



Uma Heurística Geral Para a Comparação de Sinais

Pedro Jorge de Albuquerque de Oliveira

pejalb@gmail.com

Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações,
Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Rua São Francisco Xavier, 524, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

pejalb@gmail.com

Nadia Nedjah

nadia@eng.uerj.br

Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações,
Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Rua São Francisco Xavier, 524, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Luiza de Macedo Mourelle

ldmm@eng.uerj.br

Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação,
Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Rua São Francisco Xavier, 524, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Abstract. *This paper proposes a generic comparison heuristic, with possible application during the evaluation and analysis of similarities of two datasets. In particular, we aim to make possible the objective ordering of real system models according to their fidelity as to produce the expected results. The mentioned datasets are obtained through an experimental process of data acquisition vs. via simulation of a model for the system in consideration. The effectiveness of this heuristic is proven herein through its use in an evolutionary system of automatic circuit synthesis using genetic programming. Its role in this system is to evaluate the evolved circuit fitness by the synthesis system regarding the circuit expected behavior. Nonetheless, the proposed metric can be used universally in any system where comparisons of system models, such as those used during the design of controllers, is required.*

Keywords: *Genetic Programming, Correlation Analysis, Automatic Synthesis, , Heuristic signal comparison*

1 INTRODUÇÃO

Um problema clássico da estatística é o de identificar relações existentes entre e dentro de conjuntos de dados. Se forem feitas referências às relações dentro de um conjunto de dados, usualmente se faz alusão a medidas de dispersão como médias, modas, variâncias, e desvios padrão. No caso de medidas de relação, têm-se indicadores como a covariância e índices de correlação como o de Pearson, o de Spearman e outros.

A comparação de dois conjuntos de dados tem aplicações variadas que vão de problemas puramente estatísticos, como a análise de regressão, ao processamento de imagens, da comparação de modelos dinâmicos de sistemas físicos à criação de funções de aptidão para sistemas evolucionários. Dada a ampla aplicabilidade, é o objetivo desse trabalho de propor e descrever uma heurística de comparação simples baseada na agregação de dados extraídos de fatores presentes nos conjuntos de dados. Por meio do uso de conceitos como o de erro quadrático, transformadas de Fourier e correlação, é proposta uma função capaz de comparar dois conjuntos de dados, fornecendo um grau de semelhança que permite uma ordenação precisa dos conjuntos comparados.

Nesse artigo, no entanto, enfatizamos um problema, frequente em engenharia que consiste na comparação de diversos modelos para um mesmo sistema no que tange sua fidelidade a resultados experimentais. Definiremos um critério objetivo para a classificação de tais modelos, dos quais apenas se conheçam as entradas e saídas correspondentes. A solução proposta se baseia em uma função que é capaz de, atribuir um grau indicativo da semelhança entre dois sinais. No restante deste artigo, será assumido que estamos sempre lidando com a aplicação da função de comparação proposta à verificação da similaridade entre um conjunto de resultados experimentais e um advindo de um modelo do sistema real. A partir de um grau de similaridade entre os resultados fornecidos por um conjunto de modelos e os resultados experimentais, torna-se possível comparar a qualidade de diversos modelos, ordenando-os com base no critério objetivo obtido via a heurística proposta.

Antes de abordar o desenvolvimento referente à heurística em si, alguns termos e convenções utilizados adiante serão aqui definidos. Em todas as seções que precedem a de exemplo de aplicação usaremos funções para criar situações ilustrativas. Sem perda de generalidade, começaremos por arbitrar que todas as funções serão aplicadas sobre a variável t e que essa assumirá valores reais no intervalo $[0,1]$. Fica também determinado que serão denotadas por $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$ as funções usadas como exemplos. Sobre as funções $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$, suas imagens serão assumidas como reais pelo restante da discussão. Determina-se também que $x(t)$ sempre denota a função que reproduzirá o resultado ideal, ou almejado, do sistema. Ademais, afirmamos que todos os cálculos e gráficos se baseiam em versões amostradas das funções envolvidas. Por fim, sempre que fizermos referência à média de uma variável, o faremos pela superposição de uma barra ao seu símbolo como, por exemplo, em $\bar{x}$ ou $\bar{y}$.

O restante deste artigo está dividido em sete seções: A Seção 2 trata dos conceitos fundamentais utilizados na métrica proposta; 4 Subseção 2.1 trata do erro quadrático e seu uso na heurística proposta; a Subseção 2.2 descreve o índice de correlação de Pearson e seu papel na heurística; a Subseção 2.3 explica brevemente o conceito de uma transformada discreta de Fourier e como ela impacta nos resultados fornecidos pela heurística proposta; a Seção 3 introduz a função de comparação propriamente dita; e a Seção 4 mostra dois exemplos de aplicação da heurística descrita : como função de aptidão em um sistema baseado em programação genética e como uma métrica de comparação de imagens; na Seção 5 são oferecidas as conclusões e possíveis

direções para trabalhos futuros.

2 Conceitos Fundamentais

Nessa sessão discutiremos de modo sucinto os conceitos essenciais subjacentes à técnica de comparação que proposta com o intuito de facilitar a compreensão do material exposto. Começaremos por elucidar de modo breve o que é a soma dos erros quadráticos (ou a sua média), frequentemente empregada no campo de ajuste de curvas devido ao sucesso da técnica dos mínimos quadrados. Prosseguiremos por meio de uma breve discussão sobre o índice de correlação de Pearson. Motivaremos, por fim, a aplicação de transformadas de Fourier como modo de extrair informações intrínsecas ao conjunto de dados sob análise

2.1 Soma dos Erros Quadráticos

É prática comum em problemas do gênero aqui proposto que se use a soma dos erros quadrados como medida de precisão, ou a soma dos desvios absolutos, e não a soma dos desvios simples $\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})$. Tal noção se origina do teorema do limite central (Kallenberg, 1997), ou Central Limit Theorem. Sob hipóteses leves é possível mostrar que os desvios de uma variável aleatória, com qualquer distribuição de probabilidades, tende a seguir uma distribuição normal. Assim sendo, é comum que se use o erro quadrático, *i.e.* $\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$, como medida de erro ao invés dos simples desvios da variável como parâmetro para julgar a proximidade de um conjunto de dados em relação à sua média. De modo análogo, ao comparar dois conjuntos de dados fornecidos por um modelo de um sistema aos valores ideais vemos a tendência de que os erros se compensem, ou seja sigam aproximadamente uma distribuição normal de média zero.

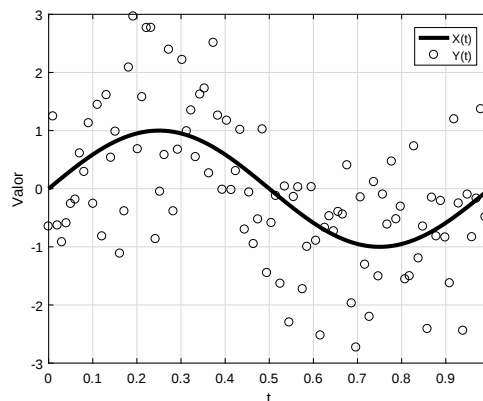


Figura 1: Comparação entre sinal de teste e a senóide com ruído Gaussiano de média 0 e variância 1

Como pode ser verificado na Figura 1 muitas vezes é difícil reconhecer se há ou não uma componente desejada e.g. uma senóide, se estivermos em meios muito ruidosos. De fato, calculando os desvios simples da função de teste convencionada em relação aos valores ideais, vê-se que seus valores tendem a se compensar, como pode ser visto na Figura 2. Não só isso, mas também os valores acumulados, ou os valores médios, dos erros simples tendem a zero, como mostrado na Tabela 1.

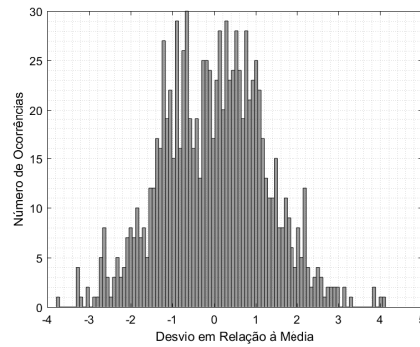


Figura 2: Histograma de desvios da medida muito ruidosa

Como se observa, os desvios em relação à média parecem tender a se compensar, conforme esperado de uma distribuição normal de média nula, hipóteses usuais para distribuições de erros que em virtude do teorema do limite central previamente citado levam ao resultado observado. Na Tabela 1, verifica-se que a média dos desvios simples tende a zero, enquanto a média dos erros quadráticos tende a um valor mais indicativo da real presença de ruído.

Tabela 1: Senóide com ruído Gaussiano

Experimento	Média		Variância	
	y	z	y	z
Desvio Simples	$5.428e - 3$	$5.371e - 3$	1.0269	$1.067e - 2$
Erro Quadrático	1.0259	$1.069e - 2$	2.3929	$2.284e - 4$

É possível mostrar que o erro quadrático é não só uma heurística capaz de indicar similaridade de sinais, mas também uma métrica em um espaço de funções (de quadrado integrável). Seu uso para a finalidade de comparar dois conjuntos de dados é justificável, embora haja críticas ao seu uso indiscriminado. Dentre as críticas mais relevantes para a presente discussão, está o fato de que essa medida tende a dar um peso excessivo a *outlier*¹.

2.2 Correlação de Pearson

O índice de correlação de Pearson, permite medir a dependência linear entre duas variáveis aleatórias quaisquer. Este coeficiente assume valores reais pertencentes ao intervalo fechado $[-1, 1]$, em que o valor $+1$ indica uma perfeita relação linear positiva, -1 uma perfeita relação linear negativa e zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Em quase todos os casos práticos, no entanto encontraremos valores intermediários. Sejam duas variáveis x e y . Seu coeficiente de correlação é dado pela Equação 1,

$$\rho(x, y) = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sqrt{\text{Var}(x)\text{Var}(y)}}. \quad (1)$$

¹*Outlier*: Em estatística, *outlier*, valor aberrante ou valor atípico, é uma observação que apresenta um grande afastamento das demais da série, ou que é inconsistente.

O tipo de resultado produzido pela aplicação desse indicador a conjuntos de dados pode ser melhor compreendido por meio de ilustrações. Para esse fim, faça-se a comparação dos sinais da Figura 1, de modo análogo ao que foi feito na Seção 2.1, usando o índice de correlação de Pearson.

A Figura 2 mostra a função $y(t)$ com seus valores mostrados contra $x(t)$, na subfigura da esquerda, e a função $z(t)$ com seus valores mostrados contra $x(t)$. Ou seja, é ilustra a relação entre os dois conjuntos de dados. Pode-se verificar na Figura 2 que dados mais correlacionados tendem a fornecer valores de ρ maiores. Não só isso, mas também pode ser observado o fato de que quanto maior o valor do módulo de ρ , mais a relação entre os dois conjuntos de dados se aproxima da linearidade. Isso leva ao questionamento do porquê de ρ não ser usado como o único fator de comparação. Tal modo de proceder é inadequado do ponto de vista prático, pois se assim fosse feito perder-se-ia a noção de diferença, vista como distância, entre os conjuntos de dados sendo comparados. No entanto, pode-se considerar o uso de um fator multiplicativo proporcional ao inverso de um monômio em ρ , sob o qual se imponha a restrição de assumir valores não negativos. Como $0 \leq \rho^2 \leq 1$, o termo $\frac{1}{\rho^2}$ pode ser usado como esse fator multiplicativo. De fato, por uma análise simples do que foi exposto, pode-se verificar que para conjuntos de dados pouco relacionados o termo em questão tenderia a ∞ , já que nesses casos ρ tenderia a zero. De modo similar, em conjuntos com forte correlação, seja ela positiva ou negativa, $|\rho|$ tende à unidade e o fator em questão tem pouca influência sobre o resultado da comparação. Desse modo, termos do gênero levam a uma transformação não linear quando aplicadas a medidas de erro como aquela apresentada na Seção 2. Essa transformação, levará

a termos da forma $\frac{\sum_{i=1}^N (x-y)^2}{\rho(x,y)^2}$, que permitirão amplificar o erro atribuído a conjuntos de dados pouco relacionados e a conservar um valor de erro próximo ao erro quadrático se sua correlação for próxima de $+1$. Tal efeito pode ser verificado na Tabela 2 onde comparamos o valor da soma dos erros quadráticos com o fornecido por $\frac{\sum_{i=1}^N (x-y)^2}{\rho(x,y)^2}$ para o exemplo corrente.

Tabela 2: Comparação do erro quadrático com o termo sugerido que leva em consideração o coeficiente de correlação

	Soma dos erros quadráticos	Termos da forma sugerida
$y(t)$	$1.025938e + 3$	$3.054565e + 3$
$z(t)$	$1.069026e + 1$	$1.091755e + 1$

2.3 Transformadas de Fourier

As transformadas de Fourier são muito usadas em processamento de sinais por tornar possível a projeção de sinais expressos no domínio do tempo para o da frequência. No caso de sinais discretos, ou amostragens de sinais contínuos, estas são computadas por transformadas discretas de Fourier. Embora existam diversas convenções para os pares de transformações diretas e inversas, dependendo da normalização adotada pelo autor da publicação. Nesse trabalho será usado o par adotado em (Oppenheim e Schaffer, 1989):

Transformada direta:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \exp\left(\frac{-2\pi i}{N}\right)^{(j-1)(k-1)} \quad (2)$$

Transformada inversa:

$$x(j) = \sum_{k=1}^N X(k) \exp\left(\frac{-2\pi i}{N}\right)^{(j-1)(k-1)} \quad (3)$$

Mapeamentos entre espaços de funções base são úteis, pois não só permitem que se obtenha novo *insight* em problemas cuja solução seja conhecida, mas também permitem que se lance mão de toda uma nova gama de ferramentas advindas da análise de Fourier para a solução de problemas de difícil resolução. Dentre estas ferramentas, a mais simples talvez seja a filtragem de determinadas faixas de frequência, já que sinais possuem espectros característicos como, por exemplo, a função senoidal cujo espectro pode ser expresso por meio da soma de duas funções impulso unitárias somadas e pondera-das por um fator proporcional à sua amplitude e deslocadas no eixo das frequências, conforme pode ser verificado na Figura 3.

Decerto, partindo da premissa de que o espectro de um sinal seja característico deste, é possível conceber que se possa usar tal fato para reconhecê-lo. Com efeito, certos perfis de ruído são mais bem caracterizados no domínio da frequência que no do tempo, como pode-se verificar comparando a forma exibida na Figura 3 àquela da Figura 4.

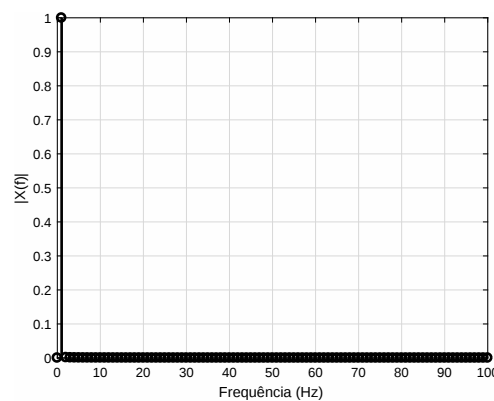


Figura 3: Espectro unilateral de uma senóide com frequência de 1Hz amostrada em 1024 pontos

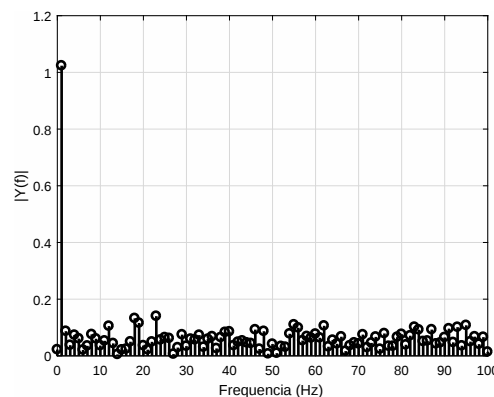


Figura 4: Espectro de uma senóide de 1Hz com ruído Gaussiano

Foi arbitrado, portanto, que seriam incluídos na função de comparação proposta termos proporcionais ao erro quadrático na magnitude e na fase, obtidos por meio do cálculo da transformada discreta de Fourier dos sinais de resposta desejados (do modelo) e os obtidos (medidos), respectivamente.

A Tabela 3 mostra de forma patente como a presença de ruído em um sinal faz com que haja uma grande divergência em seu espectro, tal qual sugerido anteriormente.

Tabela 3: Comparação do efeito da presença de ruído no espectro de um sinal. A tabela mostra os efeitos na magnitude e na fase da transformada de cada sinal separadamente

Medida	SSE ² da magnitude	SSE da fase
$y(t)$	$9.948382e + 5$	$8.520671e + 3$
$z(t)$	$5.129149e + 5$	$9.024235e + 3$

3 Função de Comparação

Quando é proposta a criação de uma heurística de comparação capaz de eficientemente distinguir entre duas funções, sendo uma almejada como saída de um dado modelo de algum fenômeno mensurável e outra a saída obtida de um experimento, ou observação, é usual que se pense em minimizar o erro entre os resultados fornecidos pelo modelo e os que seriam considerados "ideais". A fim de tornar mais acurado o discernimento entre sinais, foi acrescida uma dependência funcional entre o grau atribuído pelo critério de avaliação proposto nessa seção, e o índice de correlação de Pearson. No caso de uma mera comparação o uso do inverso do quadrado do índice de correlação de Pearson se mostra suficiente para o objetivo de introduzir uma transformação não linear que altere a escala dos erros no caso de conjuntos com correlação quase nula, já que $0 \leq \rho^2 \leq 1$. Tal fato torna atraente uma relação funcional que considere menos aptos modelos que ocasionam erros maiores e que apresentem correlações menores. Pode-se, sem perda de generalidade, considerar então a razão entre a soma dos quadrados dos erros e o quadrado da correlação de Pearson como um termo para a função de comparação. O raciocínio por trás dessa ideia é que, se a função gerada for diferente da desejada não só seu erro tenderá a crescer, mas também sua correlação tenderá a zero e, dessa forma, o termo proporcional ao inverso do quadrado do coeficiente de correlação de Pearson tenderá ao infinito, forçando o valor da aptidão a crescer ainda mais.

Ademais, é inevitável a existência de ruído nas saídas de quaisquer sistemas reais. Portanto, comparações de resultados experimentais com os previstos por modelos propostos, geralmente formulados com base em hipóteses que só são verossimilhantes em casos particulares, tendam a apresentar diferenças mesmo que não haja quaisquer outras razões para tal dissonância. Isso pode ser exemplificado pela comparação das funções apresentadas na Figura 1. O efeito contrário também pode ocorrer já que, por vezes, na tentativa de capturar o comportamento de um sistema somos levados a modelos que introduzem distorções que podem não ser verificáveis no sistema real, a exemplo do que ocorre em sistemas que possuem estados que não sejam diretamente observáveis, mas cuja existência tenha sido postulada, a despeito disso. Assim sendo, uma resposta realista de um sistema poderia conter desvios pontuais, ou mesmo distorções não

lineares, que muito provavelmente não estariam previstas e, portanto, não seriam capturadas por um modelo.

Conforme já foi arguido na Seção 2.3 certos perfis de ruído são mais bem caracterizados no domínio da frequência que no do tempo e, para esse fim, arbitrou-se que seriam incluídos na heurística de comparação proposta termos proporcionais ao erro na magnitude e na fase, obtidos por meio do cálculo da transformada discreta de Fourier dos sinais de resposta desejados (do modelo) e os obtidos (medidos), respectivamente. O acúmulo dos termos foi feito de modo aditivo. Por fim, visando limitar a grande variação da função de comparação, impusemos uma transformação do tipo $\log 1 + x$, transformação de escala (Bäck, et al., 2000). A presença da constante 1 nessa transformação está consoante ao fato de a função logaritmo não ter valor definido sobre os reais para valores nulos ou negativos. Desse modo, temos que garantir que esse caso jamais ocorra. Assim sendo, a forma final e completa da heurística de comparação proposta é dada pela Equação 4

$$\log \left(1 + \frac{(T_1 + T_2 + T_3)}{\rho^2} \right) \quad (4)$$

Em que

$$T1 = \sum_{i=1}^N (y_{\text{medido}} - y_{\text{alvo}})^2, \quad (5)$$

$$T2 = \sum_{i=1}^N (|\mathcal{F}(y_{\text{medido}})| - |\mathcal{F}(y_{\text{alvo}})|)^2, \quad (6)$$

$$T3 = \sum_{i=1}^N (\angle \mathcal{F}(y_{\text{medido}}) - \angle \mathcal{F}(y_{\text{alvo}}))^2, \quad (7)$$

e

$$\rho^2 = \rho(y_{\text{medido}}, y_{\text{alvo}})^2. \quad (8)$$

4 Aplicações

Nessa seção serão apresentadas duas aplicações da função de similaridade proposta. A primeira é originária do problema que levou à sua concepção, e traz consigo uma visão mais focada na noção de comparação entre um modelo "ideal" e uma implementação que lhe deseje fazer justiça. A segunda aplicação que será mostrada exhibe o potencial de estender a função heurística proposta para problemas genéricos em dimensões superiores, como por exemplo comparação de similaridade de imagens mediante subamostragem, ou ruído de outra sorte. Objetiva-se que seja observado o potencial que a robustez da comparação (provida pela comparação simultânea nos domínios espaço (ou tempo) e da frequência) pode agregar a problemas como problemas de *block matching*, *object tracking*, etc.

4.1 Síntese Evolucionária de Circuitos

A heurística de comparação deduzida na Seção 3 foi empregada para a avaliação de aptidão de indivíduos em um sistema de síntese de circuitos baseado em programação genética com codificação linear. Esse sistema foi desenvolvido visando a aplicação na elaboração de circuitos baseados em nanotubos de carbono. Nesse problema em particular, foi uma escolha de projeto

sacrificar a noção de escala, no sentido de que o sistema efetivamente busca uma solução e compara sua saída normalizada com uma versão normalizada da saída desejada a fim de ganhar expediência na exploração do espaço de busca. Esse tipo de *trade-off*, tornou possível a obtenção de resultados em um tempo relativamente curto.

Utilizou-se uma codificação em que os circuitos sendo evoluídos são representados como conjuntos de instruções para uma rotina de construção de circuitos, inspirado em (Lohn & Colombano, 1999). Cada uma dessas instruções usa uma representação interna na forma de um inteiro de trinta e dois bits sem sinal, sendo os quatro bits mais altos reservados para a operação a ser realizada, seguidos de oito bits para uma representação do componente (resistor, capacitor ou transistor) sendo manipulado. Os vinte bits de ordem mais baixa representam parâmetros como capacitâncias, resistências, espessuras de isolantes de porta etc. O processo de construção se inicia sempre num nó conectado à primeira entrada e prossegue até que não haja mais instruções a pro-cessar. As instruções usadas, são dezesseis em número e estão limitadas a dois tipos: as de manipulação do processo de síntese, e as de posicionamento de componentes. Durante o processo de construção da netlist³ que representa o circuito correspondente ao programa sendo evoluído, foi adotada a convenção de que os nós criados receberiam identificadores inteiros que começariam em 1 e seriam incrementa-dos a cada instrução que criasse um novo nó. A rotina de construção de circuitos mantém os identificadores: do último nó a ter sido manipulado, do último nó a ter sido criado, dos nós em que estão conectadas as fontes, dos nós onde estão conectadas as entra-das de sinal e do nó sobre o qual se medirá a tensão de saída. Cada instrução de manipulação de com-ponente tem associada a ela (implicitamente) o nó ativo e outro nó que pode ser um dos nós fixos, como as fontes de alimentação ou um nó inferido do contexto. Todas as instruções de manipulação do processo em si, podem estar associadas a no máximo um nó, pois são instruções de movimentação da rotina de construção de circuito pelo grafo do subjacente ao circuito representado. Na Tabela 4 são mostradas todas as instruções de posicionamento de componentes:

As instruções da Tabela 4 todas introduzem um componente entre o nó ativo e um nó de saída pré-determinado. O sistema se refere a todos os nós cria-dos durante a síntese por valores de referência numéricos. A instrução *MV_NEW* cria um novo nó e o conecta ao nó ativo por meio de um componente que recebe como argumento (juntamente com parâmetros numéricos). A instrução *MV_NEXT* introduz um elemento entre um nó e o nó com referência de valor subsequente, se esse não existir será criado. Todas as instruções do tipo *CAST_* conectam o nó ativo a um nó pré-determinado. A *CAST_PREV* opera de modo contrário à *MV_NEXT* e conecta o nó ativo ao seu antecessor imediato pondo um componente entre eles. A *CAST_PREV*, no entanto, não cria novos nós e só retrocede até o primeiro nó, sendo impossível aplica-la ao primeiro nó. As instruções *CAST_IN1*, *CAST_IN2* e *CAST_IN3* conectam o nó ativo, respectivamente à entrada 1, à entrada 2 e à entrada 3. A instrução *CAST_OUT* liga o nó ativo diretamente à saída do circuito. A *CAST_GND* a liga o nó ativo ao terra do circuito. As instruções *CAST_PPS* e a *CAST_NPS* ligam o nó ativo à fonte de tensão dc positiva e negativa respectivamente. A Tabela 5 mostra todas as instruções de manipulação do processo de síntese.

As instruções de manipulação do processo de síntese não alteram o nó de saída, é suficiente, portanto, que se conheça como ela altera o nó ativo. A instrução *NOP* é a mais peculiar de

³Netlist: uma representação textual de um circuito usada por simuladores de circuito como o SPICE e seus descendentes.

Tabela 4: Instruções de manipulação de componentes

Instrução	Nó de Saída	Novo Nó Ativo
MV_NEW	ULTIMO_NO+1	ULTIMO_NO+1
MV_NEXT	NO_ATIVO+1	NO_ATIVO+1
CAST_PREV	NO_ATIVO-1	NO_ATIVO-1
CAST_IN1	INPUT1	INPUT1
CAST_IN2	INPUT2	INPUT2
CAST_IN3	INPUT3	INPUT3
CAST_OUT	OUTPUT	OUTPUT
CAST_GND	GROUND	GROUND
CAST_PPS	PPS	PPS
CAST_NPS	NPS	NPS

Tabela 5: Instruções de manipulação da síntese

Instrução	Nó de Saída	Novo nó Ativo
NOP (no operation)	N/A	INALTERADO
RESET_IN1	N/A	INPUT1
RESET_IN2	N/A	INPUT2
RESET_IN3	N/A	INPUT3
RESET_START	N/A	Primeiro Nó(1)
PICK_LAST_FLOATING	N/A	Último nó criado

todas as mostra-das na Tabela 5, já que não tem qualquer efeito sobre o nó ativo. O *NOP* tem uma função intrínseca à implementação realizada em que são usados cromossomos de tamanho fixo, e a variedade no tamanho das soluções é possibilitada pelo uso de *NOP* nos genes inativos. As instruções do tipo *RESET_* servem para alterar o nó ativo para um dos nós fixos ou para o primeiro nó do circuito. Ou seja, *RESET_IN1*, *RESET_IN2*, *RESET_IN3* e *RESET_START* alteram o nó ativo para a entrada 1, para a entrada 2, para a entrada 3 e para o primeiro nó do circuito respectivamente. Por fim, a instrução *PICK_LAST_FLOATING*, faz com que o ultimo nó criado se torne o novo nó ativo e permite que a síntese continue do nó com maior ID.

Como exemplo, de circuito gerado pelo sistema empregando a heurística proposta como função de aptidão, podemos mostrar o caso de um inversor lógico visto na Figura 5. Esse circuito fornece uma saída correta, dentro dos padrões especificados e foi simulado via SPICE usando o modelo de fonte virtual de Stanford para transistores de efeito de campo com canais

constituídos de nano-tubos de carbono (Lee e Wong, 2015). É possível verificar que o modelo citado é compatível com simuladores capazes de empregar componentes descritos em Verilog A como o HSPICE, o Xyce e o NGSPICE.

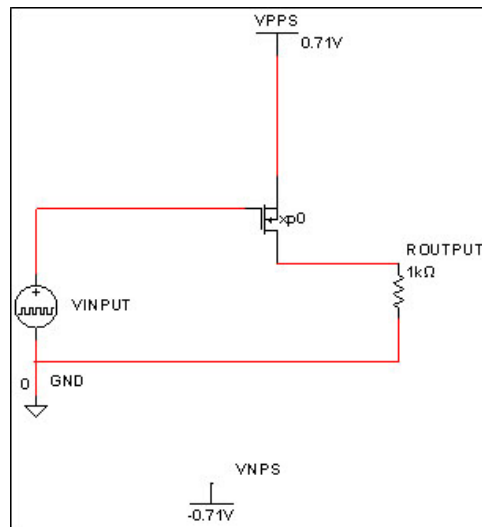


Figura 5: Circuito Inversor.

A Figura 6 ilustra a relação entre a entrada e a saída do circuito evoluído para um inversor lógico é apresentado na Figura 5.

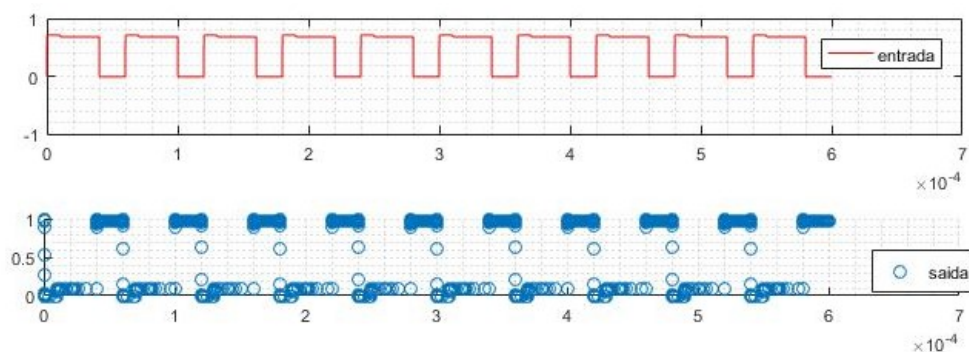


Figura 6: Comparação entre a entrada e a saída.

Na Figura 7 vemos que a saída do circuito super-posta à saída ideal a fim de mostrar a diferença de escala que mencionamos previamente. Esse circuito ao ser submetido à avaliação da função de aptidão que propomos recebe um valor de aptidão de 3.05596 e obtido após 33 gerações.

Foi também possível gerar circuitos mais complexos como o de uma porta NAND de três entradas, cujo processo de síntese levou 30 gerações, usando populações de 50 indivíduos. O circuito da Figura 8 apresenta um número de componentes grande se comparado a um circuito simples projetado por um humano, vide (Sedra e Kenneth C. Smith, 2004). Apesar disso, realiza a função que é esperada, como mostrado na Figura 9.

Destaca-se que o modo rápido como valor médio da aptidão da população decai com o número de gerações, conforme mostra a Figura 10, é resultado direto forma da função de

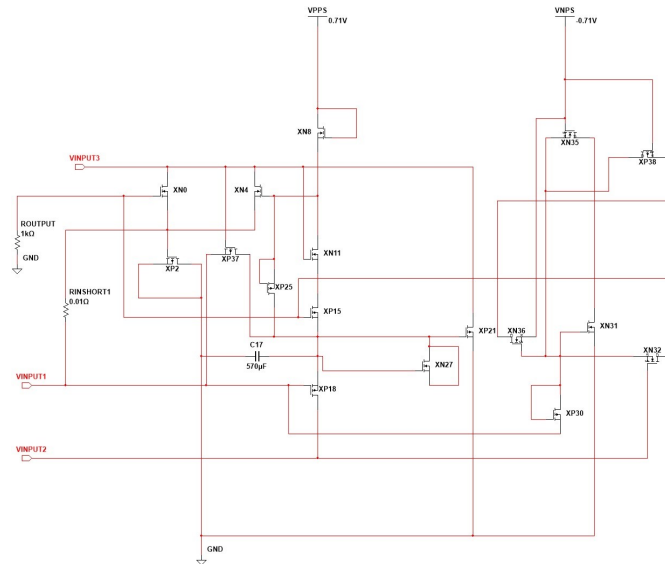


Figura 7: NAND de três entradas

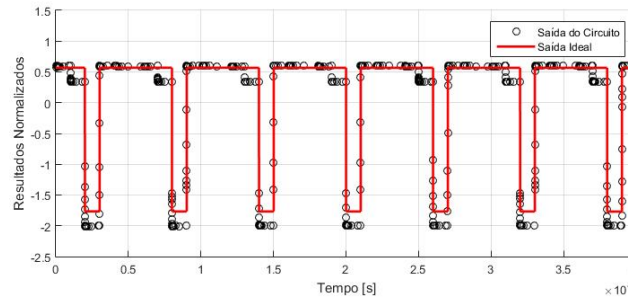


Figura 8: Saída ideal sobreposta à saída obtida

aptidão, (Bäck, et al., 2000). Ao que tudo indica, quanto mais o sistema evolucionário for capaz de diferenciar circuitos que de fato realizem a função que deles se deseje, daqueles que não o façam, mais rápida será a convergência para uma solução de boa qualidade.

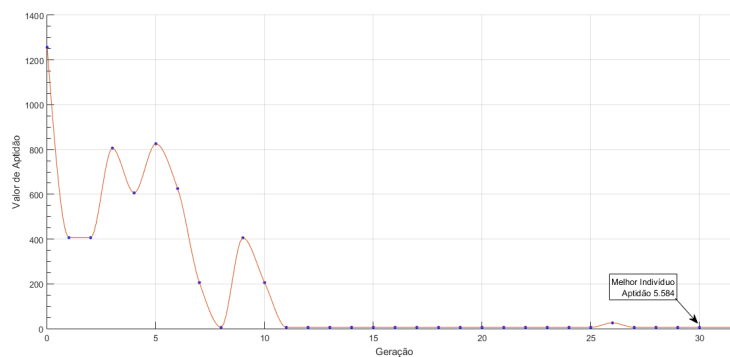


Figura 9: Aptidão média da população.

4.2 Comparação de Imagens

A métrica de comparação que expusemos nesse trabalho pode, sem muita dificuldade, ser estendida para que se aplique à comparação de objetos definidos em espaços de dimensão maior do que 1. Com efeito, a aplicação dessa heurística à comparação de imagens, por exemplo, traz muitos dos mesmos benefícios que discutimos até a presente seção. A função preserva a mesma forma, até o momento discutida, desde que fique claro que as funções, antes definidas para argumentos escalares, passam a operar sobre matrizes. Seja a Figura 10(a) usada como objeto de teste para a comparação da heurística, ora proposta, com outras medidas de similaridade em comum uso no campo de processamento de imagens.

Propomos como primeiro experimento, o uso de imagens de teste padrão com ruído sobreposto. Na Figura 10, encontra-se exibida a imagem conhecida como *Lenna*, à qual sobreposemos ruído gaussiano com média nula e diferentes níveis de variância. Procedendo desse modo obtemos imagens qualidade variada, como pode ser observado claramente na Figura 10. Na Figura 10(a), observa-se a imagem original (sem ruído acrescido). Na Figura 10(b), exibe-se o resultado da sobreposição de um ruído Gaussiano com variância (σ) de 0.01. A Figura 10(c) exibe o resultado da superposição de um ruído com $\sigma = 0.1$. Já na Figura 10(d), observa-se o resultado da superposição de ruído Gaussiano com $\sigma = 1$.

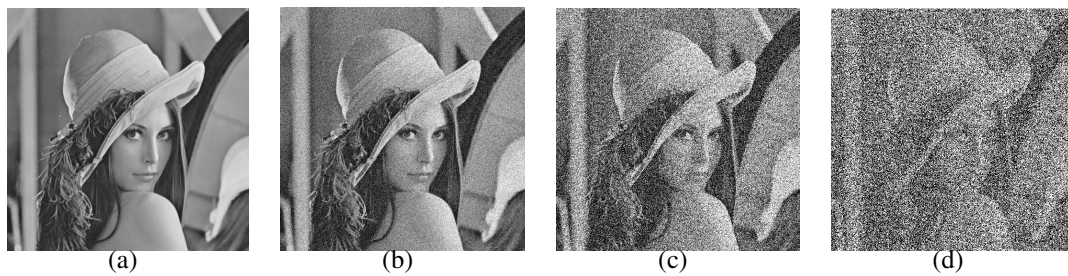


Figura 10: Lenna com ruído Gaussiano de média nula, para diferentes valores de variância

Na Figura 10 pode-se observar o efeito de diferentes níveis de ruído sobrepostos à imagem de teste. Enquanto o valor do erro médio quadrático dos pixels varia expressivamente, a variação correspondente na Heurística (que na Tabela 6 é denotado H) é bem menor, de acordo com o esperado, pois conforme dito anteriormente, ela foi originalmente desenvolvida para identificar se em meio ao ruído havia um sinal desejado.

Ao repetir o experimento acima com outra imagem de teste padrão, conhecida como *Mandrill*,

Tabela 6: Comparação da influência de ruído Gaussiano aditivo nas métricas comparadas.

σ	MSE	H
0,000	0,000	0,000
0,001	86,689	32,044
0,010	113,861	35,314
1,000	123,760	38,565

obtivemos resultados bastante similares aos do primeiro teste. Deveras, a Figura 11 ilustra o efeito da aplicação da mesma sequência de testes que descrevemos para a Figura 10.

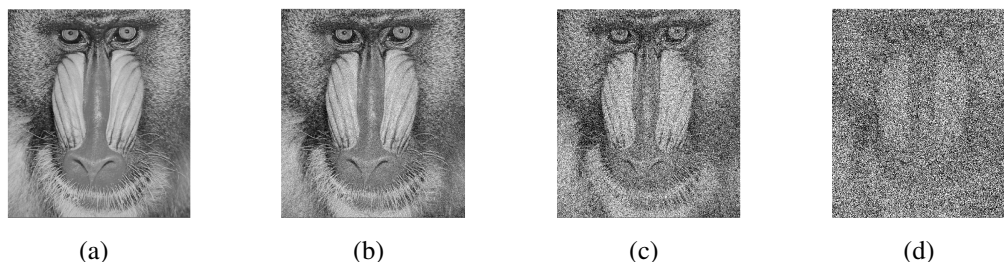


Figura 11: Mandrill com ruído Gaussiano de média nula, para diferentes valores de variância

A Tabela 7 exhibe os valores numéricos obtidos para o erro médio quadrático (MSE) e para a heurística proposta (H), de modo análogo à Tabela 6. Como pode ser observado, os resultados foram bastante próximos aos do teste com a imagem da Lenna. Isso está de acordo com o esperado, tendo em vista que em ambos os casos a imagem de teste foi sujeita a ruídos com características idênticas.

Tabela 7: Comparação da influência de ruído Gaussiano aditivo nas métricas comparadas.

σ	MSE	H
0,000	0,000	0,000
0,001	86,691	31,829
0,010	113,862	35,305
1,000	123,761	38,670

Para melhor substantiar o que afirmamos acerca da robustez da heurística exposta nesse trabalho é necessário que sejam fornecidos resultados de testes com outros tipos de distorção comuns em imagens como o chamado ruído sal e pimenta (*salt and pepper noise*), e o desfoque Gaussiano (*Gaussian Blur*). Além disso, na Figura 12, na Figura 13 e na Figura 14 demonstra-se o comportamento das medidas comparação em relação ao crescimento do nível de distorção.

A Figura 12 mostra o comportamento da métrica de comparação proposta comparado ao MSE (*Mean Squared Error*) em função da variância de um ruído aditivo Gaussiano. Pode-se observar que, o comportamento das curvas é similar sob esse tipo de ruído.

As curvas exibidas na Figura 13 mostram o comportamento da heurística e do erro médio quadrático em relação ao percentual de pixels afetados por um ruído do tipo sal e pimenta. Esse tipo de ruído consiste de um processo de "ligar e desligar pixels" e, portanto, leva à variações abruptas na imagem. A introdução de variações abruptas pode ser diretamente associada ao aparecimento de componentes de alta frequência no espectro de Fourier da imagem.

A Figura 14 ilustra o comportamento de ambas as métricas de comparação exibidas em função da variância de um filtro do tipo desfoque Gaussiano (*Gaussian Blur*). É interessante notar que o filtro gaussiano tende a atenuar as componentes de alta frequência no espectro de Fourier da imagem, de modo que esse teste complementa aquele realizado com ruído sal e pimenta.

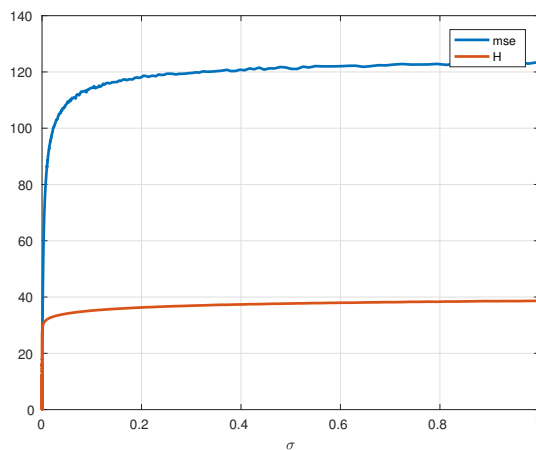


Figura 12: Ruído Gaussiano aditivo.

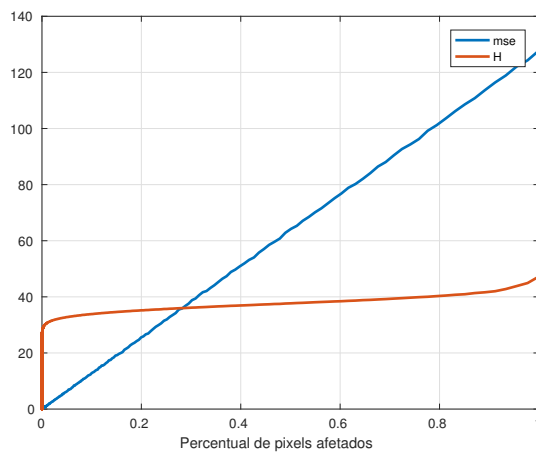


Figura 13: Ruído sal e pimenta.

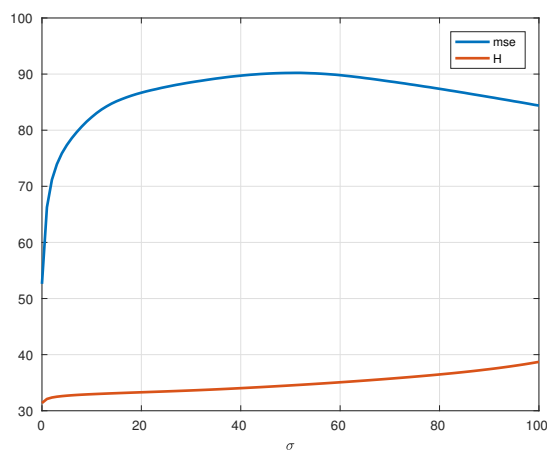


Figura 14: Desfoque Gaussiano.

5 Conclusão

Durante a elaboração de um sistema de síntese, foi observado que dois fatores influenciavam majoritariamente o seu desempenho: a codificação do problema e a função de aptidão. A função foi iterativamente refinada durante o desenvolvimento do sistema de síntese. Por meio de uma análise simultânea de um sinal nos domínios do tempo e da frequência, conforme explicado, obteve-se uma função capaz de discernir entre circuitos desejáveis e indesejáveis com maior precisão. A função de aptidão desenvolvida, no entanto, pode ser encarada como um critério para a comparação de conjuntos de dados arbitrários, como mencionado anteriormente. Seu uso, portanto, pode ser estendido a problemas diferentes do que lhe deu origem. Além da generalidade, ela apresenta um comportamento bastante desejável na presença de sinais ruidosos. Dessa característica, altamente desejada em ambientes que contenham quantidade grande de ruído, surgiu a ideia de aplicarmos a nossa técnica como método de comparação de outros tipos de sinais, tais como imagens ou sequências delas, já que nessas circunstâncias, a variedade de fontes de ruído possíveis aumenta incomensuravelmente. É interesse de pesquisa futura a extensão desse método à comparação e ordenação de modelos mediante o nível de aderência de suas previsões às respostas apresentadas pelo sistema por eles representados, possibilitando não só autonomia em processos teste automatizado de sistemas, quanto a ampliação do uso de técnicas de otimização bio-inspiradas na formulação de modelos de sistemas dinâmicos.

REFERENCIAS

- Bäck, T., Fogel, D. B. & Michalewicz, Z., 2000. *Evolutionary Computation I*. Bristol And Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Lee, C.-S. & Wong, H.-S. P., 2015. Stanford Virtual-Source Carbon Nanotube Field-Effect Transistors Model.
- Lohn, J. D. & Colombano, S. P., 1999. *A Circuit Representation Technique*. IEEE Transactions On Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 3, Setembro, pp. 205-219.
- Kallenberg, O., 1997. *Foundations of Modern Probability*. New York: Springer-Verlag.
- Sedra, A. S. & Kenneth C. Smith, K. C., 2004. *Microeletrônica*. 5ª ed. s.l.:Prentice Hall.
- Oppenheim, A. V. & Schafer, R. W., 1989. *Discrete-Time Signal Processing*. *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989: Prentice-Hall.