

Gerador de Sinal Ruído Correlacionado: Modelagem, Simulação e Proposta de Inovação Tecnológica

Por

EMILSON RIBEIRO NETO

Orientador:

PROF. DR. ISMAEL VICTOR DE LUCENA COSTA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade de Brasília.

UnB - FUP - Planaltina - DF

EMILSON RIBEIRO NETO

GERADOR DE SINAL RUÍDO CORRELACIONADO: MODELAGEM,
SIMULAÇÃO E PROPOSTA DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

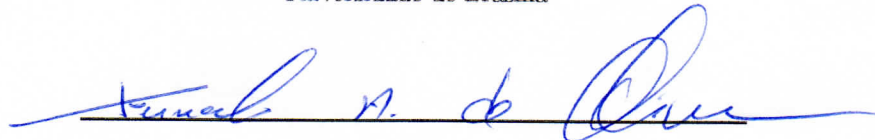
Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em Ciência
de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciência de Materiais da Universidade de Brasília.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2017

BANCA EXAMINADORA



Professor Dr. Ismael Victor de Lucena Costa – Presidente da Banca
Universidade de Brasília



Professor Dr. Fernando Albuquerque de Oliveira – Membro Efetivo, Externo ao PPG-CIMA
Universidade de Brasília



Professor Dr. Paulo Eduardo de Brito – Membro Efetivo
Universidade de Brasília

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RR484g Ribeiro Neto, Emilson
GERADOR DE SINAL RUÍDO CORRELACIONADO: MODELAGEM,
SIMULAÇÃO E PROPOSTA DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA /
Emilson Ribeiro Neto; orientador Ismael Victor de
Lucena Costa. -- Brasília, 2017.
132 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciência de
Materiais) -- Universidade de Brasília, 2017.

1. Gerador de Sinal Ruído Correlacionado,
modelagem, simulação e inovação tecnológica. 2.
Ressonância estocástica, caracterização de materiais,
autocorrelação, correlação. I. de Lucena Costa, Ismael
Victor , orient. II. Título.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Sâmia Machado Ribeiro e filha Alice Ribeiro Ponce de Leon; aos meus pais Mirson José Lima Ribeiro e Heleneide Mangueira Carneiro; ao meu irmão Randolpho Gonçalves Dias e sobrinho Daniel Marques Dias; e aos meus avós Emilson Ribeiro, Mirta Lima Ribeiro e, em especial, à Francisca Mangueira Carneiro (in memoriam).

∨

Agradecimentos

Dedico e agradeço este trabalho primeiramente aquele que em todas as coisas tem me sustentado, dado conhecimento, sabedoria, aberto oportunidades e cuidado de mim e minha família, comprovando a cada dia seu imensurável amor, me sustentando em todas as necessidades e me feito encontrar no caminho pessoas maravilhosas. Ao Deus onisciente, onipresente e onipotente; ao único que é digno de receber a honra e a glória, a força e o poder. Ao Rei Eterno imortal, invisível mas real que é digno de todo louvor: Iavé; à Yeshua (Jesus) seu filho, o Cristo, e ao Espírito Santo que transformou minha vida e tem feito de mim um trabalho de aperfeiçoamento me tornando um ser humano melhor a cada dia por sua misericórdia.

Ao grande e digníssimo professor Ismael por toda sua dedicação, humanidade, simplicidade, paciência, ajuda, generosidade e por sua grande capacidade como professor e como ser humano. Foi pedra fundamental na construção na construção desde edifício. Serei eternamente grato.

Aos professores Paulo Brito, Alex Fabiano, Renata Aquino e Armando Maroja por tamanho empenho e dedicação na formação de nós estudantes.

Agradeço a minha esposa Sâmia que tem me apoiado com sua imensa compreensão, amor e incentivo; e à minha filha Alice que tem me proporcionado imenso prazer e alegria dia a dia, combustível perfeito para motivar meus trabalhos e minha vida. Papai ama e te amará para eternidade. Sem vocês, por certo, este degrau e trabalho não existiria.

Aos meus pais Mirson Lima Ribeiro e Heleneide Manguiera Carneiro; irmão Randolpho Gonçalves Dias Terceiro por terem me apoiado e incentivado neste trabalho. Aos meus avós Emilson Ribeiro e Mirta Lima Ribeiro por todo apoio e inspiração para vencer na vida e, em especial, à minha tão querida e amada avó Francisca Manguiera Carneiro, em memória, que tanto me apoiou, se dedicou, me sustentou em vida e tanto se alegrou comigo quando ingressei neste programa de mestrado mas que seu corpo físico não a suportou para comemorarmos junto este término. Agradeço a todos os meus familiares tios(as), primos(as) e sobrinho Daniel.

Aos irmãos da Igreja de Cristo na Capital por suas orações, apoio e por tanto nos ajudar e suportar as adversidades da vida. Agradeço em especial aos meus amigos Otávio Calegari e Francisco Lira.

Ao grande amigo e professor José Ivan Carnaúba Accioly por ter me repassado tantos ensinamentos acerca do Reino e do Pai Celestial, além da minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de mestrado Gerson, Edivaldo, Paulo, Hudson, Lucas, Marcos, Ingrid e Rogério.

Resumo

Nesta dissertação se analisa a ocorrência do fenômeno da ressonância estocástica pela inserção de sinal-ruído, seus efeitos e requisitos para ocorrência do fenômeno. Entre os principais requisitos para ocorrência do fenômeno, encontramos a necessidade de existência de uma correlação entre uma fonte de sinal com o sinal-ruído estocástico inserido. Quando ocorre tal correlação entre os sinais em determinado instante de tempo, ocorre o fenômeno de ressonância estocástica que provoca a amplificação do sinal em picos.

A partir da análise do fenômeno supracitado, é proposto uma inovação tecnológica de um sistema gerador de sinal-ruído estocástico correlacionado, capaz de induzir e facilitar a ocorrência do fenômeno de ressonância estocástica por meio de um modelo matemático, inspirado em uma tese de doutorado, que atende o requisito principal de gerar sinais correlacionados a partir de dados de correlações conhecidas. Neste sentido o sistema é definido com todos os seus requisitos de funcionamento e composição neste trabalho.

O trabalho faz uso de simulações para validar o funcionamento da proposta e comprovar a eficácia do modelo matemático na geração de sinais correlacionados a partir de dados de correlações inseridas no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Ressonância estocástica, gerador de ruído correlacionado, sistema, simulação, inovação tecnológica.

Abstract

In this dissertation we analyse the occurrence of the stochastic resonance phenomenon for the insertion of signal-noise, their effects and requirements for the phenomenon occurrence. Among the main requirements for the occurrence of the phenomenon, we found the necessity of the existence of a correlation between the signal source with the signal-noise stochastic added. When exist a correlation between the signals in a specific instant of time, the stochastic resonance phenomenon occurs causing the signal amplification in peaks.

From the analysis of the aforementioned phenomenon, it's proposed a technological innovation of a generator system of signal-noise correlated, capable of inducing and facilitating the occurrence of the the stochastic resonance phenomenon by means of a mathematical model, inspired by a doctoral thesis, that meets the main requirement of generating correlated signals from datas of known correlations. In this respect, the system is defined with all your requirements of operation and composition in this paper.

This paper makes use of simulations to validate the operation of the proposal and prove the effectiveness of the mathematical model in the generation of correlated signals from datas of correlations inserted in the system.

KEYWORDS: Stochastic resonance, correlated noise generator, system, simulation, technological innovation.

Sumário

1 Introdução	1
1.1 O uso de ressonância estocástica na ciência	1
1.2 Sobre este trabalho	2
2 Modelagem e Simulação Computacional	3
2.1 Do modelo científico de simulação	4
2.2 Os tipos de variáveis	5
2.3 Os tipos de modelos	6
2.4 Classificação quanto aos modelos de simulação:	6
2.5 Passos para simulação	7
2.4.1 Descrição de passos para simulação segundo Banks	8
3 Análises, medições e contabilização de ruídos	11
3.1 Função Densidade de Probabilidade	11
3.2 Análise de sinais determinísticos e não determinísticos (ruído).	12
3.3 Análise de densidade espectral de potência	13
3.4 Análise de densidade espectral de energia.	14
3.5 Processos estocásticos	15
3.6 Análise de correlação	16
3.6.1 Análise de autocorrelação	17
4 Sinal ruído	20
4.1 Ruído.	20
4.2 Taxonomia do sinal ruído	21
4.2.1 Ruído branco	22
4.2.2 Ruído <i>shot</i>	24
4.2.3 Ruído rosa.	25
4.2.4 Ruído vermelho	26
4.2.5 Ruído caótico.	27
4.3 Experimento prático de sinais-ruído caóticos.	29
14.3.1 Resultados do experimento	31
5 Fenômeno fotoacústico	32
5.1 Interação da luz com os sólidos.	33
5.1.1 Refração	33

5.1.2 Reflexão.	33
5.1.3 Absorção.	34
5.2 Modelo de célula fotoacústica.	35
5.3 Geração de ondas fotoacústicas	36
5.3.1 Geração acústica por difusão térmica	36
5.3.2 Geração acústica por expansão térmica.	37
5.3.3 Geração acústica por flexão termoelástica	37
5.3.4 Geração acústica por efeito fotobárico.	38
5.4 Processo de captação e obtenção de resultados	38
5.5 Estudos recentes	39
6 Ressonância Estocástica	41
6.1 Definição de ressonância estocástica e seus benefícios	41
6.2 Sistemas de limiares	43
6.2.1 Ressonância estocástica de sub-limiar.	43
6.2.2 Ressonância estocástica de supra-limiar.	44
6.2.3 Sistema genérico de ruído não linear (sub-limiar).	45
6.2.4 Array de sistemas limiares idênticos (supra-limiar)	46
6.3 Quantização de sinais de sistemas de limiares	47
6.4 Máximo efeito de ressonância estocástica.	47
7 Gerador de Ruído Aleatório Correlacionado	49
7.1 Equação geradora de ruído correlacionado	49
7.2 A função aleatória descorrelacionada $\phi(\omega)$	50
7.3 A equação geradora em tempos futuros	51
7.4 A correlação da equação geradora.	51
7.5 Transformada de cosseno	53
7.6 A amplitude a partir da correlação da equação geradora.	54
8 Concepção, simulação e experimentação de gerador de sinais correlacionados	56
8.1 Concepção	56
8.2 Da simulação computacional	58
8.2.1 A metodologia da simulação computacional.	58
8.3 Dos resultados dos experimentos em simulação computacional correlação de função exponencial.	60
8.4 Dos resultados dos experimentos em simulação computacional correlação de função decrescente	65

8.5 Dos resultados dos experimentos em simulação computacional de correlação obtida de sinal simulado.	67
8.6 Dos resultados finais da simulação computacional	71
8.7 Da simulação experimental	71
8.7.1 A metodologia da simulação experimental.	71
8.8 Dos procedimentos executados e resultados da simulação experimental.	72
9 Proposta de sistema dispositivo de gerador de sinal correlacionado real	79
9.1 Significados dos símbolos da notação BPM.	80
9.2 Dos blocos funcionais.	81
9.3 Detalhamento dos blocos funcionais da proposta	82
9.3.1 Entrada de sinal.	82
9.3.2 Dos blocos conversores analógico/digital	82
9.3.3 Computador real-time gerador de ruído estocástico correlacionado	83
9.3.4 Conversor digital/analógico.	88
9.3.5 Circuito gerador de ruído estocástico descorrelacionado	88
9.4 Dos processos de trabalho da proposta.	88
9.4.1 Macro processo.	89
9.4.2 Subprocesso “gerar ruído correlacionado”.	89
9.4.3 Detalhamento do macroprocesso.	89
9.4.4 Detalhamento do subprocesso “gerar ruído correlacionado”	91
9.4.5 Saída principal.	92
9.5 Desenvolvimento para estudos futuros.	92
9.5.1 Demonstração dos blocos funcionais da proposta para estudos futuro	94
9.5.2 Demonstração do macroprocesso da proposta para estudos futuro	95
9.5.3 Descrição do macroprocesso da proposta para estudos futuro.	95
9.5.4 Dos blocos funcionais da proposta para estudos futuro	101
10 Conclusão	104
11 Referências	106
A Apêndice - Programa 1-Calcula_numeros_aleatorios2.py, 2-Calcula_correlacao.py e RealChua.m	110

Lista de Figuras

1	Processo de simulação definido por Banks. Fonte: adaptado de [25]	8
2	Representação de pulso aleatório	14
3	Gráficos de correlações. Fonte: [7]	17
4	Representação de sinal ruído branco gaussiano (a) e uniforme (b) registrado por gravação. Fonte: adaptado de [44]	23
5	Histograma da função de densidade de probabilidade para sinal ruído branco gaussiano (a), uniforme (b) e exemplo de representação da extração do histograma gaussiano (c) e uniforme (d) em relação ao sinal. Fonte: adaptado de [44]	23
6	Representação da densidade espectral de potência de um ruído branco. Fonte: adaptado de Gaussianwaves <gaussianwaves.com>. Acessado em 10 out. 2016	24
7	Representação do sinal ruído <i>shot</i>	25
8	Representação de sinal ruído rosa registrado por gravação. Fonte: adaptado de [44]	26
9	Densidade espectral de potência de um ruído rosa. Fonte: Texas Instruments < http://www.ti.com > Acessado em 10 out. 2016	26
10	Representação de sinal ruído vermelho registrado por simulação. Fonte: adaptado de Texas Instruments < http://www.ti.com > Acessado em 10 out. 2016	27
11	Relação constitutiva do resistor não-linear. Fonte: [30]	28
12	Circuito de <i>Chua</i> . Fonte [30]	28
13	Arranjo do circuito resistor não-linear de <i>Chua</i> . Fonte:[30]	29
14	Atrator caótico de duplo enrolamento (double scroll) do circuito de Chua. Fonte: [30]	29
15	Esquema de montagem do circuito de <i>Chua</i> . a) circuito de <i>Chua</i> b) indutor eletrônico c) resistor não linear de <i>Chua</i>	30
16	Experimento do circuito de Chua	31
17	Polarização eletrônica resultante de uma distorção da nuvem eletrônica por um campo elétrico. Fonte: [12]	34
18	Mecanismo de absorção de fótons para materiais não metálicos em que um elétron é excitado através do espaçamento entre bandas. Fonte: [12]	35
19	Modelo de célula proposto por Rosencwaig e Gersho, 1975. Fonte: adaptado de [5]	36
20	Geração acústica por difusão térmica	36
21	Geração acústica por expansão térmica	37
22	Geração acústica por flexão termoelástica	38

23	Geração acústica por efeito fotobárico	38
24	Aparato de um sistema de espectroscopia fotoacústica e piezoelétrica utilizando espectrofonos. Fonte: adaptado de [20]	39
25	Curva típica da relação de saída do sinal-ruído (<i>signal noise ratio</i>) com a magnitude da entrada do ruído em sistema de ressonância estocástica. Fonte: adaptado de [13]	42
26	Ressonância estocástica com sinal sub-limiar periódico com ruído com transições do sinal em relação ao limiar o tornando perceptível à leitura (c). Fonte: adaptado de [13].	44
27	Ressonância estocástica supra-limiar. Fonte: adaptado de [13]	45
28	Sistema genérico de ruído não linear para obtenção do efeito de ressonância estocástica. Fonte: [13]	46
29	Representação de um <i>array</i> de sistemas idênticos para obtenção do efeito SSR. Fonte:[13]	46
30	Representação do gerador de sinais correlacionados	57
31	Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada de função exponencial e correlação de dados gerados a partir de mesmo quantitativo de amostras. a) 20 amostras, b) 100 amostras, c) 1.000 amostras, d) 10.000 amostras, e) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	62
32	Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada de função exponencial com 1.000 amostras e correlação de dados gerados com a) 1.000 amostras, b) 10.000 amostras, c) 50.000 amostras, d) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	64
33	Gráfico com resultados comparativos entre correlação de entrada com variação determinada no número de amostras inseridas versus correlação dos dados produzidos pelo gerador. a) 20 amostras, b) 100 amostras, c) 1.000 amostras, d) 10.000 amostras, e) 100.000 amostras e f) 1.000.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	66
34	Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 100 amostras e b) 10.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	68

35	Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 1.000 amostras e b) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	68
36	Resultados de simulações comparativo entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 10.000 amostras e b) 1.000.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	69
37	Resultados de simulações comparativo entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com resolução de 100.000 amostras (itens a e b) e 1.500.000 amostras (itens c e d). Os itens b e d são as respectivas ampliações dos gráficos correlatos. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”	70
38	Concepção simulação experimental	73
39	Amplificador operacional não-inversor	74
40	Esquema eletrônico para uso do <i>Soundcard Scope</i>	75
41	Resultados apresentados pelo <i>Soudcar Scope</i>	75
42	Simulação de circuito de <i>Chua</i> utilizando <i>Multisim</i>	77
43	Experimento do circuito de <i>Chua</i> na FUP	78
44	Descrição da simbologia do modelo BPM	81
45	Diagrama do sistema de geração de sinal correlacionado proposto	81
46	Proposta do Macro-Processo de funcionamento da proposta de sistema gerador de sinal correlacionado	89
47	Sub-processo “Gerar Ruído Correlacionado”	89
48	Blocos funcionais da proposta para estudos futuro	94
49	Macro-processo da proposta para estudos futuro	95

Tabela de Variáveis

f = Frequência;

ω = Frequência angular;

t = Tempo;

$\pi = 3.14159\ 26535\ 89793$;

c = Velocidade da luz no vácuo;

v = Velocidade de luz no meio;

ϵ = Permissividade;

μ = Permeabilidade da substância;

ϵ_r = Constante dielétrica;

μ_r = Permeabilidade magnética relativa;

n = Índice de refração;

I_0 = Feixe incidente à superfície do meio sólido;

I_T = Feixes incidente transmitidos;

I_A = Feixe incidente absorvido;

I_A = Feixe incidente refletidos;

R = Reflexividade;

B = Número de amostras por segundo;

Fm = Maior frequência de um sinal;

\bar{x} = Média;

σ^2 = Variância;

σ = Desvio padrão;

δ = Função delta de Dirac;

$x(t)$ = Sinal de um processo aleatório estacionário em razão do tempo t ;

$\eta(t)$ = Processo aleatório em razão do tempo t ;

$f(t)$ = Função integrável em razão do tempo t ;

$s(t)$ = Sinal de entrada não linear;

$T[.]$ = Transformação não-linear de um sinal de entrada em sinal de saída independente;

$\rho_x(x)$ = Função de densidade de probabilidade;

S_x = Densidade espectral de potência;

$F(\omega)$ = Transformada de Fourier;

$R_x(\tau)$ = Função de autocorrelação;

$\Phi(\omega)$ = Densidade espectral de energia;

$S_{xx}(f)$ = Densidade espectral de energia;

r_k = Coeficiente de correlação de Pearson;

c_k = Função de autocorrelação com autoconvariância;

$g(Vc_1)$ = Função do resistor não linear;

$\Upsilon(t)$ = Função geradora de processo aleatório correlacionado;

$\phi(\omega)$ = Função aleatória descorrelacionada;

$a(\omega)$ = Função de amplitude dos cossenos;

$\langle \Upsilon(t) \Upsilon(t + \tau) \rangle$ = Correlação no ensemble com flutuação no tempo da função geradora de processo aleatório correlacionado;

$C_\Upsilon(\tau)$ = Função de correlação em função da amplitude;

Fr = Frequência real de trabalho mínima de um computador;

Tm = Taxa de leitura e gravação de um sistema de armazenamento secundário;

1 Introdução

1.1 O uso de ressonância estocástica na ciência

A ressonância é o fenômeno que viabiliza um ganho de amplitude em um dado sinal entre dois sistemas oscilantes: o indutor e o induzido. A ressonância se manifesta de várias maneiras conhecidas. Entre elas temos a ressonância mecânica, ressonância acústica, ressonância eletromagnética, ressonância magnética nuclear, ressonância de spin eletrônica entre outras.

A ressonância eletromagnética é um fenômeno fortemente explorado em circuitos elétricos e em alguns fenômenos da natureza. Dentre as ressonâncias podemos destacar a ressonância estocástica.

A ressonância estocástica é um fenômeno em que um dado sinal aperiódico, em um sistema não linear, obtém ganhos de amplitude quando aplicado alguns tipos de sinal ruído tais como ruído branco uniforme, gaussiano caótico etc. Tal fenômeno é amplamente utilizado para detectar sinais, em especial, que são tão fracos que sequer conseguem ultrapassar o limiar de leitura dos equipamentos. No ramo da biomedicina a ressonância estocástica é utilizada para tornar legível sinais eletrofisiológicos neuronais pelo uso de matriz de eletrodos. Já em ciência de materiais tal fenômeno pode ser utilizado para caracterização de nanomateriais, polímeros, detecção de energia e outros em células fotoacústicas sem a necessidade de amplificadores do tipo *lockin*. Em estudos de biomedicina a ressonância estocástica também é aplicada na sincronização neuronal, estimulação transcraniana e diversos tipos de tratamentos neurológicos. Na física é aplicada na transferência de spin em nanopilares magnéticos e em dezenas de outras atividades.

A ressonância estocástica, para que ocorra, possui como requisito a existência de correlação entre o sinal de um dado sistema e o sinal-ruído aplicado. Na utilização de

sinais-ruído aleatórios constantes que possuam todo o espectro de frequência, como é o caso do ruído branco, também ocorre de forma aleatória correlação entre os sinais produzindo o fenômeno de ressonância estocástica. Com fins de maximizar uma melhor relação entre sinal-ruído e ressonância estocástica, é utilizado hoje circuitos que produzem sinais estocásticos ajustáveis com finalidade de se obter um melhor resultado possível porém sem o uso de mecanismos que consigam gerar sinais a partir de uma correlação já conhecida ou obtida no experimento previamente. Um exemplo é o uso do circuito caótico de Chua que é ajustável.

1.2 Sobre este trabalho

A formulação de um sistema que produza sinais-ruído estocásticos correlacionados com um dado sinal de interesse, viabilizaria a facilitação de um máximo efeito de ressonância estocástica. O aperfeiçoamento da exploração do fenômeno com maior incidência do fenômeno de ressonância estocástica viabilizaria a obtenção de significativos ganhos e benefícios nas diversas áreas de ciência que se utilizam deste fenômeno.

Percebendo a importância e necessidade da existência de um sistema que viabilize uma maior facilitação do fenômeno de ressonância estocástica, ou seja, maior índice de ocorrência do fenômeno, este trabalho foi desenvolvido a fim de propor um sistema gerador de sinais correlacionados, a partir de uma dada correlação conhecida, que viabilizará maior incidência do fenômeno.

Este trabalho foi desenvolvido inspirado na tese de doutorado [29] que, a partir do desenvolvimento matemático, é proposto um sistema, dentro de um processo definido, capaz de gerar sinais-ruído correlacionados objetivando uma maior facilitação e eficiência na exploração do fenômeno de ressonância estocástica.

2 Modelagem e Simulação Computacional

As técnicas de simulação são multidisciplinares e viabilizam, por meio de um modelo matemático adequado às necessidades de cada pesquisa, prever, identificar e analisar comportamentos reais de um dado ponto de interesse a partir da compreensão e estudo da fenomenologia de problemas complexos. A partir disso é possível, por simulação, ajustar e corrigir valores/cargas, prever gargalos, identificar e prever falhas, obter e aferir dados; prever expectativas futuras, consumos, viabilidade técnica, funcionalidades, efetividade, perdas, valores agregados, despesas, erros, vulnerabilidades e aspectos relevantes de interesse para previsão de dados científicos de problemas complexos em áreas tão abrangentes quanto as ciências naturais, engenharias, exatas, de materiais, biológicas, humanas, ambientais, financeiras, econômicas etc. A partir desse ponto é possível o desenvolvimento científico de novas tecnologias, aperfeiçoamento das já existentes, tomadas de decisões, validação das viabilidades técnicas e adequações prévia de projetos, ações, produtos e serviços obtidas pelos resultados das simulações [25, 33, 8].

Quanto falamos de simulação, hoje, é praticamente indissociável do termo computação. Tal afirmação se sustenta em decorrência da complexidade dos processos de simulação que utilizam grande volume de dados, centenas de variáveis, modelos matemáticos complexos e produção de milhares de dados para análise que podem ser explorados para solucionar problemas quase que exclusivamente por computação, em razão de tal complexidade, utilizando-se de algoritmos computacionais, além da viabilidade de redução significativa de tempo e custos em relação às soluções experimentais ou tratamentos analíticos complexos. Uma das vantagens da simulação computacional é o suporte de modelos interativos e flexíveis no seu processo de construção. As restrições conhecidas para simulação existem quanto há impossibilidade no desenvolvimento de modelos que possam descrever o comportamento do ponto de interesse e consecutivamente

tais problemas não podem ser simulados [36, 3].

A simulação computacional apresenta várias vantagens, embora processos de modelagem sejam geralmente complexos, pois é possível pela análise de informações pela previsibilidade de dado comportamento ao longo do tempo realizar escolhas assertivas num processo de tomada de decisão fato-baseado, comprimir e expandir o tempo na simulação em dado problema, compreender o por quê de certos fenômenos, explorar possibilidades, diagnosticar problemas, identificar restrições, desenvolver compreensões sob dado problema/fator, visualizar planos, construir consensos, preparar-se para mudanças, investir assertivamente, treinar equipes, especificar requerimentos, economia de tempo e recursos financeiros.

2.1 Do modelo científico de simulação

O conceito de modelo científico de simulação é uma abstrata representação física, matemática e/ou lógica de um sistema de entidades reais ou imaginárias de problemas complexos, o mais fidedigna possível, incluindo seus fenômenos e/ou processos com suas variáveis envolvidas, interações e funcionamentos; também utilizando deduções e inferências do comportamento real, descritos por uma estrutura artificial simplificada análoga ao fenômeno natural em que suas propriedades reflitam as observações empíricas com exatidão suficiente, qualitativa e quantitativamente, para gerar confiança no seu poder de predição [8, 33, 3, 10].

No processo de modelagem deve existir uma preocupação com os limites ou fronteiras do modelo do sistema que o representa, considerando suas aproximações físicas (escala, fenômenos físicos etc) e a nocional (conjunto de equações matemáticas ou instruções lógicas que descrevem o comportamento do sistema). O modelo deve ser completo o suficiente para responder a questão levantada, mas não tão complexo ao ponto de representar o sistema como um todo com total exatidão. Este deve ser desenvolvido

para que possa representar apenas os aspectos que afetam o desempenho do ponto a ser investigado sendo confiável quanto possível [33, 25].

Tratando-se de desenvolvimento de um modelo para simulação, este é um processo contínuo que requer conhecimento do sistema compreendendo as regras de estrutura e operação, consolidando um nível de detalhe suficiente para refletir de forma realista as características importantes do sistema sem incluir detalhes desnecessários, possua aspectos que viabilize sua atualização, evolução e sustentação básica para futuros modelos. A declaração do problema ou o problema é o elemento de controle primário na resolução de problemas com base em modelo uma vez que o problema ou objetivos dirigem o desenvolvimento do modelo a partir das necessidades das exigências do sistema especificando os detalhes dos limites e fronteiras do modelo. Nesta mesma sequência o modelo deve ser continuamente refinado, atualizado, modificado e ampliado [25].

2.2 Os tipos de variáveis

As variáveis são elementos que comportam estados ou um dados que compõe as características do sistema ao longo do tempo. Estas podem ser classificadas como variáveis endógenas, exógenas ou de estado:

- a. Variáveis de estado: armazenam ou simbolizam um dado estado do sistema.
- b. Variáveis exógenas: são independentes do sistema ou de entrada do modelo classificadas como controláveis ou não controláveis.
- c. Variáveis endógenas: são dependentes ou de saída do sistema geradas pela interação das demais outras variáveis [3].

2.3 Os tipos de modelos

Em termos de modelos há cinco tipos básicos todos de acordo com o objetivo do ponto de interesse da simulação. São eles:

- a. Modelos para estudos de previsão: objetivam a previsão de estados futuros de um determinado sistema ao longo de um tempo determinado;
- b. Modelos para estudos investigativos: objetivam obtenção de informações e formulação de hipóteses a partir de um dado comportamento apresentado pelo sistema obtidas pelas reações dos estímulos inseridos;
- c. Modelos para estudos de comparações: objetivam a avaliação dos resultados nas variações dos seus *inputs* e mecanismos de controle;
- d. Modelos para estudos específicos: objetivam a obtenção de informações e avaliação de resultados sob condições específicas de um sistema de comportamento peculiar;
- e. Modelos para estudos genéricos: objetivam avaliação de resultados através de modelos flexíveis utilizados repetidamente por um dado sistema e seus compatíveis aplicáveis [33].

2.4 Classificação quanto aos modelos de simulação

- a. Modelos determinísticos: não se permite às variáveis exógenas e endógenas serem variáveis randômicas. Também, as características operacionais devem ser relações exatas e não funções de densidade de probabilidade. Em resumo, métodos analíticos são mais eficientes que os métodos de simulação na resolução de problemas determinísticos.

- b. Modelos estocásticos: quando pelo menos uma das características operacionais é dada por uma função de probabilidade. Geralmente são mais complexos que modelos determinísticos. Deste modo, a simulação é mais adequada como método de análise e solução para os modelos estocásticos. Estes modelos são adequados à geração randômica de dados para serem utilizados nos estágios de observação ou de testes.
- c. Modelos estáticos: não consideram a variável de tempo. Nas pesquisas operacionais, geralmente a maioria dos trabalhos nas áreas da programação linear, não linear e na teoria dos jogos, têm sido relacionadas com modelos estáticos. No entanto, o uso de simulação pode não ser recomendado pelo fato de que a maioria dos modelos estáticos são completamente determinísticos. Assim, as soluções, em alguns casos, podem normalmente ser obtidas por técnicas analíticas diretas.
- d. Modelos dinâmicos: tratam a respeito de interações variáveis com o tempo (ocorrência de uma ordem temporal entre eventos)[3] .

2.5 Passos para simulação

Banks define um processo para simulação que permeia desde a formulação do problema até implementação de algo ou alguma tomada de decisão a partir dos resultados de simulação[25]:

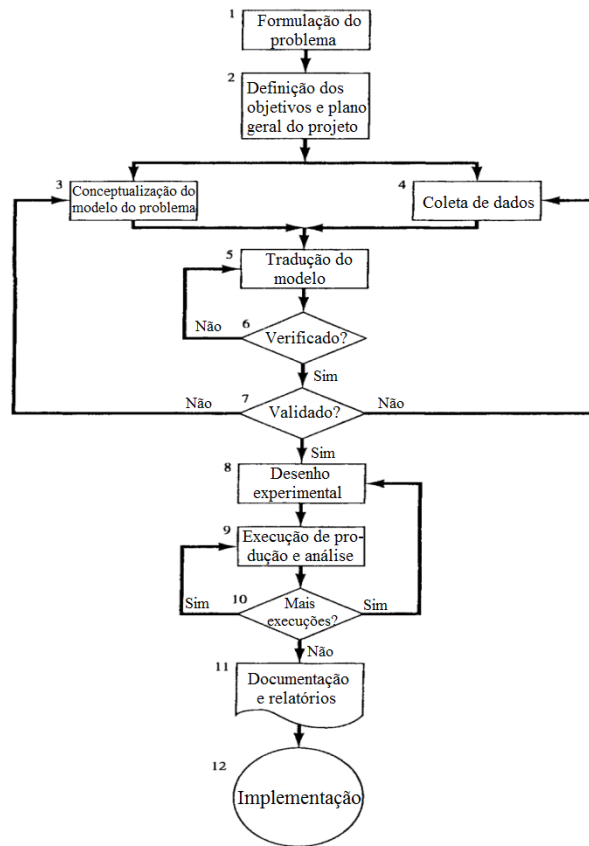


Figura 1: Processo de simulação definido por Banks. Fonte: adaptado de [25]

2.5.1 Descrição de passos para simulação segundo Banks

- 1- “Formulação do problema”: Compreensão clara do problema e definição dos acordos para simulação tendo conhecimento da possibilidade de reformulação conforme o progresso do estudo da simulação.
- 2- “Definição dos objetivos e plano geral do projeto”: A definição dos objetivos que indicam as questões que serão respondidas pelo estudo de simulação juntamente com o plano de projeto que deve incluir o estado dos cenários que serão investigados (termos, duração, equipes, hardware, softwares, condução da execução, análises,

estágios de investigação, saídas de cada estágio, custos e procedimentos).

- 3- “Conceptualização do modelo do problema”: O problema real sob investigação é abstraído pelo conceito de modelo com seus aspectos matemáticos, lógicos e relacionamentos que compõem a estrutura e os componentes do sistema.
- 4- “Coleta de dados”: Coleta de dados e organização/conversão no formato exigido e submissão para simulação eletrônica.
- 5- “Tradução do modelo” : Consiste na tradução do modelo conceituado em forma estrutural para um modelo de interpretação operável por computadores (codificação).
- 6- “Verificado?” : Verificação se a operação obteve o funcionamento adequado pela verificação dos processos, controle interativo de execução ou debugger.
- 7- “Validado?”: Realização da validação da acurácia do modelo conceitual com a representação do sistema real. "O modelo pode substituir o sistema real em sua proposta de experimento?"
- 8- “Desenho experimental”: Na simulação de cada senários decisões são tomadas de acordo com o tamanho da execução da simulação, número de execuções, maneiras de inicialização conforme requisitos.
- 9- “Execução de produção e análise”: Execução da produção e subsequente análise são usadas para estimar medidores de performance para o senário que foi simulado.
- 10- “Mais execuções?”: Baseado na análise realizada sobre as execuções que foram completadas, o analista de simulação pode terminar se novas execuções são necessárias e se novos cenários precisam ser simulados.
- 11- “Documentação e relatórios”: Documentação de todos os resultados e processos para fins de registro e identificar se mais passos deverão ser realizados, formulação

dos resultados e recomendações para serem comparados.

- 12-** “Implementação”: Implementação de ponto de interesse de acordo com os estudos da simulação.

3 Análises, medições e contabilização de ruídos

Antes de tudo é necessário compreender que ruído, neste trabalho, será caracterizado como um sinal eletrônico, mesmo tendo o conhecimento que comportamentos estocásticos podem ser caracterizados como ruído em outras áreas da ciência de outras formas, como ruído acústico, informacional etc. Os ruídos se distribuem segundo uma “função de densidade de probabilidade” e são caracterizados de três formas distintas: pelo tempo, pela função de autocorrelação do sinal e pela densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* – PSD) para análise no domínio da frequência. Afinal sinais estocásticos podem ser caracterizados por meio da sua densidade espectral de potência por uma função que mostra como a potência total do sinal é distribuído entre as componentes de diferentes frequências [14]. No capítulo 4, abordaremos especificamente as características, tipos e taxonomia dos ruídos.

Em termos práticos, o processo de medições de sinais ruído eletrônico são comumente feitas na saída de um circuito ou amplificador porque os sinais são, geralmente, mais fortes e para se evitar interferências e perturbações do medidor na blindagem, aterramento ou no equilíbrio do circuito de entrada. [51].

Adiante abordaremos conceitos fundamentais para o pleno entendimento dos processos de mensuração de ruídos que são processos estocásticos.

3.1 Função Densidade de Probabilidade

A “função de densidade de probabilidade”, $\rho_x(x)$, na estatística, é uma função que representa a distribuição de probabilidade de ocorrer uma variável aleatória seja contínua em x . Variável aleatória contínua que é toda aquela em que os possíveis resultados

abrangem todo um intervalo de números reais. O objetivo da função de densidade de probabilidade, em poucas palavras, é calcular as probabilidades de eventos associados a uma variável aleatória contínua.

A função de densidade de probabilidade $\rho_x(x)$ é toda aquela que satisfaz às seguintes propriedades,:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_x(x) \geq 0, \\ \int \rho_x(x)dx = 1. \end{array} \right.$$

No primeiro caso implica que $\rho_x(x)$ por ser uma probabilidade terá valores entre 0 e 1. O segundo caso significa que a probabilidade de obter uma variável aleatória no intervalo total será igual a 1, ou seja, 100%.

3.2 Análise de sinais determinísticos e não determinísticos (ruído)

Os sinais podem ser caracterizados estatisticamente pelo tempo, em sinais de potência e em sinais de energia.

A caracterização no tempo de sinais ruído é realizada mediante suas propriedades estatísticas tais como média ($\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$), variância ($\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$), desvio padrão (σ), correlação entre dois sinais e autocorrelação de um sinal com ele mesmo (é muito comum utilizar apenas o termo correlação, neste ultimo caso, sabendo-se que a análise de correlação de um sinal consigo mesmo é a autocorrelação); uma vez que sua distribuição se dá segundo uma “função de densidade de probabilidade”. Nos casos de análise estatística da variância em que o universo amostral é desconhecido, porém estimado, é utilizado o denominador $n - 1$ para que a variância não se torne um estimador tendencioso e é utilizada a expressão de variância $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$.

A caracterização de sinais em potência se dá pela análise de densidade espectral de potência (*power spectral density* - PSD) que, em poucas palavras, objetiva medir a força em cada frequência dentro de um espectro contínuo para caracterizá-las, em sinais aleatórios, por faixa de frequência unitária (exemplo largura de banda de 1Hz). Os sinais de potência são tidos como aqueles que possuem energia infinita, mas com uma potência média finita não possuindo uma transformada de Fourier em tempo discreto.

A caracterização de sinais em energia se dá pela análise de densidade espectral de energia (*energy spectral density* - ESD) que, em poucas palavras, objetiva descrever como a energia de um sinal com função integrável de energia finita, ou série temporal, é distribuída com a frequência utilizando o quadrado da magnitude da transformada de Fourier da função que caracteriza o sinal. A ESD é uma função que expressa a distribuição de frequência de energia no tempo $x(t)$ do sinal utilizada em sinais transitórios.

3.3 Análise de densidade espectral de potência

A densidade espectral de potência, S_x descreve como a potência de um sinal, $x(t)$, seja ele aleatório ou determinístico, se distribui na frequência em termos de magnitude. Em sinais determinísticos o conteúdo de frequências pode ser determinado por meio da transformada de Fourier $F(\omega)$ em que ω é a frequência angular. Já em processos aleatórios, em razão da impossibilidade de descrição dos sinais por expressões matemáticas determinísticas e consecutivamente não ser possível calcular a transformada de Fourier, a caracterização destes é feita pela densidade espectral de potência obtida a partir da transformada de Fourier da função de autocorrelação de um processo estacionário, descrevendo, em magnitude do conteúdo espectral, excluindo-se informações de fases, como um sinal de uma série é distribuída com a frequência por unidade de banda e é expressa por Watt por radiano por segundo (W/rad/s) ou Watt por hertz (W/Hz).

[52, 18].

$$S_x = F(R_x(\tau)) \quad (3.1)$$

sendo S_x = a densidade espectral;

$F()$ = a transformada de Fourier;

$R_x(\tau)$ = a função de autocorrelação do processo estacionário.

Como exemplo [6], considerando uma função $Y(t) = x(t)\cos(2\pi f_c t + \theta)$ em que $x(t)$ é um processo aleatório estacionário, θ uma variável aleatória uniformemente distribuída entre o intervalo de 0 a 2π e $f_c = \frac{4}{T_c}$ em que T_c é a duração do pulso conforme imagem, como sua função de autocorrelação definida por $R_y(\tau) = \frac{1}{2}R_x(\tau)\cos 2\pi f_c \tau$, em que $R_x = [x(t+\tau)x(t)]$, sua densidade espectral de potência S_y é a transformada de Fourier da função de autocorrelação tendo como resultado: $S_y(f) = \frac{1}{4}[S_x(f - f_c) + S_x(f + f_c)]$.

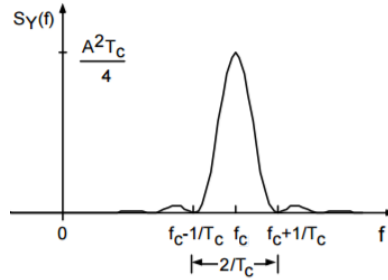


Figura 2: Representação de pulso aleatório

3.4 Análise de densidade espectral de energia

A densidade espectral de energia, $\Phi(\omega)$ ou $S_{xx}(f)$, descreve na distribuição de frequência a energia de um sinal com função integrável de energia finita $f(t)$ de um sinal $x(t)$ elevado ao quadrado da magnitude da transformada de Fourier $F(\omega)$ e ω a frequência angular.

$$\Phi(\omega) = |F(f)^2| = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \right|^2 \text{ (Joule/Hz)}$$

A partir da densidade espectral de energia é possível se chegar a densidade espectral de potência dividindo a densidade de energia esperada pelo intervalo T e tomando o limite como $T \rightarrow \infty$:

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\Phi(\omega)}{T} \text{ (Watts/Hz = Joule)} \quad (3.2)$$

3.5 Processos estocásticos

Um processo tido como aleatório ou estocástico é descrito em termos probabilísticos e analisado por propriedades estatísticas. Um processo estocástico ou aleatório é descrito como um fenômeno que possui uma família de variáveis imprevisíveis ao longo do tempo [27, 19, 32]

Dentro desta ciência estes podem ser classificados como processos não-estacionário ou estacionários. Este último subdividido em processos estacionário de sentido estrito ou sentido amplo [27].

Os processos não-estacionários são aqueles que o valor da variável cresce sem limites e sua variância aumenta com o tempo. Os processos estacionários possuem média e variância constantes ao longo do tempo de acordo com sua subclassificação:

- a) Em um dado processo aleatório, $\eta(t)$, sua função de correlação é dada por $\langle \eta(t)\eta(t') \rangle = R(t - t')$, onde $\langle \rangle$ significa a média no ensemble. Caso o processo seja de um ruído branco a sua função de correlação é dada por $\langle \eta(t)\eta(t') \rangle = \delta(t - t')$ em que δ é a função delta de Dirac. O uso do delta de Dirac expressa a ideia de um ruído ideal, ou seja, descorrelacionado. Isso significa que no processo de análise de autocorrelação o ruído possui zero correlação consigo mesmo ou todas as frequências possuem a mesma densidade espectral de potência, ou seja, plana.

- b) Processo estacionário sentido amplo: em um dado processo aleatório $x(t)$, a média do processo aleatório, $\bar{x}(t)$, é constante, ou seja, invariante no tempo $\bar{x}(t) = E[x(t)] = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) dt \right) / \left(\int_{-\infty}^{+\infty} dt \right) = \text{constante}$, e sua função de autocorrelação, $R_x(t_1, t_2)$, depende da diferença das duas variáveis aleatórias t_1 e t_2 , ou seja, $\tau = t_2 - t_1$ em que $R_x(t_1, t_2) = R_x(t_1 - t_2)$.
- c) Processo estacionário sentido estrito: todas as densidades de probabilidades, $p_x(x)$, não variam com o tempo, ou seja, não há mudanças nas características estatísticas com o tempo. $p_x(x, t) = p_x(x) = \text{constante}$.

3.6 Análise de correlação

Em processos de análises de processos randômicos os principais pontos analisados são as regularidades estatísticas e correlações. Uma correlação é uma relação entre duas variáveis mensurada por um coeficiente de correlação que mede o grau que duas variáveis influenciam uma a outra e tendem a sofrer alterações em conjunto. Tal coeficiente descreve a força e a direção da relação entre estas variáveis. Os dados podem ser representados por pares ordenados (x, y) , onde x é a variável independente (ou explanatória) e y a variável dependente (ou resposta) [7].

Há basicamente dois tipos de coeficientes de correlação, que são os de Pearson (produto-momento), que mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, e o de Spearman (ordem de posto), que avalia a relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais que não possuem taxa constante de mudanças conjuntas [46]. Neste trabalho utilizaremos o coeficiente de correlação de Pearson.

Para identificar correlações de Pearson é necessário calcular o coeficiente de correlação, que é a medida da intensidade e direção de uma relação linear entre duas variáveis

por meio da fórmula [7]:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

r_k = coeficiente de correlação;

n = número de dados

O coeficiente de correlação tanto de Person quanto de Spearman varia entre -1 e 1 e os seguintes exemplos tipos de resultados podem variar de correlação positiva forte, negativa forte, linear positiva fraca e por fim ser decorrelacionado.

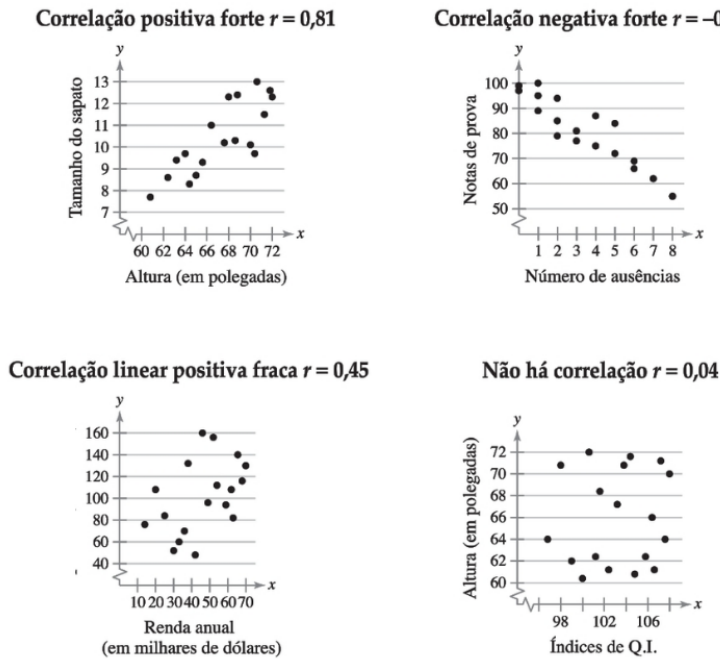


Figura 3: Gráficos de correlações. Fonte: [7]

3.6.1 Análise de autocorrelação

Uma função de autocorrelação, ou como também conhecida como correlação serial ou denominada de correlação quando se refere a análise de um único sinal, mede o grau de correlação de uma variável, em um dado instante, consigo mesma, em um instante de tempo atrasado por uma ou mais unidades de tempo, e é utilizado para avaliar o

grau de irregularidades de um dado sinal utilizada para identificarmos um modelo em uma a série temporal. Tal análise estatística é realizada para análise de sinais consigo mesma [46, 43].

Utilizando-se da equação de correção de Pearson modificando o uso apenas dos valores para único eixo medindo observações sucessivas temos a autocorrelação. Na primeira ordem o atraso é uma unidade de tempo, neste caso o coeficiente de correlação simples das primeiras observações $N - 1$, no caso $(x_t, t = 1, 2, 3, \dots, N - 1)$ e a próxima observação $N - 1$ $(x_t, t = 2, 3, 4, \dots, N - 1)$:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+1} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{N-1} (x_{t+1} - \bar{x}_2)^2}} \quad (3.4)$$

onde \bar{x}_1 é a média das primeiras observações N-1 e \bar{x}_2 a média das últimas observações N-1

Simplificando o denominador da equação por aproximação para um valor de N muito grande, ignorando a diferença entre subperíodo \bar{x}_1 e \bar{x}_2 assim como a diferença entre a somatória das observações de 1 até $N - 1$ e de 2 até N , obtemos a seguinte aproximação de r_k generalizada para fornecer a correlação entre observações de separadas por k passos de tempo:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

Uma outra medida de análise é a função de autoconvariância, que mede o grau de interdependência (ou inter-relação) numérica entre duas variáveis aleatórias que apresenta valores zero para variáveis totalmente independentes que é representada pela equação [43]:

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (3.6)$$

Combinando as equações r_k e c_k em que a autoconvariância para o atraso 0, c_0 , temos a seguinte equação [43]:

$$r_k = \frac{c_k}{c_0} \quad (3.7)$$

Desta forma a equação de alternativa da autocorrelação com autoconvariância pode ser reescrita como[43]:

$$c_k = \frac{1}{(N - K)} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (3.8)$$

4 Sinal ruído

4.1 Ruído

O termo ruído, de uma maneira geral, é quase sempre associado aos fenômenos acústicos sonoros incômodo e, em termos de sinais elétricos, como sinais que podem causar interferências, distúrbios ou perturbações não desejáveis. Dependendo do caso, o ruído pode ser desejável, por exemplo, os que provocam limites nas performances de sistemas. Na verdade, o conceito de ruído é muito mais amplo e não apenas restrito à sinais elétricos e acústicos. O ruído pode ser verificado em diversos fenômenos, de áreas distintas, desde que caracterizados por sua definição específica, e ocorrem de modos diferentes na natureza tais como a flutuação térmica de resistências em semicondutores, atividades elétricas do coração, atividades sísmicas, níveis de insulina em diabéticos, comportamento de bolsa de valores, circuitos elétricos com comportamento caótico etc.

O ruído, por definição, é um fenômeno randômico que não podem ser descrito por uma função específica à frente de sua ocorrência em razão da sua natureza aleatória e não determinística. Em razão da sua natureza aleatória e pela sua distribuição, os ruídos podem ser descritos por uma função de densidade de probabilidade e analisados estatisticamente. Assim é possível prever algumas características estatísticas tais como descrição da grandeza e velocidade da alteração dos dados, permitindo uma classificação dos diferentes tipos de ruído inserindo-os em uma taxonomia tais como: ruído branco, *shot*, ruído rosa, ruído colorido, ruído caótico e outros [44, 51, 13].

Em razão da natureza deste trabalho, que envolve simulação de sinais eletrônicos, os ruídos serão tratados dentro do escopo do trabalho. A taxonomia de ruído a ser apresentada possui aplicação universal.

4.2 Taxonomia do sinal ruído

Como já abordado, os ruídos são geralmente analisados no âmbito estatístico e podem ser classificados a partir do teor da densidade espectral de potência dos sinais obtida pela transformada de Fourier do sinal.

Através de análises da densidade espectral de potência foram identificados ruídos com vários comportamentos de densidade espectral. E disso definiu alguns nomes. Quando a densidade espectral é constante costuma-se ser chamado de ruído branco, quando é constante e proporcional à média da corrente de ruído *shot*, quando proporcional a $\frac{1}{f}$ de ruído rosa e $\frac{1}{f^2}$ de ruído colorido. Obtemos assim uma taxonomia específica. Vale ressaltar que a taxonomia é obtida sem considerar a magnitude do ruído pois, neste caso, diferentes classificações seriam possíveis e não equivalente a supracitada [44].

Tipo	Descrição	Densidade espectral	Presença	Exemplo de fontes
Térmico (ruído de Johnson) ou ruído branco	Originário pela flutuação térmica de componentes eletrônicos e é decorrelacionado	Constante	Sempre (noise floor)	Resistores que produzem ruídos aleatórios decorrelacionados por flutuação térmica.
Shot (tiro)	Originado pela variação aleatória na emissão de elétrons de uma superfície do cátodo, que produz uma corrente de ruído e é caracterizada por um espectro do ruído branco até uma certa frequência	Constante	Sempre (noise floor)	Difusão através da base do transistor, que apresenta geração e recombinação de pares elétrons-buracos.
<i>Flicker</i> , ou ruído rosa, ou ruído colorido ou $1/f$	Afeta circuitos integrados lineares e o espectro de frequências como a densidade espectral de potência é $1/f$. Tem-se o nome de ruído rosa por ser intermediário entre o ruído branco e o vermelho (popcorn) e predominante em fenômenos de baixa frequência	$1/f$	Variável	No processo de união entre contatos.
<i>Popcorn</i> , ou ruído vermelho, ou marrom, ou ruído browniano ou ruído colorido	Afeta circuitos integrados lineares e o espectro de frequências como a densidade espectral de potência é $1/f^2$. O som amplificado tem o aspecto de um estouro de pipocas.	$1/f^2$	Variável	Origem em defeitos em díodos e semicondutores (impurezas metálicas).
Ruídos Caóticos	Circuito complexo que apresenta em sua saída comportamento dinâmico estocástico com ajustes desde funcionamento periódico à caótico.	Ajustável de sinais periódicos à constantes (gaussianos e uniformes)	Ajustável	Origem por meio de um circuito complexo concebido especificamente para obtenção de resultados dinâmicos estocásticos

Tabela 1: Resumo taxonomia de ruído

4.2.1 Ruído branco

Também conhecido como ruído térmico ou ruído de Johnson em circuitos elétricos, possui processo estocástico decorrelacionado de distribuição estatística gaussiana ou uniforme, se distribui no espectro em todos os comprimentos de onda, o que provoca uma densidade espectral constante (plana). Um dado processo aleatório $x(t)$ é tido como branco quando sua autocorrelação é igual a zero em instantes de tempos diferentes, ou seja, como exemplo $t_1 \neq t_2$.

No âmbito de sinais e circuitos elétricos possui flutuação randômica de voltagem e pode ser originado pelo movimento dos elétrons livres em um circuito. Como o ruído

ocorre em razão da natureza do movimento dos elétrons este não pode ser eliminado. Em circuitos eletrônicos uma fonte comum são os resistores. [51, 44, 42, 26].

O termo ruído branco tem origem em uma analogia à luz branca no tocante a distribuição de força que é uniforme nas bandas de frequência da luz visível.

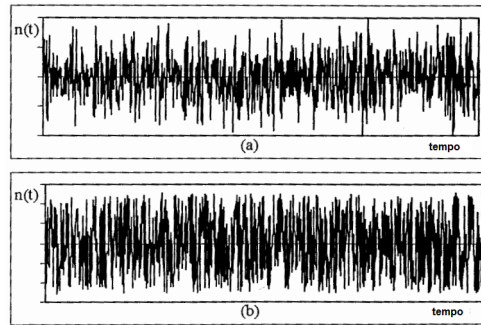


Figura 4: Representação de sinal ruído branco gaussiano (a) e uniforme (b) registrado por gravação. Fonte: adaptado de [44]

Os ruídos branco gaussiano e uniforme podem ter função de densidade de probabilidade totalmente diferentes, porém com a mesma característica de densidade espectral de potência, ou seja, densidade constante.

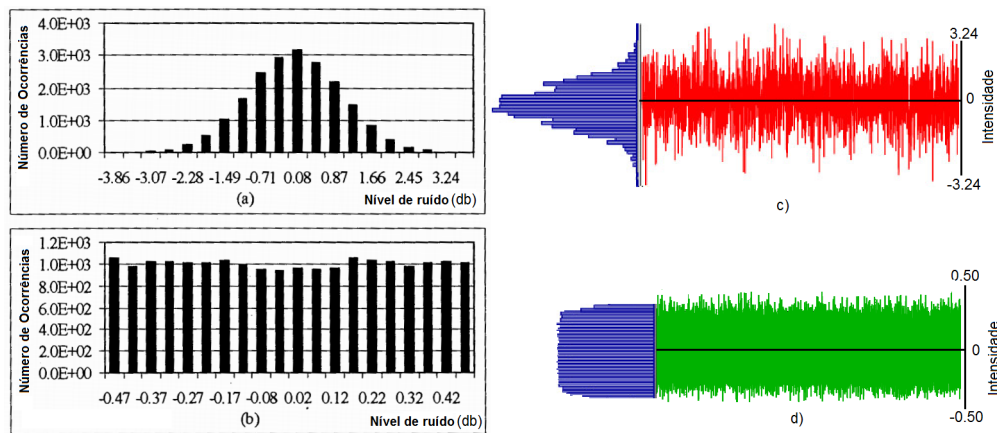


Figura 5: Histograma da função de densidade de probabilidade para sinal ruído branco gaussiano (a), uniforme (b) e exemplo de representação da extração do histograma gaussiano (c) e uniforme (d) em relação ao sinal. Fonte: adaptado de [44]

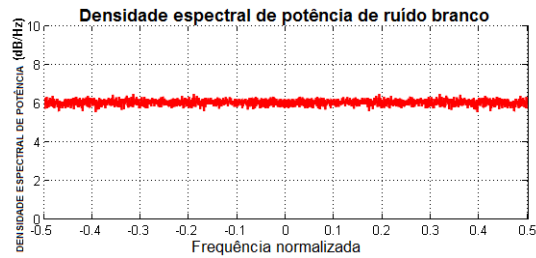


Figura 6: Representação da densidade espectral de potência de um ruído branco. Fonte: adaptado de Gaussianwaves <gaussianwaves.com>. Acessado em 10 out. 2016

4.2.2 Ruído *shot*

O ruído *shot*, ou também conhecido como corrente de ruído, possui como característica principal densidade espectral constante proporcional a média da corrente e encontra-se apenas dentro de um espectro limitado em relação ao ruído branco. Sua distribuição de probabilidade pode ser modelada por processo *Poisson*.

Este fenômeno ocorre devido a flutuação aleatória na emissão de elétrons de uma superfície do cátodo que produz uma corrente ruidosa através de uma barreira de potencial ou pela variações aleatórias na difusão de portadoras de carga em semicondutores (diodo ou transistor). Em resumo este tipo de ruído resulta de que a corrente não é um fluxo contínuo mas a soma de impulsos discretos, cada um correspondendo a uma transferência de elétrons através do condutor [42, 44].

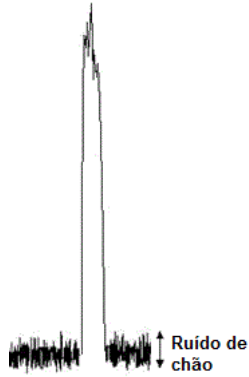


Figura 7: Representação do sinal ruído *shot*.

4.2.3 Ruído rosa

Também conhecido como ruído *Flicker*, colorido, de contato ou $\frac{1}{f}$, estes termos são utilizados pois é tido como meio termo entre o ruído branco e vermelho. Como característica fundamental é um ruído estocástico como densidade espectral de potência $\frac{1}{f}$, ou seja, inversamente proporcional à frequência, de magnitude gaussiana.

Na eletrônica é conhecido também como ruído de contato causado pela flutuação da condutividade devido as imperfeições do contato entre dois materiais quando são unidos (chaveamento dos interruptores de um *relay* por exemplo) [51].

Uma de suas fontes artificiais é pela "meia integral" de um processo de ruído branco e consecutivamente elevado seu resultado ao quadrado para se obter o espectro de $\frac{1}{f}$. Muito utilizado por engenheiros de áudio para calibração uma vez que este possui a capacidade de manter igual sua potência em oitavas sonoras [22].

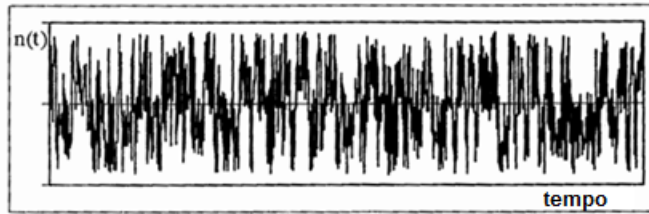


Figura 8: Representação de sinal ruído rosa registrado por gravação. Fonte: adaptado de [44]

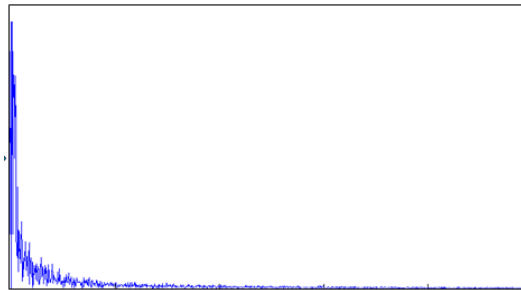


Figura 9: Densidade espectral de potência de um ruído rosa. Fonte: Texas Instruments <<http://www.ti.com>> Acessado em 10 out. 2016

4.2.4 Ruído vermelho

O ruído vermelho, também conhecido como *popcorn*, marrou ou ruído de explosão; possui a peculiaridade do som produzido, quando amplificado, ser parecido com o som de estouro de pipocas. Daí se origina o termo “*popcorn*” que significa pipoca em português.

Sua característica principal é de possuir rajadas que variam de microssegundos para segundos, com taxa de repetição não periódica que provocam mudanças discretas em níveis, com amplitude fixa, já que é uma característica de defeitos de junção no processo de manufatura proveniente de impurezas metálicas. Tipicamente, a amplitude é de 2-100 vezes o ruído térmico [51].

A densidade espectral de potência de ruído *popcorn* é da ordem $\frac{1}{f^2}$.

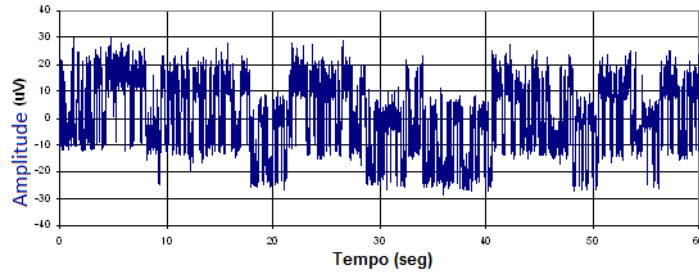


Figura 10: Representação de sinal ruído vermelho registrado por simulação. Fonte: adaptado de Texas Instruments <<http://www.ti.com>> Acessado em 10 out. 2016

4.2.5 Ruído caótico

Geralmente ruído é considerado um sinal aleatório que em tese não pode ser descrita por uma função específica. Alguns trabalhos têm mostrado que um ruído pode também pode ser a saída de sistemas tidos como caóticos, que são sistemas não lineares determinísticos. O circuito de *Leon Chua*, também conhecido como circuito de *Chua*, é um exemplo sistema dinâmico complexo em que se pode ser observado em suas saídas um sinal ruidoso. Isto pode ser utilizado porque este circuito pode ser ajustado para produzir, de acordo com ajustes desejados, ruídos gaussianos e uniformes com características estatísticas e espectrais de interesse a partir de sinais periódicos a comportamentos caóticos ajustáveis [44, 13].

O circuito de Chua, que produz comportamentos caóticos ajustáveis, é descrito pelo seguinte sistema de equações diferenciais 4.1 [30, 47],

$$\begin{cases} C_1 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{R}(y - x) - g(x) \\ C_2 \frac{dy}{dt} = \frac{1}{R}(x - y) + z \\ L \frac{dz}{dt} = -y \end{cases} \quad (4.1)$$

em que $g(V_{C_1})$, que é a equação do resistor não linear, ou também conhecido como

diodo de Chua, como o nome já diz, apresenta um comportamento que, de acordo com a corrente do sistema a resistência apresenta variações atendendo a equação:

$$g(V_{C1}) = m_0 V_{C1} + \frac{1}{2}(m_1 - m_0) |V_{C1} + B_p| + \frac{1}{2}(m_0 - m_1) |V_{C1} - B_p| \quad (4.2)$$

Os valores de B_p, m_0 e m_1 são características da curva de acordo com a corrente e tensão no resistor não-linear como podem ser observados da imagem Figura 11

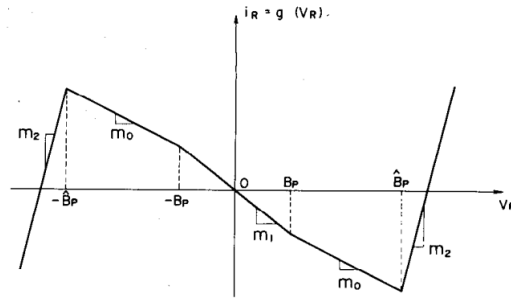


Figura 11: Relação constitutiva do resistor não-linear. Fonte: [30]

Tal equação supracitada é derivada do arranjo do circuito funcional arranjado por um indutor, dois capacitores, um resistor comum e um resistor não linear conforme esquema abaixo:

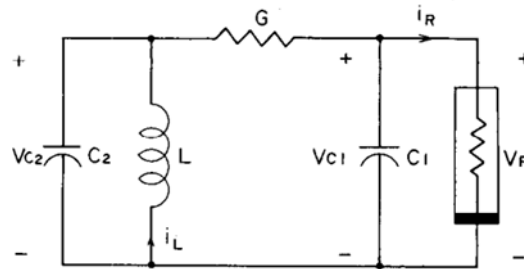


Figura 12: Circuito de Chua. Fonte [30]

O resistor não-linear foi desenvolvido pelo arranjo de um circuito composto de diodos, resistores, amplificadores e fonte de tensão positiva e negativa

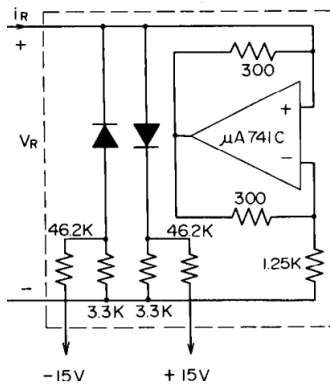


Figura 13: Arranjo do circuito resistor não-linear de *Chua*. Fonte:[30]

O resultado do circuito, dependendo de sua configuração, como apresentado por *Chua*, pode apresentar o que chamamos de atrator estranho de duplo enrolamento de *Chua* ou “*double scroll*”, que se trata de uma órbita em torno de dois pontos fixos instáveis alternando entre eles e desenhando uma estrutura fractal pela solução: $1/C_1=9$, $1/C_2=1$, $1/L=7$, $G=0.7$, $m_0=-0.5$, $m_1=-0.8$, $B_p=1$; com o seguinte aspecto:

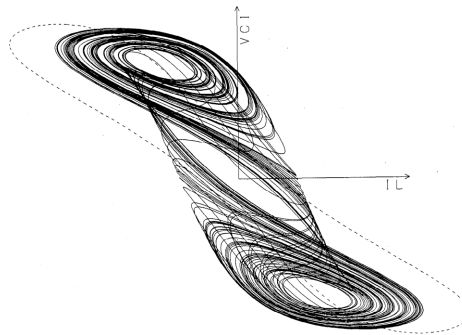


Figura 14: Atrator caótico de duplo enrolamento (double scroll) do circuito de Chua. Fonte: [30]

4.3 Experimento prático de sinais-ruído caóticos

Os ruídos caóticos são aqueles que possuem uma extrema sensibilidade em relação as condições iniciais pois mínimas variações podem gerar significativas mudanças nos

resultados finais. Neste sentido o sinal ruído caótico pode ser ajustados para produção de sinais com características aleatórias e descorrelacionadas, o que é bem diferente de diversas funções randômicas computacionais que quase sempre apresentam índice de autocorrelação crescente, decrescente ou estável.

Mais adiante mostraremos em nossa proposta de gerador de ruído correlacionado que será necessário a entrada de um ruído descorrelacionado. Propomos para isso a inclusão do circuito de *Chua* como entrada de sinais descorrelacionados. Em razão da necessidade da obtenção de dados aleatórios descorrelacionados, o circuito de *Chua* foi montado nos laboratórios da UnB, campus Planaltina, de acordo como descrito pelo seu autor, incluindo o resistor não linear RN . Como o componente indutor desejado não estava disponível na cidade de Brasília, no momento, como alternativa foi montado um circuito que simula as condições de corrente e resistência do indutor sem qualquer prejuízo ao experimento.

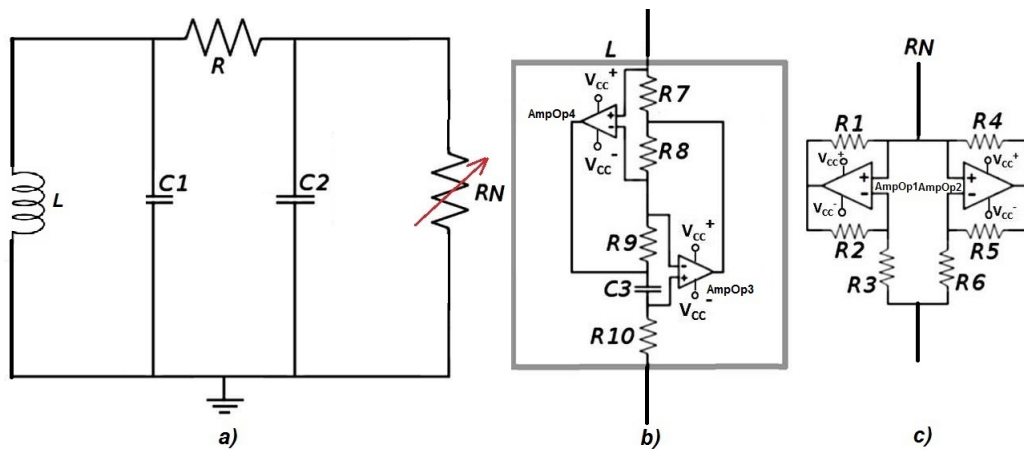


Figura 15: Esquema de montagem do circuito de *Chua*. a) circuito de *Chua* b) indutor eletrônico c) resistor não linear de *Chua*

Dentre os componentes escolhidos foram utilizados resistores potenciômetros em R e R10 para fins de ajuste fino.

Circuito de Chua		Resistor não-linear		Indutor eletrônico	
Comp	Valor	Comp	Valor	Comp	Valor
C1=	100 nF	R1=	220 Ω	R7=	100 Ω
C2=	10 nF	R2=	220 Ω	R8=	1.0 k Ω
L=	15 mH	R3=	2.2 k Ω	R9=	1.0 k Ω
R=	2.5 k Ω (pot)	R4=	22.0 k Ω	R10=	2.5 k Ω (pot)
		R5=	22.0 k Ω	C3=	100 nF
		R6=	3.3 k Ω	AmpOp3=	TL082
		AmpOp1=	TL082	AmpOp4=	TL082
		AmpOp2=	TL082		*pot=Potenciômetro

Tabela 2: Tabela de componentes do circuito de *Chua* experimental

4.3.1 Resultados do experimento

O resultado verificado no osciloscópio foi de geração de ruído com características de enrolamento próximas ao “*double scroll*” descrito por *Chua*. A reprodução do osciloscópio foi coletada para posterior análise e uso em simulação.

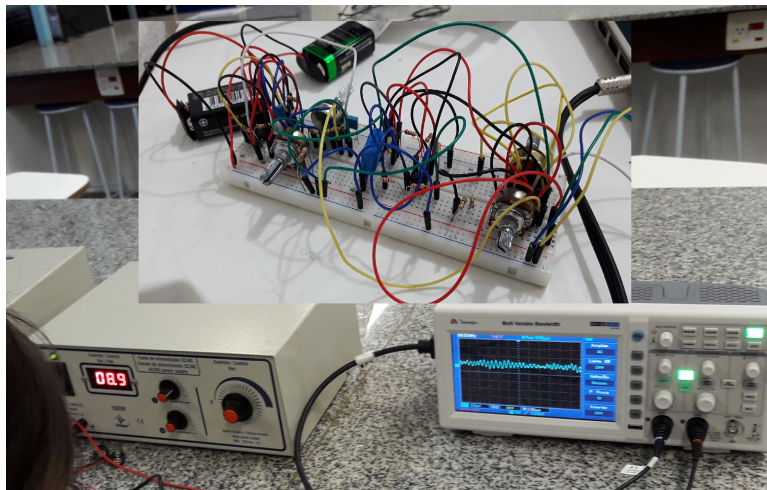


Figura 16: Experimento do circuito de Chua

5 Fenômeno fotoacústico

O fenômeno fotoacústico foi descoberto por Alexander Graham Bell (1880) no estudo do desenvolvimento de um equipamento chamado *photophone* que consistia no primeiro dispositivo de telecomunicação utilizando luz. Enquanto realizava experimentos com seu *photophone*, Graham Bell observou que era possível obter sinal audível diretamente de forma não elétrica quando um feixe de luz era rapidamente interrompido pelo giro de um disco com ranhuras com forma de diafragma (microfone) conectado ao tubo de audição ligado ao seu próprio ouvido. Graham Bell observou que o efeito, em sólidos, era dependente da absorção de luz já que a força do sinal acústico era dependente de como a luz incidente era absorvida pelo material na célula de estudo. Medições precisas tornaram-se apenas possíveis com o desenvolvimento de dispositivos na década de 1970 [5].

O fenômeno fotoacústico é basicamente a produção de ondas acústicas pela incidência de pulsos de luz sobre um dado material. A partir deste fenômeno é realizada a caracterização de propriedades de materiais utilizando o “Método de Espectroscopia Fotoacústica” (PAS) UV-VIS por um dispositivos chamados “célula fotoacústica”. Técnica de espectroscopia consiste na obtenção de dados físico-químicos por meios do fenômenos de absorção, reflexão, transmissão, emissão e a dispersão de radiação eletromagnética na amostra do material. A ênfase na espectroscopia fotoacústica está no estudo da absorção de amostras e não na geração de ondas acústicas em si.

Na área de ciência de materiais tal efeito é utilizado na caracterização de materiais tais como nanomateriais, polímeros, monitoramento em processos de fotocura, estudos de gases, medidas de fases, fusão de materiais etc.

5.1 Interação da luz com os sólidos

Em termos de interação da radiação luminosa com materiais, os transparentes são aqueles que possuem absorção e reflexão relativamente muito pequenas. Já os materiais translúcidos são aqueles que a luz é dispersa em seu interior e a luz é transmitida de maneira difusa. Os opacos são todos aqueles que a luz é impenetrável, pois sua radiação ou é absorvida ou refletida. Isso tudo ocorre quando a radiação luminosa quando passa de um meio para outro uma parcela da radiação pode ser transmitida, outra absorvida e outra refletida na interface de acordo com a natureza do material [12].

Pela lei da conservação da energia, o feixe incidente à superfície do meio sólido (I_0) deve ser igual à soma das intensidades dos feixes transmitidos (I_T), absorvidos (I_A) e refletidos (I_R), ou seja $I_0 = I_T + I_A + I_R$

5.1.1 Refração

A luz transmitida para o interior de materiais transparentes experimenta uma diminuição da sua velocidade e, como resultado disso, é desviada na interface. O índice de refração “ n ” de um material é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo “ c ” e a velocidade de luz no meio “ v ”, “ ϵ ” é a permissividade, “ μ ” a permeabilidade da substância, “ ϵ_r ” é a constante dielétrica e “ μ_r ” permeabilidade magnética relativa [12]:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\epsilon_0\mu_0} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (5.1)$$

5.1.2 Reflexão

Ocorre quando a radiação luminosa passa de um meio para outro com índice de

refração diferente, uma parcela da luz é dispersa na interface entre os dois meios, mesmo se ambos os materiais forem transparentes. A refletividade, R , representa a fração da luz incidente que é refletida na interface, ou seja, em que I_0 e I_R são respectivamente, as intensidades dos feixes incidentes e refletidos [12].

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (5.2)$$

5.1.3 Absorção

Ocorre ou por polarização eletrônica ou pela transição eletrônica de bandas de valência para bandas de condução. Na polarização eletrônica, o campo elétrico interage com a nuvem eletrônica que envolve cada átomo em sua trajetória de maneira a induzir uma polarização eletrônica ou a deslocar a nuvem eletrônica em relação ao núcleo do átomo com cada mudança na direção do componente do campo elétrico. As duas consequências da polarização são uma parcela da energia da radiação pode ser absorvida ou a onda de luz tem suas velocidades reduzidas conforme passam através do meio por refração.



Figura 17: Polarização eletrônica resultante de uma distorção da nuvem eletrônica por um campo elétrico. Fonte: [12]

A absorção de um fóton pela transição eletrônica de banda de valência pode ocorrer por promoção ou excitação de um elétron de uma banda de valência praticamente preenchida, através do espalhamento entre bandas, para um estado de energia vazio na banda de condução, conforme demonstrado na figura abaixo, são criados um elétron

livre na banda de condução e um buraco na banda de valência [12].

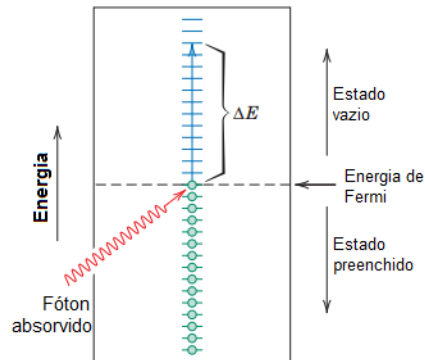


Figura 18: Mecanismo de absorção de fótons para materiais não metálicos em que um elétron é excitado através do espaçamento entre bandas. Fonte: [12]

5.2 Modelo de célula fotoacústica

Para realização de estudos e obtenção de dados oriundos do efeito fotoacústico, tal efeito é explorado por meio de um dispositivo denominado célula fotoacústica. Rosencwaig e Gersho propuseram inicialmente um modelo padrão de célula fotoacústica em que consistia na captação dos sinais fotoacústicos gerados pela expansão e contração de uma camada de gás que provocavam ondas mecânicas propagadas pelo gás, resultantes da emissão de luz modulada em uma cavidade, até as paredes da célula que estava acoplada com microfone(s) e amplificadores do tipo *lock-in* (amplificador que detecta sinais na presença de ruído, análise de magnitude e fase). Como a magnitude das flutuações de pressão periódicas na célula é proporcional à quantidade de calor que emana do absorvente sólido, há uma correspondência próxima entre a intensidade do sinal acústico e a quantidade de luz absorvida pelo sólido. Com isso é possível realizar caracterizações dos materiais [5].

Uma evolução da célula fotoacústica supracitada é a célula fotoacústica aberta (OPC

- “open photoacoustic cell”) que explora os mesmos efeitos mas viabiliza o estudo de materiais “in vivo”.

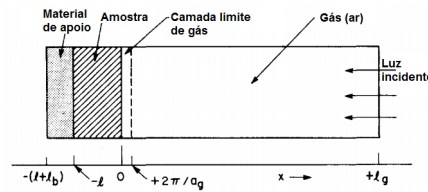


Figura 19: Modelo de célula proposto por Rosencwaig e Gersho, 1975. Fonte: adaptado de [5]

5.3 Geração de ondas fotoacústicas

O processo de geração de ondas fotoacústicas ocorre principalmente por quatro fatores físicos. São eles a difusão térmica, expansão, flexão termoelástica e efeito fotobárico.

5.3.1 Geração acústica por difusão térmica

A geração acústica por difusão ocorre quando a luz modulada incidente (luz cortada diversas vezes por segundo) produz calor periódico no material amostral provocando expansão e contração da fina camada de gás originada pela propagação de ondas térmicas decorrentes da variação de temperatura. Estas expansões e contrações no gás geram ondas de pressão sonoras que são conhecidas como pistão vibratório e são detectadas pelo microfone no sistema [49, 28, 37].

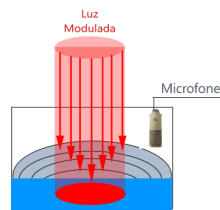


Figura 20: Geração acústica por difusão térmica

5.3.2 Geração acústica por expansão térmica

A absorção da radiação e aumento da temperatura resulta na expansão térmica nos diferentes pontos da amostra proporcionalmente ao coeficiente de dilatação térmica além de dependentes da velocidade do som no material. Com o aquecimento periódico a amostra como um todo se contraia e expanda fazendo com que a mesma se comporte como um pistão vibratório produzindo sons acústicos no gás. Além disso, como o aquecimento do material amostral é heterogêneo, os gradientes de temperatura resultam também, através da expansão térmica, na geração de ondas elásticas que podem ser detectadas por meio de um transdutor piezoelétrico diretamente ligado na amostra. Mostra-se que a amplitude dessas ondas elásticas é proporcional à potência absorvida, assim como acontece com sinais fotoacústicos [49, 28, 37].

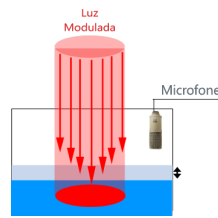


Figura 21: Geração acústica por expansão térmica

5.3.3 Geração acústica por flexão termoelástica

Tal fenômeno ocorre por meio das ondas de pressão decorrentes de curvaturas nas bordas do material produzidas por efeito termoelástico (flexão) que se encontram fixadas, presas na célula, gerando sinal acústico [49, 28, 37].

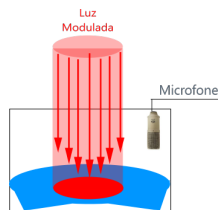


Figura 22: Geração acústica por flexão termoelástica

5.3.4 Geração acústica por efeito fotobárico

O efeito fotobárico ocorre por meio da emissão de gases, bolhas e vapores liberados a partir do aquecimento de certas amostras, em especial muito comum em materiais orgânicos. Tal liberação causa pressões que são detectadas pelo microfone [16, 35].

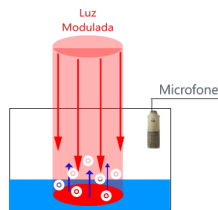


Figura 23: Geração acústica por efeito fotobárico

5.4 Processo de captação e obtenção de resultados

O processo de obtenção de resultados, simplificado, é basicamente composto de um emissor de laser que atravessa o *chopper* (espécie de disco giratório perfurado que permite a passagem do laser periodicamente de acordo com a rotação) e em seguida é submetido à célula fotoacústica que contém a amostra de análise de interesse, captadores microfones e transdutores piezoelétricos. Os dados obtidos são pré-amplificados e em seguida submetidos à amplificadores do tipo *lock-in*, que são amplificadores especiais para amplificar sinais muito fracos e/ou presença de ruídos, análise de magnitude e

fases [20, 49].

Michaelian e Wang descrevem um modelo experimental simplificado de sistema para obtenção de sinais fotoacústicos. Estes utilizam amplificadores *lock-in* no processo de captação dos sinais. :

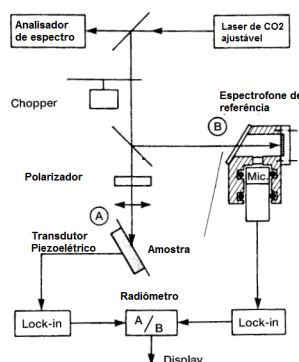


Figura 24: Aparato de um sistema de espectroscopia fotoacústica e piezoelétrica utilizando espectrofonos. Fonte: adaptado de [20]

5.5 Estudos recentes

Até 2001, basicamente, amplificadores *lock-in* eram exclusivamente utilizados. O problema do uso deste tipo de dispositivo é que os sinais muito fracos que não conseguem ultrapassar os limiares de leitura dos equipamentos não são registrados, distorções de leituras e os preços de mercado são elevados. Tais fatores podem limitar resultados e consecutivamente apresentar severas falhas em estudos em razão de medições. *Song, Shao e Su* realizaram experimentos e publicaram o artigo “*A study on the detection of weak photoacoustic signals by stochastic resonance*” que utilizaram ressonância estocástica para captação de sinais fracos dispensando amplificadores do tipo *lock-in* no processo de leitura abrindo novas perspectivas no estudo de sinais fotoacústicos [40].

Recentes estudos tem empregado extensivamente do efeito fotoacústico para caracterização de nanopartículas de carbono com fins de aplicações biomédicas [24], estudos e

caracterização de polímeros [23], detecção de energia de materiais[9], monitoramento da fotocura de resina [34], caracterização óptica e térmica de materiais [37], caracterização óptica e térmica de materiais poliméricos [16], observação do efeito negativo em materiais de construção experiências “in vivo” [41], identificação de componentes do solo [31], análise de materiais biológicos[4], diagnóstico de estruturas e dimensões de materiais [1], estudos em microfraturas e caracterização de difusividade em materiais[39, 48], etc.

6 Ressonância Estocástica

6.1 Definição de ressonância estocástica e seus benefícios

A ressonância estocástica, denotado SR, é um fenômeno onde a presença de um sinal de ruído estocástico em um sistema não-linear é essencial para o desempenho ideal do sistema já que proporciona uma melhor resposta do sistema para um determinado sinal de entrada do que na ausência de um sinal ruído. A ressonância estocástica ocorre quando um sinal ruído aleatório proporciona um benefício de processamento de sinal melhor que na ausência de um ruído. O fenômeno envolve um rápido aumento na relação sinal-ruído com um ótimo valor na variância de valores de ruído e a presença de um pico no espectro de sinal de saída, correspondentes à frequência do sinal de força.

Como já abordados em capítulos anteriores, o sinal ruído aleatório, também conhecido como estocástico, é aquele que é “desordenado e aleatório, imprevisível e não determinístico, em que sua evolução não pode ser estabelecida, a priori, e nunca se repete” [44] e que apresentam características gaussianas (para o caso do ruído branco). Um exemplo de sistema não-linear que gera sinais analógicos com tais características é o circuito de *Chua* que funciona pela descrição das equações diferenciais 4.1 com um elemento resistor não-linear 4.2.

A figura 25 demonstra um exemplo clássico da relação sinal-ruído máxima de um pico induzido por um ruído produzido pelo efeito de ressonância estocástica [44, 28, 30].

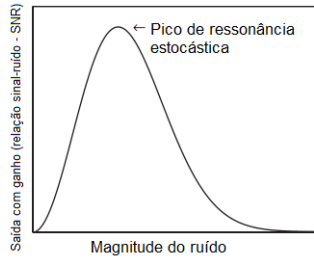


Figura 25: Curva típica da relação de saída do sinal-ruído (*signal noise ratio*) com a magnitude da entrada do ruído em sistema de ressonância estocástica. Fonte: adaptado de [13]

Em sistemas em que apresentam sinais muito fracos de entrada e leitura, a ressonância estocástica, fenômeno este ocasionado pela inserção de um sinal ruído aleatório, viabiliza ampliações (picos) dos sinais de entrada possibilitando que estes ultrapassem os limiares mínimos de leitura de sistemas tornando possível o registro, reconhecimento e análise de sinais.

Em termos de mensuração de desempenho, a ressonância estocástica é, usualmente, mensurada por “*mutual information*”, que mede e quantifica a dependência mútua entre duas variáveis aleatórias, ou correlação entre os sinais de entrada e saída em função da intensidade de ruído. Outra questão relevante é que a ressonância estocástica, no limite da relatividade de um sinal fraco e um ruído de grande intensidade, pode ser também descritos utilizando a teoria de resposta linear [13].

Tais sistemas, em que um sinal de entrada é fraco o suficiente para não ultrapassar o limiar de leitura, geralmente são chamados de sistemas biestáveis baseados em limiares (*thresholding*), como é o caso de sistemas de leitura de sinais eletrofisiológicos neuronais e sinais fotoacústicos para caracterização de materiais, por exemplo, em que a aplicação de sinal ruído estocástico viabiliza picos de amplitude pelo benefício de ressonância estocástica que viabiliza uma máxima relação sinal-ruído. Tal fenômeno é denominado como ressonância estocástica de sub-limiar - *subthreshold stochastic resonance*. Já o fenômeno de ressonância estocástica explorado em sistemas de *arrays* com limiares

é denominado de ressonância estocástica de supra-limiars - *suprathreshold stochastic resonance* (SSR) [13, 44, 40]. Já em sistemas lineares não ocorre ressonância estocástica pois o ruído não se soma ao sinal porém mantêm-se ali presente

Este trabalho será conduzido dentro da área de sinais porém o fenômeno de ressonância estocástica não se limita apenas ao uso em leitura de sinais neuronais, estímulos nervosos e caracterização de materiais em fenômenos fotoacústicos. Por ser um fenômeno explorado apenas em entorno de trinta e poucos anos, ainda há muito do que se desenvolver das áreas da física, medicina, biologia, materiais etc.

6.2 Sistemas de limiars

6.2.1 Ressonância estocástica de sub-limiar

O sistema de sub-limiar é composto por um sinal com um sub-limiar fraco, uma barreira de potencial e ruído gaussiano. Tal condição tem como efeito na saída picos/pulsos de curta duração, com grande amplitude e um tempo refratário determinístico que altera o sistema biestável para o nível de presença de sinal. Pela figura 25 é possível perceber que a inserção do ruído torna possível a leitura de sinais fracos que não conseguem ultrapassar o sub-limiar de leitura [13].

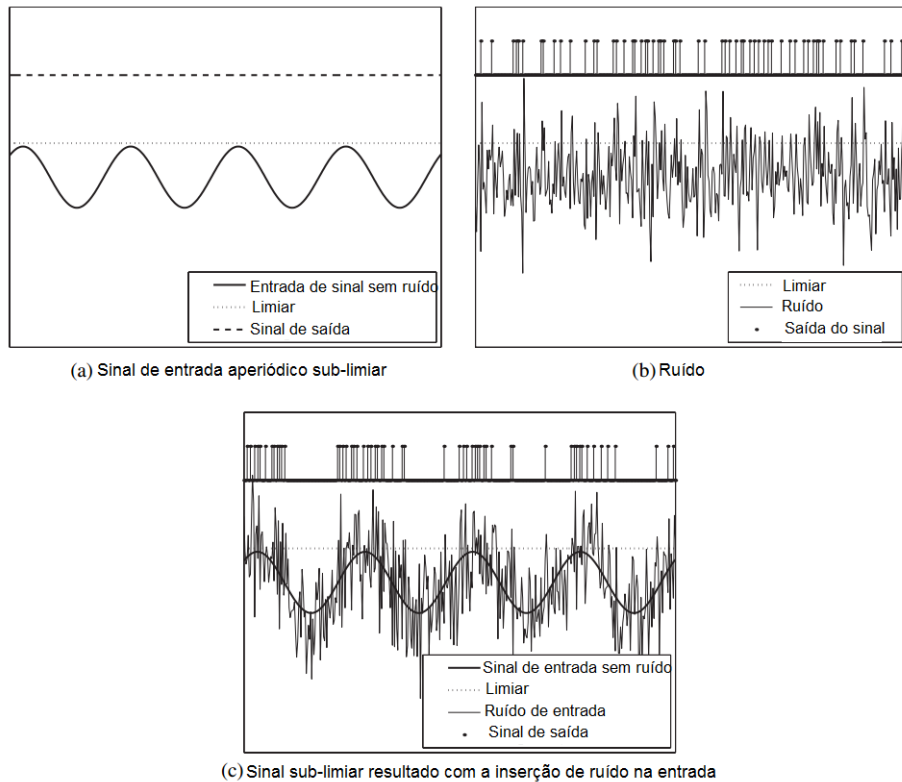


Figura 26: Ressonância estocástica com sinal sub-limiar periódico com ruído com transições do sinal em relação ao limiar o tornando perceptível à leitura (c). Fonte: adaptado de [13]

6.2.2 Ressonância estocástica de supra-limiar

O fenômeno de ressonância estocástica pode ser explorado também quando os sinais de entrada estão um pouco acima do limiar do sistema denominado supra-limiar (*suprathreshold*). Para se conseguir tal feito é utilizado um *array* de sistemas de limiares idênticos. Neste sistema é possível se conseguir um limiar de leitura menor e observar um número mais intenso de transições nos pontos acima do limiar identificando também sinais abaixo do limiar trazendo maior precisão de leitura de sinais não senoidais.

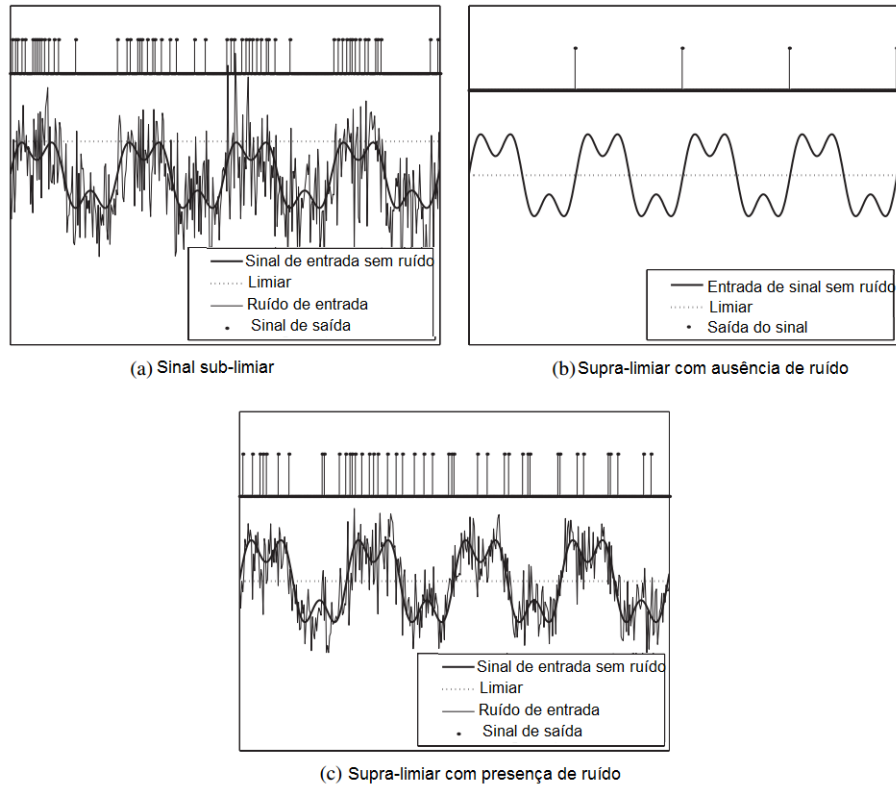


Figura 27: Ressonância estocástica supra-limiar. Fonte: adaptado de [13]

Na figura 27 item (c) é possível identificar no ruído supra-limiar que a presença do ruído possui uma maior eficiência na transição do sinal em relação ao limiar, tornando a leitura mais eficiente.

6.2.3 Sistema genérico de ruído não linear (sub-limiar)

Para se conseguir os efeitos de amplificação do sinal pela ressonância estocástica, um sistema de ruído não linear, que produziria tal efeito, pode ser compreendido como um sistema em que num dado sinal de entrada $s(t)$ é inserido um ruído $\eta(t)$ que resulta na saída $x(t)$ que é submetido a uma transformação não-linear tendo como resultado uma saída $y(t) = T[x(t)]$ [13].

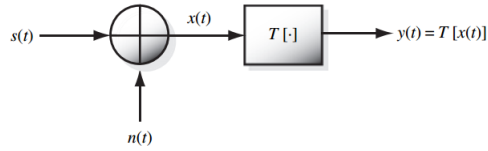


Figura 28: Sistema genérico de ruído não linear para obtenção do efeito de ressonância estocástica. Fonte: [13]

6.2.4 *Array* de sistemas limiares idênticos (supra-limiar)

A ressonância estocástica de supra-limiar é uma forma de ressonância estocástica que ocorre em *arrays* de dispositivos de limiar idênticos em especial de sinais aleatórios que usando um sinal de entrada aperiódico, a ressonância estocástica pode ocorrer entre a entrada e a saída da matriz contanto que o limiar seja de mesmo valor em todo o arranjo e ocorre independentemente de se o sinal de entrada é inteiramente sub-limiar ou não. Stocks [17] chamou tal efeito de ressonância estocástica de supra-limiar para distingui-lo a partir da ocorrência de SR em estudos anteriores de sistemas com um limiar único e, posteriormente, mostrar que o efeito é maximizado quando todos os valores-limite são definidos como a média do sinal [17, 13].

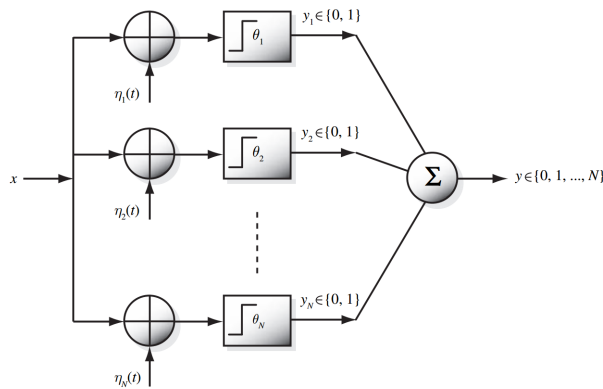


Figura 29: Representação de um *array* de sistemas idênticos para obtenção do efeito SSR. Fonte:[13]

6.3 Quantização de sinais de sistemas de limiares

A quantização de dado sinal em um sistema biestável de limiares é realizada por seus picos de sinais “zeros” e “uns” remontando os valores diferentes de zero como uma a onda do sinal. Tal quantização é conhecida como quantização estocástica.

Em termos de medida de desempenho é a relação de saída do sinal-ruído pela relação entre a densidade espectral de potência (PSD) da saída do sinal presente com a PSD do ruído de saída. Existem também outros vários mecanismos de mensurar SR que já foram demonstrados. São eles “*spectral power amplification*”, “*correlation coefficient*”, “*mutual information*”, “*Kullback entropy*”, “*channel capacity*”, “*Fisher information*”, “*teta divergences*” e “*mean square distortion*”. [44, 13, 15, 28]

6.4 Máximo efeito de ressonância estocástica

Em termos de eficiência em ressonância estocástica, a questão é encontrar um ruído ideal para otimizar o desempenho. Estudos têm demonstrado matematicamente que o coeficiente de correlação entre sinais (de entrada e ruído) é fator determinante para a máxima eficiência de ressonância estocástica, em especial os estudo realizados por Jung [38]. O que se tem um consenso é que quanto maior o grau do coeficiente de correlação espacial maior é o efeito da ressonância estocástica, incluindo a ocorrência de harmônicos da frequência motriz na saída de uma densidade espectral de potência [28, 44, 38].

No aspecto de eficiência, para que a ressonância estocástica aconteça, há um teorema de intervalo proibido [13], não estendido para além de sinais de entrada binários, que fica na região $[\theta - A, \theta + A]$, onde θ é o valor de limiar e o sinal binário tenha valores de $-A, A$, a ser observado, que prova que a ressonância estocástica irá ocorrer para todos as variâncias finitas da distribuição do ruído se e apenas:

- 1 - a média esteja fora do “intervalo proibido” e;
- 2- todas as variâncias infinitas da distribuição do ruído estáveis e;
- 3- o parâmetro local do ruído esteja fora do intervalo proibido;

É importante ressaltar que o teorema de intervalo proibido é uma questão em aberto em relação às condições existem indicando se SR pode ou não pode ocorrer quando o sinal de entrada for uma variável aleatória de valores contínuos.

A inserção de ruído estocástico para fins de exploração do fenômeno de ressonância estocástica também deve levar em consideração a relação de intensidade do sinal e do ruído uma vez que caso o ruído seja maior que o sinal ambos sairão do sistema sem ganho. Tal afirmação é baseada na utilização da teoria linear de resposta que uma vez que o sinal é pequeno em comparação com o ruído, tanto o sinal e ruído são transferidos de forma linear para a saída, e, num sistema linear, nenhum ganho de relação sinal-ruído é possível [50, 15, 13, 38].

7 Gerador de Ruído Aleatório Correlacionado

Se tratando de ressonância estocástica, o coeficiente de correlação matemática entre o sinal analisado e o sinal de ruído gerado é fator determinante para a ocorrência do fenômeno. Em outras palavras, para alcançar máxima eficiência na ressonância estocástica entre os sinais, é necessário que o ruído inserido no sistema possua a máxima semelhança na correlação com o sinal existente.

Visando atingir o objetivo de desenvolver um modelo matemático que viabilize a geração de sinais de ruídos correlacionados, tem-se que esta etapa matemática foi inspirada no trabalho da tese de doutorado “Processos estocásticos: difusão e crescimento”, pelo Ismael V. L. Costa, seção 3.6 [29], e artigo [2], em que apresenta um modelo para gerar valores aleatório correlacionados a partir de um coeficiente de correlação conhecido com a finalidade de estudos relacionados a difusão e crescimento.

7.1 Equação geradora de ruídos correlacionados

O objetivo principal da função é a geração de números aleatórios, porém correlacionados. Para isso vamos propor que o ruído, função temporal $\Upsilon(t)$, possui a seguinte forma

$$\Upsilon(t) = \int_0^{\infty} a(\omega) \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega \quad (7.1)$$

onde:

$a(\omega)$ é a amplitude do cosseno. Para cada frequência uma amplitude diferente. Mais adiante mostraremos que $a(\omega)$ possuirá a forma apresentada na eq. 7.19,

$\phi(\omega)$ é um valor aleatório descorrelacionado para alterar a fase do cosseno.

Sendo assim, o objeto é gerar sinais correlacionados a partir de uma determinada função de correlação. Mostraremos que a amplitude $a(\omega)$ apresentará as características que permitirá gerar este ruído, e que as mudanças aleatórias na fase do cosseno não alteraram a correlação da função, somente a superposições dos cossenos. Assim, a função demonstra que uma força estocástica genérica $\Upsilon(t)$ pode ser decomposta em um conjunto de osciladores harmônicos.

7.2 A função aleatória descorrelacionada $\phi(\omega)$

A função de fase aleatória descorrelacionada encontra-se no intervalo de $-\pi < \phi(\omega) < \pi$. Sua propriedade de descorrelação pode ser matematicamente apresentada pela função de correlação [29]:

$$\langle \phi(\omega) \phi(\omega') \rangle = \frac{\pi^2}{3} \delta(\omega - \omega') \quad (7.2)$$

A equação supracitada é desenvolvida tomando a média de todo ensemble $\langle \rangle$. Para uma função delta de Dirac em que um valor para $t \neq 0$ equivale a 0, o que representa um valor descorrelacionado se aplicado à função de correlação [32]. O valor $\frac{\pi^2}{3}$ é o valor esperado para a média do ensemble dos valores de $\phi(\omega)$ dentro do intervalo $-\pi < \phi(\omega) < \pi$, ou seja, 2π , caso os valores de $\phi(\omega)$ sejam iguais, $\langle \phi(\omega)^2 \rangle$, conforme demonstração

$$\langle \phi(\omega)^2 \rangle = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 d\phi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\phi^3}{3} \Big|_{-\pi}^{\pi} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi^3}{3} - \frac{(-\pi)^3}{3} \right) = \frac{\pi^2}{3} \quad (7.3)$$

7.3 A equação geradora em tempos futuros

Se conhecemos $\Upsilon(t)$, podemos conhecer a função do ruído no tempo $t + \tau$, ou seja, $\Upsilon(t + \tau)$ vale

$$\Upsilon(t + \tau) = \int_0^\infty a(\omega) \cos[\omega(t + \tau) + \phi(\omega)] d\omega \quad (7.4)$$

7.4 A correlação da equação geradora

A correlação entre o gerador e sua flutuação $\langle \Upsilon(t) \Upsilon(t + \tau) \rangle$ pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\langle \Upsilon(t) \Upsilon(t + \tau) \rangle = \int_0^\infty \int_0^\infty a(\omega) a(\omega') \langle \cos[\omega t + \phi(\omega)] \cos[\omega'(t + \tau) + \phi(\omega')] \rangle d\omega d\omega' \quad (7.5)$$

O desenvolvimento da equação é mediante fórmula de adição de arcos relacionado com o delta de Dirac em que o termo $\langle \cos[\omega t + \phi(\omega)] \cos[\omega'(t + \tau) + \phi(\omega')] \rangle$ é resolvido por:

$$\begin{aligned} \langle \cos[\omega t + \phi(\omega)] \cos[\omega'(t + \tau) + \phi(\omega')] \rangle &= \cos(\omega t) \cos[\omega'(t + \tau)] \langle \cos[\phi(\omega)] \cos[\phi(\omega')] \rangle > \\ &\quad - \cos(\omega t) \sin[\omega'(t + \tau)] \langle \cos[\phi(\omega)] \sin[\phi(\omega')] \rangle > \\ &\quad - \sin(\omega t) \cos[\omega'(t + \tau)] \langle \sin[\phi(\omega)] \cos[\phi(\omega')] \rangle > \\ &\quad + \sin(\omega t) \sin[\omega'(t + \tau)] \langle \sin[\phi(\omega)] \sin[\phi(\omega')] \rangle > \end{aligned} \quad (7.6)$$

Supondo que $\forall \omega, \phi(\omega)$ é igualmente distribuído de $-\pi$ a π . Para a consideração acima, desenvolvemos então para valores de cosseno $\langle \cos[\phi(\omega)] \cos[\phi(\omega')] \rangle >$:

$$\langle \cos [\phi (\omega)] \cos [\phi (\omega')] \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \phi \cos \phi' d\phi d\phi' = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\pi}^{\pi} \cos \phi d\phi \right]^2 = 0, & \text{se } \omega \neq \omega' \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\cos \phi)^2 d\phi = \frac{1}{2}, & \text{se } \omega = \omega' \end{cases}, \quad (7.7)$$

ou seja, $\langle \cos [\phi (\omega)] \cos [\phi (\omega')] \rangle = \frac{1}{2} \delta (\omega - \omega')$. No mesmo raciocínio desenvolvendo os valores de seno com base em Dirac para $\langle \sin [\phi (\omega)] \sin [\phi (\omega')] \rangle$:

$$\langle \sin [\phi (\omega)] \sin [\phi (\omega')] \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \phi \sin \phi' d\phi d\phi' = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\pi}^{\pi} \sin \phi d\phi \right]^2 = 0, & \text{se } \omega \neq \omega' \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\sin \phi)^2 d\phi = \frac{1}{2}, & \text{se } \omega = \omega' \end{cases}, \quad (7.8)$$

ou seja, $\langle \sin [\phi (\omega)] \sin [\phi (\omega')] \rangle = \frac{1}{2} \delta (\omega - \omega')$. Já a resolução para $\langle \cos [\phi (\omega)] \sin [\phi (\omega')] \rangle$ obtemos sempre os valores de 0 conforme demonstração abaixo

$$\langle \cos [\phi (\omega)] \sin [\phi (\omega')] \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \phi \sin \phi' d\phi d\phi' = 0. \quad (7.9)$$

Assim chegamos ao seguinte resultado preliminar do desenvolvimento da equação do gerador com sua flutuação com base em Dirac:

$$\begin{aligned} \langle \cos [\omega t + \phi (\omega)] \cos [\omega' (t + \tau) + \phi (\omega')] \rangle &= \cos (\omega t) \cos [\omega' (t + \tau)] \frac{1}{2} \delta (\omega - \omega') \\ &\quad - 0 \\ &\quad - 0 \\ &\quad + \sin (\omega t) \sin [\omega' (t + \tau)] \frac{1}{2} \delta (\omega - \omega') \end{aligned} \quad (7.10)$$

Isto nos leva ao seguinte resultado da equação:

$$\begin{aligned} & \langle \cos [\omega t + \phi(\omega)] \cos [\omega' (t + \tau) + \phi(\omega')] \rangle = \\ & \cos(\omega t) \cos[\omega' (t + \tau)] \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega') + \sin(\omega t) \sin[\omega' (t + \tau)] \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega') \end{aligned} \quad (7.11)$$

que sendo resolvida pela regra dos cossenos:

$$\begin{aligned} & \langle \cos [\omega t + \phi(\omega)] \cos [\omega' (t + \tau) + \phi(\omega')] \rangle = \\ & \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega') \cos(\omega t - \omega' (t + \tau)) = \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega') \cos(\omega t - \omega' t - \omega' \tau) \end{aligned} \quad (7.12)$$

Substituindo na equação de correlação no gerador com sua flutuação no ensemble, temos:

$$\begin{aligned} \langle \Upsilon(t) \Upsilon(t + \tau) \rangle &= \int_0^\infty \int_0^\infty a(\omega) a(\omega') \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega') \cos(\omega' t + \omega' \tau - \omega t) d\omega d\omega', \\ C_\Upsilon(\tau) &= \int_0^\infty \frac{a^2(\omega)}{2} \cos(-\omega \tau) d\omega. \end{aligned} \quad (7.13)$$

Assim, o gerador de dados aleatórios ($\Upsilon(t)$) possui a seguinte correlação ($C_\Upsilon(\tau)$) em função da amplitude ($a(\omega)$):

$$C_\Upsilon(\tau) = \int_0^\infty \frac{a^2(\omega)}{2} \cos(\omega \tau) d\omega. \quad (7.14)$$

7.5 Transformada de cosseno

Essa seção objetiva apresentar ou relembrar a transformada de cosseno de uma dada função integrável $f(t)$, pois será uma informação necessária para prosseguir os cálculos da correlação da equação geradora. Dada uma função $f(t)$, a transformada de cosseno dessa função é representada da seguinte forma

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt. \quad (7.15)$$

Na função acima, o $F(\omega)$ representa a amplitude, para cada frequência, de cada função cosseno. A transformada inversa é representada por

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega) \cos(\omega t) d\omega. \quad (7.16)$$

Com as expressões das transformadas de cossenos, prossigamos o cálculo da função de correlação, $C_{\Upsilon}(\tau)$, 7.14.

7.6 A amplitude a partir da correlação da equação geradora

Nessa seção, obteremos, a partir da equação de correlação ($C_{\Upsilon}(\tau)$) 7.14 e da transformada de cosseno, os valores de amplitude $a(\omega)$. A eq. 7.14 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$C_{\Upsilon}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\pi a^2(\omega)}{2} \cos(\omega\tau) d\omega. \quad (7.17)$$

Utilizando a transformada de cosseno apresentada na seção anterior, obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{\pi a^2(\omega)}{2} &= \int_0^{\infty} C_{\Upsilon}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \\ a(\omega)^2 &= \int_0^{\infty} \frac{4}{\pi} C_{\Upsilon}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \end{aligned} \quad (7.18)$$

Desse modo, a amplitude dos cossenos para cada frequência será

$$a(\omega) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^{\infty} C_{\Upsilon}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}. \quad (7.19)$$

A expressão da amplitude $a(\omega)$ será utilizada na equação geradora 7.1:

$$\Upsilon(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \sqrt{\int_0^{\infty} C_{\Upsilon}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau} \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega \quad (7.20)$$

Perceba que nessa equação geradora são necessários somente duas entradas externas. A primeira entrada é a correlação dos dados, $C_{\Upsilon}(\tau)$, que consiste na correlação que objetivamos gerar com os dados aleatórios. A segunda entrada é a função aleatória descorrelacionada, $\phi(\omega)$. Essa função pode ser obtida através dos geradores pseudoaleatórios computacionais, ou mesmo, através de circuitos eletrônicos geradores de dados aleatórios descorrelacionados, como é o caso do circuito de *Chua* (para certos parâmetros de entrada).

8 Concepção, simulação e experimentação de gerador de sinais correlacionados

8.1 Concepção

A proposta teórica da concepção fundamental do gerador básico de sinais aleatórios correlacionados consiste em um computador que executa a função geradora de sinais correlacionados 8.1, demonstrada no capítulo anterior, funcional a partir da leitura de dados de correlação já existentes $C_Y(\tau)$ e função/informações de dados aleatórios $\phi(\omega)$, e tem como resultado final a produção de dados de sinais com a mesma correlação inserida no sistema. A partir das informações de sinais correlacionados produzidos podem ser encaminhados para um transdutor que fará a conversão dos dados de sinais de acordo com o interesse do experimento (em sinais elétricos, vibracionais, ópticos etc), de acordo com a representação da figura 30.

$$\Upsilon(t) = \int_0^{\frac{\pi}{dt}} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^{\tau_{max}} C_Y(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau} \right) \cos[\omega t + \phi(\omega)] d\omega \quad (8.1)$$

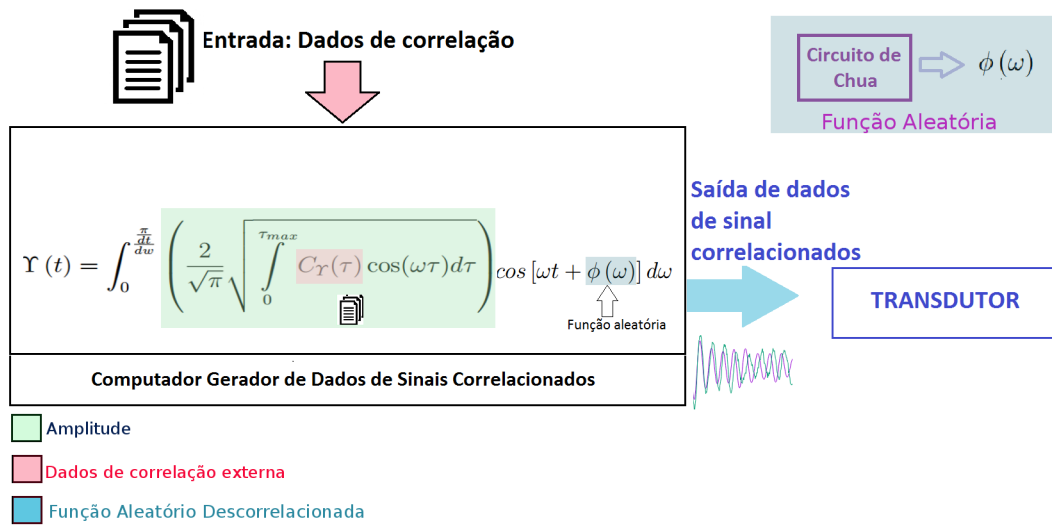


Figura 30: Representação do gerador de sinais correlacionados

Uma observação importante é que a função geradora depende de dados aleatórios descorrelacionados de uma função $\phi(\omega)$ que pode ser obtido a partir de algoritmos computacionais com funções aleatórias ou por outros meios como é o caso do circuito de caótico de *Chua* que, suas condições iniciais podem ser ajustadas para tal funcionamento, é confiável para este propósito. Este trabalho aborda em vários momentos o uso do circuito de *Chua* tendo como finalidade propor o seu uso como gerador de função aleatória de dados descorrelacionados, já que muitas funções randômicas computacionais existentes são pseudoaleatórias e seu uso deve ser previamente analisado em casos reais de utilização. A correlação tem como conceito básico o quanto um dado valor de variável influencia o outro e, neste sentido, dados pseudoaleatórios significam possuir certo grau de correlação entre os dados das variáveis e podem influenciar os resultados finais da função geradora já que o objetivo da função aleatória é mudar de fase as amplitudes dos sinais correlacionados gerados.

O transdutor do sistema é aquele definido para geração de sinais de acordo com o interesse do experimento científico. Como exemplos, no caso de necessidade de gerar

sinais elétricos, pode ser utilizado como transdutor um dispositivo de interpreta os dados e os converte em sinais elétricos analógicos; no interesse de geração de vibrações pode ser utilizado acoplado na saída elétrica do dispositivo um cristal piezoelétrico.

Os sinais aleatórios correlacionados obtidos pelo gerador proposto objetivam aplicação na facilitação da ocorrência do fenômeno de ressonância estocástica, como é o caso da caracterização de materiais pelo fenômeno fotoacústico e de leitura de sinais neuronais, porém podem ser utilizados em todo e qualquer experimento que dependa do uso de sinais aleatórios correlacionados.

8.2 Da simulação computacional

A simulação computacional objetiva a validação da proposta do gerador a partir da codificação da função geradora 8.1, por meio de uma metodologia definida, incluindo a escolha das correlações para o experimento e análise dos resultados.

Será adotado um modelo de estudos de previsões dinâmicas com simulação classificada como investigativa neste estudo. A variável exógena é um *array* com os dados de correlação de entrada.

8.2.1 A metodologia da simulação computacional

Etapa-01: Definição do software e equipamento para simulação do gerador: definido o uso de linguagem para codificação e compilador *Python* versão 2.7.13, utilizado

sob sistema operacional *Linux* distribuição *Kali* e gerador de gráficos *Gnuplot* 5.0. Foi definido também o uso do software *MatLab R2014a* apenas para geração de dados de correlação e para extração de dados de sinais por simulação do circuito de *Chua* para uso como variável exógena. O equipamento utilizado na simulação foi um laptop Dell Inspiron 15R SE 7520 com processador Intel Core i7-3632QM com 3.2Ghz de frequência, memória *dual channel* 8GB DDR 1600MHZ e disco SSD 850 EVO 500GB *Samsung*.

Etapa-02: Definição de processo de funcionamento dos códigos de simulação: foram escritos dois programas para a simulação e depois compilados em *Python*. O primeiro programa realiza a carga dos dados de correlação contidos em um arquivo externo e executa a geração de uma quantidade determinada dos dados de sinal aleatório correlacionado (1-*Calcula_numeros_aleatorios.py*). O segundo programa carrega os dados de sinal correlacionados gerados e extrai a autocorrelação para fins de análise e comparação (2-*Calcula_correlacao.py*). Cada código do programa foi ajustado para definir o quantitativo de variáveis aleatórias a serem geradas sendo gerados para cada quantitativo de vetores o mesmo número de números aleatórios.

Etapa-03: Definição das variáveis exógenas e endógenas: foram escolhidos duas funções matemáticas de modelos de correlação e extração da correlação de um simulado aperiódico. Em termos de quantitativo foram definidos vetores contendo entre 20, 100, 1.000, 10.000 e 100.000 amostras de dados de correlação para experimento. Para alguns experimentos foram realizados análises com até 1.500.000 amostras de dados de correlação. O gerador produziu dados correlacionados entre 10 e 50.000 vezes o valor do número de dados de correlação de acordo com a descrição de cada experimento que serão detalhadas a frente. Entre as funções matemáticas de correlação foram escolhidas uma função decrescente $f(x) = a - x$ e uma função exponencial $f(x) = \exp\left(\frac{-x}{0.2a}\right)$ em que os valores de "a" sendo o tamanho do vetor

no experimento. O sinal simulado foi extraído da simulação do circuito de *Chua* desenvolvido em *MatLab*, obtido em <http://www.chuacircuits.com/matlabsim.php>, ajustado para geração de valores aperiódicos que se repetem ao longo do tempo com total 100.000 amostras. Todas as amostras de correlação foram gravadas em arquivo com codificação *ASCII*, contendo os valores das variáveis linha e linha, e com nome dados_2.dat.

Etapa-04: Definição dos procedimentos de análises: foram feitas análises entre os dados de correlação inseridos e a correlação dos sinais gerados. Ambas as correlações foram plotadas em gráfico único, com a mesma escala, para fins de análise e validação dos resultados do gerador.

Etapa-05: Finalização do experimento: análise final e escrita dos resultados;

8.3 Dos resultados dos experimentos em simulação computacional correlação de função exponencial

A simulação foi realizada com variação no número de amostras de dados de entrada de correlação que apresentavam como característica um gráfico exponencial obtidas a partir da função $f(x) = \exp(\frac{-x}{0.2a})$, sendo os valores da variável "a" cada experimento: 20, 100, 1.000, 10.000 e 100.000.

Neste experimento o gerador produziu amostras de sinais correlacionados com o mesmo número de amostras do sinal correlacionado e em seguida foi extraída sua correlação e realizada comparação das correlações de entrada e a dos dados de sinal correlacionado gerados. Tal metodologia objetivou a analisar os dados produzidos, com

poucas amostras, e avaliar sua correlação com a correlação do sinal de entrada e avaliar a significância quando utilizadas correlações de longo alcance. O experimento mostrou que para correlações de entrada de longo alcance ocorre perda de significância da correlação dos dados gerados quando há produção de poucos dados. Em outras palavras, quando utilizadas correlações de entrada muito extensas e geração de dados de sinais aleatórios correlacionados com quantidade igual aos dados de correlação de entrada, a correlação dos dados gerados perdem significativa resolução não apresentando exatas correlações com as dos dados de entrada.

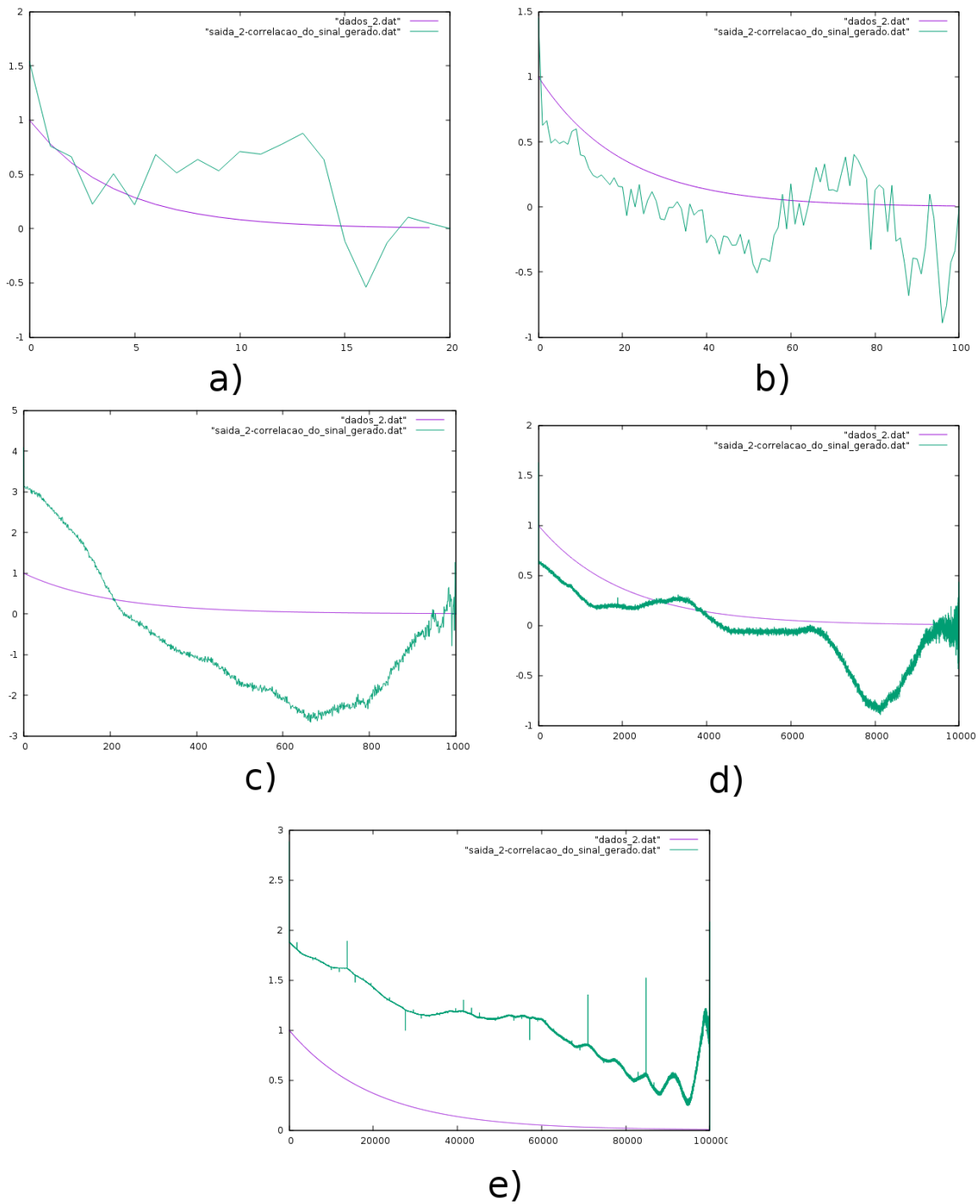


Figura 31: Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada de função exponencial e correlação de dados gerados a partir de mesmo quantitativo de amostras. a) 20 amostras, b) 100 amostras, c) 1.000 amostras, d) 10.000 amostras, e) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: "dados_2.dat". Arquivo de correlação dos resultados gerados: "saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat"

Para se testar a significação da correlação dos dados gerados com os dados de entrada a partir do número de dados produzidos pelo gerador, a função exponencial de correlação de entrada com 1.000 dados foi utilizada configurando o gerador para produzir desde o mesmo valor de dados até 100.000. Este parâmetro de tamanho de dados de correlação de entrada foi escolhido porque foi percebido que com a geração de dados de sinal correlacionados com o este quantitativo, idêntico aos da correlação de entrada, com 1.000 dados, iniciou um processo de perda de significação dos resultados. Neste sentido foram gerados em três experimentos 10.000, 50.000 e 100.000 dados de sinal correlacionado e posteriormente extraídas suas correlações para comparação com a correlação de entrada. Com o aumento de dados foi percebido uma amplificação e da resolução das correlações assim como melhor aproximação com a correlação de entrada até se alcançar a mesma correlação.

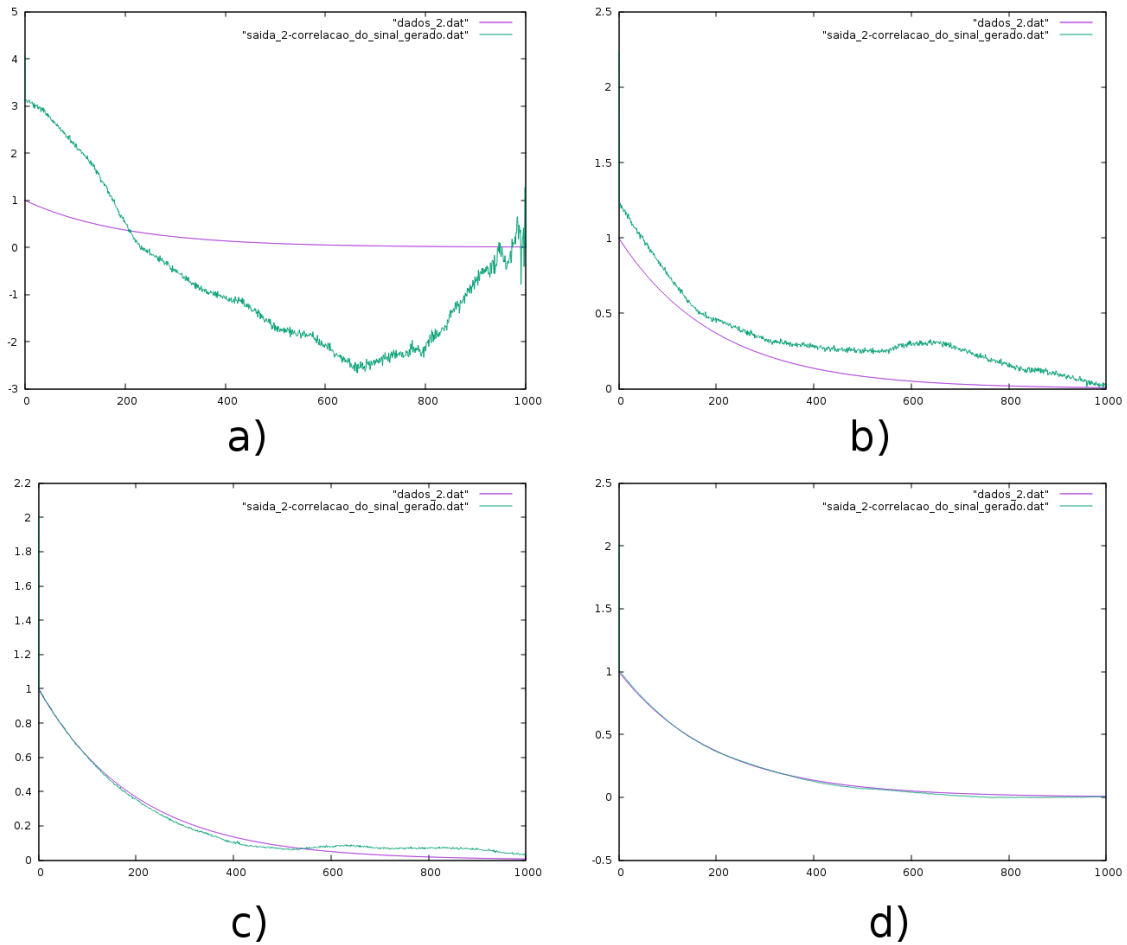


Figura 32: Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada de função exponencial com 1.000 amostras e correlação de dados gerados com a) 1.000 amostras, b) 10.000 amostras, c) 50.000 amostras, d) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

Os resultados mostraram também que em correlações de entrada de longo alcance ocorre perda de resolução proporcional ao longo do distanciamento dos valores iniciais mesmo quando há elevada resolução.

8.4 Resultados dos experimentos em simulação computacional correlação da função decrescente

A simulação foi realizada com variação no número de amostras de dados de entrada de correlação que apresentavam como característica um gráfico com reta decrescente obtidas a partir da função $f(x) = a - x$, com resolução de geração de 20, 100, 1.000, 10.000, 100.000 e 1.000.000 amostras para um valor de x com correlação de curto alcance. O Objetivo final é analisar o comportamento do gerador para diferentes tipos de curva de correlação. Para análise dos resultados foi realizada extração das correlações dos dados produzidos pelo gerador e comparado com a correlação de entrada no sistema impressas nos gráficos da Figura 33.

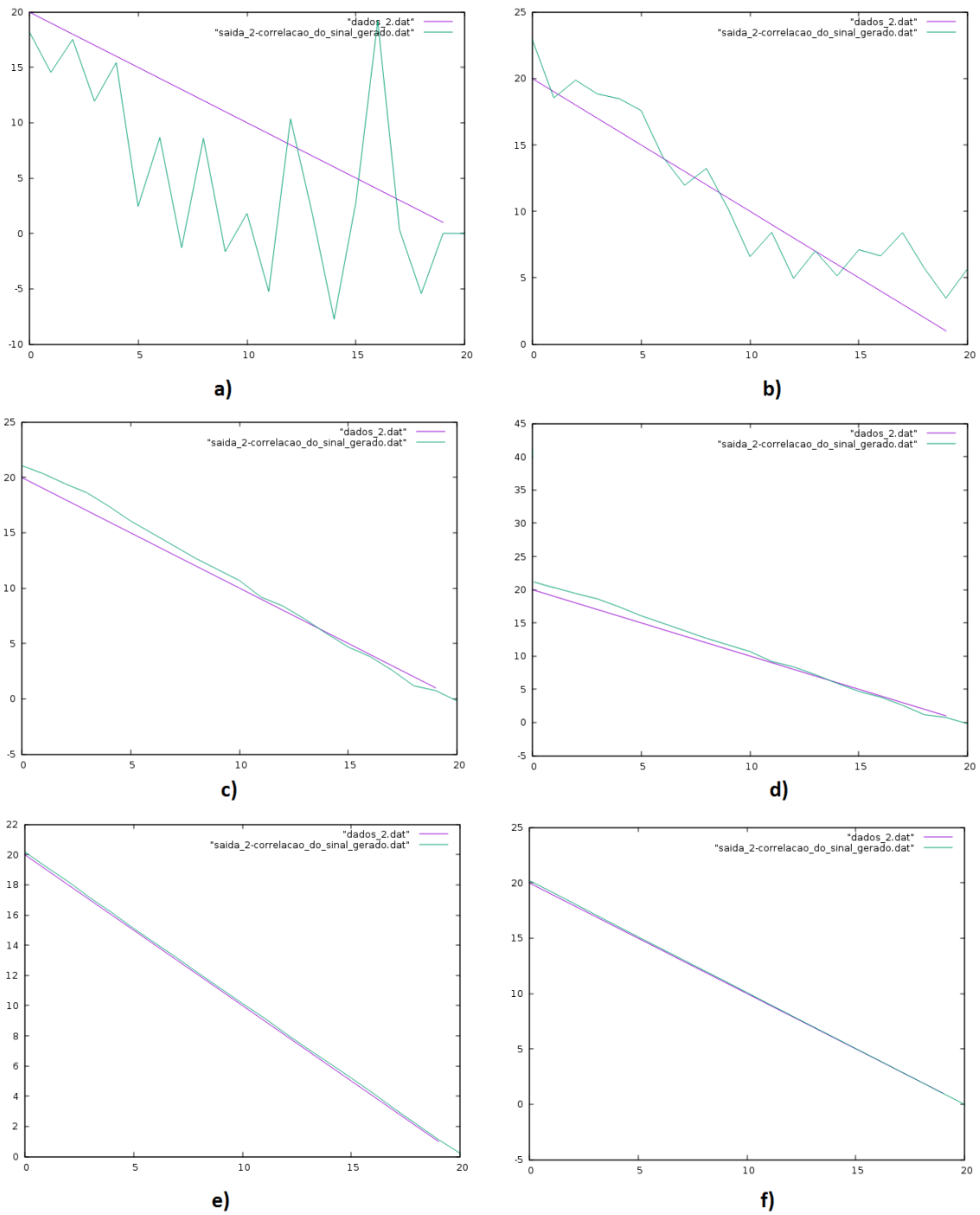


Figura 33: Gráfico com resultados comparativos entre correlação de entrada com variação determinada no número de amostras inseridas versus correlação dos dados produzidos pelo gerador. a) 20 amostras, b) 100 amostras, c) 1.000 amostras, d) 10.000 amostras, e) 100.000 amostras e f) 1.000.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

Em todos os casos os resultados demonstraram uma relação da correlação dos dados gerados com a resolução, que está vinculada com a quantidade de amostras geradas, apresentou resultados de dados correlacionados com a correlação de entrada com elevada exatidão. Este experimento valida a eficácia do gerador na produção de dados de sinais aleatórios com a mesma correlação inserida previamente no sistema.

8.5 Dos resultados dos experimentos em simulação computacional de correlação obtida de sinal simulado

A partir de sinal obtido pela simulação do circuito de *Chua* ajustado para funcionamento de produção de sinais aperiódicos repetíveis, 100.000 amostras foram obtidas e sua correlação extraída para uso como dados de correlação de entrada.

Foram realizadas oito simulação com quantitativo de sinal de entrada de correlação de 100, 1.000, 10.000 e 100.000 amostras, com geração dados de sinais aleatórios correlacionados com o mesmo quantitativo e também multiplicado por 100 vezes, com exceção do quantitativo de correlação de entrada com 100.000 dados de variável que foram geradas 1.500.000 amostras pelo gerador. O objetivo de tal especificidade foi a avaliação e comparação da correlação dos dados gerados com a correlação de entrada que possuía um comportamento que não fosse decrescente e originada de um sinal aperiódico.

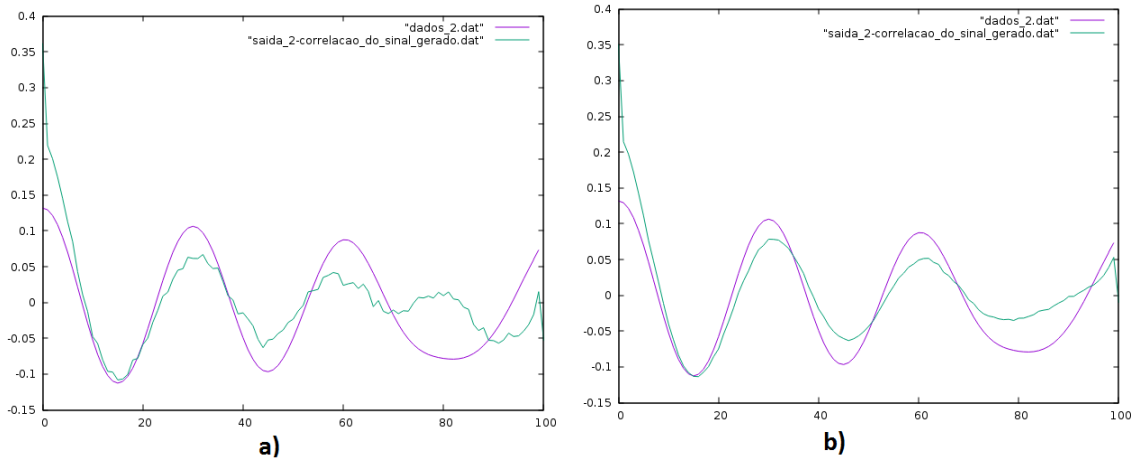


Figura 34: Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 100 amostras e b) 10.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

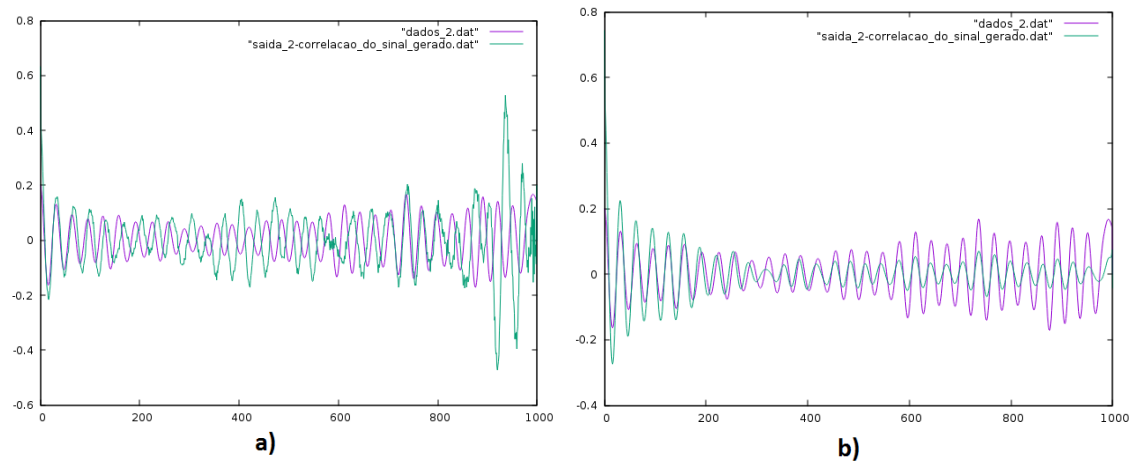


Figura 35: Resultados de simulações comparativa entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 1.000 amostras e b) 100.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

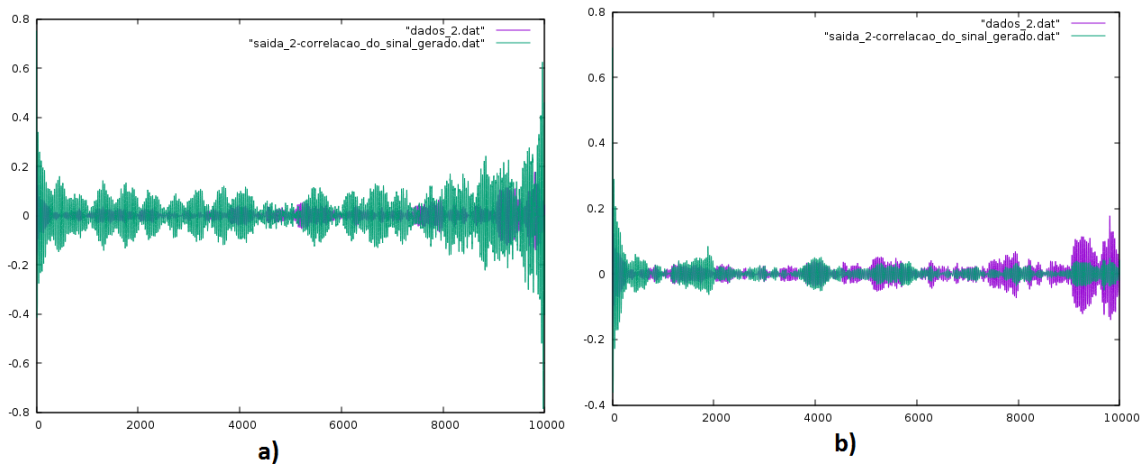


Figura 36: Resultados de simulações comparativo entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com a) 10.000 amostras e b) 1.000.000 amostras. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

Foi percebido neste experimento que correlações de longo alcance produzem resultados com perda de significação após determinados valores ao longo do gráfico. Identificamos também que a correlação obtida pela amplificação da resolução, que é promovida pelo aumento do quantitativo de dados de sinais correlacionados gerados, minimiza consideravelmente a perda de significância a começar por um sincronismo com as fases entre correlações de entrada e a dos dados gerados, perceptível na simulação com resolução de 15 vezes o número de dados de correlação deste experimento e, logo depois, um processo de aproximação muito discreto das amplitudes nos gráficos da figura 37.

Com correlações de curto alcance, de dados de entrada de 20 até 1.000 amostras, obtivemos excelente ajuste da correlação dos dados gerados com a correlação de entrada para uma relação aproximada de resolução a partir de 1.000 vezes a quantidade de dados de correlação de entrada. Para esta simulação, com os recursos disponíveis, objetivou-se gerar sinais correlacionados na relação de ao menos 1.000 vezes a quantidade de dados de correlação de entrada com valor de 100.000 amostras, porém foi calculado um custo computacional de processamento de dados para se gerar resultados na escala de meses,

o que inviabilizou tal prática e análise da acurácia da correlação de dados gerados com os dados de entrada para tal quantitativo.

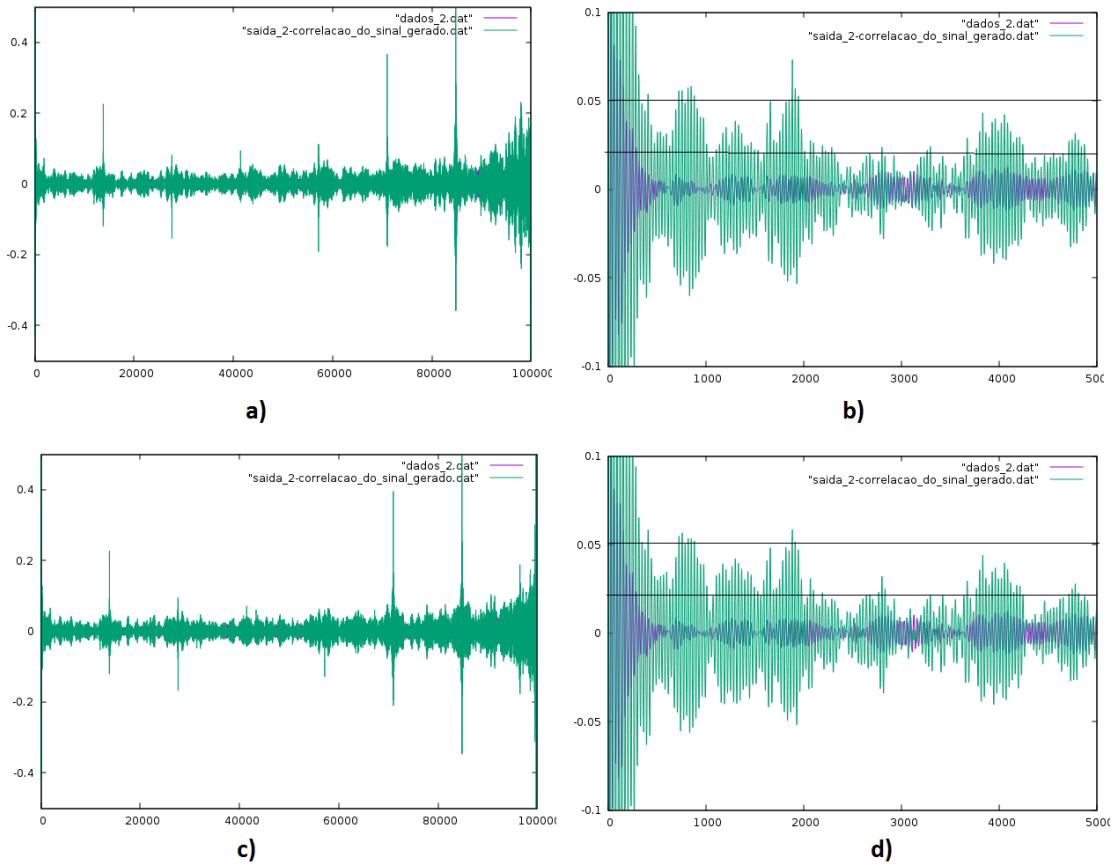


Figura 37: Resultados de simulações comparativo entre correlação de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis e correlação de dados gerados com resolução de 100.000 amostras (itens a e b) e 1.500.000 amostras (itens c e d). Os itens b e d são as respectivas ampliações dos gráficos correlatos. Arquivo de correlação de entrada: “dados_2.dat”. Arquivo de correlação dos resultados gerados: “saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat”

Concluimos que para este experimento correlações de entrada obtidas de sinais aperiódicos repetíveis, inseridas no gerador, resultam bons resultados de sinais correlacionados evidenciados pela aproximação entre as correlação, mas com perda de significação ao longo do gráfico quando utilizada na entrada de correlação de longo alcance. Foi observado que tais perdas podem ser minimizadas pelo aumento da resolução (extração da correlação de dados gerados com maior número de amostras).

8.6 Dos resultados finais da simulação computacional

Concluimos a função geradora é válida e possui a plena capacidade de gerar dados de sinal aleatório correlacionado a partir de uma dada correlação conhecida satisfatoriamente dentro das expectativas da função geradora. Em alguns casos foi percebido que para autocorrelações de longo alcance pode ocorrer uma pequena perda de significação que pode ser minimizada amplificando a resolução da correlação dos dados gerados, o que é feito por meio da geração de maior quantidade de dados correlacionados. Não é possível afirmar que tal perda de significação persistirá quando maximizada a resolução pelo aumento do número de amostras geradas.

8.7 Da simulação experimental

A simulação experimental objetiva a validação da proposta utilizando em experimentos componentes físicos que simulam as reais condições de um dado problema. Inicialmente foi desenvolvida uma metodologia para simulação experimental definido a utilizar um conjunto de circuitos eletrônicos que estavam disponíveis no mercado em conjunto com os equipamentos de medição disponibilizados pela FUP.

8.7.1 A metodologia da simulação experimental

Etapa-01: Definição do escopo e componentes da simulação experimental: simulação do circuito inicialmente, uso sistema não-linear gerador de sinal aperiódico como

sinal de entrada; computador gerador de sinais correlacionados que realiza a extração da correlação e geração de sinal-ruído aleatório correlacionado; junção dos sinais e avaliação da ocorrência do fenômeno de ressonância estocástica;

Etapa-02: Definição de componentes, aquisição e empréstimo dos equipamentos : *Arduino Uno*, dois circuitos de *Chua* (um ajustado como gerador de sinal não-linear aperiódico e outro como gerador de sinal descorrelacionado), conversor D/A MCP4725 para *Arduino*, utilização de osciloscópio experimental (*Soundscope*) e UT-P0x FUP;

Etapa-03: Montagem dos circuitos e avaliação preliminar: testes unitários de cada componente para realização do experimento;

Etapa-04: Codificar programa e executá-lo no dispositivo gerador experimental: desenvolver algoritmo e codifica-lo para *Arduino* ;

Etapa-05: Finalização do experimento: análise final e escrita dos resultados: Avaliar sinais de entrada, validar o sinal descorrelacionado, comparar correlações, avaliar existência de picos, extrair a PSD dos sinais, avaliar estatisticamente as ocorrência do fenômeno de ressonância estocástica, reajustar circuito de *Chua* para PSD constante (ruído branco), avaliar ressonância estocástica com ruído branco e comparar com ruído correlacionado do gerador

8.8 Dos procedimentos executados e resultados da simulação experimental

Foi definido a utilização do dispositivo *Arduino Uno* codificado como gerador de sinais aleatórios correlacionados, uso de dois circuitos de *Chua* (um configurado para gerar números aleatórios descorrelacionados e outro configurado para geração de sinais aperiódicos como entrada de sinal), aplicação do sinal aleatório correlacionado com o

sinal da ocorrência do efeito de ressonância estocástica por equipamentos. Como o *Arduino* possui apenas saídas digitais foi decidido o uso de um dispositivo conversor digital/analógico para *Arduino* para se realizar os testes finais de acordo com a figura 38. As análises seriam feitas por coleta dos dados no próprio equipamento *Arduino*, dos osciloscópios utilizados da FUP e depois outros utilizados.

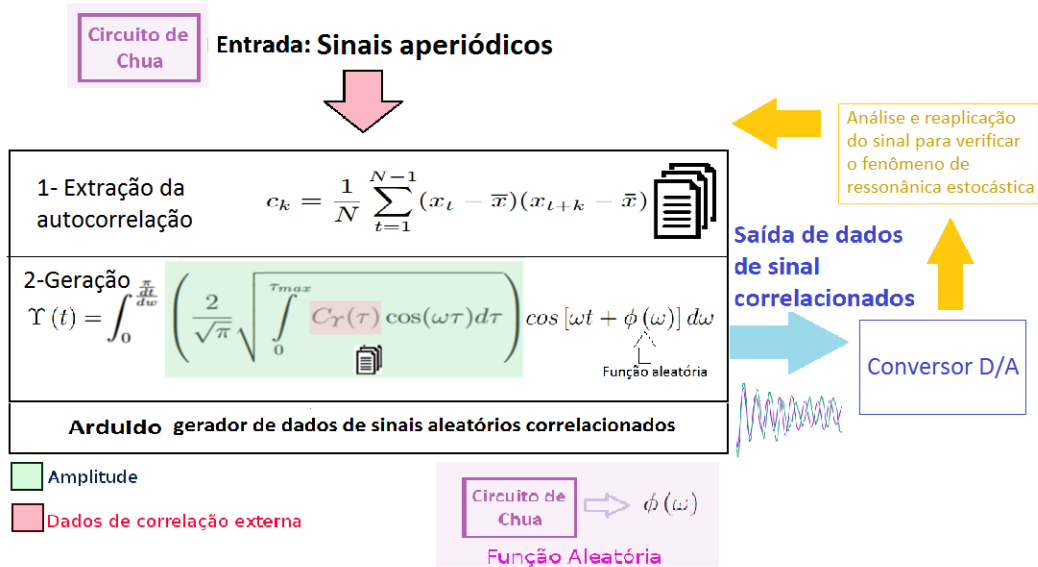


Figura 38: Concepção simulação experimental

Foi definido o uso além dos equipamentos osciloscópios da FUP, em teste, o osciloscópio alternativo simulado por software “*Soundcard Scope*” para análise dos sinais. O *Arduino* foi escolhido para o experimento em razão da sua disponibilidade de preço e configurações, em especial sua frequência de coleta na entrada analógica é de 980 Hz e realizar leitura entre 0 e 5V com resolução de 1024 níveis de energia (4,88mV).

Para composição dos circuitos de *Chua* foi decidido e adquiridos todos os componentes descritos na tabela 2, com exceção do potenciômetros de 2.5KΩ que estavam indisponíveis para compra em comércio local e foram substituídos potenciômetros de 2.0KΩ ligados em série com um resistores de 500Ω; duas unidades de amplificador ope-

racional TL082CP com resistor de 1Ω e potenciômetros de $5K\Omega$ para amplificação de sinal; resistor de $560K\Omega$ para extrair a tensão do circuito sem interferir na corrente do mesmo; dois resistores de 20Ω e quatro unidades de 10Ω para utilização de osciloscópio alternativo; *protoboards*, cabos, baterias de 9V, conectores e um conversor Digital/Analógico modelo MCP4725 para dispositivos *Arduino*. Uma unidade de dispositivo *Arduino* Uno de propriedade da UnB foi utilizado por regime de empréstimo.

Foram montados no *protoboard* o circuito de *Chua*, conforme imagem 15, e um amplificador operacional não-inversor, figura 39 caso se necessitasse de amplificação dos sinais gerados. O amplificador não inversor utilizou o componente TL082CP com resistores R1 de 1Ω e R2 potenciômetros de $5K\Omega$ para fins de ajustes. Além de análise em equipamento osciloscópio disponibilizado pela UnB para análise de sinal, foi utilizado como tentativa o software de simulação de osciloscópio “*Soundcard Scope*” com ao circuito da figura 40 interligado a placa de som do computador.

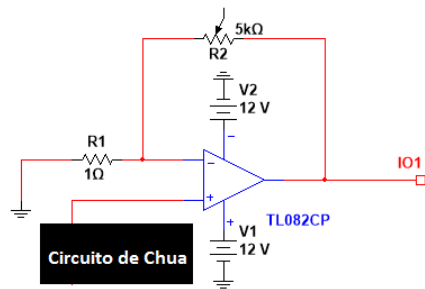


Figura 39: Amplificador operacional não-inversor

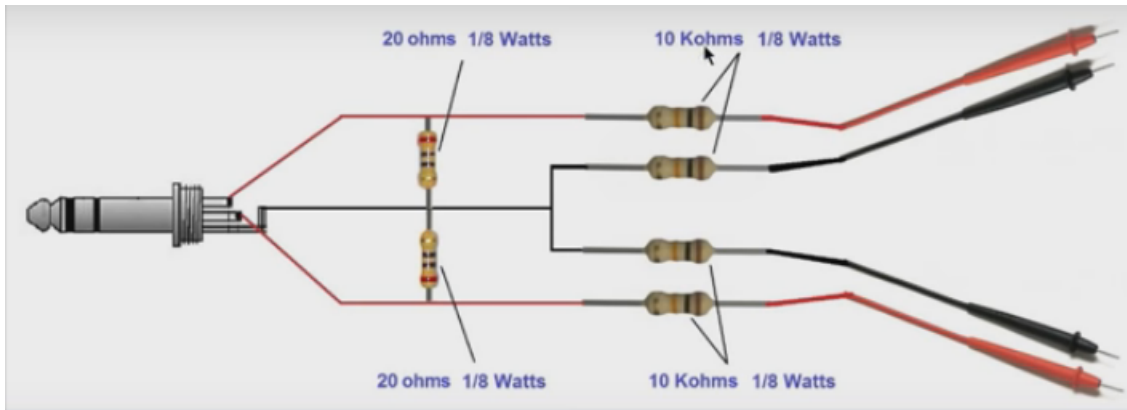


Figura 40: Esquema eletrônico para uso do *Soundcard Scope*

Preliminarmente foi feita uma tentativa de análise dos sinais gerados utilizando o *Soundcar Scope*. O nível do sinal obtido foi muito pequeno menor que 1mV. Decidiu-se utilizar então o circuito amplificador operacional não inversor montado no próprio *protoboard* para análise. Foi identificado que a amplificação do sinal iniciava-se na escala de Volts, porém em questão de segundo ocorria um decaindo acentuado na tensão provocado pela perda de carga total da bateria em menos de um minuto e meio inviabilizando o experimento, seus ajustes e análise. Foi então optado por refazer a análise nos laboratório da Unb com aparelho osciloscópio da instituição e utilizar fontes de tensão para o experimento.

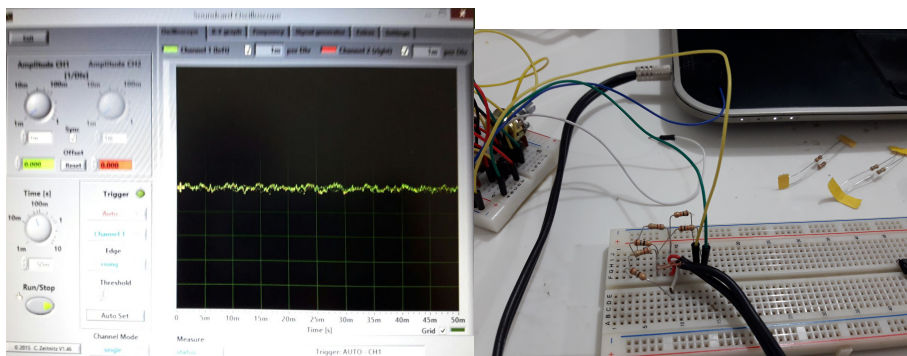


Figura 41: Resultados apresentados pelo *Soudcar Scope*

Após montagem e análise das tensões produzidas no circuito nos laboratórios da FUP

utilizando osciloscópio modelo *UT-P0x*, foi identificado níveis de tensão de até 2mV e estaria abaixo do limiar de leitura do dispositivo *Arduino* inviabilizando o experimento. Foi decidido que o uso de amplificador de tensão era essencial em razão da resolução de leitura dos níveis de energia do *Arduino* (mínimo de 4,88mV). O objetivo era se obter tensão de saída do circuito com picos até 5V.

Foi utilizando o software de simulação de componentes eletrônicos *Multisim* versão 12 para validação do uso do amplificar operacional. Foi percebido que utilizando baixa resistência havia fuga de corrente essencial ao funcionamento do circuito de *Chua* para o amplificador causando funcionamento não esperado. Para tanto foi constatado que, como o circuito funciona com variações muito pequenas de corrente elétrica e tensão, foram utilizados em simulação resistências elevadas com finalidade de que o mínimo de corrente tenha fuga para o amplificador deixando apenas sua tensão. Para fins de facilitar a visualização gráfica dos resultados no osciloscópio virtual foi utilizado um amplificador operacional inversor.

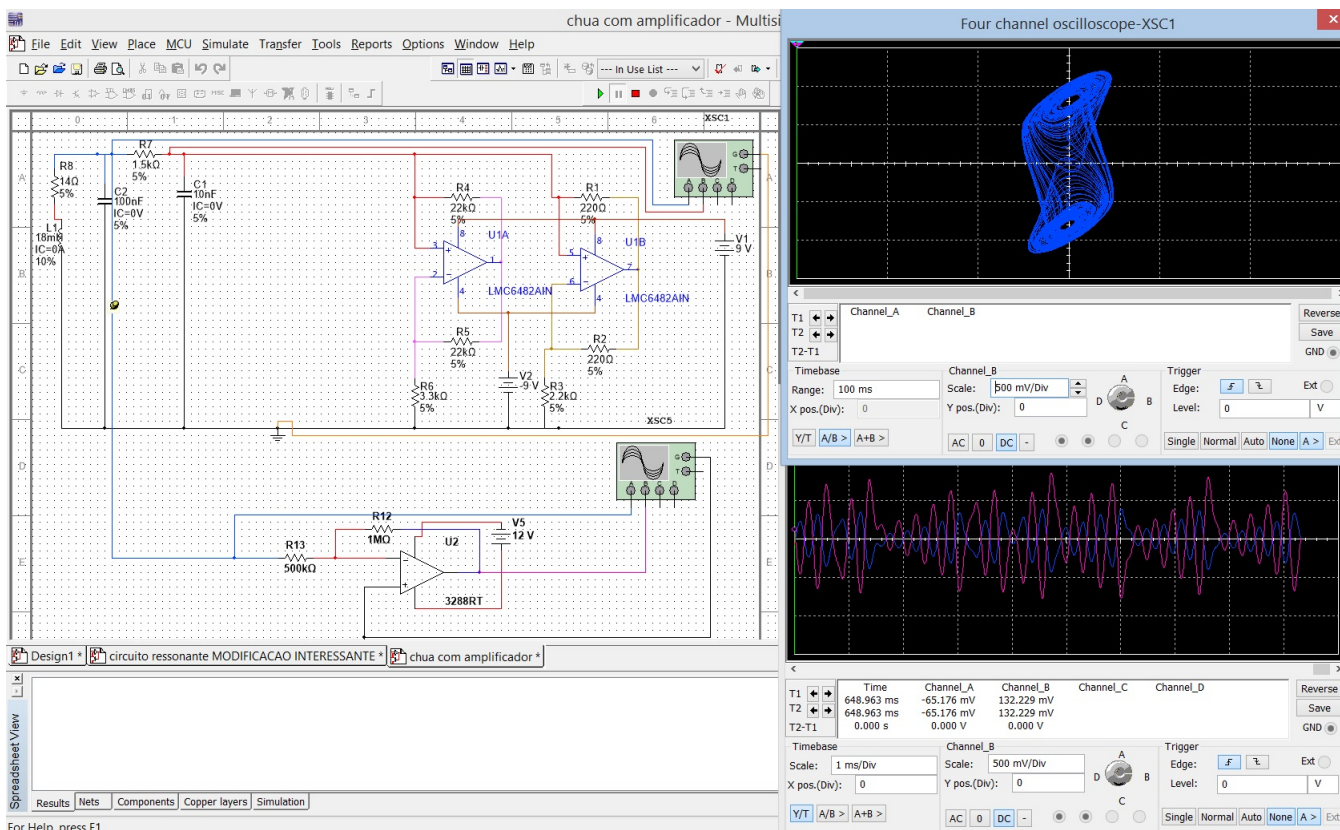


Figura 42: Simulação de circuito de *Chua* utilizando *Multisim*

Com finalidade de amplificar as tensões do circuito foi utilizado o amplificador operacional e alimentado os circuitos em fontes de tensão da instituição. Foi percebido que com baixa corrente não apresentou funcionamento. Conforme fomos ajustando aumentando a corrente no circuito iniciou-se o funcionamento, porém os CIs TL082CP queimaram no processo de ajuste. Como não havia componentes sobressalentes o experimento completo não pode ser continuado.

Os resultados apresentados foram os enrolamentos de *Chua* esperado, porém não se pode chegar ao ponto do “*Doble Scroll*” perfeito em razão da dificuldade de ajustes finos nos potenciômetros.



Figura 43: Experimento do circuito de *Chua* na FUP

Os resultados do experimento foram gravados na saída USB do osciloscópio para análise e uso posterior na simulação computacional. Para isso o software *DSO Monitor Controller* versão 1.6 foi copiado acreditando se possível análise dos dados posteriormente. Infelizmente o arquivo REC001.REC coletado pela equipamento não possui um formato ASCII legível e apenas pode ser aberto para reprodução da gravação no próprio dispositivo.

Por falta de recursos físicos disponíveis a simulação experimental não poder ser continuada em razão do funcionamento de um único circuito disponível.

9 Proposta de sistema dispositivo de gerador de sinal correlacionado real

Neste capítulo será descrita uma proposta para o desenvolvimento um sistema gerador de ruído correlacionado com finalidade de se obter facilitação na exploração do fenômeno de ressonância estocástica em aplicação que se beneficiam dos seus efeitos em sistemas que utilizam tensões elétricas, como é o caso de sistemas de caracterização de materiais que exploram o fenômenos fotoacústico, em leitores de sistemas neuronais entre outros.

A ressonância estocástica é o fenômeno em que um dado sinal de interesse entra em ressonância com sinal ruidoso aplicado dentro do sistema com máxima facilitação e efeito quando ambos os sinais possuam a mesma correlação em dado instante de tempo sendo este o objetivo final do gerador proposto. A título de exemplo, a ressonância estocástica é utilizada na caracterização materiais por efeito fotoacústico, leitura/registro de sinais eletrofisiológicos, terapias de estímulo em redes neuronais e, dependendo da aplicação, estabelecer ressonância com materiais para diversos fins de estudos científicos.

O processo de trabalho do sistema foi modelado utilizando técnica BPM (*Business Process Manager*) para melhor compreensão do fluxo, por meio de um processo de funcionamento definido providos por blocos funcionais, com funcionamento a partir de informações de correlações já existentes, para geração direta de sinal estocástico correlacionado.

Este sistema foi concebido para geração de sinais correlacionados a partir de sinais de entrada legíveis e correlação conhecida por se tratar de um sistema multiestável, ou seja, terá como saída diversos estados distintos de sinal analógico; o que é bem diferente dos sistemas biestáveis utilizados em sistemas sub e supra-limiais. Uma proposta de estudo futuro contemplará a geração de sinais a partir de sinais supra-limiais com

dados de autocorrelação desconhecidas e retroalimentação de sinal correlacionado a fim de se atingir um ponto máximo de correlação por ciclos. Neste caso tal proposta deve ser reavaliada validada por um novo modelo matemático em razão das características de retroalimentação.

9.1 Significados dos símbolos da notação BPM

O processo de funcionamento é a definição do fluxo de trabalho da proposta por modelo BPM, composto por um sinal de entrada, fluxos de decisão, processos de funcionamento, geração de relatório, armazenamento de informações em banco de dados, saída do sinal correlacionado e encerramento do processo por meio de um macro-processo e um sub-processo de geração de ruído correlacionado. Transdutores podem ser acoplados para a saída do sistema proposto e funcionar com o tipo de saída de sinal de interesse, seja por vibrações, por óptica e qualquer outro tipo de transformação de sinal do transdutor.

A notação BPM consiste na descrição de processos que podem ser aplicados em qualquer área de ciência. O conceito descreve símbolos de entrada, condicionais, eventos, processos e saída podendo ser automatizados gerando rotinas e programas que atendem o fluxo estabelecido envolvendo áreas, pessoas, condições, envio de mensagens/sinais, registro e coleta de dados em banco de dados externo entre outras funcionalidades. Neste trabalho o BPM será utilizado apenas para fins de modelagem do fluxo de trabalho. A automação será realizada por meio de simulações que serão apresentadas em capítulos posteriores.

A notação do BPM pode ser interpretada pelos seguintes símbolos:

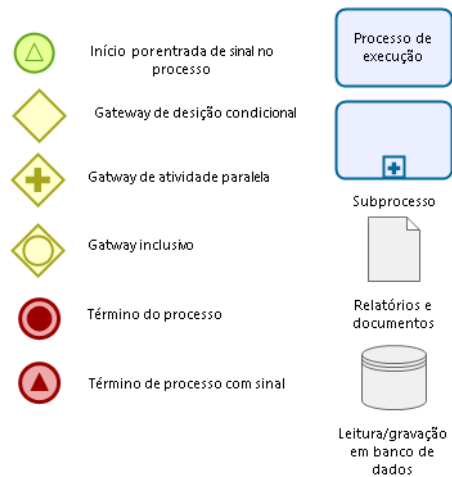


Figura 44: Descrição da simbologia do modelo BPM

9.2 Dos blocos funcionais

A proposta consiste em um sistema segmentado por um conjunto de blocos funcionais compostos por computador, conversores de sinais digitais e analógicos, dispositivos geradores de sinais estocásticos, entrada de sinal de interesse, saída de sinal ruidoso correlacionado e parâmetros técnicos mínimos para o desenvolvimento físico da proposta.

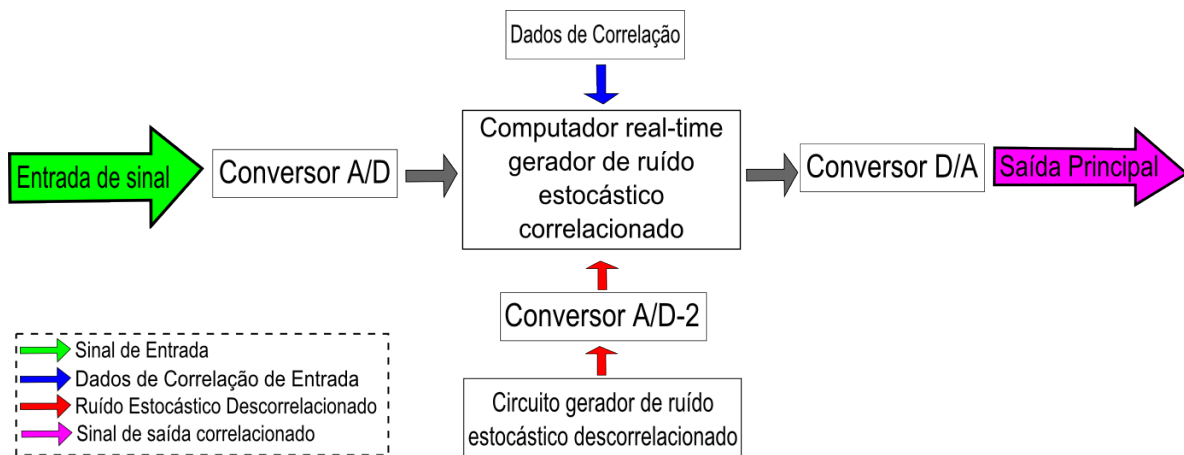


Figura 45: Diagrama do sistema de geração de sinal correlacionado proposto

9.3 Detalhamento dos blocos funcionais da proposta

9.3.1 Entrada de sinal

Consiste no bloco do dispositivo de entrada de sinal por meio de acoplagem com a fonte do sinal de interesse com a entrada de leitura do sistema. Este bloco está ligado diretamente ao bloco “Conversor analógico/digital”.

9.3.2 Dos blocos conversores analógico/digital

Bloco em que o sinal recebido será convertido em sinal digital. O fato mais importante a ser dimensionado na escolha do conversor é o tamanho de palavra e nível de sinal de trabalho. Neste caso é essencial, para escolha do conversor, estimar a variância de tensão do sinal a fim de se utilizar a melhor resolução para processo de conversão levando em conta que, para diferenças muito pequenas de tensão no sinal, dependendo da resolução do conversor, haverá significativa perda de informações e comprometimento dos resultados.

Para melhor compreensão tomemos como exemplo um sinal que possui variação de 0 até 10V em um conversor analógico digital de 12bits que trabalha no mesmo range de tensão. 12bits de resolução produzirá 4095 palavras. Isso representa uma variação com resolução de leitura de $\frac{10V}{4095} = 0.00244V$ unidades níveis de tensão elétrica. Caso o sistema de interesse necessite trabalhar com leitura de tensões menores que 0.00244V o sistema será ineficaz, pois apenas poderá registrar sinais de entrada a cada 0.00244V já que uma tensão de 0.00121V será interpretado como tensão 0V. Em termos de limitações em razão da quantidade de palavras do conversor, o limiar de leitura fica estabelecido na menor unidade de tensão elétrica do conversor legível e para variações muito pequenas no experimento, menores que a unidade de tensão, o experimento ficará comprometido.

O segundo fator a ser observado é tempo de conversão do sinal. Neste caso o tempo de conversão deve ser o mais próximo possível da frequência de trabalho do bloco

“Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado”, a fim de se ter taxas de amostragem de acordo com o teorema da amostragem de Nyquist–Shannon, que define que um dado sinal pode ser plenamente recuperado utilizando a fórmula $B = 2 * Fm$ em que B é o número de amostras por segundo e Fm é a maior frequência do sinal original [11, 21].

9.3.3 Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado

O gerador de ruído estocástico correlacionado é um computador que realiza cálculos matemáticos complexos em instantes de tempo suficiente para se evitar atrasos e perda de sincronismo do sinal de entrada com o sinal gerado na saída, ou seja, computação instantânea. Sendo o gerador um computador este também possui necessidade de memória para execução, armazenamento de informações, escalabilidade na modificação em códigos de programa e processos de pesquisa. Neste sentido alguns parâmetros serão estipulados para o pleno funcionamento do sistema.

Computadores *real-time* são aqueles que “recebem um estímulo e devem dar uma resposta instantânea” [45]. Para a geração de um sinal que deve ser antes processado e emitido com uma mínima defasagem de tempo possível, faz-se necessário o uso de computação *real-time*. Defasagens de tempo na geração do sinal ocasionarão falhas, pois dado sinal gerado no momento da saída pode não mais apresentar a correlação de interesse do sinal de entrada no instante de tempo defasado.

Observando as características dos computadores modernos, diferente das primeiras gerações que trabalhavam com execuções sequenciais, trabalham com arquiteturas de execuções paralelas. O paralelismo é uma técnica que objetiva uma maior performance dos computadores e podem ocorrer em nível de processadores, de instrução e em multi-computadores. Paralelismo de instrução, também conhecido como pipeline, segmenta-se uma execução em vários estágios de processamento além da execução de vários processos

paralelamente em nível de instrução. Paralelismo de processadores consiste na execução de instruções segmentadas em vários processadores existentes, com seus pipelines, numa mesma máquina que compartilham barramento e recursos de memória e dispositivos de entrada e saída controlada via software interno. Paralelismo em multi-computadores consiste no uso de vários computadores atuando em conjunto, paralelamente, a fim de somar poder computacional, também conhecido como *cluster*. Para fins de compreensão um programa de computador pode executar vários processos, que são tarefas a serem executadas. Vale considerar também que cada fabricante pode definir uma estratégia diferente para cada tipo de instrução. É possível se ter pipelines duplos, triplos etc; assim como as chamadas arquiteturas superescalares que consistem em um dado estágio do *pipeline* a execução de vários tipos de subprocessos internos.

É praticamente impossível saber previamente, a não ser o próprio fabricante, que um certo tipo de processo com suas peculiares instruções qual o caminho de processamento irá seguir. O que sabemos que os processadores são projetos para que sejam executados processos de maneira mais efetiva possível. Instruções simples podem ser direcionadas para pipelines que executam instruções simples e instruções complexas direcionadas à pipelines que executam instruções complexas para se ter decodificação e execução das instruções mais eficientes [45].

Compreendendo que o gerador funcionará como um processo que será segmentados em vários estágios (pipeline), que é um fator de trabalho dos computadores modernos, é necessário compreender que o processamento não ocorre em um único ciclo de *clock*. Portanto, para a escolha do tipo de computador, para o sistema, deve se levar em consideração preliminar, na escolha do computador para composição do sistema, uma série de requisitos técnicos tais como frequência de trabalho, pipeline, memória, velocidade de dispositivos de entrada/saída e de gravação.

Para escolha do computador *real-time* é proposto neste trabalho uma métrica sim-

ples de parametrização de requisitos mínimos do computador viável do sistema a ser observado na composição do sistema proposto:

a) Frequência real de trabalho Embora os computadores trabalhem na casa de Giga-hertz, no presente tempo atual, um processo que é dividido em vários estágios a sua frequência real de trabalho mínima, Fr , será dada pela razão da frequência nominal de trabalho pelo número de estágios de *pipeline* máximo conhecido. Conceituamos a proposta, neste trabalho, de frequência real de trabalho mínima por que um processo, com suas instruções, poderá não passar por todos os estágios de um pipeline assim como não sabemos previamente qual fluxo os processos de um programa irão percorrer. Sendo assim, a frequência real de trabalho mínima deve ser calculada a fim de se estabelecer parâmetros mínimos de configuração que atendam os experimentos.

$$Fr = \frac{FrequenciaNominal(GHz)}{PipelineMaximo} \quad (9.1)$$

Neste cenário compreendemos que os ciclos de busca, decodificação e execução estão todos embutidos no pipeline do processador *real-time*.

b) Dimensionamento e caracterização de memória volátil (RAM) e barramento Em um computador os dados produzidos e utilizados pelos processos são sempre gravados na memória volátil de alta velocidade, também conhecida como memória RAM.

O processador de um computador trabalha exclusivamente com dados que se encontram na memória volátil. Em resumo, todo e qualquer dado que é acessado pelo processador vem da memória volátil. Havendo um dado externo fora da memória volátil necessário ao funcionamento, estes são transferidos do dispositivo de armazenamento secundário para a memória volátil. Apenas depois deste processo os dados são lidos pelo processador.

Ocorrendo o uso do limite disponível da memória volátil, os sistemas operacionais utilizam a técnica de troca *Swapping*; técnica que consiste em utilizar um dispositivo de armazenamento secundário, geralmente de baixa velocidade, para troca e armazenamento temporário de dados da memória volátil viabilizando área útil disponível para o funcionamento do sistema. O impacto do uso da técnica de troca é a redução significativa do desempenho do funcionamento do sistema tornando limitada a velocidade e taxas do dispositivo mais lento. Nestes casos, dependendo da velocidade e taxa de leitura e gravação do dispositivo, se pode inviabilizar os experimentos [45].

Para o pleno funcionamento do sistema com objetivo de minimizar o uso da técnica de *Swapping*, torna-se necessário o dimensionamento prévio de memória volátil do sistema e configuração de velocidade/taxas de trabalho.

A velocidade de memória volátil deve ser a mais próxima possível da frequência nominal do processador. A mesma regra vale para o barramento da memória (vias que interconectam fisicamente os componentes).

Neste trabalho é sugerido que a memória volátil deve comportar área de armazenamento suficiente para conter as informações dos sinais resultantes do gerador, dados de correlação e dados de variáveis por todo o período de tempo em que durar o experimento, incluindo a dimensão de armazenamento para software sistema operacional do dispositivo, existindo sempre uma sobra técnica de 50% para se evitar o estouro da memória:

$$Memória = 1.5(Volume_Informações + Volume_area_sistema_operacional)(KB) \quad (9.2)$$

onde:

$$Volume_Informações = (Dado_Correlação(KB) + Dado_sinal_gerado(KB)) * (B * tempo_experimento(s));$$

$$Dado_sinal_gerado = (sinal_correlacionado(KB) + \sum variáveis_amplitude(KB) * \tau^{Max});$$

$Volume_area_sistema_operacional(KB)$ = área do sistema operacional e código de programa.

B = Número de amostras em pelo teorema de amostragem de Nyquist–Shannon;

em que $B = 2 * Fm$

sendo Fm = maior frequência do sinal original;

c) Velocidade do dispositivo de armazenamento secundário O dispositivo de armazenamento é utilizado tanto como área de troca como de armazenamento final da informações podendo ser de várias tecnologias. Tal dispositivo deve possuir taxa de leitura e gravação, Tm , suficiente para leitura e gravação de palavras ou bits do experimento suportando o número amostras de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist–Shannon dimensionadas em Kilobytes:

$$Tm > B * (Dado_Correlação(KB) + Dado_sinal_gerado(KB)) \text{ (KB/s)}$$

d) Proposta de método de dimensionamento de processador *real-time* Proposta de método de dimensionamento de processador *real-time* para funcionamento do dispositivo levando em consideração o número de amostras e a frequência real do processador levando em conta o pipeline máximo do componente, considerando uma sobra de 50% além do suporte do processamento dos dados baseados teorema de amostragem de Nyquist–Shannon para os códigos de programas.

$$Fr = \frac{FrequenciaNominal}{PipelineMaximo} > 1,5(2 * Fm) \quad (9.3)$$

Hz

$FrequenciaNominal$ = Frequência nominal do processador (Hz);

$PipelineMaximo$ = Número de pipeline máximo do processador definido pelo fabricante;

Fr = Frequência real (Hz);

Fm = maior frequência do sinal original;

9.3.4 Conversor digital/analógico

O entendimento do conversor digital/analógico é o mesmo do bloco conversos analógico/digital porém funcionando de maneira invertida. As mesmas preocupações e definições na escolha da resolução devem ser observadas de acordo com o interesse do experimento.

9.3.5 Circuito gerador de ruído estocástico descorrelacionado

O bloco gerador de ruído (sinal) estocástico descorrelacionado deve ser capaz de gerar sinais completamente aleatórios descorrelacionados. Como computacionalmente a geração de dados aleatórios por funções randômicas quase sempre apresentam valores com correlação estatística, ou seja, são pseudoaleatórias, é proposto o uso do circuito *Chua*, que apresenta comportamento caótico com geração de sinal descorrelacionado de comportamento gaussiano, como compositor de sinais aleatórios descorrelacionados.

9.4 Dos processos de trabalho da proposta

O macroprocesso da proposta consiste basicamente que recebe um sinal de entrada de interesse e um sinal estocástico descorrelacionado, os converte de sinais analógicos em digitais, realiza leitura dos dados de correlação e por final gera um sinal correlacionado com o sinal de leitura armazenando todos os dados de entrada e saída em banco de dados para posterior geração de relatórios.

9.4.1 Macro processo

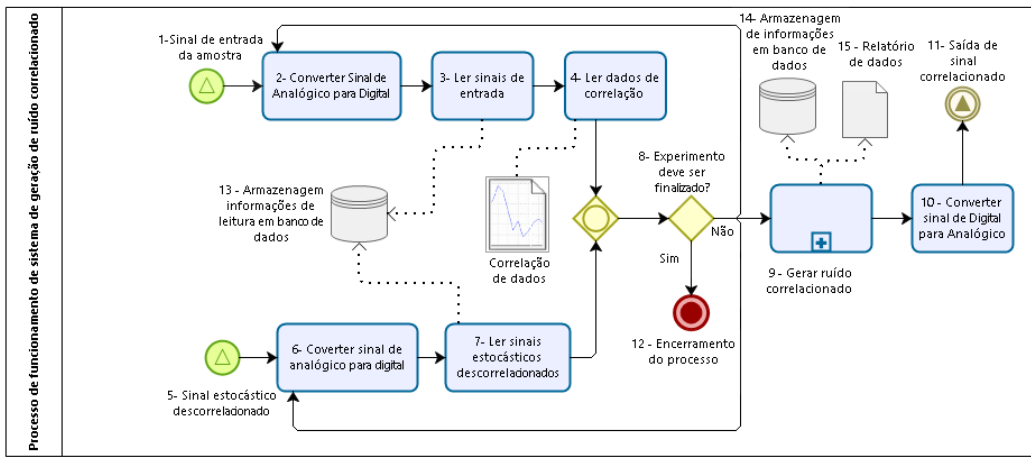


Figura 46: Proposta do Macro-Processo de funcionamento da proposta de sistema gerador de sinal correlacionado

9.4.2 Subprocesso “gerar ruído correlacionado”

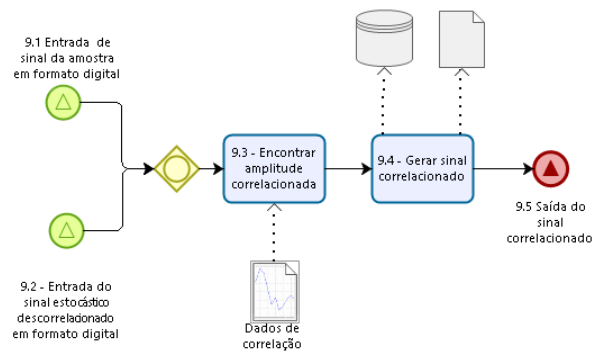


Figura 47: Sub-processo “Gerar Ruído Correlacionado”

9.4.3 Detalhamento do macroprocesso

O macroprocesso descreve o processo geral de funcionamento sem descrever processos internos dentro do sistema. A proposta do trabalho consiste exclusivamente na geração de sinais correlacionados com o sinal de entrada legíveis a partir de uma correlação conhecida do sinal de entrada.

O processo consiste na entrada simultânea do sinal da amostra de interesse e de um sinal estocástico descorrelacionado seguido da leitura de dados já existentes de correlação do sinal da amostra com a saída do sinal correlacionado.

- a) 1 - Sinal de entrada da amostra: O sinal da amostra é inserido no sistema;
- b) 2 - Converter Sinal de Analógico para Digital: No bloco “Conversor A/D” o sinal da amostra é convertido de analógico para digital;
- c) 3 - Ler sinais de entrada: O bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado” realiza a leitura dos dados e os armazena em banco de dados todos as informações do sinal;
- d) 4 - Ler dados de correlação : O bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado” realiza a leitura dos dados já existentes de correlação do sinal de entrada;
- e) 5 - Sinal estocástico descorrelacionado: Entrada do sinal estocástico descorrelacionado no sistema;
- f) 6 - Converter sinal de analógico para digital : No bloco “Conversor A/D-2” o sinal estocástico correlacionado é convertido de analógico para digital;
- g) 7 - Ler sinais estocásticos descorrelacionados: O bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado” realiza a leitura dos dados e os armazena em banco de dados todos as informações do sinal;
- h) 8 - Condicional - Experimento deve ser finalizado? : Nesta fase do processo o usuário define quando o experimento deve ser interrompido. Caso possa ser finalizada o processo é direcionado para o item 12 e o macro processo é encerrado. Caso contrário o item 9 é executado e os processos dos itens 1 e 5 volta a se repetir (*loop*);

- i) 9 - Subprocesso - Gerar ruído correlacionado : O resultado deste subprocesso é a geração do sinal em formato digital do sinal correlacionado produzido pelo bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado” com armazenamento em banco de dados de todas as informações produzidas assim como geração de relatórios;
- j) 10 - Converter sinal de Digital para Analógico: O bloco “Conversor D/A” realiza a transformação do sinal digital em analógico para aplicações de interesse científico;
- k) 11- Saída de sinal correlacionado: resultado final com emissão do sinal correlacionado na saída principal do sistema;
- l) 12 - Encerramento do processo: O processo é finalizado por decisão do usuário;
- m) 13 - Armazenagem informações de leitura em banco de dados: Como resultado do processo todos os dados referente ao sinal de amostra de entrada e do sinal decorrelacionado são registrados pelo bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado”;
- n) 14 - Armazenagem informações em banco de dados: Como resultado do processo todos os dados referente ao sinal correlacionado gerado são registrados pelo bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado”;
- o) 15 - Relatório de dados: Relatório gerado referente a todas as informações do macroprocesso executado;

9.4.4 Detalhamento do subprocesso “gerar ruído correlacionado”

O funcionamento do subprocesso viabiliza a geração de sinais correlacionados a partir de sinais legíveis pelo sistema por meio dos processos internos de sequência

enumerados 9.1 até 9.5, tendo como resultados a saída digital do sinal correlacionado do bloco “Computador *real-time* gerador de ruído estocástico correlacionado”.

- a) 9.1 Entrada de sinal da amostra em formato digital: O bloco recebe os dados do sinal de entrada em formato digital;
- b) 9.2 - Entrada do sinal estocástico descorrelacionado em formato digital: O bloco recebe os dados do sinal estocástico descorrelacionado em formato digital;
- c) 9.3 - Encontrar amplitude correlacionada: O bloco realiza a buscas dos dados de correlação previamente lidos e a partir da leitura dos sinais de entrada encontra os dados de amplitude correlacionada;
- d) 9.4 - Gerar sinal correlacionado : A partir dos dados de amplitude correlacionada e do sinal estocástico descorrelacionado é gerado o sinal correlacionado com armazenamento em banco de dados da amplitude e do sinal correlacionado em formato digital. Após o armazenamento em banco de dados o bloco gera os relatórios de interesse;
- e) 9.5 Saída do sinal correlacionado: O sinal correlacionado gerado em formato digital sai do bloco com destino a saída principal.

9.4.5 Saída principal

Consiste no bloco do dispositivo de saída de sinal analógico para acoplagem ao dispositivo externo de interesse tais como diretamente em sistemas que funcionam com tensões elétricas ou em transdutores de interesse.

9.5 Desenvolvimento para estudos futuros

A proposta do sistema supracitado é focado apenas para um dispositivo de geração de sinais correlacionados legíveis. Utilizando o mesmo princípio é possível também

a geração de sinais correlacionados de sinais de sub e supra-limiaries . Para tanto é necessário o desenvolvimento da ideia de um gerador, em estudos futuros, de um dispositivo que seja constituído por um *array* de sistemas lineares idênticos, que amplifique inicialmente seu sinal com posterior retroalimentação de sinais correlacionados para o estudo de outras potencialidades.

Para tanto, a abordagem da ideia abaixo será utilizada para estudos futuros assim com desenvolvimento de modelos matemáticos que possam validar o método de trabalho que será descrito.

Neste capítulo será descrita uma proposta para o desenvolvimento um sistema para geração de ruído correlacionado com finalidade de se obter máxima facilitação para geração e exploração do fenômeno de ressonância estocástica. para sinais sub-limiaries e sinais legíveis.

Leitura de sinais sub e supra-limiaries são realizadas por sistemas biestáveis, que são aqueles que possuem apenas dois estados estáveis, geralmente valores zero e um. É necessário um estudo para atestar se a retroalimentação viabilize a leitura de sinais provendo um sistema multiestável, ou seja, que consiga realizar a leitura real do sinal e não estimativas pela incidência de dois estados. Neste sentido o dispositivo traria significativo benefício pela captação das características e muitos próximas do comportamento contínuo do sinal.

A proposta em si é a concepção de um modelo de sistema gerador de ruído correlacionado funcional, por meio de um processo definido em BPM, de acordo com a peculiaridade de cada tipo de sinal, que trabalhará tanto com sinais de entrada legíveis e ilegíveis com retroalimentação, quando for o caso.

9.5.1 Demonstração dos blocos funcionais da proposta para estudos futuro

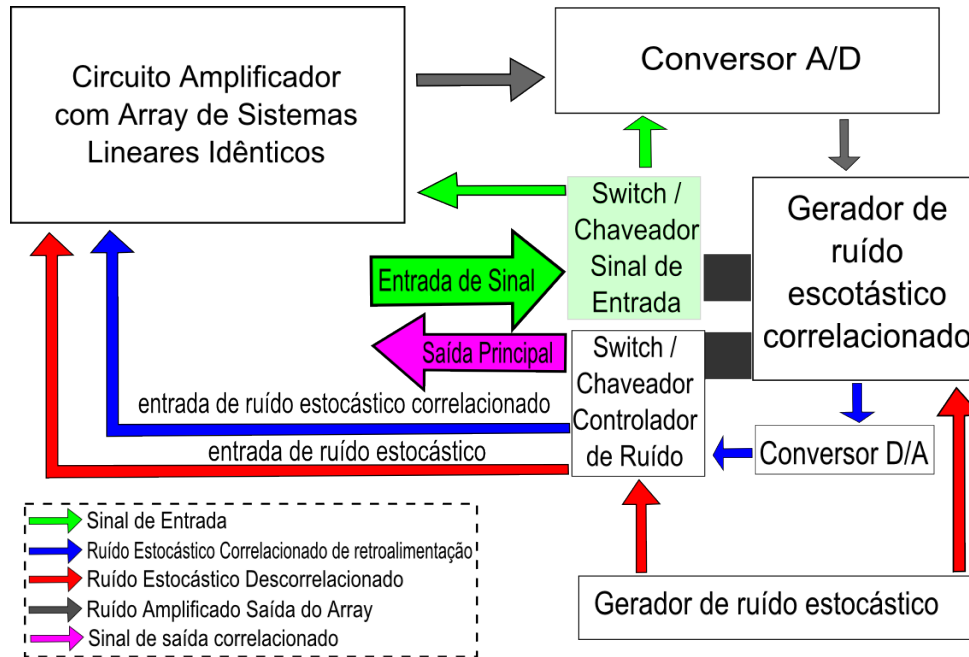


Figura 48: Blocos funcionais da proposta para estudos futuro

9.5.2 Demonstração do macroprocesso da proposta para estudos futuro

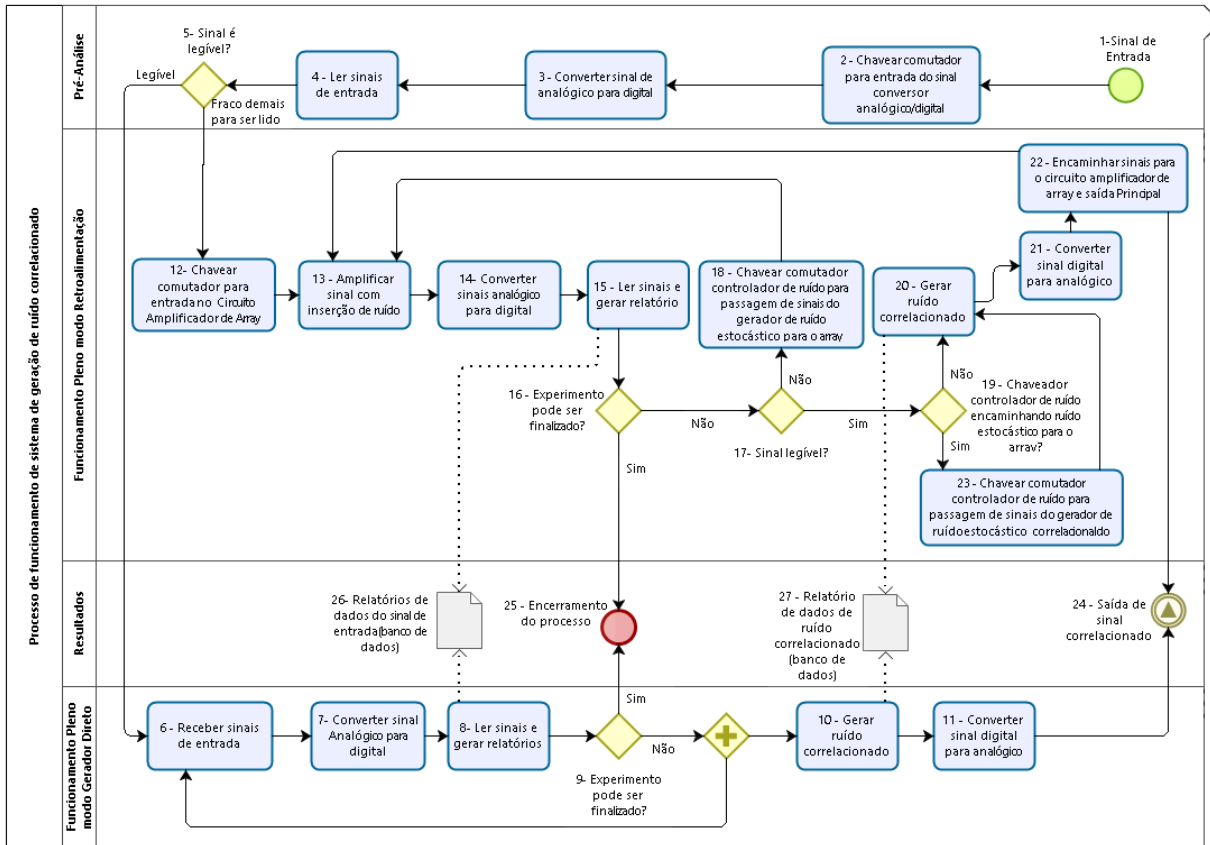


Figura 49: Macro-processo da proposta para estudos futuro

9.5.3 Descrição do macroprocesso da proposta para estudos futuro

O processo de funcionamento é a definição do fluxo de trabalho da proposta que é composto por um sinal de entrada, fluxos de decisão, processos de funcionamento, geração de relatório em banco de dados, saída do sinal correlacionado e encerramento do processo.

Toda a estrutura do processo de funcionamento está segmentado em duas etapas de funcionamento, pré-análise e funcionamento pleno, e dois modos de operação, modo

direto e retroalimentação.

Etapa de funcionamento em pré-análise A etapa de funcionamento em pré-análise consiste na fase do processo de leitura prévia do sinal a fim de se identificar se o mesmo é legível ou ilegível. A partir de um processo decisório automático o sistema se auto ajusta ao seu modo de funcionamento.

Os modos de funcionamento do dispositivo são os modos direto ou retroalimentação. No funcionamento modo direto, quando o sinal de entrada é legível pelo sistema, o sistema funcionará gerando sinais correlacionados a partir da correlação do próprio sinal de entrada ou da inserção de dados de correlação pelo usuário. No modo de funcionamento modo retroalimentação, em que os sinais são ilegíveis pela incapacidade de leituras dos equipamentos de sinais sub-limiars é adiciona ruído branco para exploração do fenômeno de ressonância estocástica e consecutiva leitura inicial, análise dos dados de correlação dos sinais inicialmente lidos e, por final, ciclos de retroalimentação para leituras cada vez mais precisas e correlacionadas do sinal de entrada.

O processo na etapa de funcionamento em pré-análise consiste na sequência dos processos enumerados de 1 até 5, com ação condicional para os processos internos em funcionamento pleno modo direto enumerados de 6 a11 e condicional para os processos internos de em funcionamento pleno modo retroalimentação enumerados de 12 a 23, ambos com saída de sinal correlacionado no item 24 através da seguinte descrição:

- a) 1- Entrada - Sinal de Entrada: Corresponde a entrada do sinal da amostra no sistema;
- b) 2- Chavear comutador para entrada do sinal conversor Analógico/Digital: O bloco “*Switch / Chaveador Sinal de Entrada*” é comutado para direcionar o sinal ao bloco “Conversor A/D”;
- c) 3-Converter Sinal de Analógico para Digital: O bloco “Conversor Analógico/Digita”

converte o sinal de entrada analógico para uma sinal digital interpretável pelo bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”;

- d) 4-Ler sinais de entrada: O bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” realiza a leitura do dados em sua entrada;
- e) 5-Condiciona - Sinal é legível?: Nesta condicional o bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” avalia se há sinais em sua entrada. Havendo sinais legíveis encaminha para o processo item 6, caso ilegível encaminhar para o processo item 12.

Etapa de Funcionamento Pleno Modo Direto O funcionamento pleno modo direto viabiliza a geração de sinais correlacionados de sinais que podem ser lidos pelo sistema sem o auxílio de ruído branco, enumerados na sequência de 6 até 11 com resultado no processo 24, que é a saída principal de sinais correlacionados do dispositivo.

- a) 6- Receber sinais de entrada: O sistema mantém o estado do bloco “*Switch* / Chaveador Sinal de Entrada” para encaminhamento dos sinais de entrada para envio ao “Conversor Analógico/Digita”;
- b) 7 - Converter Sinal Analógico para Digital : O bloco “Conversor Analógico/Digita” converte o sinal analógico recebido para formato digital e o encaminha para o bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”;
- c) 8 - Ler sinais e gerar relatórios O bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” realizar a leitura do sinal de entrada para gerar os sinal correlacionado. Nesta fase o sistema também armazena todos os dados inseridos no sistema para registro em banco de dados do sinal de entrada do experimento para futuras análises;
- d) 9 - Condiciona - Experimento pode ser finalizado?: Nesta fase do processo o usuário define quando o experimento deve ser interrompido. Caso possa ser finalizada o

processo é direcionado para o item 26 e o macro processo é encerrado, caso contrário o item 10 é o próximo a ser executado e o processo do item 6 volta a se repetir (*loop*).

- e) 10 - Gerar ruído correlacionado: O bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” realiza sua funcionalidade principal e encaminha o sinal gerado para o bloco “Conversos Digital/Analógico”. O sistema nessa fase também armazena todos os sinais gerados para registro em banco de dados para futuras análises e relatórios.
- f) 11 - Converter sinal de Digital para Analógico: O sinal recebido do bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” é convertido em sinal analógico e encaminhado para a saída principal neste mesmo bloco.

Etapa de Funcionamento Pleno Modo Retroalimentação Sinais não legíveis podem ser compreendidos como sinais fracos que não conseguem ultrapassar o limiar de leitura dos equipamentos considerados sinais sub-limiais. Tais sinais, mesmo não sendo legíveis diretamente no sistema estão presentes. É o caso de sinais neuronais e fotoacústicos que são apenas registrados com a inserção de ruído estocástico, branco, para promover o fenômeno de ressonância estocástica e conseqüente ampliações momentâneas dos sinal e leituras pelo surgimento de pequeno picos que ultrapassam o limiar quando ocorre correlação do ruído com sinal de entrada. Este sistema poderá viabilizar uma leitura concreta do sinal e não apenas leituras biestáveis. Sendo assim, os picos de amplificação são avaliados, interpretados e consecutivamente estimada a assinatura (desenho) do sinal.

A retroalimentação objetiva viabilizar um processo de amplificação inicial, pelo método tradicional de inserção de ruído estocástico para se estimar uma leitura inicial e, a partir dela, gerar ruídos cada vez correlacionados reinseridos no sistema para novas leituras e ciclos cada vez mais correlacionado a fim de atingir uma máxima facilitação

do fenômeno de ressonância com o sinal de entrada.

- a) 12- Chavear comutador para entrada no Circuito Amplificador de *Array*: O bloco “*Switch* / Chaveador Sinal de Entrada” é comutado para encaminhar os sinais de entrada para o bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos”;
- b) 13 - Amplificar sinal com inserção de ruído: O bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos” adiciona em todo *array* o ruído estocástico para fins de amplificação pelo efeito de ressonância supra-limiar (*suprathreshold*);
- c) 14- Converter sinais analógico para digital: O bloco “Conversor Analógico/Digital” converte o sinal analógico recebido para formato digital e o encaminha para o bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”;
- d) 15 - Ler sinais e gerar relatório: O bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” realizar a leitura do sinal de entrada para gerar os sinal correlacionado. Nesta fase o sistema também armazena todos os dados inseridos no sistema para registro em banco de dados do sinal de entrada do experimento para futuras análises;
- e) 16 - Condicional - Experimento pode ser finalizado?: Nesta fase do processo o usuário define quando o experimento deve ser interrompido. Caso possa ser finalizada o processo é direcionado para o item 25 e o macro processo é encerrado, caso contrário o item 10 é o próximo a ser executado e o processo do item 6 volta a se repetir (*loop*);
- f) 17 - Condicional - Sinal legível? : Esta condicional define o fluxo do processo que, dependendo do sinal, se ilegível, o processo item 18 será acionado e se legível o processo item 20 seguirá o fluxo;

- g) 18 - Chavear comutador controlador de ruído para passagem de sinais do gerador de ruído estocástico para o *array*: Nesta fase do processo o bloco “*Switch / Chaveador Controlador de Ruído*” chaveia e direciona o sinal oriundo do bloco “Gerador de ruído estocástico” com destino a entrada de ruído do bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos” para se iniciar se explorar o fenômeno de ressonância estocástica a fim de que se obtenham valores de leitura iniciais no sistema;
- h) 19 - Condicional - Chaveador controlador de ruído encaminhando ruído estocástico para o *array*? : Processo decisório importante que, havendo sinais legíveis, é checado se há ou não retroalimentação no bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos” por sinais correlacionados gerados pelo bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”. Havendo sinais de leitura é neste processo decisório que se inicia a retroalimentação do sistema com sinais gerados correlacionado pelo processo item 20 pela chaveamento do bloco “*Switch / Chaveador Controlador de Ruído*” para que encaminhe ao “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos” os sinais gerados;
- i) 20 - Gerar ruído correlacionado : Processo em que ocorre a geração de sinais correlacionados baseados na leitura dos dados amplificados pelo bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos”;
- j) 21 - O sinal recebido do bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” é convertido em sinal analógico e encaminhado para a saída principal neste mesmo bloco.
- k) 22 - Encaminhar sinais para o circuito amplificador de *array* e saída Principal: Neste processo havendo geração de sinais estes são encaminhados para o bloco “Conversor Digital/Analógico” que segue sequência para o bloco “*Switch / Chaveador Contro-*

lador de Ruído” que encaminhará o sinal para as duas saídas: saída principal e saída de retroalimentação que alimenta junto de sinais no bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos”;

- 1) 23 - Chavear comutador controlador de ruído para passagem de sinais do gerador de ruído estocástico correlacionado: Processo em é o bloco “*Switch* / Chaveador Controlador de Ruído” para que altere o fluxo de entrada de sinais do bloco “Gerador de ruído estocástico” para “Conversor Digital/Analógico” que recebe os dados do bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”;

Resultados

- a) 24 - Evento saída de sinal - Saída de sinal correlacionado: Tal evento é o resultado final dos processos 11 e 22;
- b) 25 - Encerramento do processo: final de todo macroprocesso ocasionados pelas condicionais 9 e 16;
- c) 26 - Relatório de dados do sinal de entrada (banco de dados): Relatório de dados que consiste no registro de todos os dados do sinal de entrada que serão armazenados em banco de dados no bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado”;
- d) 27 - Relatório de dados de ruído correlacionado (banco de dados):Relatório de dados que consiste no registro de todos os dados do sinal produzido pelo bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” que serão armazenados em banco de dados no próprio bloco;

9.5.4 Dos blocos funcionais da proposta para estudos futuro

***Switch* / Chaveador Controlador de Ruído** O bloco *switch* chaveador controlador de ruído é controlado pelo bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” que

possui duas entradas e duas saídas. As entradas são provenientes dos sinais gerados pelo bloco “Conversor D/A” e “Gerador de ruído estocástico”. As saídas são “saída principal”, em que o bloco encaminha os sinais oriundos do “Conversor D/A”, a saída com destino ao bloco “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos” encaminhando ou sinais vindos ou bloco “Gerador de ruído estocástico” ou do “Conversor D/A”.

Switch / Chaveador Sinal de Entrada Assim como o bloco anterior este é um chaveador controlado pelo bloco “Gerador de ruído estocástico correlacionado” que possui uma entrada e duas saídas. A bloco possui como entrada os sinais da “Entrada de sinais” e que exerce ação encaminhando o sinal ou para o bloco “Conversor A/D” ou para o “Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos”.

Gerador de ruído estocástico Bloco composto por um gerador de ruído estocástico descorrelacionado compreendido pelo circuito de *Chua*.

Gerador de ruído estocástico correlacionado O bloco é um computador do tipo *real-time* que receberá os dados de sinais de entrada, controlará os blocos chaveadores assim como fará o registro em banco de dados de todas as informações do sinal de entrada, dos sinais correlacionados gerados e relatórios. O gerador realizará tanto os cálculos de geração direta quanto os provenientes do *array* de sistemas lineares idênticos.

Circuito Amplificador com *Array* de Sistemas Lineares Idênticos Trata-se do *array* de sistemas lineares idênticos que tem como funcionamento a amplificação pelo fenômeno de supra-limiar pela inserção do sinal de ruído que ao final é somado e adquirido um sinal supra-limiar legível em sua saída;

Conversor Analógico/Digital Bloco por uso de CI conversor de sinal analógico

para digital.

Conversor Digital/Analógico Bloco por uso de CI conversor de sinal digital para analógico

10 Conclusão

Vimos que o fenômeno de ressonância estocástica consiste na aplicação de um sinal de ruído aleatório com certas características e cujo objetivo é ampliar um determinado sinal estocástico. Tal fenômeno ocorre quando o sinal de interesse e o sinal ruidoso possuem a mesma autocorrelação. Vimos também que a ressonância estocástica é amplamente explorada pela ciência, desde processos de caracterização de materiais, incluindo *invivo*, que se beneficiam do fenômeno fotoacústico; medição de sinais eletrofisiológicos, em aplicações em tratamentos médicos, nas áreas de engenharias e diversas outras.

Pensando em processos que viabilizem o fenômeno, este trabalho idealizou e propôs um dispositivo que gera sinais aleatórios correlacionados a partir de uma dada correlação conhecida. Para isso, o presente estudo apresentou um modelo matemático capaz de gerar números aleatórios correlacionados, a partir de uma correlação conhecida. O modelo matemático foi utilizado em uma série de simulações computacionais.

Após apresentar o modelo e as simulações, apresentamos a idealização de um dispositivo que viabilizasse tal funcionalidade. Descrevemos a proposta com suas características principais, assim como seus requisitos funcionais. As simulações demonstraram a eficácia do gerador, nos mostrando, inclusive, questões relacionadas a necessidade de observações de parâmetros que influenciam nas resoluções das correlações dos dados obtidos, como no caso da relação entre quantitativo de amostras geradas e resolução.

A partir deste trabalho é possível desenvolver novas propostas de dispositivos tecnológicos para gerar sinais que causem ressonância estocástica em diversos sistemas. Assim, seria possível novos estudos em caracterização de materiais, no campo médico, em específico nas áreas que envolvam leitura de sinais fisiológicos, como é o caso do processo de leitura de sinais neuronais para compreensão e tratamentos do sistema nervoso; além de qualquer área que faça uso de sinais de ruído, em especial na exploração

do fenômeno de ressonância estocástica.

11 Referências

Referências

- [1] Burbelo R. ; Andrusenko D.; Isaiev M.; Kuzmich A. Laser photoacoustic diagnostics of advanced materials with different structure and dimensions. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2011.
- [2] COSTA I. V. L. ;SANTOS M. V. S. ; DONATO C. C. ; OLIVEIRA F. A. A numerical study for non-stationary anomalous diffusion considering non-inversive velocity correlation functions. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, v. 1, p. 113-117, 2009.
- [3] Mello B. A. *Modelagem e Simulação de Sistemas*. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007.
- [4] Rosencwaig A. Photoacoustic spectroscopy of biological materials. *Science*, 1973.
- [5] Rosencwaig A.; Gersho A. *Theory of the photoacoustic effect with solids*. Murray Hill, 1975.
- [6] S. A. Abrantes. Função de autocorrelação e densidade espectral de potência - notas de aula.
- [7] Larson R.; Farber B. *Estatística aplicada. 4ed.* Pearson, 2009.
- [8] Bassanezi R. C. *Modelagem Matemática Teoria e Prática*. Editora Contexto, 2015.
- [9] Cabalob J. B.; Sausa R. C. The detection of energetic materials by laser photoacoustic overtone spectroscopy. *OSA Publishing*, 2012.
- [10] Von Baeyer H. C. *A física e o nosso mundo*. Elsevier, 2004.
- [11] Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proc. Institute of Radio Engineers vol. 37, n.1*, 1949.
- [12] Callister Jr. W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. LTC, 2015.
- [13] McDonnell M. D.; Stocks N. G.; Pearce C. E. M.; Abbott D. *Stochastic Resonance From Suprathreshold Stochastic Resonance to Stochastic Signal Quantization*. Cambridge, 2008.
- [14] Butkov E. *Física Matemática*. Editora Guanabara, 1988.
- [15] Dykman M. I. et al. Stochastic resonance in perspective. *Il Nuovo Cimento*, 17, p. 661., 1995.

- [16] Dias T.; Rosa D. F. *Caracterização óptica e Térmica de Materiais Poliméricos via Métodos Fototérmicos*. PhD thesis, Departamento de Física da UEM, 2005.
- [17] Stocks N. G. Information transmission in parallel threshold arrays: suprathreshold stochastic resonance. *Physical Review E*, 63, Art. No. 041114., 2001.
- [18] D. A. Guimarães. Processos aleatórios - notas de aula, 2007-2011.
- [19] Damgaard P. H.; Hüffel H. *Stochastic Quantization*. CERN.
- [20] Michaelian K. H. *Photoacoustic Infrared Spectroscopy*. Wiley-Interscience, 2003.
- [21] Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors. *Phys. Rev.* 32, 110, 1928. Disponível em: < <http://link.aps.org/abstract/PR/v32/p110>>. Acessado em: 12 out. 2016.
- [22] Press W. H. Flicker noises in astronomy and elsewhere. *Comments on Astrophysics [S.l.: s.n.]* 7: 103, 1978. Disponível em: < http://www.lanl.gov/DLDSSTP/Flicker_Noise_1978.pdf > .Acessado em 12 out. 2016.
- [23] Singh H. Studies on selected polymeric materials using the photoacoustic spectroscopic technique. *Chin. Phys. B Vol. 20, No. 6*, 2011.
- [24] Zhang T.; Cui H. Carbon nanoparticles in photoacoustic imaging. SPIE Spotlight, 2015.
- [25] Banks J. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. EMP Books, 2007.
- [26] Johnson J. Thermal agitation of electricity in conductors. *Phys. Rev.* 32, 97, 1928. Disponível em: < <http://link.aps.org/abstract/PR/v32/p97>> Acessado em: 12 out. 2016.
- [27] Albuquerque J.P.A. Modelos probabilísticos em engenharia elétrica. Apostila PUC RIO, 2003.
- [28] McDonald F. A.; Wetsel G. C. Jr. Generalized theory of the photoacoustic effect. *J. Appl. Phys. Vol. 49*, 1978.
- [29] Costa I. V. L. *Processos estocásticos de difusão e crescimento*. PhD thesis, Universidade de Brasília - Instituto de Física, 2006.
- [30] Chua L. O.; Matsumoto T.; Komuro M. The double scroll, August 1985.
- [31] Melo W. L. B.; Lóio D. A.; Viana J. H. M. Aplicação da espectroscopia fotoacústica na identificação de componentes do solo. Technical report, Embrapa Instrumentação, 2010.

- [32] Namiki M. *Stochastic Quantization*, chapter III, pages 31–47. Springer-Verlag, 1992.
- [33] Sokolowski J. A.; Banks C. M. *Real-World Applications in Modeling and Simulation*. Wiley, 2012.
- [34] Borges F. S.; Cella N. Monitoramento da fotocura de resina epóxi pela espectroscopia fotoacústica. In *I Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro*, 2015.
- [35] Cella N. *Contribuição por Espectroscopia Fototérmica ao Estudo de Propriedades ópticas e Térmicas de Materiais Orgânicos e Inorgânicos*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 1990.
- [36] Medeiros F. L.; Moser A.; Santos N. A simulação computacional como técnica de pesquisa na administração. *Revista Intersaberes*, 2014. Vol. 9.
- [37] Pessoa Júnior O. Aplicações de medidas de fase do efeito fotoacústico. Master's thesis, Univesidade Estadual de Campinas, 1985.
- [38] Jung P.; Bartussek R.; Hanggi P. Stochastic resonance in optical bistable systems. *Physical Review. E*, 49, 3930., 1994.
- [39] Liu C.; Hu H. P. *Study on photoachoustic dectection of sub-surface microcrack in materials*, page 223. Materail Science and Environmental Engineering - The proceedings of 2016 Internation Workshop on Material Science and Environmental Engineering (IWMSEE2016), 2016.
- [40] Song H.; Shao X.; Su Q. A study on the detection of weak photoacoustic signals by stochastic resonance. *Fresenius J Anal Chem*, 2001.
- [41] Benetti L. C.; Innovente P. R. Fotoacústica: Construção e aplicações. In *Seminário Integrado - Ciência no Brasil*, 2009.
- [42] Connor F. R. *Introductory Topics in Electronics and Telecommunications: Noise. 2 Edition*. Edward Arnold, 1982.
- [43] Anderson R.L. Distribution of the serial correlation coefficients. In *Annals of Mathematical Statistics*. Institute of Mathematical Statistics, 1941.
- [44] Andò B.; Graziani S. *Stochastic Ressonance - Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [45] Tanenbaum A. S. *Organização estruturada de computadores*. LTC, 2013.
- [46] Broersen P. M. T. *Automatic Autocorrelation and Spectral Analysis*. Springer, 2006.

- [47] Matsumoto T. A chaotic attractor from chua's circuit. vol. cas-31 n. 12., December 1984.
- [48] Prandel L. V. Implementação da técnica de fotoacústica de célula aberta para obtenção da difusividade térmica de metais. Master's thesis, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2009.
- [49] Wang L. V. *Photoacoustic Imaging and Spectroscopy*. CRC Press, 2009.
- [50] DeWeese M.; Bialek W. Information flow in sensory neurons. *Il Nuovo Cimento*, 17, p. 733., 1995.
- [51] Ott H. W. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. 2 Edição. Wiley-Interscience, 2008.
- [52] Ricker D. W. *Echo Signal Processing*. Kluwer Academic Publisher, 2003.

A Apêndice - Programa 1-Calcula_numeros_aleatorios2.py, 2- Calcula_correlacao.py e RealChua.m

Programa 1: 1-Calcula_numeros_aleatorios2.py

Linguagem e programa compilador: Python versão 2.7.13

```
#*****
#      INICIO DO PROGRAMA 1
#*****

import math
import random

T_max = 1000000
#Quantitativo de valores aleatórios correlacionados que se quer gerar

Nome_do_arquivo_entrada_de_correlacao = 'dados_2.dat'
#Nome_do_arquivo_de_entrada_de_correlacao_conhecida 'dados_2.dat'

Nome_do_arquivo_saida = 'saida_1-numeros_aleatorios.dat'
#Nome_do_arquivo_de_saida_de_dados_correlacionados 'saida_1-numeros_aleatorios.dat'

tau_max = 1000
#Valor limite superior da autocorrelação e dimensão para percorrer a correlação no proce
dt = 0.01 dw=0.01  w_max = math.ceil(math.pi/dt)

#*****
# LEITURA DO ARQUIVO DE CORRELAÇÃO
# INSERÇÃO DOS DADOS EM VETOR
#*****
```

```

dados = []
numeroDeDados = 0
arq = open(Nome_do_arquivo_entrada_de_correlacao, 'r')
texto = arq.readlines()
for linha in texto:
    dados.append(eval(linha))
numeroDeDados=len(dados)
arq.close()

#*****
# Calculo da funcao a(w) (Amplitude correlacionada)
#*****
a = list(range(int(w_max/dw)))
for m in range(int(w_max/dw)):
    temp=0
    for tau in range(tau_max):
        temp = temp + dados[tau]*math.cos(m*dw*tau)
    a[m] = math.sqrt(temp) * 2 / math.sqrt(math.pi)

#*****
# Calculo dos valores aleatorios correlacionados
# Gravação dos dados no arquivo de saida
#*****
ruído_branco = list(range(int(w_max/dw)))
for mm in range(int(w_max/dw)):
    ruído_branco[mm] = (2*random.random()-1)*math.pi

saida = list(range(int(T_max)))
arq1 = open(Nome_do_arquivo_saida, 'w')

```

```

for t in range(T_max):
    b=0
    for n in range(int(w_max/dw)):
        b = b + a[n]*math.cos(n*dw*t+ruído_branco[n])*dw
    saida[t]=b
    arq1.write(str(b))
    if t!=T_max-1:
        arq1.write('\n')
arq1.close()

```

```

#####
#FIM DO PROGRAMA 1
#####

```

Programa 2: 2-Calcula_correlacao.py

Linguagem e programa compilador: Python versão 2.7.13

```

#*****
#      INICIO DO PROGRAMA 2
#*****

```

```

import math

```

```

Nome_do_arquivo_entrada_Dados = 'saida_1-numeros_aleatorios.dat'

```

```

#Nome do arquivo de dados com sinais a serem lidos e extraído a autocorrelacao

```

```

Nome_do_arquivo_saida_Correlacoes = 'saida_2-correlacao_do_sinal_gerado.dat'

```

```

#Nome do arquivo com os valores de autocorrelacao obtidos

```

```

#*****

```

```

# LEITURA DO ARQUIVO DE DADOS DE SINAIS

```

```

# INSERÇÃO DOS DADOS EM VETOR
#*****
dados = []
numeroDeDados = 0
arq = open(Nome_do_arquivo_entrada_Dados, 'r')
texto = arq.readlines()
for linha in texto:
    dados.append(eval(linha))
numeroDeDados=len(dados)
arq.close()

#*****
# FUNCAO DE AUTOCORRELACAO
# EXTRAI A AUTOCORRELACAO DO ARRAY DE DADOS FORNECIDO
#*****
def corr(dados,x):
    n=0
    for i in range(0,len(dados)-x):
        n=n+dados[i]*dados[i+x]/(len(dados)-x)
    return n

#*****
# EXECUCAO DA FUNCAO DE AUTOCORRELACAO
# GRAVACAO DOS RESULTADOS DE AUTOCORRELACAO EM ARQUIVO
#*****
#Definição dos limites da autocorrelacao
limite_Inferior_Da_Correlacao = 0
limite_Superior_Da_Correlacao = 1000

#Execucao da função e gravação dos resultados no arquivo de saida
arq1 = open(Nome_do_arquivo_saida_Correlacoes, 'w')
for j in range(limite_Inferior_Da_Correlacao,limite_Superior_Da_Correlacao+1):
    arq1.write(str(j))

```

```

        arq1.write('\t')
        arq1.write(str(corr(dados,j)))
        arq1.write('\n')
arq1.close()

```

```

#####
#FIM DO PROGRAMA 2
#####

```

Programa 3: RealChua.m

Linguagem e programa compilador: MatLab R2004a

Obtido em: <http://www.chuacircuits.com/matlabsim.php>

```

#*****
#      INICIO DO PROGRAMA
#*****
%-----RealChua.m-----
function out = RealChua(t,in)
x = in(1); %v_1
y = in(2); %v_2
z = in(3); %i_L
C1 = 10*10^(-9); %10nF
C2 = 100*10^(-9); %100nF
R = 1800; %1.8k
Ohms G = 1/R;
%Chua Diode*****
        R1 = 220;
        R2 = 220;
        R3 = 2200;
        R4 = 22000;

```

```

R5 = 22000;
R6 = 3300;
Esat = 9; %9V batteries
E1 = R3/(R2+R3)* Esat;
E2 = R6/(R5+R6)* Esat;

m12 = -1/R6;
m02 = 1/R4;
m01 = 1/R1;
m11 = -1/R3;

m1 = m12+m11;

if (E1>E2)
    m0 = m11 + m02;
else
    m0 = m12 + m01;
end

mm1 = m01 + m02;
Emax = max([E1 E2]);
Emin = min([E1 E2]);

if abs(x) < Emin
    g = x*m1;
elseif abs(x) < Emax
    g = x*m0;
    if x > 0
        g = g + Emin*(m1-m0);
    else
        g = g + Emin*(m0-m1);

```

```

        end

elseif abs(x) >= Emax
    g = x*mm1;
    if x > 0
        g = g + Emax*(m0-mm1) + Emin*(m1-m0);
    else
        g = g + Emax*(mm1-m0) + Emin*(m0-m1);
    end
end

end

%end Chua Diode*****

%Gyrator*****

R7 = 100; %100 Ohms
R8 = 1000; %1k Ohms
R9 = 1000; %1k Ohms
R10 = 1800;
C = 100*10(-9); %100nF
L = R7*R9*C*R10/R8; %18mH

%end Gyrator*****

% Chua's Circuit Equations
xdot = (1/C1)*(G*(y-x)-g); ydot = (1/C2)*(G*(x-y)+z); zdot = -(1/L)*y;
out = [xdot ydot zdot]';

%chamar função do simulador passando os parâmetros onde se define o tempo
%de simulação para geração das amostras e valores das condições iniciais que
%devem ser ajustadas até se atingir o comportamento resultante de interesse
[t,y] = ode45(@RealChua,[0 2.00],[ -0.5 -0.2 0]);
plot3(y(:,1),y(:,2),y(:,3))
grid

```