,36	39,92	0,50	17,66	0,50	99,98	0,50	42,59	0,53	23,58	8,80	99,27	0,82
718	1244	35,52546	517,629	926,245	8,70461	4547,34	48,59	2,02	87,45	0,50	29,23	0,51	100,00	0,51	48,02	1,48	49,56	64,18	99,95	10,06
719	1244	33,22305	768,869	1381,16	15,633	931,785	17,07	1,40	85,77	0,50	28,32	0,50	99,98	0,50	42,73	0,52	39,91	14,98	99,95	0,75
720	1244	37,76025	237,747	754,223	4,68609	6278,65	45,81	2,05	96,77	0,50	28,69	0,50	100,00	0,50	82,68	7,24	42,87	64,65	100,00	20,84
721	1244	27,2432	833,859	2402,24	29,121	363,06	37,44	1,33	86,59	0,50	22,09	0,50	99,99	0,50	42,82	0,51	16,13	3,33	99,92	0,57
722	1244	68,51186	0,496207	0,433837	0,082602	7687,9	41,59	1,43	99,99	0,55	29,21	10,29	5,98	36,56	3,52	100,00	32,36	17,56	77,38	68,07
723	1244	35,32042	516,698	949,504	8,87133	4384,03	49,02	2,03	87,57	0,50	29,19	0,51	100,00	0,51	48,36	1,50	47,69	63,00	100,00	10,15
724	1244	65,39759	1,81247	3,44381	0,22153	14627,1	54,28	1,90	99,99	0,91	49,12	11,48	16,52	25,69	17,87	99,99	45,39	38,47	99,35	71,95
725	1244	39,1516	52,1495	2274,43	0,862693	23023,1	51,71	2,28	94,79	0,52	29,27	0,53	100,00	0,51	87,46	17,61	98,55	99,23	100,00	99,33
726	1244	52,59881	28,0352	258,128	0,844306	28254,9	77,15	2,29	99,55	1,27	56,08	2,32	99,99	2,04	96,31	49,92	98,06	96,47	100,00	82,59
727	1244	39,26687	163,041	1779,43	3,16659	11414,7	42,64	2,21	91,40	0,50	22,09	0,50	99,99	0,53	98,80	9,34	43,64	99,20	100,00	50,20
728	1244	54,40456	17,5954	148,673	0,413337	28983,1	41,81	2,27	98,76	1,19	52,20	2,32	100,00	2,03	99,98	48,89	95,91	91,87	100,00	95,13
729	1244	25,0142	602,852	2465,85	26,7822	269,482	10,37	1,33	39,74	0,50	17,81	0,50	99,98	0,50	47,69	0,50	6,73	2,16	99,21	0,50
730	1244	30,23267	619,478	2040	17,3154	271,489	11,61	1,37	39,75	0,50	17,76	0,50	100,00	0,50	48,36	0,51	4,85	0,98	99,25	0,60
731	1244	39,6285	101,948	1735,13	1,52836	13589	49,43	2,09	93,09	0,50	29,20	0,50	100,00	0,51	87,87	8,21	61,11	86,15	99,99	66,56
732	1244	46,2851	24,1909	17,3142	0,36721	1920,26	21,99	1,43	99,99	0,50	19,38	0,94	10,88	0,89	5,66	6,55	34,44	20,09	76,11	13,12
733	1244	32,43073	743,626	1559,63	16,3752	608,462	13,57	1,46	85,34	0,50	27,89	0,50	100,00	0,50	30,77	0,58	34,78	8,83	99,11	0,53

N.	Semente	$A_{\lambda 0}$ (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{avr} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
734	1244	23,76186	714,73	2686,42	30,8464	259,168	11,59	1,27	46,78	0,50	11,20	0,50	100,00	0,50	42,72	0,50	6,22	1,30	99,93	0,50
735	1244	53,3924	24,216	282,206	0,69153	30573,1	74,81	2,29	99,23	1,27	58,76	2,32	100,00	2,02	99,76	49,92	98,97	99,80	100,00	98,08
736	1244	39,51213	136,503	1449,41	2,47913	11777,3	42,44	2,23	99,51	0,50	28,74	0,50	100,00	0,53	98,41	9,90	98,41	99,57	100,00	52,01
737	1244	50,99757	36,0055	212,958	0,775588	17671,8	53,32	2,05	99,09	0,89	53,70	2,68	99,95	1,35	98,27	38,12	68,94	43,39	99,99	64,54
738	1244	35,23827	522,519	955,526	8,44457	4898,78	40,94	2,07	79,82	0,50	25,88	0,50	100,00	0,51	54,49	0,98	47,38	72,63	99,99	11,43
739	1244	39,20553	152,594	1370,54	2,67277	11542,6	52,42	2,09	91,05	0,50	28,25	0,52	100,00	0,51	87,14	8,75	67,26	87,32	99,98	39,21
740	1244	38,70633	36,9767	2299,68	0,567116	22682,8	30,74	2,28	93,07	0,50	30,09	0,54	100,00	0,50	68,66	17,90	99,99	99,99	100,00	100,00
741	1244	35,40284	628,862	974,9	10,4926	1044,64	11,54	1,42	85,46	0,50	28,75	0,50	100,00	0,50	45,91	0,67	29,33	21,63	99,97	1,34
742	1244	32,15279	862,753	1587,49	20,7224	1713,96	45,65	1,44	99,62	0,50	29,31	0,50	100,00	0,50	67,96	0,56	74,50	17,80	99,92	0,82
743	1244	39,53298	89,0468	2210,42	1,52425	20491,5	79,10	2,27	99,27	0,50	28,77	0,54	100,00	0,52	97,94	12,64	81,63	97,26	99,98	98,43
744	1244	38,15551	404,022	626,202	5,79322	4705,73	43,08	1,98	85,78	0,51	26,94	0,50	100,00	0,57	55,67	1,41	49,28	63,22	100,00	12,04
745	1244	34,23754	728,754	1205,73	13,8785	1236,61	18,11	1,41	89,54	0,50	29,82	0,50	100,00	0,50	45,97	0,66	38,90	21,70	99,96	1,12
746	1244	39,75526	126,589	2021,96	1,81437	13633,9	49,16	2,09	93,09	0,50	23,79	0,51	100,00	0,51	88,27	8,18	61,22	86,54	99,99	66,72
747	1244	28,9982	913,423	2089,94	29,7965	1825,8	39,92	1,44	99,31	0,50	21,68	0,50	99,99	0,50	67,67	0,51	69,70	20,93	99,99	0,77
748	1244	27,87484	921,652	2463,4	33,2348	397,232	33,75	1,33	98,71	0,50	22,04	0,50	99,98	0,50	68,10	0,50	15,84	3,53	99,99	0,52
749	1244	39,60322	150,985	1002,11	2,63723	11173,2	53,25	2,04	90,50	0,51	29,24	0,53	100,00	0,53	83,64	8,62	66,82	87,32	99,99	36,67
750	1244	23,78132	753,221	2689,15	31,6228	267,691	11,59	1,27	54,19	0,50	11,82	0,50	99,98	0,50	43,00	0,50	6,01	1,39	99,93	0,50
751	1244	28,82595	576,005	1864,79	16,6576	443,215	5,58	1,36	37,75	0,50	17,95	0,50	99,99	0,50	28,30	0,58	22,91	8,83	99,21	0,53
752	1244	37,24772	432,918	626,89	6,1193	4357,88	34,61	2,03	90,14	0,50	30,31	0,51	100,00	0,52	45,24	1,50	47,74	62,62	100,00	10,07
753	1244	29,54043	859,542	2083,52	26,9831	641,756	37,81	1,42	98,70	0,50	29,71	0,50	99,99	0,50	68,85	0,58	30,29	8,83	100,00	0,65
754	1244	37,99608	232,408	701,199	4,42531	6105,13	45,81	2,05	96,77	0,50	28,69	0,50	100,00	0,50	82,68	7,24	42,87	60,60	100,00	20,84
755	1244	29,72481	762,669	1814,17	22,473	980,014	17,55	1,44	87,41	0,50	32,12	0,50	100,00	0,50	43,42	0,55	29,18	21,61	99,89	0,82
756	1244	38,99031	155,185	1217,98	2,77026	10958	49,55	2,08	90,97	0,51	29,02	0,52	99,97	0,51	83,40	8,70	63,98	87,29	100,00	36,99
757	1244	30,11358	593,469	1772,48	15,7956	483,25	5,28	1,36	39,73	0,50	17,92	0,50	99,99	0,50	27,17	0,50	23,99	8,98	99,19	0,53
758	1244	32,32382	815,073	1555,29	19,5042	1497,57	20,69	1,42	91,13	0,50	29,81	0,50	100,00	0,50	68,87	0,68	48,19	22,88	99,99	0,80
759	1244	56,48878	8,70171	29,5227	0,183876	23130,6	38,29	1,88	98,72	1,28	29,64	2,10	99,58	2,83	72,25	81,87	65,33	25,36	99,15	87,79
760	1244	35,00092	494,367	903,752	7,98982	5018,02	40,94	2,12	79,96	0,50	27,13	0,50	100,00	0,51	54,49	0,97	47,34	74,12	100,00	11,95
761	1244	51,01066	31,0367	166,516	0,65167	20296,7	51,22	2,03	98,58	0,90	55,51	2,73	96,08	1,36	98,91	49,36	74,28	43,65	99,99	65,48
762	1244	39,53998	89,6484	385,276	1,32914	14971,5	30,75	2,21	95,15	0,52	28,20	0,53	100,00	0,51	87,54	9,92	95,01	94,96	100,00	39,83
763	1244	33,72191	473,621	1006,64	8,36814	2305,34	24,03	2,12	51,45	0,50	18,66	0,50	100,00	0,50	34,51	0,77	29,76	41,48	99,99	8,47
764	1244	55,93219	13,5731	56,6891	0,373528	28747,8	49,22	2,29	99,48	1,42	57,05	2,34	100,00	2,84	95,71	47,72	99,41	93,44	100,00	92,07
765	1244	32,39697	656,052	1602,86	14,7832	499,076	11,54	1,36	47,07	0,50	17,73	0,50	99,98	0,50	42,99	0,51	24,35	8,61	99,94	0,80
766	1244	40,19964	76,9422	466,543	1,22521	15316,3	41,38	2,23	99,16	0,53	33,04	0,53	100,00	0,55	90,37	11,10	83,59	96,63	99,97	49,83
767	1244	38,86665	179,059	621,917	3,2538	12973,1	54,03	2,26	98,97	0,52	27,97	0,53	100,00	0,54	82,93	7,45	94,93	95,58	100,00	24,23
768	1244	34,72873	556,073	1019,34	9,83196	3893,03	42,44	2,03	87,66	0,50	27,99	0,51	99,68	0,50	45,80	1,10	44,12	60,85	99,99	8,92
769	1244	38,01859	371,647	425,873	4,17503	4208,64	34,44	1,99	90,17	0,50	27,29	0,52	100,00	0,51	33,95	1,16	61,68	47,06	99,98	10,07
770	1244	38,23723	289,476	358,265	3,14556	2724,74	15,79	2,13	91,51	0,50	27,60	0,50	99,99	0,50	27,30	2,06	30,79	42,26	99,98	10,92
771	1244	32,01658	647,675	1555,14	14,2744	445,184	12,53	1,40	78,41	0,50	28,13	0,50	100,00	0,50	19,82	0,53	26,48	6,21	99,89	0,53
772	1244	38,86665	179,059	621,917	3,2538	12973,1	54,03	2,26	98,97	0,52	27,97	0,53	100,00	0,54	82,93	7,45	94,93	95,58	100,00	24,23
773	1244	33,25327	777,135	1441,86	16,5246	1104,77	21,87	1,44	88,99	0,50	28,82	0,50	100,00	0,50	49,04	0,66	31,79	21,63	99,97	1,34
774	1244	52,60778	28,7301	261,927	0,853192	28074,7	77,15	2,28	99,38	1,27	56,29	2,32	99,99	2,02	96,82	49,06	98,06	96,38	100,00	82,05
775	1244	39,51037	136,486	1448,79	2,47912	11777,5	42,44	2,23	99,51	0,50	28,74	0,50	100,00	0,53	98,41	9,90	44,12	99,57	100,00	52,01
776	1244	38,54828	344,717	443,935	4,21767	5980,2	46,67	2,08	85,85	0,50	28,80	0,50	99,99	0,56	47,75	1,65	66,94	64,01	99,99	13,12
777	1244	38,29159	83,0462	2904,23	1,41442	22574,9	30,74	2,28	43,57	0,50	9,36	0,53	100,00	0,50	68,66	17,64	100,00	100,00	100,00	100,00
778	1244	36,13818	501,679	883,258	7,5974	4913,97	43,02	2,08	86,78	0,50	25,95	0,50	100,00	0,52	47,08	1,12	49,00	69,16	99,99	12,03
779	1244	28,61082	908,883	2122,94	30,5411	1848,7	38,87	1,43	99,21	0,50	21,69	0,50	99,98	0,50	67,67	0,51	70,60	21,04	99,99	0,73
780	1244	39,87033	86,9101	2110,03	1,48065	20367,6	79,83	2,26	98,82	0,51	29,02	0,54	100,00	0,53	99,71	12,59	80,83	97,32	100,00	97,54

N.	Semence	$A_{\lambda 0}$ (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{avr} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
781	1244	38,26245	369,399	571,263	5,32782	6102,43	47,69	2,08	91,03	0,51	29,36	0,51	100,00	0,58	43,80	1,93	60,39	73,05	100,00	12,86
782	1244	39,36406	118,056	204,782	1,66331	8387,72	27,66	2,07	96,69	0,50	30,44	0,51	100,00	0,50	87,72	7,53	74,28	62,81	100,00	21,73
783	1244	40,47583	156,518	492,539	2,62945	11309,3	49,52	2,08	95,05	0,51	27,85	0,52	100,00	0,56	95,59	6,90	79,21	88,50	99,99	27,44
784	1244	38,05916	194,781	761,505	3,57864	12802	53,13	2,28	98,97	0,52	28,09	0,53	100,00	0,51	86,72	7,45	92,23	95,79	100,00	24,40
785	1244	38,79139	96,4867	2220,35	1,401	18036	73,80	2,27	87,45	0,50	29,23	0,51	100,00	0,51	48,02	9,69	77,99	95,44	99,96	94,47
786	1244	28,0588	882,128	2130,95	30,0642	1876,71	41,58	1,43	99,20	0,50	21,69	0,50	100,00	0,50	67,82	0,69	70,61	21,04	99,99	0,76
787	1244	37,02836	455,062	696,116	6,59701	4090,88	34,61	2,03	91,13	0,50	30,05	0,51	100,00	0,52	45,24	1,50	42,93	62,62	100,00	10,41
788	1244	32,51193	441,999	1235,93	9,35778	2203,91	24,38	1,99	32,68	0,50	14,44	0,50	100,00	0,50	40,58	1,43	28,80	37,40	99,96	8,64
789	1244	28,13772	895,967	2152,1	31,0077	1653,04	41,03	1,44	99,95	0,50	21,48	0,50	99,98	0,50	66,46	0,53	61,62	20,75	99,92	0,82
790	1244	40,19964	76,9422	466,543	1,22521	15316,3	41,38	2,23	99,16	0,53	33,04	0,53	100,00	0,55	90,37	11,10	83,59	96,63	99,97	49,83
791	1244	34,66935	565,34	993,376	9,70773	3867,22	42,44	2,03	86,83	0,50	27,64	0,50	100,00	0,50	45,94	0,83	44,12	60,85	99,99	8,92
792	1244	30,35144	666,053	2008,59	18,333	298,441	11,53	1,28	62,51	0,50	28,75	0,50	99,99	0,50	46,08	0,51	6,00	1,62	99,85	0,51
793	1244	38,56717	219,486	605,58	3,97803	6344,83	45,86	2,05	96,46	0,50	28,65	0,50	100,00	0,51	82,68	7,27	47,07	60,60	100,00	20,62
794	1244	39,23318	299,936	305,077	3,14281	4615,62	34,46	1,99	92,52	0,50	28,66	0,52	100,00	0,56	33,95	1,49	67,08	48,30	99,98	10,41
795	1244	37,51897	246,999	724,905	5,33687	8810,39	44,67	2,07	91,68	0,50	28,76	0,51	100,00	0,52	86,78	6,72	62,33	92,56	99,99	16,49
796	1244	33,40763	637,489	1463,35	12,7087	425,186	11,49	1,33	78,87	0,50	28,13	0,50	100,00	0,50	20,67	0,53	26,93	5,37	99,97	0,51
797	1244	37,64474	331,524	406,646	3,97934	4604,54	52,63	2,03	85,82	0,50	38,33	0,51	100,00	0,52	42,72	1,54	57,19	50,39	100,00	13,62
798	1244	53,7632	24,4329	274,244	0,674728	29592,9	74,91	2,19	99,23	1,26	58,43	2,32	100,00	2,02	99,44	47,33	98,97	96,15	100,00	97,39
799	1244	37,30777	417,667	669,571	5,61085	3102,24	39,13	2,00	84,29	0,50	29,36	0,51	99,68	0,51	44,73	1,43	34,25	42,75	99,98	12,95
800	1244	33,94828	381,873	888,941	6,58933	525,689	12,01	1,37	23,66	0,50	16,21	0,50	100,00	0,50	29,88	0,82	20,89	7,52	99,34	1,81
801	1245	39,86595	10,8001	7,67179	0,067953	5,59573	11,50	1,25	1,51	0,50	0,50	0,50	1,05	0,50	0,65	0,50	1,63	0,50	1,26	0,85
802	1245	70,38474	0,17765	0,115437	0,132733	2076,03	6,97	1,54	99,55	0,55	6,41	0,56	9,22	62,19	1,09	99,50	18,10	31,23	10,61	2,86
803	1245	34,29089	738,718	1239,7	13,9145	1294,69	3,60	1,29	96,28	0,50	28,72	0,50	93,89	0,51	33,65	0,58	35,71	27,59	99,43	0,51
804	1245	38,50935	94,4016	2849,46	1,63506	21013,4	48,23	1,89	52,52	0,50	10,89	0,54	100,00	0,50	69,79	17,39	100,00	84,21	100,00	100,00
805	1245	36,74793	0,118787	0,090245	0,000784	469,275	15,27	0,72	7,08	2,23	14,22	1,53	11,25	0,51	0,92	0,83	34,41	4,37	2,61	20,13
806	1245	28,31719	945,271	2402,92	34,0952	501,988	48,72	1,33	99,65	0,50	21,66	0,50	99,99	0,50	95,72	0,50	28,93	4,61	99,50	0,52
807	1245	44,57919	33,8488	1149,98	0,71045	30502,4	62,36	2,28	99,87	0,50	29,68	0,75	99,97	0,86	99,62	54,73	98,99	96,04	99,97	97,79
808	1245	24,00223	833,045	2679,56	39,5554	356,061	8,76	1,33	99,63	0,50	14,35	0,50	99,96	0,50	84,61	0,50	4,24	1,76	99,46	0,50
809	1245	37,82725	56,6528	2596,05	1,16744	25328,7	27,85	2,27	99,85	0,50	29,08	0,89	99,99	0,50	99,30	28,12	99,57	98,96	99,50	96,88
810	1245	59,33555	10,5861	18,3526	0,989853	13290,3	4,81	1,34	98,49	0,50	23,99	0,50	99,81	5,85	36,22	46,79	98,76	85,49	99,73	1,67
811	1245	53,4002	38,7514	87,2717	2,1559	12270,5	5,68	1,42	99,51	0,50	30,09	0,53	99,52	2,19	89,24	36,22	51,96	96,33	99,23	2,34
812	1245	38,88534	41,7923	2279,47	0,763502	23156,9	49,76	1,86	97,36	0,50	28,99	0,54	99,88	0,50	88,42	27,25	99,60	85,00	99,53	96,88
813	1245	44,83023	34,695	1153,29	0,723702	29240,9	62,22	2,28	99,87	0,50	28,30	0,75	99,96	0,87	99,71	48,52	99,01	95,64	99,96	97,83
814	1245	44,67991	26,3236	1048,66	0,509453	23311,5	49,76	2,29	97,36	0,50	30,33	0,74	99,98	0,85	88,42	27,25	99,96	85,00	99,95	96,88
815	1245	45,80742	50,9573	84,4399	1,20991	14387,5	14,54	1,27	98,80	0,50	30,16	0,54	99,72	0,86	98,77	29,35	94,71	79,59	99,96	7,48
816	1245	37,77612	57,7029	2605,3	1,20217	25600,7	29,49	2,28	99,88	0,50	29,01	0,89	99,99	0,50	99,81	28,49	99,57	98,96	99,50	98,58
817	1245	44,39017	31,6729	1142,47	0,643452	28849,9	51,66	2,22	99,94	0,50	31,81	0,75	100,00	0,83	99,33	47,47	94,87	99,26	99,96	96,93
818	1245	43,67798	17,5509	362,077	0,34591	24303,7	48,50	2,23	99,88	0,50	23,96	0,56	99,73	0,77	92,92	48,28	91,44	62,10	99,24	94,45
819	1245	43,67798	17,5509	362,077	0,34591	24303,7	48,50	2,23	99,88	0,50	23,96	0,56	99,73	0,77	92,92	48,28	91,44	62,10	99,24	94,45
820	1245	40,59447	20,9659	266,384	0,391989	22169,4	48,50	2,26	99,96	0,50	33,34	0,56	99,73	0,60	97,51	34,49	91,43	62,03	98,87	96,21
821	1245	66,43648	0,326308	0,153796	0,166263	1789,6	8,16	1,54	99,61	0,50	6,31	0,55	9,22	59,32	0,75	21,86	16,91	31,16	10,45	2,82
822	1245	44,69824	28,3702	1085,98	0,567931	28204	50,03	2,23	99,88	0,50	27,33	0,75	99,98	0,85	99,66	52,39	99,67	82,85	99,99	91,96
823	1245	57,69003	18,7393	38,8024	1,73846	12902,9	5,66	1,42	99,45	0,50	30,35	0,53	99,91	4,71	89,20	36,37	53,02	96,29	100,00	2,35
824	1245	40,70115	24,5006	1399,96	0,462745	22161,3	48,50	2,26	99,82	0,50	28,21	0,56	99,73	0,60	99,80	47,40	91,43	62,03	98,87	96,21
825	1245	44,81034	18,7347	335,196	0,360141	26406,7	36,31	1,89	99,92	0,50	29,76	0,73	99,97	0,86	99,80	34,49	93,56	76,87	99,93	94,46
826	1245	40,45871	49,956	1730,17	0,843154	21334	49,66	2,05	99,81	0,50	42,48	0,71	99,97	0,58	95,12	16,78	89,22	92,90	99,59	96,16
827	1245	58,04006	14,9236	32,7311	1,90238	16178,7	10,80	1,46	99,66	0,50	31,56	0,50	98,72	5,34	94,53	44,10	90,46	71,69	99,56	1,72

N.	Semente	A_{v0} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/μs)	P_{avr} (mW)	Area (μm ²)	I_{pol} (μA)	V_{pol} (V)	$W_{1,2}$ (μm)	$L_{1,2}$ (μm)	$W_{3,4}$ (μm)	$L_{3,4}$ (μm)	$W_{5,6}$ (μm)	$L_{5,6}$ (μm)	$W_{7,8}$ (μm)	$L_{7,8}$ (μm)	W_9 (μm)	L_9 (μm)	W_{10} (μm)	L_{10} (μm)
828	1245	44,87549	30,1214	1059,67	0,612345	26926	55,87	2,27	99,79	0,50	28,31	0,75	99,96	0,87	95,66	48,62	93,71	82,79	99,96	95,55
829	1245	44,78514	34,9213	1155,75	0,733325	30017,9	63,12	2,28	99,88	0,50	28,26	0,75	99,93	0,87	98,10	51,84	99,60	97,27	99,96	98,46
830	1245	48,09862	61,9292	136,598	2,50751	15410,4	9,99	1,34	99,00	0,50	31,48	0,50	99,96	1,22	96,93	30,25	97,68	91,70	99,77	2,14
831	1245	39,48483	88,556	2576,04	1,5437	18877,8	49,51	2,06	97,29	0,50	12,96	0,54	99,85	0,51	94,89	17,03	99,38	74,04	99,52	81,14
832	1245	56,24394	27,0038	59,0781	2,05335	14814	12,89	1,27	98,71	0,50	30,53	0,53	99,67	3,44	99,16	29,35	98,24	81,06	99,98	2,12
833	1245	39,82353	36,8988	1782,72	0,548152	17888,7	48,64	1,86	99,47	0,50	28,21	0,54	99,73	0,54	70,39	16,95	91,28	63,11	98,87	96,13
834	1245	50,4841	77,529	159,886	3,53095	11667,4	7,98	1,32	98,90	0,50	31,27	0,50	99,99	1,70	98,86	13,38	87,49	96,26	99,77	1,31
835	1245	59,23918	59,9918	2216,86	1,02128	19980,1	46,64	2,05	93,58	0,50	28,74	0,54	99,87	0,50	95,45	16,38	86,11	92,79	99,27	87,02
836	1245	57,90605	14,9991	35,3209	2,20693	17728	13,46	1,31	99,19	0,50	34,93	0,52	99,68	5,79	79,33	43,41	94,69	98,49	99,96	2,25
837	1245	55,09213	23,7803	47,2545	1,31311	16799,6	5,75	1,16	96,32	0,50	30,12	0,50	97,43	2,21	99,97	38,91	82,96	99,24	99,64	2,31
838	1245	42,59889	61,375	120,879	1,41855	10080	4,55	1,39	99,45	0,50	30,35	0,53	99,73	0,70	89,04	34,49	53,83	61,71	98,90	3,49
839	1245	28,75092	845,187	2025,69	25,0303	931,35	4,07	1,33	100,00	0,50	27,14	0,50	99,50	0,50	36,91	0,59	20,06	30,38	99,95	0,52
840	1245	63,66733	0,214239	0,100657	0,110163	1973,21	6,93	1,33	98,56	0,50	6,41	0,53	10,41	62,19	0,72	14,70	16,90	31,16	8,63	2,86
841	1245	45,34038	47,858	1284,23	0,753345	18407,9	50,03	2,12	97,22	0,50	12,96	0,54	99,92	0,80	98,35	17,75	99,38	74,04	99,53	73,22
842	1245	39,23794	89,4159	2645,58	1,51453	19529,7	49,35	1,89	99,43	0,50	14,40	0,54	99,97	0,50	84,81	16,69	89,01	82,51	97,70	93,54
843	1245	55,11457	23,4095	44,2512	1,28845	18327,6	6,55	1,42	94,53	0,50	30,11	0,50	97,60	2,24	97,08	39,56	98,53	99,99	99,55	2,32
844	1245	57,76967	15,4547	37,9001	2,32506	17227,8	13,46	1,32	99,17	0,50	34,82	0,52	99,68	5,74	78,73	43,39	90,28	98,49	99,95	2,24
845	1245	30,90604	855,409	1910,46	22,2879	797,875	4,07	1,28	94,63	0,50	27,13	0,50	99,50	0,50	36,77	0,50	19,96	24,47	99,55	0,51
846	1245	37,70935	254,935	482,022	5,91099	9238,7	6,29	1,75	94,17	0,50	29,05	0,50	99,76	0,52	97,78	7,56	93,45	79,18	99,89	1,35
847	1245	44,96927	24,8816	936,258	0,503172	26493	49,53	1,89	99,92	0,50	29,29	0,75	99,95	0,85	99,45	47,42	95,78	76,88	99,93	93,88
848	1245	45,3883	156,501	337,644	5,58337	8408,75	5,20	1,29	98,42	0,50	31,04	0,50	99,94	1,18	89,54	7,33	89,54	74,41	99,79	0,65
849	1245	39,79157	46,284	2080,95	0,723923	20652,1	53,50	2,23	99,47	0,50	27,95	0,54	99,98	0,54	70,90	16,87	97,44	84,29	98,99	99,10
850	1245	44,78514	34,9213	1155,75	0,733325	30017,9	63,12	2,28	99,88	0,50	28,26	0,75	99,93	0,87	98,10	51,84	99,60	97,27	99,96	98,46
851	1245	44,89652	31,6362	1067,4	0,64165	27314,5	55,87	2,26	99,79	0,50	28,31	0,75	99,96	0,87	95,66	48,62	93,71	86,93	99,96	95,55
852	1245	48,09647	128,262	198,743	3,20699	9777,14	6,33	1,27	98,98	0,50	26,50	0,50	99,77	1,19	97,62	7,60	98,37	79,47	99,82	1,13
853	1245	44,3461	182,109	299,889	4,18576	9584,91	6,48	1,30	98,95	0,50	26,50	0,50	99,77	0,85	97,89	7,39	98,32	78,61	99,88	1,14
854	1245	40,36285	230,999	418,785	5,40445	11037,8	7,04	1,35	97,39	0,50	29,83	0,50	99,99	0,64	98,16	7,62	97,84	93,56	99,86	1,35
855	1245	43,79435	172,737	314,865	4,59686	10380,7	7,10	1,30	99,30	0,50	31,26	0,50	99,98	0,85	98,87	7,64	97,46	89,48	99,68	1,17
856	1245	52,9537	40,4906	115,03	3,65354	13133,8	11,60	1,65	99,34	0,50	24,29	0,52	99,84	3,81	80,81	29,04	93,29	79,64	99,90	1,26
857	1245	28,71953	931,063	2342,22	32,0759	496,902	48,72	1,33	93,12	0,50	22,50	0,50	99,86	0,50	99,05	0,50	29,16	4,47	99,30	0,52
858	1245	53,54969	39,6785	89,2948	2,32157	14434	5,67	1,42	99,53	0,50	29,43	0,51	99,58	2,20	89,24	29,12	89,00	95,93	99,63	1,32
859	1245	56,09309	21,8169	44,3684	2,02486	15963,7	6,74	1,75	98,48	0,50	29,42	0,51	99,99	4,37	98,89	28,51	98,36	93,40	99,89	1,36
860	1245	25,08893	869,396	2662,22	35,8447	320,135	8,10	1,33	92,91	0,50	14,70	0,50	99,70	0,50	59,39	0,50	3,26	1,20	98,64	0,50
861	1245	37,66523	456,32	503,295	5,53992	3911,74	2,01	1,15	94,24	0,50	29,88	0,50	94,00	0,53	22,29	0,70	88,23	40,87	98,54	0,51
862	1245	56,46069	23,0447	55,6597	1,98868	14741,7	13,16	1,27	98,75	0,50	30,15	0,53	99,72	3,61	98,77	29,35	98,97	79,59	99,98	2,16
863	1245	22,67997	790,458	2691,81	37,7786	322,515	8,86	1,33	95,79	0,50	14,35	0,50	99,68	0,50	59,39	0,50	3,26	1,20	98,64	0,50
864	1245	44,66348	29,2032	1061,06	0,608576	27599,5	57,04	2,29	94,17	0,50	29,70	0,74	99,99	0,86	97,84	50,80	93,45	83,32	99,96	95,67
865	1245	36,3072	421,998	895,867	13,8353	8168,17	5,83	1,32	96,73	0,50	28,90	0,50	99,45	1,00	45,30	1,58	79,61	96,10	99,39	0,50
866	1245	36,67435	577,728	770,845	9,09622	4278,31	3,41	1,27	91,26	0,50	28,78	0,50	90,16	0,54	42,68	0,94	86,71	45,34	99,66	0,50
867	1245	34,92326	548,226	1663,92	8,73599	217,211	0,57	1,18	47,25	0,50	14,40	0,50	77,53	0,50	20,66	0,57	3,36	1,30	99,27	0,50
868	1245	44,56832	50,1819	1252,25	0,850194	20912,3	51,00	2,29	99,57	0,50	29,29	0,87	100,00	0,84	69,28	17,07	91,28	97,36	99,53	93,87
869	1245	30,3516	910,286	2095,3	26,337	691,816	8,10	1,33	97,25	0,50	23,95	0,50	99,85	0,50	59,40	0,50	22,75	15,80	99,51	0,50
870	1245	45,0969	150,704	266,65	4,17275	7605,68	7,05	1,30	98,49	0,50	30,89	0,50	99,68	0,98	78,73	8,09	83,99	70,26	99,83	1,06
871	1245	44,80115	23,7645	914,186	0,487839	27951,5	45,74	2,23	99,93	0,50	29,76	0,73	99,97	0,86	99,80	51,87	93,59	83,78	99,97	94,45
872	1245	44,75786	27,1566	1016,73	0,557859	27863,8	49,53	2,23	99,93	0,50	29,29	0,75	99,95	0,85	99,45	51,90	93,59	83,79	99,97	93,87
873	1245	43,17412	270,097	406,014	6,62579	7459,33	6,33	1,29	97,23	0,50	30,92	0,50	99,96	1,19	34,41	2,50	91,96	74,58	99,28	0,63
874	1245	37,56656	553,139	769,201	9,38392	2971,92	4,09	1,28	96,06	0,50	28,87	0,50	96,34	0,65	37,53	0,80	55,79	46,69	99,40	0,58

N.	Semene	A _{v0} (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{wr} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
875	1245	30,64941	820,424	1845,7	21,1142	631,99	5,95	1,28	97,41	0,50	27,08	0,50	91,77	0,50	31,65	0,51	20,00	16,64	99,95	0,50
876	1245	29,90297	925,564	2167,02	28,55	714,668	9,34	1,33	99,90	0,50	26,21	0,50	99,83	0,50	78,29	0,52	22,81	15,69	99,50	0,50
877	1245	43,64709	180,181	326,788	4,70365	8632,41	7,09	1,27	98,90	0,50	31,25	0,50	99,85	0,84	98,73	7,41	87,01	77,71	99,88	1,10
878	1245	33,05927	617,894	1071,39	12,9851	1487,41	4,06	1,29	94,99	0,50	44,30	0,50	99,45	0,50	31,68	0,50	34,45	33,80	99,14	0,53
879	1245	44,5756	50,9503	1272,54	0,862214	21149,8	51,34	2,29	99,93	0,50	29,09	0,88	99,99	0,84	70,39	16,95	91,28	97,36	99,46	96,09
880	1245	39,35769	70,3806	2280,98	1,21513	20165,3	50,90	1,78	99,03	0,50	29,97	0,71	100,00	0,53	84,84	16,65	90,49	83,33	99,25	96,24
881	1245	43,17442	289,755	386,918	6,26884	9164,34	4,84	1,34	99,55	0,50	31,07	0,50	99,80	1,12	37,09	2,09	98,88	86,92	99,77	0,61
882	1245	34,21005	740,194	1193,93	14,8137	5978,46	5,76	1,28	95,02	0,50	30,49	0,50	99,69	0,53	43,38	0,61	93,41	60,41	99,40	0,52
883	1245	36,1161	611,631	941,918	11,1486	3110,61	4,12	1,28	94,78	0,50	28,41	0,50	96,31	0,57	31,89	0,80	59,81	46,33	99,43	0,55
884	1245	34,71677	707,903	1270,49	14,4396	987,106	4,02	1,26	96,28	0,50	26,13	0,50	95,60	0,59	34,30	0,51	24,92	26,54	99,43	0,56
885	1245	46,94648	130,771	208,748	3,47482	7934,21	7,10	1,27	98,88	0,50	31,14	0,50	99,67	1,10	95,64	7,53	86,85	69,48	99,82	1,11
886	1245	40,65383	380,198	578,175	8,32323	4910,12	5,82	1,29	96,72	0,50	28,84	0,50	99,45	0,99	45,16	1,34	86,80	50,87	99,40	0,50
887	1245	33,92521	759,384	1228,88	15,0564	4742,83	4,20	1,28	93,00	0,50	28,49	0,50	94,07	0,51	43,45	0,61	73,01	60,56	99,40	0,52
888	1245	38,89537	75,9126	2388,43	1,32494	20339,3	51,18	1,95	99,47	0,50	30,01	0,71	99,93	0,51	84,99	16,81	89,06	84,76	99,43	97,44
889	1245	29,20262	904,861	2202,94	29,5877	748,498	9,48	1,33	97,37	0,50	27,23	0,50	99,82	0,50	80,64	0,53	22,69	17,15	99,53	0,50
890	1245	39,467	85,6811	2600,33	14,47963	19079,5	49,00	2,06	93,58	0,50	12,96	0,54	99,85	0,51	94,89	17,35	92,53	72,90	99,27	88,97
891	1245	42,70183	882,866	2675,19	37,1602	331,009	8,76	1,30	99,65	0,50	14,70	0,50	99,70	0,50	59,69	0,50	4,21	1,75	98,98	0,50
892	1245	49,04186	88,8069	211,854	4,52418	10865	9,70	1,34	99,12	0,50	31,30	0,50	99,99	1,69	97,85	13,43	80,63	94,71	99,80	1,31
893	1245	45,05264	133,854	179,732	2,59754	6965,13	5,91	1,30	99,34	0,50	29,51	0,50	99,82	0,84	99,88	7,08	87,29	58,71	99,68	1,30
894	1245	33,5438	782,043	1502,85	15,5944	633,539	3,52	1,28	96,30	0,50	27,08	0,50	91,82	0,50	31,54	0,51	20,15	16,66	99,45	0,50
895	1245	61,00953	3,5697	3,35997	0,30726	1375,64	7,01	1,31	98,41	0,50	6,52	0,51	12,69	5,95	4,92	44,41	20,62	31,90	14,37	1,72
896	1245	42,32126	306,18	441,738	7,08509	5348,94	6,64	1,29	95,45	0,50	29,29	0,50	99,44	1,23	34,99	1,48	83,72	57,56	99,53	0,58
897	1245	37,68981	436,248	469,722	5,24209	3820,4	2,21	1,14	94,28	0,50	30,53	0,50	94,04	0,53	22,29	0,70	88,22	39,81	98,50	0,53
898	1245	57,89516	15,1342	33,749	1,95234	15811,9	10,39	1,46	98,31	0,50	31,68	0,50	98,52	5,29	94,69	42,86	88,45	71,88	99,56	1,66
899	1245	25,23434	892,313	2679,5	39,205	356,056	8,76	1,30	99,63	0,50	14,35	0,50	99,96	0,50	84,61	0,50	4,24	1,76	99,45	0,50
900	1245	44,50567	168,39	273,891	6,77413	7777,27	6,33	1,42	94,53	0,50	30,02	0,50	97,70	2,24	34,31	2,26	91,96	76,18	99,28	0,54
901	1245	32,27481	808,688	1585,74	18,5053	1094,65	4,02	1,26	92,90	0,50	26,05	0,50	91,60	0,51	34,14	0,50	24,92	31,79	99,39	0,56
902	1245	24,4042	849,541	2674,2	36,4192	319,66	8,10	1,33	92,89	0,50	14,35	0,50	99,68	0,50	59,40	0,50	3,29	1,21	98,64	0,50
903	1245	38,2324	522,542	797,892	10,3739	6258,05	4,83	1,27	96,51	0,50	28,08	0,50	99,39	0,77	35,91	1,00	83,06	70,49	99,64	0,54
904	1245	28,53556	928,553	2356,18	32,4826	494,334	48,72	1,33	93,12	0,50	22,50	0,50	99,86	0,50	99,05	0,50	28,59	4,47	99,30	0,52
905	1245	48,30925	101,901	158,648	2,87307	10506,1	7,25	1,34	97,23	0,50	30,54	0,50	99,98	1,23	97,30	7,68	99,71	85,28	99,81	1,35
906	1245	44,62526	167,147	379,391	6,23671	8124,73	5,71	1,29	98,42	0,50	31,04	0,50	99,94	1,18	89,54	7,33	85,77	74,41	99,79	0,65
907	1245	31,43506	817,398	1706,82	20,1789	1046,08	3,34	1,28	95,01	0,50	27,09	0,50	93,92	0,51	34,33	0,53	22,98	32,29	99,11	0,51
908	1245	38,10966	490,479	812,085	11,5169	5023,07	9,30	1,33	99,33	0,50	29,90	0,50	99,96	0,85	52,37	1,22	89,06	51,01	99,83	0,54
909	1245	35,9007	633,947	963,578	12,1893	2799,24	3,65	1,54	97,41	0,50	28,41	0,50	99,94	0,57	52,17	0,79	53,19	45,52	99,43	0,55
910	1245	42,93112	200,046	349,965	4,98749	10948	8,12	1,46	97,80	0,50	29,44	0,50	99,97	0,80	99,84	7,36	99,16	91,36	99,94	1,32
911	1245	31,9153	819,427	1609,53	19,1045	1700,2	4,06	1,29	95,00	0,50	29,44	0,51	99,99	0,50	31,92	0,51	34,76	39,99	99,13	0,53
912	1245	33,8109	751,93	1297,83	16,162	2663,46	5,74	1,33	99,47	0,50	28,59	0,50	96,19	0,55	36,49	0,59	57,99	40,30	99,22	0,50
913	1245	38,47871	472,363	588,229	7,20689	4668,17	5,00	1,27	91,15	0,50	27,96	0,50	90,30	0,65	31,50	0,90	96,81	44,62	99,65	0,56
914	1245	29,16106	913,496	2218,61	29,3724	733,189	8,73	1,33	99,57	0,50	25,55	0,50	99,95	0,50	59,40	0,50	22,75	17,52	99,51	0,50
915	1245	35,67664	638,855	977,11	12,0115	5906,72	4,62	1,30	92,50	0,50	28,57	0,50	99,95	0,57	40,73	0,66	94,25	59,06	99,41	0,52
916	1245	42,52584	304,197	425,22	6,93114	5585,87	6,64	1,29	96,73	0,50	29,30	0,50	99,45	1,23	45,05	1,48	86,73	57,92	99,53	0,58
917	1245	39,84759	54,7201	1896,48	0,934517	21328,2	49,66	2,05	99,81	0,50	42,48	0,71	99,97	0,55	95,12	16,78	89,22	92,90	99,59	96,16
918	1245	48,29081	106,206	164,006	2,94525	10673,6	7,05	1,35	97,19	0,50	29,89	0,50	99,99	1,23	94,99	7,68	99,80	87,25	99,87	1,32
919	1245	39,23977	88,9509	2640,47	1,50347	19452,5	49,35	1,89	99,43	0,50	14,40	0,54	99,97	0,50	84,81	16,69	89,01	82,51	96,88	93,54
920	1245	56,6672	22,7124	45,7225	2,15313	15546,3	6,75	1,75	99,81	0,50	29,42	0,51	99,98	4,35	97,77	29,03	93,45	93,48	99,89	1,35
921	1245	43,89428	171,486	278,28	3,98348	6849,94	9,30	1,39	99,33	0,50	29,90	0,50	99,96	0,81	98,37	7,11	89,14	56,44	99,83	1,28

N.	Semene	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _{WR} (mW)	Area (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
922	1245	32,64771	797,211	1635,04	17,2976	587,518	4,02	1,28	94,41	0,50	27,10	0,50	91,73	0,50	31,83	0,50	18,61	15,70	99,51	0,50
923	1245	38,47297	478,557	646,589	8,03468	4869,03	4,83	1,27	91,44	0,50	28,06	0,50	90,07	0,67	34,72	1,23	99,03	45,37	99,64	0,51
924	1245	33,91935	751,413	1313,07	16,0172	2156,71	7,38	1,29	99,10	0,50	28,58	0,50	96,20	0,55	36,48	0,58	58,13	31,49	99,44	0,50
925	1245	34,35438	574,864	886,611	11,4089	2353,55	7,38	1,29	99,10	0,50	43,30	0,50	96,20	0,55	36,48	0,58	63,92	31,49	99,44	0,50
926	1245	40,5828	365,491	544,097	7,81534	5174,53	4,86	1,27	93,20	0,50	29,13	0,50	99,43	1,02	28,15	1,07	83,72	56,61	99,53	0,50
927	1245	35,80327	616,917	908,898	9,86935	2917,78	4,78	1,17	96,95	0,50	27,20	0,50	94,11	0,52	19,01	0,51	82,96	31,68	97,95	0,50
928	1245	40,01423	396,653	525,607	6,53362	3237,16	4,86	1,27	93,29	0,50	29,13	0,50	99,59	0,77	34,95	1,08	86,85	32,66	99,57	0,50
929	1245	39,97314	46,8964	2056,11	0,704867	20450,4	53,50	1,86	99,47	0,50	28,44	0,54	99,98	0,54	70,90	15,92	97,44	83,59	98,98	99,12
930	1245	38,09718	513,042	779,233	10,0935	6334,11	4,81	1,28	94,78	0,50	28,42	0,50	99,62	0,76	31,89	1,02	83,33	71,28	99,43	0,55
931	1245	43,73845	175,741	320,283	4,71635	8837,12	7,09	1,27	98,88	0,50	31,04	0,50	99,98	0,86	98,73	7,63	86,86	79,63	99,83	1,12
932	1245	36,96477	512,693	625,149	6,38908	1669,3	5,76	1,15	94,22	0,50	27,06	0,50	91,45	0,53	20,20	0,51	87,86	15,71	98,50	0,50
933	1245	35,86794	620,898	868,169	9,69702	1994,22	3,60	1,29	96,28	0,50	28,72	0,50	93,89	0,51	33,65	0,59	61,03	27,59	99,43	0,51
934	1245	34,75357	661,772	1102,77	12,2742	4033,11	5,76	1,15	94,32	0,50	27,06	0,50	94,02	0,53	20,18	0,50	87,86	42,59	98,49	0,50
935	1245	42,62172	147,119	195,846	2,48084	7107,24	5,11	1,30	99,54	0,50	29,33	0,50	99,63	0,66	89,29	7,00	96,79	56,47	99,39	1,32
936	1245	40,41907	65,0221	2000,34	1,11444	19312,4	51,13	1,88	99,50	0,50	29,96	0,71	99,97	0,57	84,84	15,44	88,95	83,48	99,43	90,63
937	1245	32,8637	815,958	1463,77	18,3969	3605,77	6,55	1,30	96,43	0,50	28,76	0,50	98,30	0,52	43,34	0,58	64,76	50,58	98,84	0,54
938	1245	41,22535	357,117	422,222	5,60159	3511,98	3,62	1,29	94,34	0,50	30,87	0,50	97,60	0,53	32,27	0,53	50,63	41,51	99,42	0,55
939	1245	34,18777	738,164	1283,62	13,8153	1234,09	3,60	1,17	92,89	0,50	28,50	0,50	93,89	0,85	35,46	1,18	86,87	35,44	99,59	0,54
940	1245	55,0597	25,0466	47,1199	1,24495	15679,7	5,67	1,42	99,53	0,50	30,04	0,53	99,59	2,22	88,92	35,61	89,02	95,93	99,64	2,34
941	1245	47,29215	83,2824	119,092	1,8343	8957,08	9,42	1,29	98,85	0,50	28,86	0,51	99,96	0,99	72,11	11,48	96,18	69,92	99,37	2,52
942	1245	44,66571	29,2429	1050,61	0,603477	27480,5	56,00	2,28	99,80	0,50	29,69	0,75	99,97	0,86	95,57	51,40	93,69	83,18	99,96	95,51
943	1245	34,9076	654,908	1000,81	11,8392	2419,56	3,82	1,29	94,34	0,50	30,87	0,50	97,60	0,53	32,27	0,53	50,63	41,51	99,42	0,55
944	1245	38,49052	254,127	514,124	6,31433	11083,3	7,42	1,34	97,27	0,50	28,57	0,50	99,99	0,58	95,17	7,85	99,16	92,90	99,59	1,35
945	1245	34,22158	684,358	1154,65	12,6786	3650,55	5,75	1,16	96,26	0,50	27,20	0,50	94,10	0,51	19,02	0,52	82,96	40,52	97,73	0,50
946	1245	42,91623	281,41	378,036	5,82267	3381,97	6,30	1,29	93,34	0,50	29,11	0,50	99,45	1,19	29,53	1,38	85,50	33,80	99,53	0,50
947	1245	41,88551	343,233	431,197	6,14018	4596,31	4,80	1,30	96,73	0,50	28,53	0,50	99,42	0,99	37,34	1,28	86,80	47,52	99,43	0,54
948	1245	31,91601	804,444	1667,62	18,7788	885,671	3,99	1,29	89,63	0,50	28,70	0,51	98,64	0,50	33,55	0,52	23,24	25,02	99,12	0,53
949	1245	45,74277	144,323	244,165	3,93997	7867,3	7,13	1,30	98,49	0,50	31,03	0,50	99,99	1,00	99,05	7,83	84,01	69,96	99,83	1,11
950	1245	41,12201	369,076	523,82	7,51919	4484,1	6,58	1,30	96,72	0,50	28,84	0,50	99,42	0,99	40,96	1,33	86,69	46,13	99,42	0,54
951	1245	39,86595	10,8001	7,67179	0,067953	5,59573	11,50	1,25	1,51	0,50	0,50	0,50	1,05	0,50	0,65	0,50	1,63	0,50	1,26	0,85
952	1245	39,11203	481,491	668,02	8,91172	7244,05	6,25	1,33	98,48	0,50	29,09	0,50	99,33	0,76	37,46	1,18	98,45	69,22	99,65	0,61
953	1245	43,75521	173,423	323,785	4,61552	7398,23	7,06	1,27	98,48	0,50	31,03	0,50	99,99	0,85	98,73	7,69	78,76	69,44	99,83	1,11
954	1245	60,42991	2,05775	1,70078	0,293688	1380,59	7,01	1,31	98,41	0,50	11,40	0,51	12,69	5,95	4,92	44,41	20,62	31,90	14,37	1,72
955	1245	58,83429	14,8581	28,4689	1,4851	13242,7	4,81	1,34	99,60	0,50	25,99	0,50	99,81	5,85	36,22	46,79	98,76	85,49	99,73	1,18
956	1245	38,58601	77,8427	2468,69	1,35873	20197,7	50,25	1,89	99,41	0,50	29,95	0,71	99,97	0,50	84,84	16,74	89,01	83,52	99,25	97,55
957	1245	30,07388	898,993	2118,15	27,4875	735,178	9,31	1,33	97,36	0,50	27,01	0,50	99,57	0,50	78,62	0,59	22,96	16,02	99,72	0,50
958	1245	39,1589	52,515	2482,11	0,822829	16985	36,03	2,23	99,44	0,50	14,07	0,54	99,90	0,50	84,78	16,85	88,86	56,76	94,85	93,51
959	1245	39,1607	53,3696	2496,92	0,838923	17178	36,03	2,23	99,44	0,50	14,07	0,54	99,95	0,50	84,78	16,85	88,86	56,76	96,91	93,51
960	1245	34,55921	726,908	1152,96	13,3622	4098,38	4,21	1,17	93,01	0,50	28,50	0,50	94,26	0,51	38,40	0,58	73,01	51,85	99,39	0,51
961	1245	42,54806	154,173	223,666	2,83507	6749,33	5,11	1,30	99,30	0,50	29,33	0,50	99,63	0,66	98,87	7,08	87,64	56,60	99,62	1,28
962	1245	32,61982	790,716	1575,69	17,2756	8079,24	3,26	1,28	89,63	0,50	28,70	0,50	98,62	0,50	33,60	0,51	23,10	24,68	98,03	0,50
963	1245	43,22766	274,828	410,484	6,67819	5681,02	6,64	1,29	95,43	0,50	29,90	0,50	99,44	1,23	35,90	2,23	88,45	57,58	99,53	0,58
964	1245	58,78373	15,4974	33,3442	1,64146	16820	6,60	1,31	94,63	0,50	24,97	0,50	99,51	5,78	79,65	42,97	87,79	97,20	99,70	1,73
965	1245	48,78185	106,685	204,309	4,36784	11499	11,24	1,46	95,91	0,50	30,53	0,50	99,88	1,65	97,08	8,07	99,39	94,02	99,77	1,32
966	1245	39,40311	402,974	702,564	10,4392	5110,45	9,30	1,33	99,29	0,50	29,93	0,50	99,98	0,97	51,86	1,53	89,06	51,38	99,81	0,54
967	1245	38,3729	519,376	778,907	10,1189	6513,72	4,83	1,27	96,51	0,50	28,08	0,50	99,59	0,76	36,11	1,02	86,67	70,49	99,64	0,54
968	1245	38,39442	473,923	756,099	10,1886	5419,54	7,66	1,29	95,46	0,50	30,20	0,50	99,42	0,80	40,66	1,31	88,10	56,44	99,54	0,57

N.	Semente	A ₀ (dB)	f _T (MHz)	SR (V/μs)	P _W (mW)	Area _c (μm ²)	I _{pol} (μA)	V _{pol} (V)	W _{1,2} (μm)	L _{1,2} (μm)	W _{3,4} (μm)	L _{3,4} (μm)	W _{5,6} (μm)	L _{5,6} (μm)	W _{7,8} (μm)	L _{7,8} (μm)	W ₉ (μm)	L ₉ (μm)	W ₁₀ (μm)	L ₁₀ (μm)
969	1245	37,36067	535,652	798,862	10,9631	6588,25	4,83	1,54	99,26	0,50	28,56	0,50	99,60	0,73	36,49	1,02	88,33	70,05	99,64	0,54
970	1245	39,15009	484,518	703,578	8,60503	7267,69	5,01	1,15	95,60	0,50	28,43	0,50	99,71	0,76	31,90	1,02	97,25	70,66	99,65	0,56
971	1245	36,89144	586,995	814,426	9,59871	3751,65	4,12	1,28	94,78	0,50	28,41	0,50	96,31	0,57	31,89	0,80	73,64	46,33	99,43	0,55
972	1245	50,47392	77,7873	161,89	3,54	11633,7	8,04	1,32	99,08	0,50	31,22	0,50	99,99	1,70	97,85	13,41	87,49	96,10	99,80	1,31
973	1245	41,33121	355,031	406,672	4,85011	2581,2	5,10	1,30	94,63	0,50	27,85	0,50	99,59	0,75	36,77	1,47	87,74	24,47	99,57	0,54
974	1245	33,91427	740,526	1244,58	14,885	2535,01	3,98	1,29	93,41	0,50	28,54	0,50	97,60	0,53	31,76	0,52	52,41	42,49	99,42	0,50
975	1245	44,70218	27,2712	1017,82	0,558069	27390,4	49,41	2,23	99,93	0,50	29,24	0,75	99,95	0,85	99,66	50,30	93,59	82,73	99,99	93,10
976	1245	41,86962	320,916	486,537	7,8872	9036,99	6,62	1,34	99,55	0,50	31,39	0,50	99,80	1,12	40,72	2,14	98,77	85,53	99,76	0,62
977	1245	31,30576	603,83	1858,73	13,118	228,76	0,47	1,18	51,97	0,50	14,40	0,50	76,55	0,50	20,66	0,62	3,36	3,02	99,27	0,50
978	1245	39,1589	52,515	2482,11	0,822829	16985	36,03	2,23	99,44	0,50	14,07	0,54	99,90	0,50	84,78	16,85	88,86	56,76	94,85	93,51
979	1245	38,73715	488,407	729,668	9,94418	6631,14	4,81	1,33	97,27	0,50	28,08	0,50	99,59	0,82	36,04	1,02	85,66	72,55	99,68	0,54
980	1245	32,81889	810,238	1508,34	17,6782	1689,19	3,34	1,28	95,00	0,50	29,44	0,50	99,98	0,50	36,87	0,58	34,62	39,66	98,38	0,50
981	1245	48,31992	104,094	161,26	2,90401	10610	7,05	1,35	97,19	0,50	29,89	0,50	99,94	1,23	97,30	7,68	99,71	86,34	99,85	1,33
982	1245	29,95103	898,366	2130,44	27,7732	734,763	9,31	1,33	97,36	0,50	27,01	0,50	99,97	0,50	78,62	0,59	22,96	16,02	99,72	0,50
983	1245	41,32316	164,135	223,612	2,67445	5822,65	5,19	1,30	93,22	0,50	29,32	0,50	99,61	0,66	35,14	7,08	87,47	56,48	99,57	1,31
984	1245	38,7423	82,2564	2386,32	1,39433	19159,8	49,87	1,88	99,35	0,50	29,96	0,71	99,22	0,50	81,29	15,36	88,95	83,51	99,25	90,60
985	1245	43,49352	276,415	337,143	4,67687	3415,3	4,84	1,30	96,67	0,50	29,50	0,50	99,32	0,97	34,92	2,09	86,65	33,44	99,77	0,54
986	1245	45,82267	115,342	285,344	4,97115	11397,2	9,85	1,32	98,91	0,50	31,23	0,50	99,98	1,23	99,35	13,49	87,58	93,77	99,74	1,28
987	1245	35,31142	694,654	1084,27	11,9089	2248,15	4,49	1,12	95,60	0,50	28,62	0,50	92,86	0,51	43,77	0,63	58,70	32,78	98,88	0,50
988	1245	48,31345	110,803	173,16	3,14695	11204,4	7,00	1,36	98,79	0,50	29,89	0,50	99,62	1,25	97,29	7,73	99,07	92,77	99,88	1,31
989	1245	39,63932	428,82	657,487	8,59516	2378,1	5,92	1,30	95,05	0,50	29,49	0,50	99,82	0,84	45,26	1,29	58,69	32,67	99,68	0,53
990	1245	31,91361	812,489	1727,11	19,9606	808,669	4,08	1,28	95,84	0,50	27,10	0,50	97,80	0,53	34,80	0,53	20,96	23,62	99,42	0,50
991	1245	43,30969	137,889	170,289	2,29281	7149,06	5,11	1,30	99,54	0,50	29,33	0,50	99,63	0,70	89,29	7,00	97,39	56,47	99,39	1,32
992	1245	38,91318	443,606	567,418	6,89053	4729,6	4,92	1,27	89,91	0,50	27,97	0,50	90,13	0,65	31,94	1,23	98,42	44,30	99,65	0,56
993	1245	35,529	675,833	1037,05	12,1615	2150,68	4,77	1,28	99,33	0,50	28,59	0,50	96,20	0,55	36,48	0,58	57,99	31,46	99,44	0,50
994	1245	42,68552	306,783	360,439	5,06701	3588,18	5,07	1,30	96,67	0,50	29,42	0,50	99,59	0,97	34,95	1,48	86,87	35,80	99,57	0,54
995	1245	34,00171	745,176	1193,93	14,6189	4715,89	4,20	1,27	92,98	0,50	28,48	0,50	91,62	0,51	43,39	0,61	73,19	60,08	99,39	0,52
996	1245	37,75649	499,56	582,358	6,83918	4062,97	3,51	1,27	91,32	0,50	28,81	0,50	90,26	0,56	34,95	0,95	83,72	44,42	99,25	0,58
997	1245	37,99575	517,652	599,757	7,01668	3190,23	3,51	1,27	99,39	0,50	28,81	0,50	90,26	0,56	34,95	0,95	72,18	39,32	99,25	0,58
998	1245	41,49764	312,703	462,536	7,5665	5505,3	7,66	1,29	95,46	0,50	30,20	0,50	99,42	1,23	40,66	1,31	88,10	56,44	99,54	0,57
999	1245	34,42795	736,135	1372,91	13,7827	587,968	4,04	1,27	96,52	0,50	27,04	0,50	91,58	0,52	33,70	0,50	21,08	13,52	98,93	0,50
1000	1245	33,91616	600,081	1534,7	12,899	386,816	3,40	1,27	91,36	0,50	28,65	0,50	90,03	0,56	33,70	1,18	7,23	5,01	99,35	0,50

ANEXO A - TRABALHO PUBLICADO EM CONGRESSO

DESVENDANDO OS LIMITES DE OTIMIZAÇÃO DE UM OTA CMOS POR MEIO DA ELETRÔNICA EVOLUCIONÁRIA EXTRÍNSECA

ANTONIO PAULO DE MORAES LEME*, SALVADOR PINILLOS GIMENEZ*, CARLOS EDUARDO THOMAZ*

* Centro Universitário da FEI
Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972
São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil

Emails: apmleme@ieee.org, sgimenez@fei.edu.br, cet@fei.edu.br

Abstract— The multiple objective optimization of the OTA is one of the most studied problems in microelectronics. Obtaining approximations of the Pareto Front, using the known evolutionary algorithm NSGA-II, integrated to SPICE simulator, reveals the relationship between the commitment to the goals often known only intuitively by analog integrated circuit designers. The results of this study suggest that the Multivariate Analysis of Pareto approximations is an important guide to getting more refined designs of OTAs.

Keywords— Evolutionary Electronics, Operational Transconductance Amplifier, Evolutionary Algorithms, Pareto Front, Multiple Objectives, Multivariate Analysis, Microelectronics.

Resumo— A otimização de múltiplos objetivos do OTA é um dos problemas mais estudados em microeletrônica. A obtenção de aproximações da fronteira de Pareto, através do conhecido algoritmo evolucionário NSGA-II, integrado ao simulador SPICE, revela relações de compromisso entre os objetivos conhecidas muitas vezes somente intuitivamente pelos projetistas de circuitos integrados analógicos. Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que a Análise Multivariada das aproximações Pareto é um guia importante para a obtenção de projetos de OTA otimizados.

Palavras-chave— Eletrônica Evolucionária, Amplificador Operacional de Transcondutância, Algoritmos Evolucionários, Fronteira de Pareto, Múltiplos Objetivos, Análise Multivariada, Micro Eletrônica.

1 Introdução

A *Eletrônica Evolucionária* (EE) foi formalmente estabelecida como área de pesquisa em 1997 na Universidade de Napier, Escócia, englobando *Computação Evolucionária* e *Eletrônica* (Zebulum et al., 2001). As grandes áreas dentro da EE são *Evolução Intrínseca*, ou evolução direta em “hardware” reconfigurável também chamada de “*Evolvable Hardware*” (EHW), e a *Evolução Extrínseca* que consiste na utilização de Algoritmos Evolucionários guiados por *funções de aptidão* obtidas através de simuladores como o SPICE (“Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis”) (Zebulum et al., 2001).

A abordagem neste trabalho consiste na *Evolução Extrínseca* de um *Amplificador Operacional de Transcondutância* (OTA) cujo esquema é ilustrado na Figura 1. As aproximações das *Fronteiras de Pareto* obtidas são utilizadas para a extração de conhecimentos através de *Análise Multivariada*. Esta é a principal contribuição deste artigo: a utilização das *Fronteiras de Pareto* como meio de extração de conhecimento sobre o comportamento do OTA em diferentes modos de operação por mapeamento estatístico.

Recentemente Deb e Koksalam (2010) sugeriram a utilização de métodos da área de “*Multi-Criteria Decision Making*” (MCDM) em conjunto dos “*Multi-Objective Evolutionary Algorithms*” (MOEA). Os métodos de MCDM permitem a elicitación de preferências entre múltiplos objetivos *a priori*, permitindo a convergência da oti-

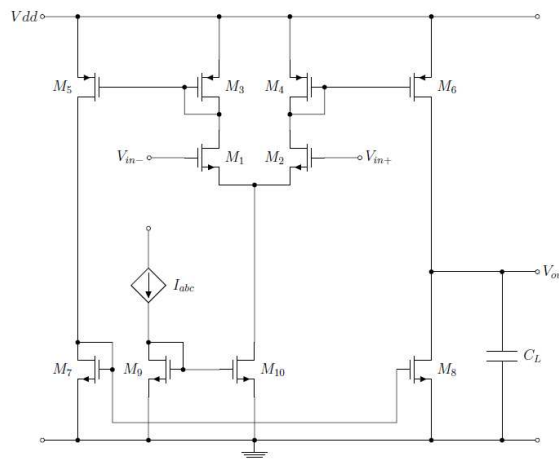


Figura 1: Esquema Elétrico do *Amplificador Operacional de Transcondutância* (OTA) de único estágio e única saída em tecnologia CMOS.

mização para uma única solução da *Fronteira de Pareto*, enquanto que os MOEAs clássicos que utilizam *Dominância Pareto* resultam em conjuntos de soluções que representam aproximações mais completas da *Fronteiras de Pareto*¹.

Enquanto obter apenas uma solução possui suas vantagens de ordem prática, o conhecimento tácito nas *Fronteiras de Pareto* muitas vezes é apenas intuitivo aos projetistas de circuitos integra-

¹A grande maioria dos MOEAs utiliza *Dominância Pareto*, onde o processo decisório é realizado *a posteriori* (Coello et al., 2006)

dos (CIs) analógicos mais experientes. As relações de compromisso entre os objetivos e parâmetros do projeto, uma vez explicitadas, podem permitir a construção de novas regras de projeto e abrir novas questões de pesquisa.

2 O Amplificador Operacional de Transcondutância

O OTA, esquematizado na Figura 1, é um amplificador de tensão-corrente caracterizado pela função de transferência ideal $I_{out} = g_m \cdot (V_{in+} - V_{in-})$, onde I_{out} é a corrente de saída, g_m é a transcondutância, V_{in+} e V_{in-} são respectivamente a entrada positiva e a entrada negativa do par diferencial. A corrente de polarização ($I_{abc} \equiv I_{pol}$) é utilizada para ajustar a transcondutância g_m (Schaumann, 2004).

O Projeto do OTA CMOS, conforme Silveira et al. (1996) e Gentinne (1996), requer o dimensionamento das larguras W e comprimentos L dos canais dos MOSFETs (“Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido Semicondutor”) M_1 a M_{10} , sendo que os pares de MOSFETs (M_1, M_2), (M_3, M_4), (M_5, M_6) e (M_7, M_8) são considerados idênticos neste trabalho. A corrente de polarização ($I_{abc} \equiv I_{pol}$) e tensão de polarização ($V_{bias} \equiv V_{pol}$) do par diferencial também devem ser ajustadas no projeto.

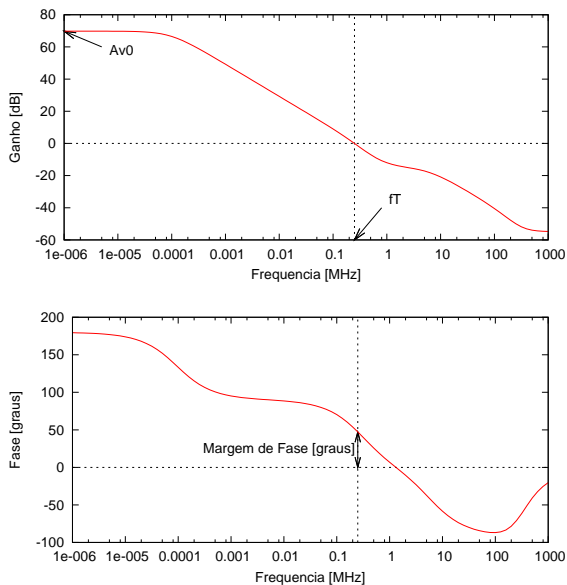


Figura 2: Diagrama de Bode ilustrando a resposta em frequência de um OTA configurado em *Malha Aberta*.

A resposta em frequência típica de um OTA, utilizando-se o modelo de pequenos sinais, é ilustrada pelo Diagrama de Bode da Figura 2. Neste diagrama, estão ilustradas as métricas de desempenho ganho de tensão (A_{v0}) e frequência de ganho de tensão unitário (f_T) e o critério de estabilidade do OTA dado pela Margem de Fase (φ_M). A

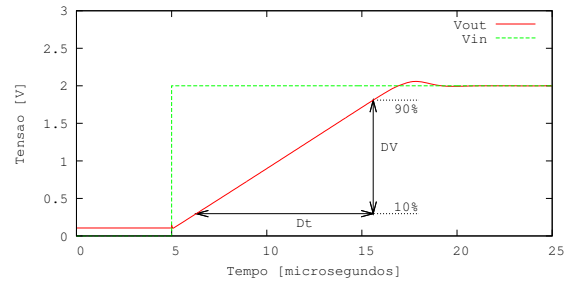


Figura 3: Resposta transiente de um OTA configurado em *Malha Fechada*.

resposta transiente típica de um OTA, utilizando-se o modelo de grandes sinais, é ilustrada na Figura 3, que representa a métrica “Slew Rate” (SR) dada pela máxima variação de tensão $\Delta V/\Delta t$. A métrica de desempenho potência P_{wr} é dada pela tensão de operação (V_{dd}) multiplicada pela corrente de consumo do OTA, enquanto que a métrica $Area$ é a somatória das áreas de portas dos transistores MOSFETs.

Parâmetro	Min.	Max.
I_{pol}	$0,1\mu A$	$100\mu A$
V_{pol}	$0,7V$	$2,3V$
W_i	$0,5\mu m$	$100\mu m$
L_i	$0,5\mu m$	$100\mu m$
V_{dd}	Fixo: $3V$	
C_L	Fixo: $3pF$	

Tabela 1: Parâmetros de configuração do OTA, onde: $I_{pol} \equiv I_{abc}$ é a corrente de polarização do par diferencial, $V_{pol} \equiv V_{bias}$ a tensão de polarização do par diferencial, W_i é a largura de canal do MOSFET M_i , $i \in 1, \dots, 10$, L_i é o comprimento de canal do MOSFET M_i , $i \in 1, \dots, 10$, V_{dd} é a tensão de alimentação do OTA e C_L é a capacitância de carga.

Objetivo	Min/Max	Unidade
A_{v0}	Maximizar	dB
f_T	Maximizar	MHz
SR	Maximizar	$V/\mu s$
P_{wr}	Minimizar	mW
$Area$	Minimizar	μm^2

Tabela 2: Objetivos de otimização do OTA, onde: A_{v0} é o Ganho em malha aberta (Figura 2); f_T é a Frequência de ganho unitário (Figura 2); SR é o “Slew Rate” ou máxima variação de tensão $\Delta V/\Delta t$ (Figura 3); P_{wr} é a potência dissipada do OTA e $Area$ a área de portas ou somatória das áreas $W_i \cdot L_i$.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 tem-se respectivamente os as faixas de valores dos Parâmetros, Objetivos

Restrições
$V_{ds}^i \geq V_{gs}^i + V_{th}^i, \forall M_i$
$45^\circ \leq \varphi_M \leq 75^\circ$
$\left \frac{V_{dd}}{2} - V_{out} \right \leq 0,1 \cdot V_{dd}$
$V_{out} \leq 0,5V, t \leq 0,5\mu s$
$V_{out} \geq 1,5V, t \geq 20\mu s$

Tabela 3: Restrições, onde: Para os MOSFETs M_i , V_{ds} é a tensão entre Dreno e Fonte, V_{gs} é a tensão entre Porta e Fonte e V_{th} é a tensão de Limiar; φ_M é a Margem de Fase; V_{out} é ajustado para a maior excursão do sinal de saída, próximo de $\frac{V_{dd}}{2}$.

e as Restrições de projeto para o problema de otimização do OTA.

3 Otimização Evolucionária do OTA

A otimização do OTA através do NSGA-II consiste na *Busca Direta* dos parâmetros do vetor \mathbf{x} do *espaço de decisão* Ω mapeados ao vetor \mathbf{y} do *espaço de objetivos* Λ através da *simulação* SPICE ($F: \Omega \rightarrow \Lambda$). A representação do cromossomo é o vetor de números reais:

$$\mathbf{x} = [I_{pol}, V_{pol}, W_{1\&2}, L_{1\&2}, \dots, W_{10}, L_{10}]^T, \quad (1)$$

O vetor \mathbf{x} é utilizado para parametrizar um arquivo de simulação SPICE escrito na linguagem NUTMEG (Tuma and Bürmen, 2009). Este arquivo de simulação é configurado para avaliar o OTA nas configurações de *Malha Aberta* e *Malha Fechada* e diferentes análises SPICE no domínio da frequência e do tempo, retornando um vetor \mathbf{y} com a avaliação dos objetivos e o vetor \mathbf{z} com as violações de restrições. Este processo é ilustrado na Figura 4.

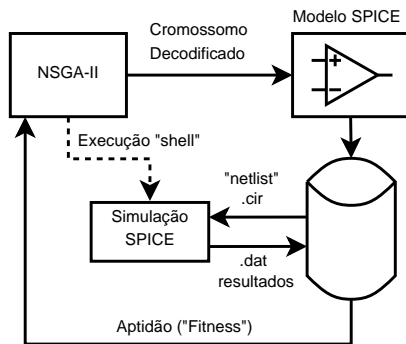


Figura 4: Integração do Simulador Spice ao NSGA-II para o cálculo da aptidão.

Os componentes de \mathbf{y} são os objetivos $[A_{v0}, f_T, SR, Pwr, Area]^T$ e os componentes de \mathbf{z} são as violações das restrições $[SR', V_{out}, \varphi'_M, Sat_{1\&2}, \dots, Sat_{10}]^T$, onde SR' é a violação da janela do Slew Rate (Figura 3), V_{out}

é a violação da tensão de saída em regime contínuo, φ'_M é a violação da Margem de Fase (Figura 2) e $Sat_{1\&2}$ a Sat_{10} são as violações de condição de operação dos transistores MOSFETs na região de saturação.

O NSGA-II utiliza a *Dominância Pareto* (Definição 1) para classificar as soluções por um número de ordem r , onde $r = 1$ representa as soluções não-dominadas da população. A classificação $r = 2$ segue o mesmo critério, excluindo as soluções com $r = 1$ e sucessivamente até a classificação completa da população através do algoritmo "Nondominated Sort" (Deb, 2001).

Definição 1 Dominância Pareto: Um vetor $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T$ domina outro vetor $\mathbf{y}' = [y'_1, y'_2, \dots, y'_k]^T$, denotado por $\mathbf{y} \prec \mathbf{y}'$, se e somente se não existe componente vetorial em \mathbf{y}' melhor do que o correspondente em \mathbf{y} e existe pelo menos um componente vetorial em \mathbf{y} melhor do que seu correspondente em \mathbf{y}' (Zitzler et al., 2002).

O segundo critério utilizado pelo NSGA-II é chamado *Distância de Apinhamento* (d) onde as soluções extremas possuem $d = \infty$ e as intermediárias tem o valor do semiperímetro normalizado do hipercubo do *espaço de objetivos* formado por suas soluções vizinhas (Deb, 2001). Este critério é utilizado para manter a diversidade de soluções.

Os dois critérios compõem o operador de seleção por torneio $<_c$ (Definição 2) (Deb, 2001).

Definição 2 Operador de Seleção por Torneio de Apinhamento ($<_c$): Uma solução i vence o torneio sobre outra solução j se quaisquer das condições abaixo forem verdadeiras:

1. Se a solução i tem melhor classificação Pareto, ou seja: $r_i < r_j$;
2. Se i e j possuem a mesma classificação Pareto, mas i possui melhor distância de apinhamento que j , ou seja: $d_i > d_j$.

Para lidar-se com as restrições do problema do OTA é necessário alterar o critério de dominância. Utiliza-se uma derivação do método de Ray-Tai-Seow (Deb, 2001, p. 308) conforme a (Definição 3).

Definição 3 Dominância Pareto modificada: Uma solução i domina outra solução j se e somente se

1. i satisfaz todas as restrições e j não;
2. i e j satisfazem todas as restrições e $\mathbf{y}_i \prec \mathbf{y}_j$ no espaço de objetivos;
3. i e j não satisfazem uma ou mais restrições e $\mathbf{z}_i \prec \mathbf{z}_j$ no espaço de restrições.

Para as operações genéticas nos cromossomos que utilizam representação em ponto flutuante utiliza-se o *Cruzamento Binário Simulado* (SBX) introduzido por Deb and Agrawal (1994) e a *Mutação Polinomial* introduzida por Deb and Goyal (1996).

Algoritmo 1: “Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II”

```

início
  Inicialize aleatoriamente a
  população  $P, |P| = N$ 
  Avalie cada solução  $x_i \in P$ , obtendo
   $y_i$  e  $z_i$ 
  enquanto  $\neg$  término faça
    Crie uma população de
    descendentes  $O, |O| = N$  usando
    cruzamento e mutação sobre  $P$ 
    Avalie cada solução  $x_i \in O$ ,
    obtendo  $y_i$  e  $z_i$ 
     $R \leftarrow P \cup O, |R| = 2N$ 
    ordene  $R$  pelo operador  $<_c$ 
     $P \leftarrow \emptyset$ 
     $P \leftarrow P \cup R^{(i)}$ , para  $i = 1 \dots N$ 
  Retorne o conjunto de soluções  $P$ 

```

O Algoritmo 1 retorna uma aproximação da *Frenteira de Pareto* (Definições 4 e 5).

Definição 4 Conjunto Pareto Ótimo
 $P^* = \{x \in \Omega | \nexists x' \in \Omega : f(x') \preceq f(x)\}$ (Coello et al., 2006).

Definição 5 Fronteira de Pareto Ótima
 $\mathcal{PF}^* = \{y = f(x) | \forall x \in P^*\}$ (Coello et al., 2006).

4 Experimentos e Resultados

O OTA é configurado com $V_{dd} = 3V$ e $C_L = 3pF$. Os modelos de transístores MOSFET utilizados são de tecnologia AMS 0,5 μm SCN05² (MOSIS).

Os parâmetros do NSGA-II utilizados são: probabilidade de cruzamento $p_c = 0.8$, probabilidade de mutação $p_m = 0.07$, fator da distribuição do cruzamento SBX $\eta_c = 20$ e fator da distribuição da mutação polinomial $\eta_m = 12$. O tamanho da população é $N = 200$ e os experimentos são executados por $t = 1000$ gerações, totalizando 200400 soluções geradas³. Os 5 experimentos possuem inicializações diferentes do gerador de números pseudo-aleatórios. Somente as soluções que satisfazem as restrições são preservadas para a análise.

Para avaliar a capacidade de convergência do método proposto, pode-se comparar os resultados obtidos com uma amostragem aleatória de 200400 soluções. Somente as soluções factíveis foram preservadas, onde 6 soluções foram obtidas (Tabela 4). Estima-se que a probabilidade de obter-se uma solução factível ao acaso é $\hat{p} = 0,0000299$ com intervalo de confiança de 95% entre $0,00000598 \leq \hat{p} \leq 0,00005389$ (Hines and

²<http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/ami-c5/t99j-params.txt>

³400 soluções da geração 0 mais 200 soluções geradas a cada geração entre as gerações 1 e 1000

Tabela 4: Resultados do experimento de busca aleatória.

A_{v0} (dB)	f_T (MHz)	SR (V/ μs)	Pwr (mW)	Area (μm^2)
58,78	6,00	12,00	0,15	7940
55,64	3,25	5,55	0,06	11300
45,06	0,98	4,11	0,08	11600
56,51	1,32	2,56	0,17	13300
54,18	1,75	3,43	0,15	15200
49,04	1,60	3,96	0,25	14100

Montgomery, 1990, p. 273–274). Todos os 5 experimentos com NSGA-II apresentaram 100% da população de pais $N = 200$ satisfazendo a todas restrições próximos da centésima geração. A proporção da população com $r = 1$ também sobe rapidamente após atingir 100% de satisfação das restrições, sendo o resultado final um conjunto de 200 soluções não-dominadas ($r = 1$).

Os limites mínimos e máximos das aproximações das fronteiras de pareto obtidas nos 5 experimentos com NSGA-II são apresentados na Tabela 5.

Objetivo	Mínimo	Máximo
A_{v0} (dB)	20,2411	70,0856
f_T (MHz)	0,118518	924,088
SR (V/ μs)	0,09385	2813,33
Pwr (mW)	0,000658	39,4558
Area (μm^2)	5,324	41378,4

Tabela 5: Limites máximos e mínimos obtidos para os 5 experimentos.

A comparação entre os conjuntos de soluções obtidos não é trivial. Conforme demonstrado por Zitzler et al. (2002) a comparação entre aproximações da *Frenteira de Pareto* requer pelo menos tantos indicadores unários quantos forem os objetivos e uma interpretação destes indicadores. Devido à complexidade em determinar qual a melhor aproximação, a prática usual é utilizar uma representação gráfica das *Frenteiras de Pareto* como a Figura 5 e alguns indicadores, sendo pelo menos um destes binário. Esta figura mostra a projeção das fronteiras de pareto para cada par de objetivos. As sub-figuras são simétricas a partir da diagonal. Os indicadores para a comparação de podem ser:

Hipervolume (Deb, 2001), que é uma métrica unária do volume dominado pelo conjunto \mathcal{A} . Para evitar o efeito de magnitudes diferentes entre os objetivos, o espaço de objetivos deve ser normalizado, ou seja,

$$I_{\mathcal{H}}(\mathcal{A}) = \cup_{i=1}^{|\mathcal{A}|} v_i, \quad (2)$$

onde v_i é o volume da área dominada por $y_i \in \mathcal{A}$;

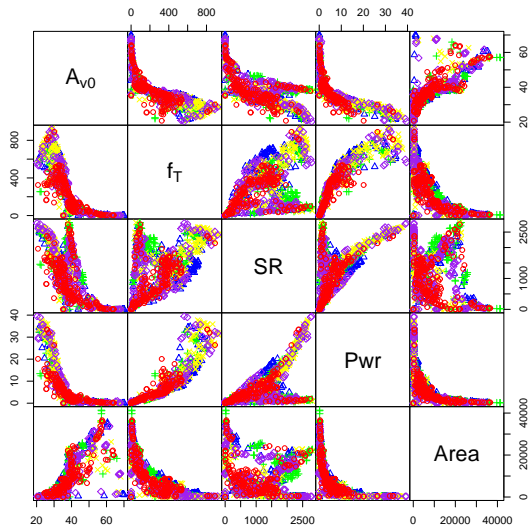


Figura 5: Projeções das aproximações da Fronteira de Pareto resultantes dos 5 experimentos com NSGA-II para cada par de objetivos: A_{v0} [dB], f_T [MHz], SR [V/ μ s], Pwr [mW] e $Area$ [μ m²].

Espalhamento (Deb, 2001), que é uma métrica unária da uniformidade do espalhamento das soluções,

$$I_{\Delta}(\mathcal{A}) = \frac{\sum_{j=1}^m d_j^e + \sum_{i=1}^{|\mathcal{A}|} |d_i - \bar{d}|}{\sum_{j=1}^m d_j^e + |\mathcal{A}| \bar{d}}, \quad (3)$$

onde o parâmetro d_j^e é a distância entre os vetores extremos \mathcal{A} correspondentes ao j -ésimo objetivo. O parâmetro \bar{d} é a média das distâncias entre as soluções $\mathbf{y}_i \in \mathcal{A}$.

Cobertura do Conjunto (Deb, 2001), que é uma métrica binária da proporção de soluções $\mathbf{y} \in \mathcal{B}$ fracamente dominadas por pelo menos uma solução $\mathbf{y} \in \mathcal{A}$,

$$I_C(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \frac{|\{y^{(b)} \in \mathcal{B} | \exists y^{(a)} \in \mathcal{A} : y^{(a)} \preceq y^{(b)}\}|}{|\mathcal{B}|}, \quad (4)$$

podemos afirmar que uma aproximação \mathcal{A} é melhor do que \mathcal{B} quando $I_C(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = 1$ e $I_C(\mathcal{B}, \mathcal{A}) < 1$.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 6 e 7, sugerindo que as aproximações dos 5 experimentos NSGA-II são equivalentes.

Experimento	I_H	I_{Δ}
NSGA-II/1	0,135	0,064
NSGA-II/2	0,157	0,045
NSGA-II/3	0,151	0,051
NSGA-II/4	0,169	0,050
NSGA-II/5	0,160	0,059
Aleatório/0	1,68E-5	0,036

Tabela 6: Hipervolume da região dominada pelos 5 experimentos.

I_C	1	2	3	4	5	0
1	#	0,020	0,051	0,005	0	0
2	0,114	#	0,097	0,021	0,061	0,5
3	0,098	0,076	#	0,005	0,061	0
4	0,212	0,192	0,240	#	0,102	0,5
5	0,109	0,061	0,138	0,036	#	0,17
0	0	0	0,005	0,005	0	#

Tabela 7: Cobertura de Conjunto entre as aproximações da Fronteira de Pareto. Experimentos NSGA-II 1 a 5, Experimento Aleatório 0.

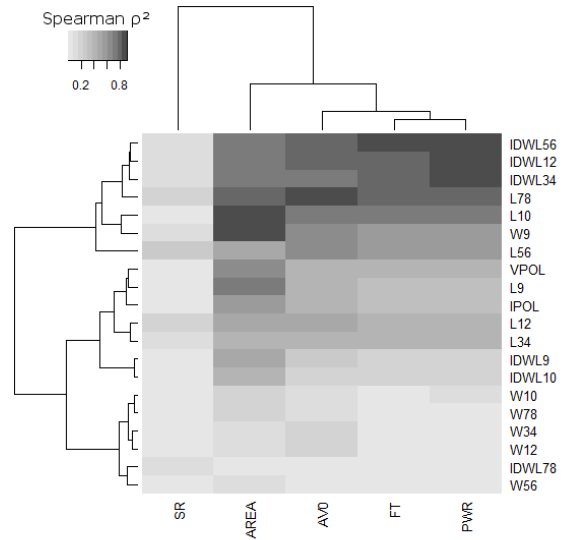


Figura 6: “Heatmap” e dendrogramas da correlação de Spearman entre os parâmetros e os objetivos. IDWL [$I_{ds}/(W/L)$] é a medida de inversão do MOSFET.

Adicionalmente, através da correlação de Spearman⁴, o “Heatmap” (Hastie et al., 2003) da Figura 6 é calculado utilizando-se as *Fronteiras de Pareto*. Os dendrogramas lateral e superior agrupam hierarquicamente os parâmetros e objetivos que possuem maior correlação quadrática (ρ^2). Os gradientes escuros mostram maior correlação entre parâmetros e objetivos e os gradientes claros menor correlação. Apesar da correlação de Spearman não ser prova de relação causal, este tipo de mapeamento estatístico pode ser utilizado como guia de configuração do OTA apresentado neste artigo.

O “Slew Rate” (SR) possui uma baixa correlação com os demais objetivos e parâmetros e observado-se a projeção das *Fronteiras de Pareto* (Figura 5), nota-se que existe uma relação bimodal de SR com os demais objetivos, justificando a baixa correlação. Este resultado deve ser abordado mais detalhadamente em trabalhos subse-

⁴A correlação de Spearman revela relações de Monotonicidade, enquanto que a correlação de Pearson revela relações Lineares.

quentes. Outra observação válida é a alta correlação dos parâmetros de inversão de alguns transistores MOSFETs [$I_{ds}/(W/L)$] com os objetivos, sugerindo que os resultados obtidos neste artigo corroboram com a metodologia g_m/I_{ds} de Silveira et al. (1996).

5 Conclusões

A *Eletrônica Analógica* é “considerada por muitos uma forma de arte ao invés de uma ciência” (O. Aaserud and I. Ring Nielsen (1995) apud Koza et al. (1999, p. 383)), requerendo intuição, experiência e grande conhecimento. O OTA é um exemplo desta complexidade, como encontramos nas abordagens de Stefanović and Kayal (2008), Silveira et al. (1996), Gimenez et al. (2005) na área de *Microeletrônica* e nos resultados apresentados neste trabalho.

As possibilidades de análise dos dados obtidos são tão extensas quanto o volume de dados gerados nos experimentos, não podendo ser completamente exploradas na extensão deste artigo. Os resultados obtidos, entretanto, sugerem que a *Análise Multivariada das Fronteiras de Pareto* é um guia importante para a investigação de relações de otimalidade em modelos complexos como o OTA, revelando relações que são muitas vezes desconhecidas por projetistas experientes.

Referências

- Coello, C. A. C., Lamont, G. B. and Veldhuizen, D. A. V. (2006). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic and Evolutionary Computation)*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, 1 edn, Wiley.
- Deb, K. and Agrawal, R. B. (1994). Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space, *Technical report*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
- Deb, K. and Goyal, M. (1996). A combined genetic adaptive search (geneas) for engineering design, *Computer Science and Informatics* **26**: 30–45.
- Deb, K. and Koksalan, M. (2010). Guest editorial special issue on preference-based multiobjective evolutionary algorithms, *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on* **14**(5): 669–670.
- Gentinne, B. (1996). *A study of the potential of SOI technology for analog applications*, PhD thesis, Université catholique de Louvain.
- Gimenez, S. P., Pavanello, M. A., ao Antonio Martino, J. and Flandre, D. (2005). Potential of Improved Gain in Operational Transconductance Amplifier using 0.5 mm graded-channel SOI nMOSFET for Applications in the Gigahertz Range, *Microelectronics Technology and Devices - SBMICRO 2005*, Vol. 2005-8, Microelectronics Technology and Devices - SBMICRO 2005, NJ, USA : The Electrochemical Society, Inc., pp. 502–511.
- Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. H. (2003). *The Elements of Statistical Learning*, 2 edn, Springer.
- Hines, W. W. and Montgomery, D. C. (1990). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, 3 edn, John Wiley & Sons.
- Igel, C., Heidrich-meisner, V., Glasmachers, T. and Sonnenburg, S. (2008). Shark, *Journal of Machine Learning* **9**.
- Koza, J. R., Bennett III, F. H., Andre, D. and Keane, M. A. (1999). *Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving*, Morgan Kaufmann.
- R Development Core Team (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Schaumann, R. (2004). *The Electrical Engineering Handbook*, Elsevier, chapter Active Filters, pp. 127–138.
- Silveira, F., Flandre, D. and Jespers, P. G. A. (1996). A g_m/i_d based methodology for the design of cmos analog circuits and its application to the synthesis of a silicon-on-insulator micropower ota, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **31**(9).
- Stefanović, D. and Kayal, M. (2008). *Structured Analog CMOS Design*, Springer.
- Tuma, T. and Bürmen, A. (2009). *Circuit Simulation with SPICE OPUS: Theory and Practice*, 1st edn, Birkhäuser Basel Berlin.
- Zebulum, R. S., Pacheco, M. A. and Vellasco, M. M. B. (2001). *Evolutionary Electronics: Automatic Design of Electronic Circuits and Systems by Genetic Algorithms*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA.
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M. and Grunert da Fonseca, V. (2002). Performance Assessment of Multiobjective Optimizers: An Analysis and Review, *Technical Report 139*, Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH Zurich.