

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

**Espaço de parâmetros de dois circuitos de Chua
sincronizados**

João Paulo Araújo Souza

Itajubá, janeiro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

João Paulo Araújo Souza

**Espaço de parâmetros de dois circuitos de Chua
sincronizados**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em física como parte de requisitos para obtenção de título de mestrado em física.

Área de concentração: física da Matéria Condensada.

Orientador: Prof. Dr. Rero Marques Rubinger.

Coorientador: Prof. Dr. Yvo M. Chiaradia Masselli

Janeiro de 2018

Itajubá

FICHA CATALOGRAFICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

João Paulo Araújo Souza

**Espaço de parâmetros de dois circuitos de Chua
sincronizados**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rero Marques Rubinger.

Prof. Dr. Yvo M. Chiaradia Masselli

Prof. Dr. Adhimar Flávio Oliveira

Prof. Dr. Felipe Emanuel Chaves

Itajubá

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pelas diversas formas de me conduzir pelo melhor caminho.

Aos meus pais Milton da Silva Souza e Maria Terezinha Lima de Araújo, pela formação, conselhos e principalmente por esse laço de confiança e sangue que nos uni, obrigado por se fazerem presentes na distância, amo muito vocês.

Ao meu avô Josias José de Souza in memoria, que ao longo de sua vida pode contribuir para pessoa que me tornei hoje, lembro que um dos seus sorrisos mais frequentes era quando chovia e ele me falava que a chuva é a certeza de algo bom. Até hoje levo isso comigo e quando tudo parece pesado demais eis que vejo um sinal dos céus.

Aos amigos “que são feitos casa” oriundos da Pastoral da Juventude que muito contribuíram com minha formação pessoal e espiritual, obrigado por se fazerem sempre presentes de alguma forma em momentos considerados difíceis por mim.

Aos familiares que de certa forma se fizeram presentes.

A Tatiane Sampaio, minha namorada que me aturou durante dois anos partilhando lágrimas e sorrisos.

Aos amigos da pós-graduação em Física pelas conversas e sonhos partilhados

Aos professores da pós-graduação em Física, pela oportunidade e ensinamentos.

À (CAPES) Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos durante o período do mestrado.

Ao professor Dr. Rero Marques Rubinger pela oportunidade de realização desse trabalho e pelos ensinamentos sempre voltados a minha formação enquanto pesquisador e ao professor Dr. Yvo Marcelo pela coorientação no trabalho e conselhos.

Ao professor e amigo Adhimar Flávio pelas conversas e conselhos durante o período do mestrado, um exemplo de profissional a ser seguido, muito grato.

Aos técnicos de laboratórios do IFQ Tiago e Roberto, pelas conversas e conselhos durante a montagem experimental.

E a vida talvez seja como a teoria do caos, onde grandes histórias iniciam de pequenos momentos, as vezes tão pequenos que chegam a ser insignificantes. E como um bater de asas de uma borboleta altera o curso da sua vida para a eternidade.

Danúbio

RESUMO

Nesta dissertação são apresentados os resultados do estudo do espaço de parâmetros da periodicidade experimental, expoente de Lyapunov simulado e experimental e faixa de resistência no qual dois circuitos de Chua se sincronizam. A simulação foi realizada através do software Fortran, no qual contribui para as análises dos resultados experimentais. Com o desenvolvimento do programa no software Labview® foram obtidas séries temporais que descrevem o sistema experimental. Para montagem experimental foram construídos dois circuitos de Chua e cinco potenciômetros. Os potenciômetros são os parâmetros de controle do nosso sistema definido como R e r_L , no qual R tem variação de sua resistência no passo de 1Ω e r_L no passo de $0,1\Omega$. Para análise dos resultados experimentais, foram desenvolvidos programas em Labview® e scripts em Python que fizeram análise das series temporais no qual foram obtidos resultados como periodicidade, maior expoente de Lyapunov e como simulação obtivemos, dimensão de Kaplan-Yorke e entropia de Kolmogorov-Sinai. Os resultados das análises foram representados na forma de espaço de parâmetros. Medições de sincronismo para dois circuitos de Chua acoplados foram realizadas para identificar a intensidade do acoplamento em função da resistência de acoplamento. Simulações do espaço de parâmetros, numa condição de acoplamento com travamento de fase foram utilizadas permitindo identificar as mesmas estruturas observadas para circuitos desacoplados.

Palavras-Chave: Circuito de Chua experimental, Espaço de parâmetros simulado, Espaço de parâmetros experimental, Sincronismo, Expoente de Lyapunov.

ABSTRACT

In this dissertation are presented the results of the study of the experimental periodicity parameters, simulated and experimental Lyapunov exponent, and resistance range in which two Chua circuits synchronize. The simulation was performed through Fortran software, in which it contributes to the analysis of the experimental results. With the development of the program in the software Labview® were obtained time series that describe the experimental system. For experimental assembly, two Chua circuits and five potentiometers were built. The potentiometers are the control parameters of our system defined as R and r_L , in which R has variation of its resistance in the step of 1Ω and r_L in the step of $0,1\Omega$. For the analysis of the experimental results, we have developed programs in Labview® and Python scripts that have analyzed the time series in which results were obtained as periodicity, higher exponent of Lyapunov and as simulation we obtained, Kaplan-Yorke dimension and Kolmogorov-Sinai entropy. The results of the analyzes were represented as parameter space. Synchronization measurements for two coupled Chua circuits were performed to identify the coupling intensity as a function of the coupling resistance. Simulations of the parameter space in a phase locked coupling condition were used to identify the same structures observed for decoupled circuits.

Key words: Circuit of experimental Chua, Simulated parameter space, Experimental parameter space, Synchronism, Lyapunov exponent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Significado geométrico da aplicação de Poincaré P : x_0 é uma órbita periódica, x_0^* é o ponto onde ela intercepta Ω ; x_1 é uma órbita não periódica que corta Ω em $Px_1' \neq x_1'$	18
Figura 2: Análise da taxa de crescimento populacional no qual (a) representa o crescimento e (b) a diminuição populacional.	20
Figura 3: Evolução de um elemento de volume esférico de raio ε_0 (x_0) em torno de um ponto inicial x_0 , depois de um tempo t a esfera se torna um elipsoide, representação bidimensional.....	22
Figura 4: Modelo do rolo de Lorenz, que surge com a diferença de temperatura entre TW e Tc com $TW > que Tc$	27
Figura 5: Dois sistemas dinâmicos, no qual o sistema S_1 atuando sobre S_2 com influência direta.....	30
Figura 6: Influência mútua entre todos os sistemas.....	31
Figura 7: Acoplamento bidirecional no qual um sistema interage com outro.....	31
Figura 8: Esquemático do modelo de McCulloch e Pitts.....	33
Figura 9: Esquemático do circuito de Chua, apresentando o diodo de Chua, indutor, capacitores e parâmetros de controle.....	36
Figura 10: Esquemático do circuito de Chua no programa Eagles(a) e (b) Circuito de Chua montado em placa de fenolite.....	37
Figura 11: Curva $i(v)$ dos dois circuitos de Chua um contra a outra.....	40
Figura 12: Circuito de Chua gerando um atrator.....	42
Figura 13: Pontos de inclinação e de intercessão da curva id do diodo de Chua.....	43
Figura 14: Detalhe do esquemático do potenciômetro digital projetado no Proteus.....	44
Figura 15: Detalhe do potenciômetro em 3D projetado no software Proteus.....	45
Figura 16: Painel principal do controle do usuário que seleciona os pinos da placa DAQ e a informação data na tela da informação dos bits que estão sendo acionados.....	46
Figura 17: Tela principal do programa no qual se faz a calibração do potenciômetro.....	46
Figura 18: Ajuste dos potenciômetros para parâmetro rL	47
Figura 19: Ajuste dos potenciômetros para parâmetro R	47
Figura 20: Ajuste dos potenciômetros para controle da resistência de acoplamento.	48
Figura 21: Esquemático do regulador de tensão.....	49
Figura 22: Regulador de tensão montado, parte I tensão de entrada e II tensão de saída, não tem o fio terra na tensão de saída pois terra é comum.	49

Figura 23: Montagem experimental para a medição das series temporais. I é o computador com programa da Labview®, II os dois circuitos de chua com os quatro potenciômetros e a placa DAQ e III bateria simétrica -12v, +12v e fio terra que alimenta os itens II.	50
Figura 24: Detalhe do item II da figura23 no qual 1 são os dois circuitos de Chua e 2 referentes aos potenciômetros que fazem o controle do circuito.	51
Figura 25: Programa que faz leitura das series temporais do circuito de Chua.....	51
Figura 26: Tela principal do programa que faz o diagrama de bifurcação.	52
Figura 27: A Figura 27 (a) é o diagrama de bifurcação inteiro e (b) diagrama de bifurcação com zoom com variação de 1400Ω até 1600Ω para o parâmetro de controle R.	53
Figura 28: Espaço de parâmetros da periodicidade para o circuito de Chua1 experimental.....	56
Figura 29: Espaço de parâmetro do expoente de Lyapunov de simulações do circuito de Chua 1.....	57
Figura 30: Espaço de parâmetro do expoente de Lyapunov de simulações do circuito de Chua 2.....	57
Figura 31: Espaço de parâmetros do expoente de Lyapunov para o circuito de Chua1.....	58
Figura 32: Espaço de parâmetros do expoente de lyapunov do circuito de Chua 3.	59
Figura 33: Entropia de Kolmogorov-Sinai de simulações para o circuito de Chua 1.	61
Figura 34: Entropia de Kolmogorov-Sinai de simulações para o circuito de Chua 2.	61
Figura 35: Dimensão de Kaplan-Yorke de simulações para o circuito de Chua 1.....	62
Figura 36: Dimensão de Kaplan-Yorke de simulações para o circuito de Chua 2.....	63
Figura 37: Gráfico que mostra o espaço de parâmetro do circuito de Chua 3 em função do DKY.	64
Figura 38: Sincronização perfeita do circuito de Chua para (a) e para (b) mostra a mudança de oscilação do circuito.....	67
Figura 39: Sincronismo do circuito de Chua para (a) oscilando em ante fase e (b) o circuito totalmente sem sincronismo.....	68
Figura 40: Espaço de parâmetros da dimensão de Kaplan-Yorke para os circuitos de Chua acoplado.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferença dos mapas logísticos para os casos 1 e 2, quando as condições iniciais são diferentes com mesmo número de interações.....	20
Tabela 2: Análise dos valores dos expoentes de Lyapunov e seu comportamento.....	24
Tabela 3: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 1 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.....	41
Tabela 4: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 2 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.....	41
Tabela 5: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 3 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.....	42

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
CAPÍTULO 1	16
TEORIA DO CAOS.....	16
1.1 ASPECTOS TEÓRICOS.....	16
1.2 SEÇÃO DE POINCARÉ.....	17
1.3 MAPA LOGISTICO.....	19
1.4 EXPOENTE DE LYAPUNOV	21
1.5 ENTROPIA DE KOLMOGOROV-SINAI.....	24
1.6 DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE (DKY).....	26
1.7 O MODELO DE LORENZ.....	26
CAPÍTULO 2	28
ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE SINCRONISMO E REDES.....	28
2.1 SINCRONISMO.....	28
2.1.1 SINCRONIZAÇÃO DA NATUREZA.....	28
2.1.2 SINCRONIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAOTICO.....	29
2.2 ACOPLAMENTO	29
2.2.1 ACOPLAMENTO UNIDIRECIONAL	29
2.2.2 ACOPLAMENTO BIDIRECIONAL.....	30
2.3 REDES.....	32
2.3.1 REDES NEURAIIS	32
2.3.2 REDES NEURAIIS NATURAIS.....	34
2.3.3 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS.....	34
CAPITULO 3	35
CIRCUITO DE CHUA EXPERIMENTAL E MÉTODOS DE ANÁLISE.....	35
3.1 CIRCUITO DE CHUA.....	35
3.1.2 ACOPLAMENTO DO CIRCUITO DE CHUA.....	38
3.2 POTENCIÔMETRO.....	44
3.3 CONTROLADOR DE TENSÃO.....	48
3.4 MONTAGEM E AQUISIÇÃO DAS SERIES TEMPORAIS.....	50
3.5 DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO E PERIODICIDADE.....	51

3.5.1 DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO	52
3.5.2 PERIODICIDADE.....	53
3.6 CALCULO DO EXPOENTE DE LYAPUNOV E DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE	54
CAPITULO 4	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 - PERIODICIDADE DE UM CIRCUITO DE CHUA.....	55
4.2- ESPAÇOS DE PARÂMETROS DO EXPOENTE DE LYAPUNOV	56
4.3- ESPAÇOS DE PARAMETROS DA ENTROPIA DE KOLMOGOROV-SINAI.....	60
4.4- ESPAÇOS DE PARÂMENTROS DA DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE.....	62
4.5- SINCRONISMOS NO CIRCUITO DE CHUA	64
4.6- ESPAÇO DE PARÂMETROS DA DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE COM CIRCUITO DE CHUA SINCRONIZADO.....	69
CAPITULO 5	71
CONCLUSÃO.....	71
BIBLIOGRAFIA	72

INTRODUÇÃO

Com a evolução das máquinas, no século atual, um dos grandes objetivos do homem é criar uma máquina que opere de forma autônoma. Um dos obstáculos encontrado ao longo dos anos, que impede essa criação, é como lidar com eventos inesperados no ambiente de operação. Essas máquinas, portanto, teriam que ter uma maior capacidade de desenvolver tarefas de alto nível cognitivo.

O objetivo desse trabalho é apresentar o desenvolvimento de um sistema com acoplamento entre dois circuitos de Chua. Este circuito apresenta resistência diferencial negativa o que possibilita a ocorrência de comportamento caótico. O estudo do espaço de parâmetros desse sistema será realizado através de potenciômetros digitais. portanto pretende-se identificar mudanças no espaço de parâmetros do mesmo, devido ao acoplamento. Esse estudo possibilita identificar possíveis aplicações em comunicação, utilizando caos e comunicação [1].

O circuito de Chua foi proposto em 1984 [2] pelo professor Leon O. Chua e testado em laboratório pelo professor Matsumoto. O circuito de Chua contém dois resistores de controle, definidos como R e r_L , dois capacitores c_1 e c_2 , um indutor L e um elemento não linear que é o diodo de chua.

Ao pesquisar sobre o circuito de Chua, percebemos que há poucos trabalhos experimentais e estudo sobre ele e seu comportamento. As poucas pesquisas sobre esse assunto não vêm pela falta de aplicabilidade, mas, sim pela dificuldade que é desenvolvê-lo experimentalmente e fazer análise de dados obtidos. Esse trabalho, vai nos proporcionar uma investigação detalhada do circuito de Chua e condições para sincronização entre dois circuitos. É válido pontuar que o acoplamento entre dois circuitos pode ser analisado como uma rede neural e uma das aplicações para o trabalho é a computação de reservatório, que é uma estrutura da computação que pode ser vista como uma extensão das redes neurais. Contudo, para que isso ocorra, é preciso algumas condições na construção do circuito, o qual iremos discutir ao longo desse trabalho.

No capítulo 1, é apresentada uma introdução teórica sobre caos, assim sendo, identificaremos esse comportamento e abordaremos algumas ferramentas de análise, como por exemplo, maior expoente de Lyapunov e dimensão de Kaplan-Yorke [3].

No capítulo 2, fazemos uma abordagem sobre tipos de sincronismo, tipos de acoplamento e algumas informações sobre o funcionamento de uma rede, seja ela natural ou artificial.

No capítulo 3, é feita uma análise do circuito de Chua experimental, apresentaremos, portanto, sua montagem experimental e algumas correções, para que ao acoplarmos os circuitos de Chua, eles oscilem com uma frequência próxima uma da outra.

No capítulo 4, é feita uma análise dos resultados experimentais obtidos, comparando com os resultados simulados.

Por fim, no capítulo 5, é feita a conclusão dos resultados obtidos, com perspectivas futuras, já que foi encontrado um circuito de Chua que opera em uma região de resistência negativa maior do que esperado.

CAPÍTULO 1

TEORIA DO CAOS

1.1 ASPECTOS TEÓRICOS

O estudo sobre caos teve seu início em 1960, quando um meteorologista do Massachusetts Institute of Technology (M.I.T), Edward Lorenz, desenvolveu modelos computacionais que descrevem os padrões do clima. A maioria da população mundial sabe que é muito difícil fazer uma previsão do tempo em longo prazo, ainda que afastemos muitos dos fatores que causam essas mudanças drásticas. Lorenz descobriu algo surpreendente: uma pequena mudança nas condições iniciais pode produzir efeitos tremendamente desproporcionais. Para um período curto do dia mal fazem diferença, mas quando ultrapassam dois meses ou mais, as mudanças produzem padrões completamente diferentes, Lorenz chamou sua descoberta de "efeito borboleta" [4]. Logo a essência da teoria do caos pode ser entendida como uma mudança muito pequena nas condições iniciais de uma situação leva a efeitos imprevisíveis.

Portanto, o comportamento caótico pode aparecer em uma infinidade de sistemas, como por exemplo: sistemas climáticos, proposto por Lorenz, movimento de partículas, reações químicas, circuitos elétricos, osciladores biológicos e até mesmo na economia. Por fim, modelos de sistemas dinâmicos podem ser compreendidos de duas formas: o sistema a partir de suas equações diferenciais ou em funções de tempo discreto. Nas seções posteriores faremos estudos de pontos importantes para compreender melhor essa teoria.

1.2 SEÇÃO DE POINCARÉ

Uma das maneiras pela qual um fluxo contínuo da origem a um mapa discreto é pela utilização de seções de Poincaré. A seção de Poincaré é a maneira de reduzir o estudo de um fluxo num espaço de fases com n dimensões a uma aplicação chamada mapa de Poincaré ou mapa de retorno num espaço de fase de $(n - 1)$ dimensões.

$$\ddot{x} + g(x, \dot{x}) = f(t) \quad (1)$$

Onde $f(t)$ é uma função periódica de período T , o diagrama de fase dessa equação é tridimensional, o qual cada estado é representado por (x, \dot{x}, t) . Nesse caso o mapa de Poincaré é obtido simplesmente, considerando-se a intersecção da trajetória no plano (x, \dot{x}) .

Introduziremos agora, o conceito de mapa de Poincaré. Por um sistema dinâmico autônomo n -dimensional, com soluções periódicas, temos

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}) \quad \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.2)$$

Nesse caso, $f(\vec{x})$ é um campo vetorial não linear. Seja \vec{x}_0 uma órbita periódica (período T) associada ao fluxo $\phi(t)$ gerado pela equação (1.2). Temos uma hipersuperfície $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ de dimensão $(n - 1)$, de tal maneira que o fluxo seja transversal a ela e a condição de transversalidade para o fluxo como sendo $\vec{n}(x)$ a normal a hipersuperfície Ω no ponto \vec{x} . Portanto, a transversalidade escreve-se $\vec{f}(\vec{x}) \cdot \vec{n}(\vec{x}) \neq 0$ para todo $\vec{x} \in \Omega$. Seja \vec{x}_0^* o ponto onde a órbita \vec{x}_0 intercepta Ω Figura 1. Então o mapa de Poincaré é definido para um ponto \vec{x}'_1 pela equação (1.3). Nessa equação o tempo é contínuo e o intervalo de tempo τ é um intervalo chamado de

tempo de retorno, isto é o tempo entre dois eventos de cruzamento do plano de Poincaré consecutivos.

$$\vec{P}(\vec{x}'_1) = \phi(\vec{x}'_1, \tau) \quad (1.3)$$

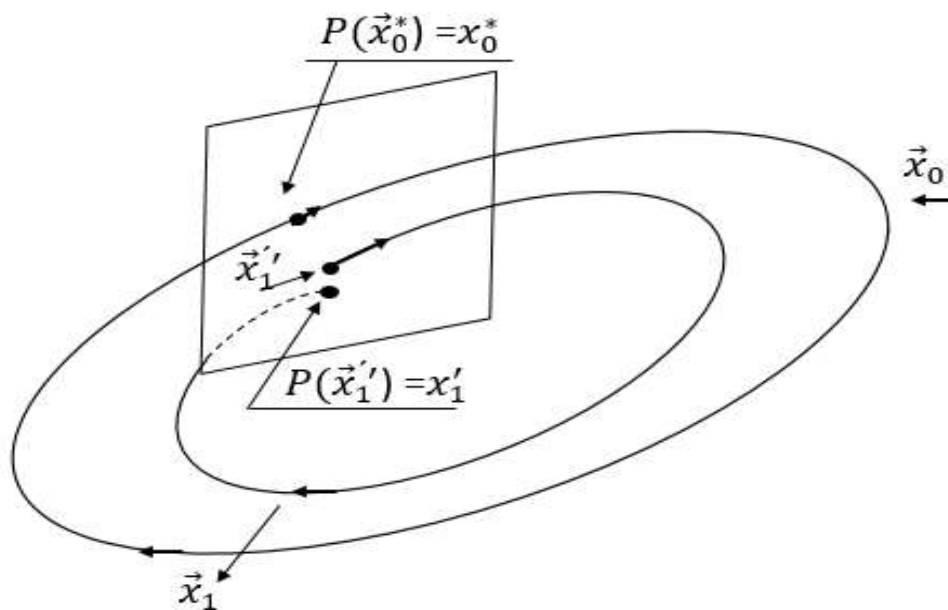


Figura 1: Significado geométrico da aplicação de Poincaré \vec{P} : \vec{x}_0 é uma órbita periódica, \vec{x}_0^* é o ponto onde ela intercepta Ω ; \vec{x}_1 é uma órbita não periódica que corta Ω em $\vec{P}(x'_1) \neq x'_1$.

Tendo assim, o fluxo de duas dimensões que originam mapas bidimensionais (o mesmo pode ocorrer para uma figura com $(D - 1)$ e gerar um mapa unidimensional) definido sobre a superfície transversal ao fluxo, o mapa de Poincaré relaciona um ponto do fluxo ao seu primeiro cruzamento com essa superfície. O mapa de Poincaré é, portanto, a sequência de pontos nos quais o fluxo intercepta a seção de Poincaré, como mostra a Figura 1.

1.3 MAPA LOGISTICO

Denominamos por mapa um sistema dinâmico que evolui no tempo de forma discreta. Um sistema dinâmico contínuo não linear e o fluxo ϕ_t a ele associado, definidos num intervalo finito, que mapeiam o intervalo unitário $(0,1)$ e tem um único máximo. Esse fluxo pode dar origem a um mapa [5],

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) = F_\mu(x_n) \quad (1.4)$$

Esse mapa logístico pertence à classe dos mapas unimodais que é um modelo usando a dinâmica de população biológica. Para compreender o mapa logístico, apresentado acima, no contexto dos modelos populacionais, admitimos que a população numa geração $(n + 1)$, seja univocamente determinada pela população da geração precedente, de acordo com alguma lei do tipo $x_{n+1} = F(x_n)$. Um exemplo mais simples possível é a da hipótese de Matsuyama, da taxa de reprodução, na qual ele afirma que a população irá crescer tanto que seria impossível produzir alimentos para toda a população mundial, isto é, $F(x) = \mu x$.

Analisando, temos, portanto, para $\mu > 1$ ocorrerá, obviamente, uma explosão de população, como mostra a Figura 2 (a), neste caso qualquer que seja o valor inicial para o número de pais, o número de filhos cresce monotonamente. Para $\mu < 1$ a tendência da população é diminuir a cada iteração e o ponto $(0,0)$ é o ponto fixo do mapa que é Figura 2(b).

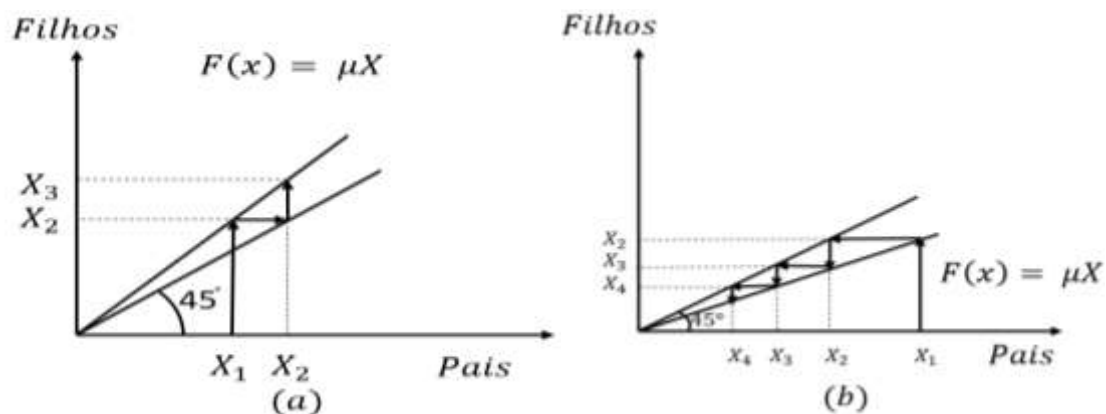


Figura 2: Análise da taxa de crescimento populacional no qual (a) representa o crescimento e (b) a diminuição populacional.

Usando a equação (1.4), que representa o mapa logístico da dinâmica populacional, faremos a seguinte análise, para o parâmetro de controle $\mu = 3,9$ em ambos os casos, no qual se altera apenas o valor de x_0 . Para o caso 1 $x_0 = 0,7500$ e para o caso 2 $x_0 = 0,7501$, obtemos o seguinte resultado apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Diferença dos mapas logísticos para os casos 1 e 2, quando as condições iniciais são diferentes com mesmo número de interações.

Caso 1		Caso 2	
n	x(n)	n	x(n)
0	0,7500	0	0,7501
1	0,73	1	0,73
2	0,77	2	0,77
3	0,70	3	0,70
4	0,82	4	0,82
5	0,57	5	0,57
6	0,96	6	0,96
7	0,17	7	0,16
8	0,54	8	0,53
9	0,97	9	0,97
10	0,12	10	0,10

Certo tempo depois...

30	0,88	30	0,44
31	0,40	31	0,96
32	0,94	32	0,15
33	0,22	33	0,48
34	0,67	34	0,97
35	0,86	35	0,10

Com isso, vemos que há diferença entre os valores gerados em cada caso para parâmetros iguais com o passar das interações, essa diferença mostra que mesmo equações simples têm sensibilidades nas suas condições iniciais quando aumentam suas interações.

1.4 EXPOENTE DE LYAPUNOV

Devido a uma alta complexidade na análise da evolução de um fluxo caótico quando a divergência de trajetórias se torna rápida. Portanto, para medir a taxa de divergência das trajetórias e quantificar a dependência sensitiva e as condições iniciais, utilizaremos os expoentes característicos de Lyapunov, também conhecidos como números de Lyapunov[5].

Podemos medir quão sensível é um sistema, para isso é necessário medir a taxa, a qual dois pontos, que inicialmente estão próximos, podem se distanciar mediante a evolução do sistema.

Alexandre M. Lyapunov (1857-1918), matemático russo desenvolveu uma forma de medir esse afastamento entre os pontos iniciais, considerando que a distância entre eles aumenta exponencialmente, esse método de medida leva em consideração a análise das condições iniciais do sistema.

Consideremos, inicialmente, sistemas contínuos com m equações diferenciais ordinárias. Imaginemos um pequeno hipervolume esférico de teste de estado iniciais vizinhos y_0 (raio $\varepsilon_0(x_0)$) em torno de ponto inicial x_0 de uma linha de fluxo, isto é,

$$|x_0 - y_0| \leq \varepsilon_0(x_0) \quad (1.5)$$

Com o passar do tempo, o fluxo deforma a hipersfera num objeto hiperelipsal com eixos principais $\varepsilon_k(t), k = 1, 2, \dots, m$. Os expoentes de Lyapunov medem o crescimento exponencial dos eixos principais $\varepsilon_k(t)$ e são definidos por:

$$\lambda_i \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon_0(x_0) \rightarrow 0} \frac{1}{t} \ln \frac{\varepsilon_i(t)}{\varepsilon_0(x_0)} \quad i = 1, \dots, m \quad (1.6)$$

Em geral os λ_i dependem do estado inicial x_0 , mas em muitos casos eles são constantes ao longo de uma significativa região do espaço de fase.

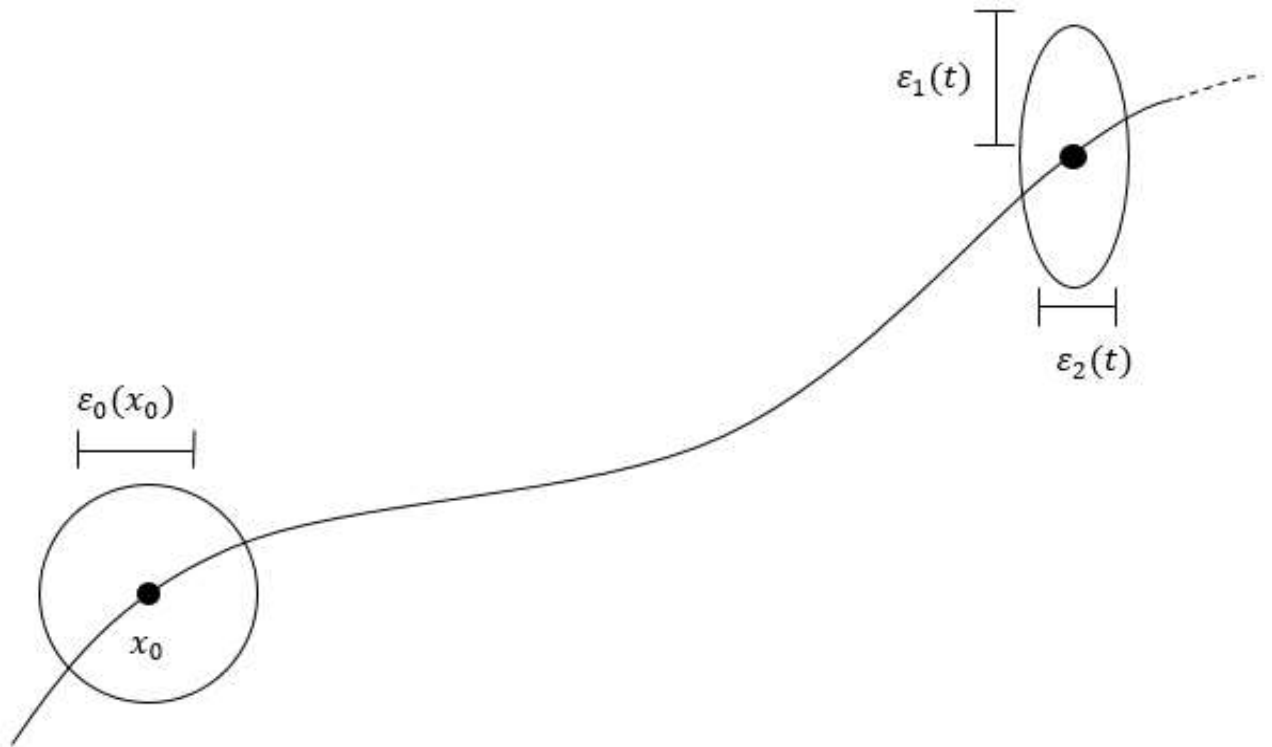


Figura 3: Evolução de um elemento de volume esférico de raio $\varepsilon_0(x_0)$ em torno de um ponto inicial x_0 , depois de um tempo t a esfera se torna um elipse, representação bidimensional.

Da equação (1.6) podemos ver que,

$$\varepsilon_i(t) \sim \varepsilon_0(x_0)e^{\lambda_i t} \quad (1.7)$$

Podemos então fazer uma pequena conclusão analisando três pontos importantes sobre os expoentes de Lyapunov.

- 1- A existência de um ou mais expoentes de Lyapunov positivos define uma instabilidade orbital nas direções associadas
- 2- Para uma solução caótica, associada a um atrator estranho, implica na existência de pelo menos um expoente de Lyapunov $\lambda_i > 0$;
- 3- Para uma solução periódica ou quase-periódica pode-se esperar que descolamentos na direção perpendicular ao movimento diminui com o tempo, enquanto que, ao longo da trajetória eles não devem se alterar, correspondendo a um simples deslocamento do ponto inicial. Segue, portanto, que no caso periódico ou quase-periódico $\lambda_i < 0$ nas direções perpendiculares ao movimento e $\lambda_i = 0$ ao longo da trajetória.

Existe então duas situações que podem ser analisadas: a primeira é quando o sistema não diverge em que $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 0$, a segunda situação é quando o sistema é conservativo (teorema de Liouville) $\sum_{i=1}^m \lambda_i < 0$, que resulta em na diminuição do hipervolume e o sistema é dissipativo.

Podemos identificar um atrator pelo sinal do expoente de Lyapunov. Considerando um espaço tridimensional ($d = 3$).Vejam os:

- I- Ponto fixo: neste caso os sinais dos expoentes são $(-, -, -)$. Com efeito, as trajetórias convergem para um único ponto, encerrando qualquer deslocamento;
- II- Ciclo -limite: tem-se $(0, -, -)$, corresponde o expoente nulo á direção ao longo de trajetória.
- III- Toro T^2 : existem agora duas direções ao longo de sua trajetórias, das quais processam-se deslocamentos, nos quais os sinais são $(0, 0, -)$
- IV- Atratores estranho: Um dos expoentes deve ser positivo, uma vez que existe uma dependência das condições iniciais, ao longo da trajetória, associa-se um expoente nulo. Sendo um sistema dissipativo, a desigualdade $\sum_{i=1}^m \lambda_i < 0$ é válida e o terceiro expoente de Lyapunov deve ser necessariamente negativo, ficando $(+, 0, -)$.

Portanto podemos analisar os expoentes do Lyapunov e suas mudanças analisando os valores característicos como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Análise dos valores dos expoentes de Lyapunov e seu comportamento.

$(-, -, -)$ ponto fixo
$(0, -, -)$ ciclo limite
$(0, 0, -)$ quase periódico
$(+, 0, -)$ caos

1.5 ENTROPIA DE KOLMOGOROV-SINAI

Consideremos um atrator no espaço de fases, preencheremos este atrator com cubos de lado ε , seja uma sequência, i_1, i_2, \dots, i_b e seja $p(i_1, i_2, \dots, i_b)$, a probabilidade de que o sistema se encontre sucessivamente nos cubos i_1, i_2, \dots, i_b em intervalos regulares de tempo τ . Segundo Shannon [22] a informação associada à sequência de b cubos é proporcional a equação 1.8.

$$I_b^{(1)}(\varepsilon) = -\sum_{i_1, i_2, \dots, i_b} p(i_1, i_2, \dots, i_b) \ln p(i_1, i_2, \dots, i_b) \quad (1.8)$$

Trata-se de informação necessária para localizar o sistema em uma trajetória espacial i_1^*, \dots, i_b^* com precisão ε , quando se conhece, a priori, apenas as probabilidades $p(i_1, i_2, \dots, i_b)$.

A entropia métrica ou probabilidade de Kolmogorov-Sinai (K) é definida como a taxa média de criação de informação no sistema (ou a taxa média que se perde informação do observador), isto é:

$$K = \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{1}{b\tau} I_b^{(1)}(\varepsilon)$$

$$= - \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{1}{b\tau} \sum_{i_1, i_2, \dots, i_b} p(i_1, i_2, \dots, i_b) \ln p(i_1, i_2, \dots, i_b)$$

Para mapas ($\tau = 1$) o limite $\tau \rightarrow 0$ é omitido.

Voltando na equação 1.8, afirmamos que não é a única possível, existem outras, como por exemplo, a generalização de Renyi. Nela alguma situação consegue fornecer uma entropia que é o limite inferior a entropia de Kolmogorov-Sinai.

1.6 DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE (DKY)

Em 1979, J.L Kaplan e J.A Yorke, propuseram uma conjectura a respeito de uma possível relação entre os expoentes de Lyapunov e a dimensão de informação de um dado atrator. A dimensão calculada a partir dos expoentes de Lyapunov é muitas vezes chamada de dimensão de Kaplan-Yorke, que é dada por [5].

$$D_{KY} = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \quad (1.9)$$

Onde $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_d$ são os expoentes arrumados de forma decrescente e j é o maior inteiro tal que $\sum_{i=1}^j \lambda_i > 0$.

1.7 O MODELO DE LORENZ

Lorenz Edward, um meteorologista do Massachusetts Institute of Technology (MIT), estava interessado na previsão do tempo e observou a divergência exponencial para condições próximas. Para compreender o sistema de Lorenz, deve-se retornar ao início da década de 1960, quando Saltzman desenvolveu trabalhos de cunho numérico a respeito da instabilidade de Rayleigh-Bernard, essa instabilidade diz respeito a um fluido localizado entre duas placas horizontais, onde a placa inferior tem temperatura maior que a placa superior. Quando a diferença de temperatura (ΔT) é pequena, existe condução de calor para a placa superior. Entretanto, quando (ΔT) é maior que um certo valor, a condução é substituída por convecção, com o aparecimento de rolos. Resultando assim, situação em que a força ascensional, devida as flutuações, é demasiada intensamente e supera a gravidade. Com o aumento da diferença de temperatura, os rolos tornam-se instáveis e o sistema entra num regime com dependência temporal, esse efeito pode ser analisado na Figura 4.



Figura 4: Modelo do rolo de Lorenz, que surge com a diferença de temperatura entre T_w e T_c com $T_w > T_c$.

O sistema de Lorenz é um exemplo clássico de sistema autônomo que representa um atrator estranho. Trata-se de um sistema de três equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, no qual essas equações estão em função do tempo: $X(t)$, $Y(t)$ e $Z(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -\sigma(X - Y) \\ \dot{Y} &= rX - Y - XZ \\ \dot{Z} &= XY - bZ \quad \text{com} \\ (XYZ) &\in \mathbb{R}^3, (\sigma, r, b > 0). \end{aligned} \tag{1.10}$$

Onde $\sigma = \frac{\mu}{\kappa}$ (número de Prandtl), $r = \frac{R}{R_c}$ (numero de Rayleigh relativo) e $b = \frac{4}{1+a^2}$, onde seus respectivos valores são $\sigma = 10$, $b = \frac{8}{3}$ e r é tomado como parâmetro do controle.

Os coeficientes $X(t)$, $Y(t)$ e $Z(t)$ tem significado físico preciso: $X(t)$ é proporcional à intensidade da convecção; $Y(t)$ é proporcional á diferença de temperatura entre as correntes de fluido ascendentes e descendentes; e $Z(t)$ é proporcional à distorção do perfil de temperatura vertical, relativamente a um perfil linear.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE SINCRONISMO E REDES

2.1 SINCRONISMO

A combinação de movimentos entre dois sistemas, em que se altera seu comportamento natural e ambos formam uma mesma dinâmica é o que definimos como sincronização. Christian Huygens, por volta do ano de 1657, registrou o que observou, enquanto estudava o movimento de dois pêndulos, os quais estavam pendurados sobre um mesmo suporte e oscilando. Esse foi o primeiro relato de sincronismo [6]. Huygens é o inventor do relógio de pêndulo, com base nessa investigação ele fez alguns estudos, em um desses, colocou dois relógios, um ao lado do outro, identificando que havia uma influência de um sistema com relação ao outro, fenômeno esse que pode ser identificado como sincronismo.

Ao longo da história, podem-se verificar vários tipos de sincronização, como a sincronização generalizada, a sincronização idêntica, de fase e de atraso.

2.1.1 SINCRONIZAÇÃO DA NATUREZA

Na natureza existem vários tipos de sincronismo que se relacionam aos seres vivos ou não. Dois sistemas com condições iniciais diferentes são capazes de se comportar de forma igual, com o passar do tempo. Podemos perceber esse tipo de comportamento em alguns seres vivos, como exemplo, o vagalume que pisca suas luzes sem influência de outros vagalumes, se ele se junta a outros vagalumes, em um ambiente, todos passam a piscar em sincronia [7][8].

2.1.2 SINCRONIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAOTICO.

A sincronização em sistemas caóticos traz alguns pontos complexos, como a sensibilidade às condições iniciais. Não se acreditava em sincronismo para estes sistemas, até que em 1990 pesquisadores como Pecora e Carroll publicaram [9] e Grebogi, Ott e Yorke [10]. Estes fizeram as primeiras publicações sobre o assunto que até hoje são bem explorados, seja na parte experimental ou em simulação computacional.

A dificuldade de sincronizar dois sistemas caóticos é o tempo de sincronização, pois, o mesmo, é uma variável estável que conduz a sincronização de sua trajetória. Neste caso, os sistemas podem estar em condições diferentes e mesmo assim tendem a se sincronizar com um determinado tempo.

2.2 ACOPLAMENTO

O acoplamento entre dois circuitos elétricos está diretamente ligado à sua sincronização e pode ser unidirecional ou bidirecional.

2.2.1 ACOPLAMENTO UNIDIRECIONAL

Quando um sistema definido como condutor S_1 atua sobre os demais sistemas, sendo eles S_2 e S_3 , em que não há interação entre eles, nesse contexto ocorre um acoplamento unidirecional. A Figura 5 representa o esquemático no qual é analisado o comportamento de um acoplamento unidirecional. A seta que liga S_1 a S_2 indica que S_1 atua como condutor no sistema e com isso influencia diretamente S_2 tornando a reciproca não verdadeira.

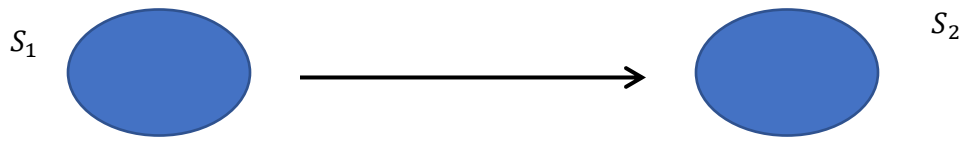


Figura 5: Dois sistemas dinâmicos, no qual o sistema S_1 atuando sobre S_2 com influência direta.

$$\dot{S}_1 = H(S_1) \quad \text{Que é o condutor}$$

$$\dot{S}_2 = H(S_2) + \eta G(S_1 - S_2) \quad \text{Resposta (2)}$$

2.2.2 ACOPLAMENTO BIDIRECIONAL

Neste dado caso, em que a situação no qual S_1 atua sobre S_2 e S_3 e há uma interação entre os sistemas, ocorre uma influência semelhante ao caso do sincronismo entre vagalume, caracterizando, portanto, um acoplamento bidirecional. A Figura 6 é um esquemático de um acoplamento bidirecional, em que as setas que ligam S_1 e S_2 indicam que há uma influência mútua.

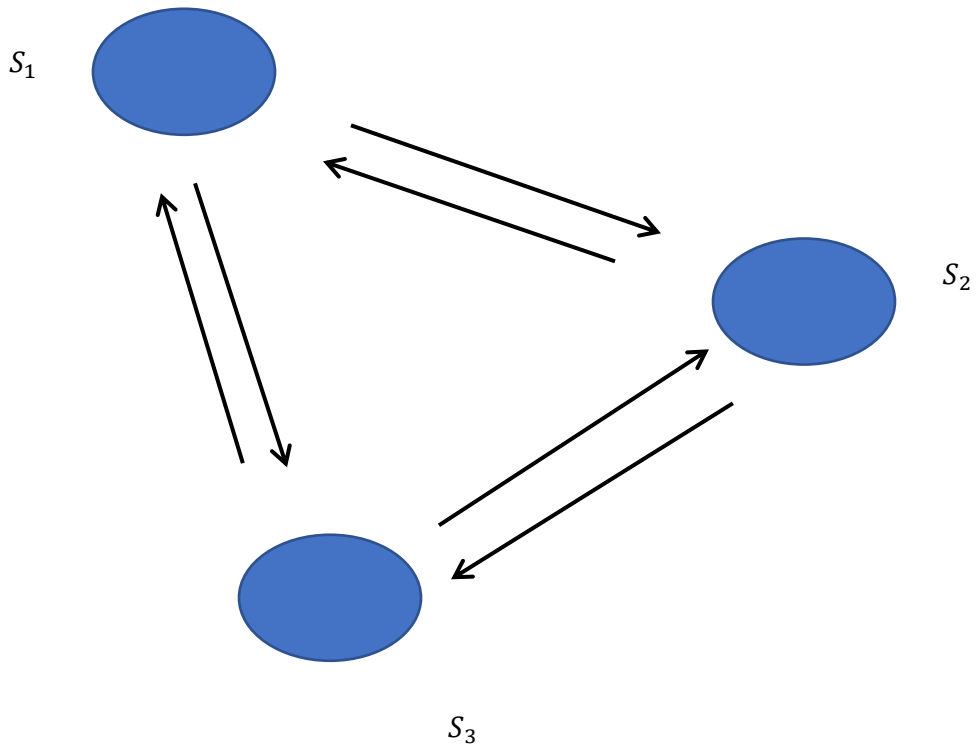


Figura 6: Influencia mutua entre todos os sistemas.

A equação 2.1 é referente a Figura 7, que mostra acoplamento bidirecional para a interação dos sistemas S_1 e S_2 , onde η representa coeficiente de acoplamento bidirecional.

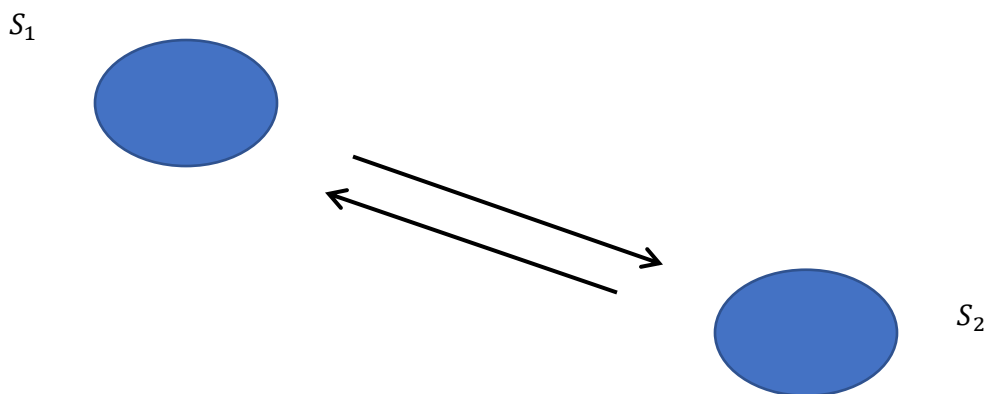


Figura 7: Acoplamento bidirecional no qual um sistema interage com outro.

$$\dot{S}_1 = F(S_1) + \eta G(S_2 - S_1)$$

$$\dot{S}_2 = F(S_2) + \eta G(S_1 - S_2) \quad (2.1)$$

2.3 REDES

Redes são estruturas capazes de se expandir de forma plena e se integram a novos nodos, os quais conseguem se comunicar dentro da rede, desde que partilhem a mesma linguagem de comunicação. Em suma, redes são definidas como sistemas de nodos e elos, termos esses empregados para retratar redes físicas, como por exemplo, uma rede telefônica [11].

Para entender melhor uma rede, podemos fazer a seguinte análise sobre transmissão de informação entre neurônios: quando uma determinada pessoa é fonte ou receptora de informação vamos definir como um nodo, já no caso em que a pessoa é portadora da informação ela se torna um elo [12], além disso, temos dois termos que se refere ao trabalho em redes: facilitação e hospedagem.

2.3.1 REDES NEURAIS

O cérebro humano é algo fascinante, referindo-se ao seu funcionamento, considerado por diversos estudiosos do mundo o processador mais potente que existe, ele é baseado em carbono, é formado por bilhões de neurônios que são responsáveis por diversas reações do corpo humano [11].

A comunicação entre os neurônios se dá através de sinapse. Sinapse é uma região onde dois neurônios se comunicam. Um neurônio forma em torno de dez mil sinapses, em que são transmitidos impulsos nervosos por eles, essa forma de comunicação é bem simples, podemos então imaginar um determinado neurônio β , que em um definido momento começa a processar, atingindo certo limiar de ação. Esse processo faz com que ele produza uma substância do tipo neurotransmissora que flui do corpo das células para o axônio, podendo ser conectado a outro neurônio α , que juntos constituem uma grande rede, denominada, assim, como rede neural. Os estímulos para esse funcionamento são variados e podem ser transmitidos por várias concentrações de Na^+

(Sódio) e K^+ (Potássio) ou como no sistema nervoso na forma de pequenos impulsos elétricos.

As primeiras publicações sobre redes neurais ou neurocomputacionais são do ano de 1943 com McCulloch e Pitts, eles fizeram um mecanismo que ficou conhecido como primeira rede neural. Esse trabalho propôs um modelo por processamento binário, cujo trabalho trazia uma semelhança entre processo eletrônico e células vivas, simulando a ação do neurônio natural, onde possuía apenas uma saída que era uma função de entrada da soma do valor de suas várias entradas, como mostra a Figura 8. Essa figura é de um modelo considerado bem simples, mas que abriu portas para desenvolvimento de novas tecnologias na época, como por exemplo, os computadores digitais e modelos matemáticos de dispositivos artificiais com ênfase em biologia. A datar, foram desenvolvidos vários trabalhos, dentre eles estão o de 1948, desenvolvido pelo professor N. Wiener[13], tais trabalhos definiram a palavra cibernética, ela que veio elucidar controle e comunicação com uma unificação nos seres vivos e nas máquinas. Em 1949, Donald O. Hebb[13] apresentou a maneira como a sinapse se altera no cérebro, o mesmo identificou que as células que são ativadas para qualquer função do corpo se fortalecem e as outras que não operam nesse funcionamento tendem a se enfraquecer. O primeiro neurocomputador foi o Mark I Perceptron, por volta de 1957, criado por Franck Rosenblatt, Charles Wightman[14,15].

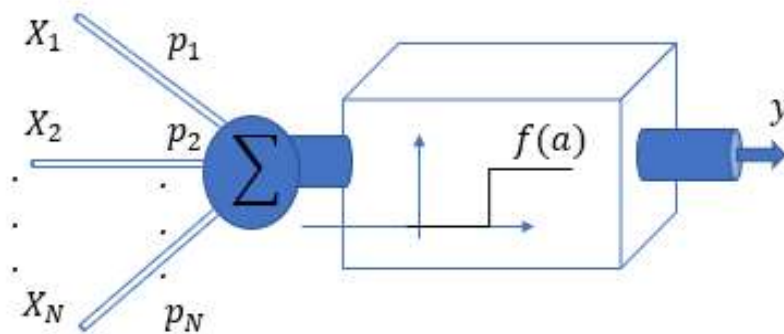


Figura 8: Esquemático do modelo de McCulloch e Pitts.

2.3.2 REDES NEURAIS NATURAIS

O cérebro é a parte de qualquer animal, seja ele racional ou não, que define seu comportamento, pensamentos e controla todo organismo. O cérebro é dividido em duas partes, as quais fazem o controle de todo corpo humano, lado esquerdo controla parte direita do corpo e o lado direito controla a parte esquerda. Controle esse que é feito por impulsos elétricos por meio de neurotransmissores. [11]

2.3.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes neurais artificiais seguem os princípios do cérebro, onde o agrupamento de vários neurônios é simulado com a ajuda de um computador. Uma rede neural artificial é constituída por várias unidades de processamento e a comunicação entre elas é feita geralmente por conectores, no qual seu comportamento se dá através da interação dos processamentos da rede. A rede neural é um modelo de inteligência artificial, onde se é construído um sistema com circuitos elétricos acoplados que fazem a simulação do cérebro humano. Uma rede neural artificial contém centenas ou milhões de unidades de processamento, podendo ser equiparado com o cérebro de um mamífero, o qual pode ter em torno de bilhões de neurônios.

O trabalho com rede neural é complexo, há uma quantidade de estudos sobre esse assunto e inúmeras elaborações de definições ou interpretações do que é realmente uma rede de neurônios. A aplicabilidade de redes neurais artificiais pode modificar-se, a depender da área, como por exemplo, a aplicação em reconhecimento de padrões e classificação, processamento de imagem e visão, identificação de sistema e controle, processamento de sinais e computacional, no qual tem como objetivo desenvolver equações matemáticas que são baseadas, ou não, na biologia e que realizem alguma função.

CAPITULO 3

CIRCUITO DE CHUA EXPERIMENTAL E MÉTODOS DE ANÁLISE.

3.1 CIRCUITO DE CHUA

O circuito de Chua foi proposto pelo professor Leon O. Chua em 1984, ele é composto por componentes lineares como os capacitores C_1 e C_2 e um indutor eletrônico e um componente não linear denominado como diodo de Chua, ilustrado na figura 9. O circuito de Chua é modelado pelas equações 3, que possuem situação mínima para acontecimento de caos, no qual a primeira e a segunda equação pode ser obtida pela lei de Kirchhoff aplicado a corrente e a terceira é obtida pela lei de Kirchhoff aplicado a tensão do meu circuito. As variáveis que descrevem o sistema são: corrente I_z , indutor L , tensão V_1 no capacitor C_1 , tensão V_2 no capacitor C_2 , sendo possível obter as equações diferenciais abaixo.

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{RC_1} - \frac{I_d(V_1)}{C_1} \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{RC_2} + \frac{I_z}{C_2} \\ \frac{dI_z}{dt} = \frac{V_2}{L} - I_z \frac{r_L}{L} \end{cases} \quad (3)$$

A explicação mais detalhada do indutor eletrônico, diodo de Chua e das equações do sistema pode ser encontrada [15].

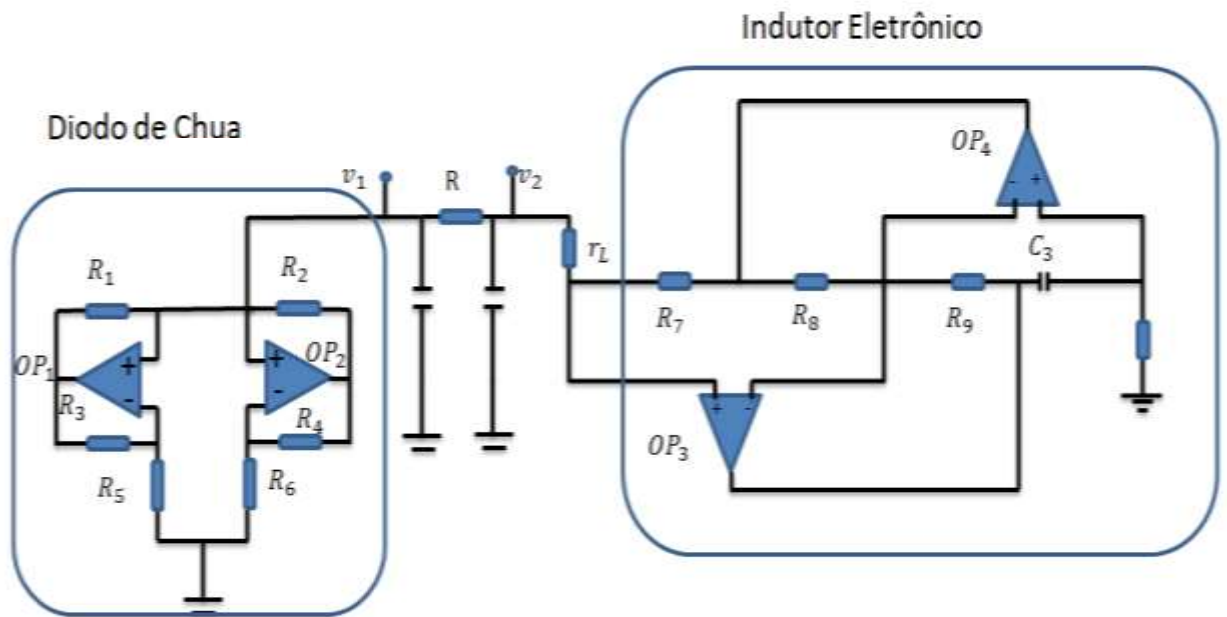
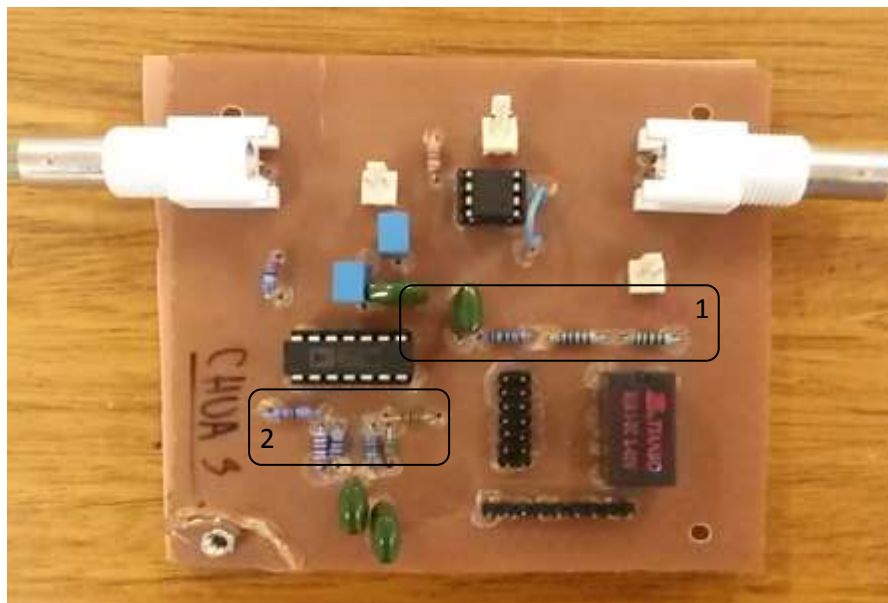
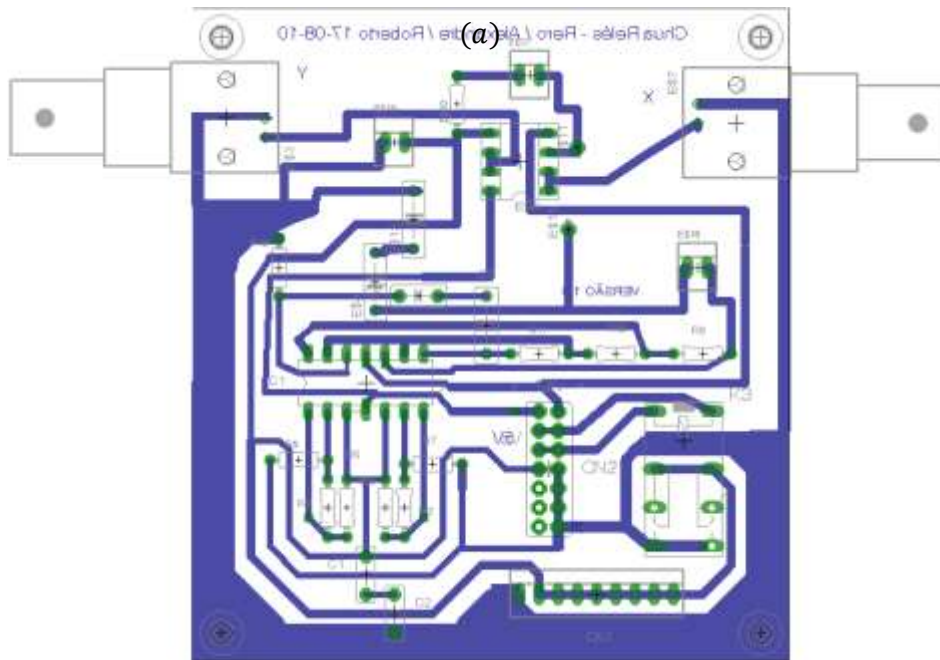


Figura 9: Esquemático do circuito de chua, apresentando o diodo de Chua, indutor, capacitores e parâmetros de controle.

A Figura 10 mostra o esquemático do circuito de Chua no programa Eagle e a placa montada em fenolite, na Figura 10 (b) vemos o número 1 que representa o indutor eletrônico e número 2 que representa o diodo de Chua, na imagem também podemos ver os dois conectores BNC que fazem a leitura das variáveis x e y do nosso sistema.



(b)
Figura 10: Esquemático do circuito de chua no programa Eagles(a) e (b) Circuito de Chua montado em placa de fenolite.

A maior dificuldade é encontrar dois circuitos de Chua no qual as suas curvas $i_v(x)$, sejam iguais ou bem parecidas, garantindo, assim, equações similares, já que vamos acoplar dois circuitos de Chua. Na próxima sessão será apresentado o método que possibilitou obter dois circuitos de Chua simétricos.

3.1.2 ACOPLAMENTO DO CIRCUITO DE CHUA

Um ponto importante para o acoplamento do circuito de Chua é a sua simetria. Uma ideia de como obter esse resultado é observando a equação 3.1 as linhas de cor preta, no qual são ideais para o experimento, já que os termos centrais, que corresponde da segunda a terceira linha são simétricos.

$$i_v(x) = \begin{cases} -8.072x - 60,658 & \text{se } x \leq -4,693 \\ x - 0,840 & \text{se } -4,693 < x \leq -1,00000 \\ 1,84x & \text{se } -1,00000 < x < 1,00000 \\ x + 0,840 & \text{se } 1,00000 \leq x < 4,923 \\ 8,887x + 68,591 & \text{se } x \geq 4,923 \end{cases} \quad (3.1)$$

Se compararmos a equação 3.1 com as equações que obtivemos 3.2 e 3.3, as quais descrevem o comportamento do circuito de Chua experimental a partir da curva i_v , há uma pequena diferença entre os valores das equações, a primeira diferença se encontra na primeira e última linha em vermelho que contribuem para o contorno do desenho, essa diferença vai ser mais nítida na sessão de resultados e discursões.

Com diversas análises dos resultados obtidos a partir da curva i_v , compreendemos como melhorar esse resultado, no qual foi aplicado no experimento. Admitindo que a segunda e a terceira linha da equação 3.1 em cor preta têm dependência com os componentes R_1 e R_3 (resistores), percebemos que esse é o primeiro resultado importante para obter simetria perfeita, resultando que a razão entre a resistências R_1 e R_3 foi inferior ou igual a 0,98..., definido, portanto, a expressão abaixo.

$$\frac{R_1}{R_3} < 0,98 \dots$$

Essa expressão garante a simetria que se verifica na segunda e terceira linha da equação 3.1 e de forma experimental nas equações 3.2 e 3.3. O segundo caso é um pouco mais complicado, pois a quarta linha da equação 3.1 em cor preta representa um termo de correção que é a saída de *offset*. A tensão de entrada e saída do circuito tem que ser igual, mas no caso experimental é muito difícil ter esse controle, então, garantir

que os resistores R_2 e R_4 sejam os mais próximos um do outro com precisão de até 3 casas decimais garante um bom resultado.

A prova que esse método de análise, para obter um melhor resultado, funciona é a Figura 11, ela mostra a curva i_v característica do diodo de Chua que é obtida com auxílio do programa desenvolvido no software Labview® e do equipamento Keithley 2100, onde verifica-se o resultado do circuito de Chua 1 e do circuito de Chua 2, plotada uma contra a outra obtida a partir das equações 3.2 e 3.3. É nítida a percepção que são praticamente iguais a menos de uma correção pequena de *offset*.

$$i_d(x) = \begin{cases} -8,072x - 60,658 & \text{se } x \leq -4,693 \\ x - 0,840 & \text{se } -4,693 < x \leq -1,00000 \\ 1,84 & \text{se } -1,00000 < x < 1,00000 \\ x + 0,857 & \text{se } 1,00000 \leq x < 4,923 \\ 8,887x + 68,591 & \text{se } x \geq 4,923 \end{cases} \quad (3.2)$$

E para o circuito de Chua 2,

$$i_d(x) = \begin{cases} -8,099x - 60,898 & \text{se } x \leq -4,693 \\ x - 0,840 & \text{se } -4,693 < x \leq -1,00000 \\ 1,840 & \text{se } -1,00000 < x < 1,00000 \\ x + 0,858 & \text{se } 1,00000 \leq x < 4,897 \\ 8,866x + 68,426 & \text{se } x \geq 4,897 \end{cases} \quad (3.3)$$

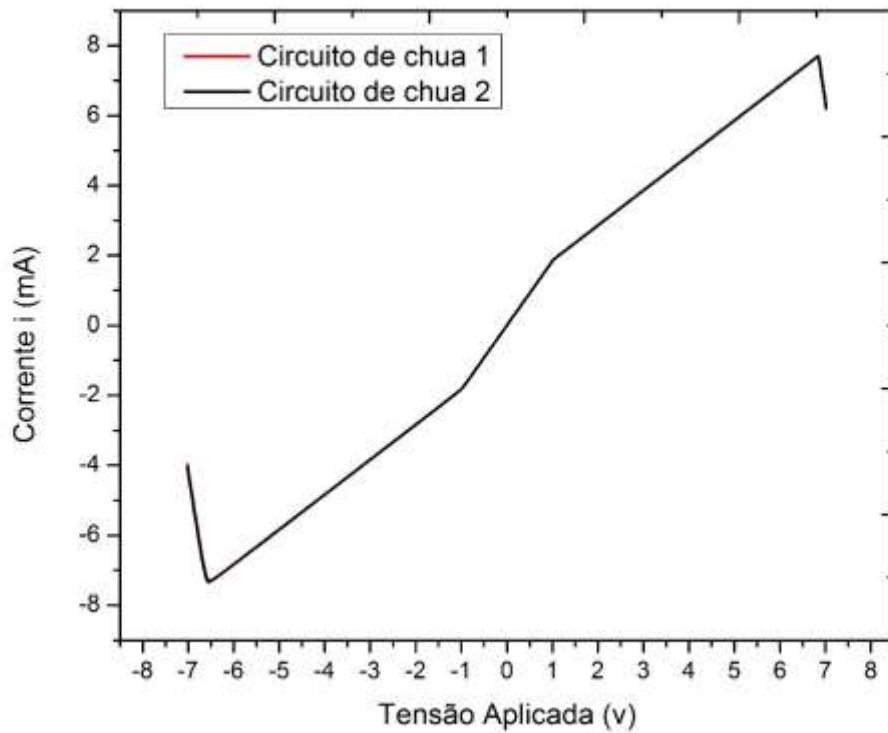


Figura 11: Curva $i(v)$ dos dois circuitos de Chua um contra a outra.

Contudo é possível melhorar esse resultado, fazendo com que os valores dos resistores R_2 e R_4 sejam mais parecidos possíveis, corrigindo offset do circuito foi obtido o seguinte resultado para o circuito de Chua 3.

$$i_d(x) = \begin{cases} -8,099x - 60,898 & \text{se } x \leq -4,693 \\ x - 0,850 & \text{se } -4,693 < x \leq -1,00000 \\ 1,850 & \text{se } -1,00000 < x < 1,00000 \\ x + 0,858 & \text{se } 1,00000 \leq x < 4,897 \\ 8,866x + 68,426 & \text{se } x \geq 4,897 \end{cases} \quad (3.4)$$

As medidas foram feitas no multímetro da Keithley 2100, com medida de 4-fios, a mesma faz leitura do valor da resistência com quatro pontos ao invés de dois, permitindo um resultado bem mais preciso na escolha dos resistores. As Tabelas 2, 3 e 4 mostram os valores dos componentes utilizados na montagem dos circuitos de Chua.

Circuito de Chua 1:

Tabela 3: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 1 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.

Componentes	Valor	Componentes	Valor
R₁	(219,0956±0,0002) Ω	R₈	(0,9947±0,0002) kΩ
R₂	(22,0452±0,0002) kΩ	R₉	(0,9949±0,0002) kΩ
R₃	(221,7034±0,0002) Ω	R₁₀	(1,7939±0,0002) kΩ
R₄	(22,0463±0,0002) kΩ	C₁	(23,8975±0,0002) nF
R₅	(2,1906±0,0002) kΩ	C₂	(235,8252±0,0002) nF
R₆	(3,2883±0,0002) kΩ	C₃	(23,8925±0,0002) nF
R₇	(0,9945±0,0002) kΩ		

Circuito de Chua 2:

Tabela 4: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 2 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.

Componentes	Valor	Componentes	Valor
R₁	(219,1935±0,0002) Ω	R₈	(0,9966±0,0002) kΩ
R₂	(22,0433±0,0002) kΩ	R₉	(0,9960±0,0002) kΩ
R₃	(221,7018±0,0002) Ω	R₁₀	(1,7942±0,0002) kΩ
R₄	(22,0423±0,0002) kΩ	C₁	(23,9075±0,0002) nF
R₅	(2,1922±0,0002) kΩ	C₂	(235,2365±0,0002) nF
R₆	(3,2876±0,0002) kΩ	C₃	(23,8925±0,0002) nF
R₇	(0,9962±0,0002) kΩ		

Circuito de Chua 3:

Tabela 5: Tabela com os valores dos componentes que formam o circuito de Chua 3 com R representando o valor da resistência e C o valor do capacitor.

Componentes	Valor	Componentes	Valor
R₁	(219,1534±0,0002) Ω	R₈	(0,9962±0,0002) kΩ
R₂	(22,0392±0,0002) kΩ	R₉	(0,9961±0,0002) kΩ
R₃	(221,8918±0,0002) Ω	R₁₀	(1,7852±0,0002) kΩ
R₄	(22,0406±0,0002) kΩ	C₁	(23,9275±0,0002) nF
R₅	(2,1823±0,0002) kΩ	C₂	(235,6356±0,0002) nF
R₆	(3,2578±0,0002) kΩ	C₃	(23,6982±0,0002) nF
R₇	(0,9963±0,0002) kΩ		

Concluída a montagem do circuito de Chua, a partir da escolha dos componentes, retiramos duas informações: a primeira é do atrator do circuito de Chua projetado em duas dimensões gerado pelo osciloscópio, observe na Figura 12.



Figura 12: Circuito de chua gerando um atrator.

As equações 3.2 e 3.3 foram obtidas a partir das condições de normalização $x = \frac{V}{B_{p1}}$ e $i_d(x) = \frac{i(v)}{\bar{m}_0 B_{p1}}$, onde são definidos os valores médios da inclinação e o ponto de intercepção dessa inclinação, como mostra a figura 19. Para o circuito de Chua 2 são $\bar{m}_0 = -4,15803E-4$ e $B_{p1} = 1,400009$ e para o circuito de Chua 3 $\bar{m}_0 = -4,16098E-4$ e $B_{p1} = 1,4000345$. Podemos identificar esses pontos com a imagem abaixo, que é a curva característica do diodo de Chua linear por partes dividida em cinco pontos de inclinação.

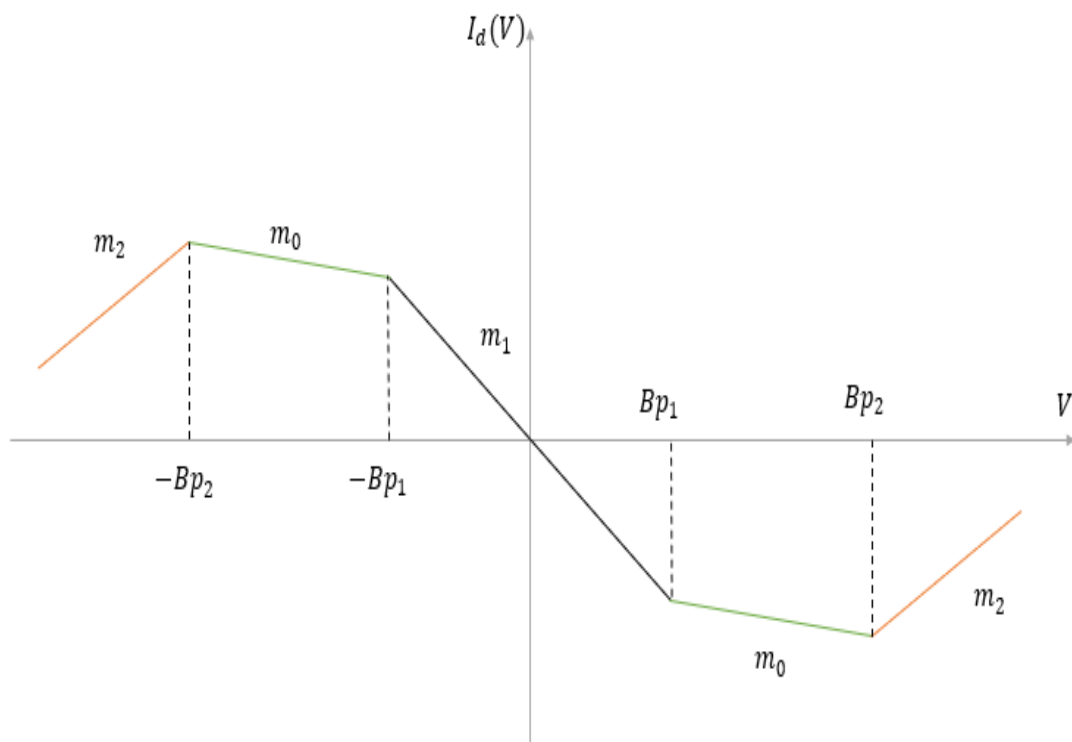


Figura 13: Pontos de inclinação e de intercepção da curva $i_d(x)$ do diodo de Chua.

3.2 POTENCIÔMETRO

Um potenciômetro é basicamente um resistor que sofre variação de sua resistência. Baseado em [16], foram construídos potenciômetros digitais para controle do circuito de Chua. Para cada circuito de Chua temos dois potenciômetros, no qual se diferem no acionamento do relé: um em que os valores das resistências são acionados quando estão normalmente abertos para parâmetro r_L e outro normalmente fechado para controle do parâmetro R , no total de quatro potenciômetros de controle, dois para cada circuito de Chua. Nosso potenciômetro foi construído com os seguintes componentes: 13 relés do tipo MB1RC2, 13 transistores BC337, 13 diodos 1n4007 MIC e 13 resistores calibrados com as resistências desejadas que variam de $0,1\Omega$ até $409,6\Omega$ com precisão de 1% e 5%, de potência nominal de 1/8 W.

Ainda foi construído um quinto potenciômetro, esse para controlar os valores das resistências de acoplamento com variação de 100Ω até $51k\Omega$. Os componentes utilizados para montagem foram os mesmos utilizados nos potenciômetros para controle do circuito de Chua. A Figura 14 mostra o esquemático dos potenciômetros no software Proteus.

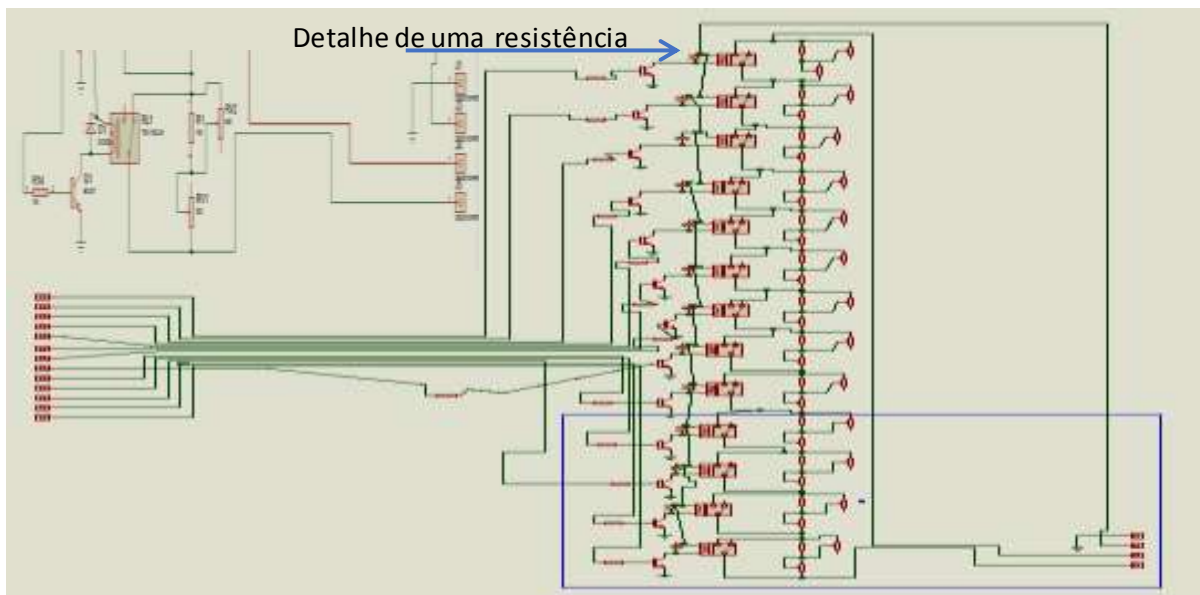


Figura 14: Detalhe do esquemático do potenciômetro digital projetado no Proteus.

A Figura 15 apresenta a imagem em 3D do potenciômetro desenhado no Proteus, mostrando a estrutura do potenciômetro.

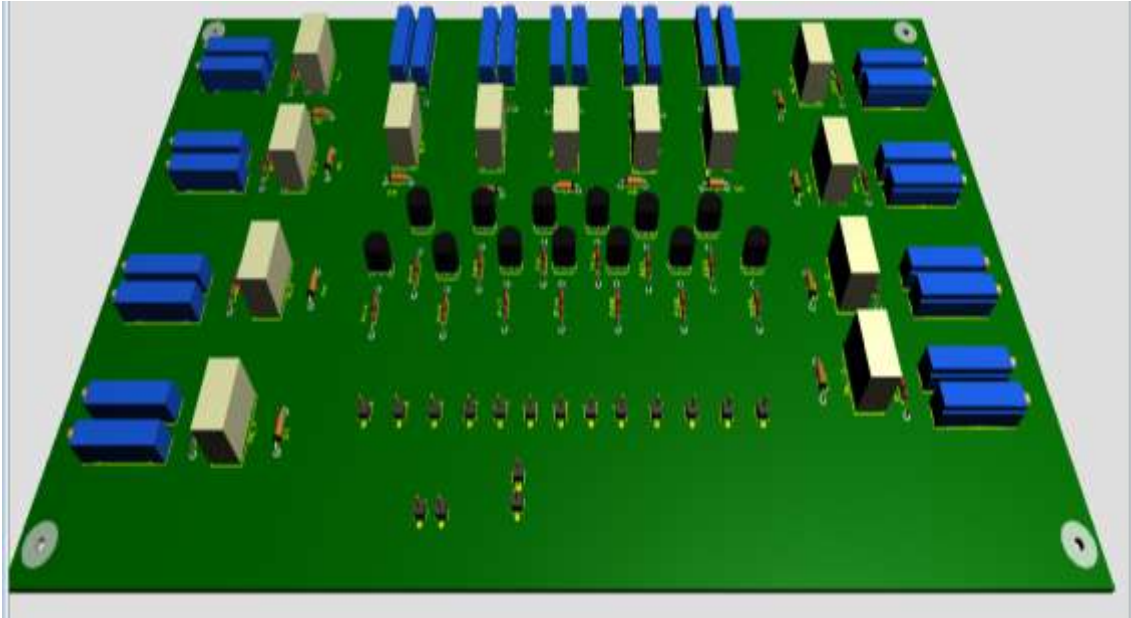


Figura 15: Detalhe do potenciômetro em 3D projetado no software Proteus.

Objetivando a calibração dos potenciômetros, foi utilizado um multímetro digital da Keithley 2100, com precisão de 4-pontos de medida para obter os valores esperados das resistências, o controle foi feito pela conexão USB com auxílio do programa Labview®.

São necessários dois passos para calibração dos potenciômetros, a figura a abaixo mostrará o primeiro passo que é o controle do potenciômetro para os parâmetros R ou r_L , onde são selecionadas as portas de contato com a placa DAQ de modelo NI SCB 68. Este bloco de conectores possui 68 I/O. São 31 portas de leitura, no qual foram utilizadas as portas 0-12 para controle de r_L e 13-25 para o controle de R e um pino de GND que é o fio terra digital. Para controle da resistência de acoplamento foram utilizadas as portas 0-10; para controle de r_L , 15-23; para controle de R e 11-14 e 26-31 para controle da resistência de acoplamento.

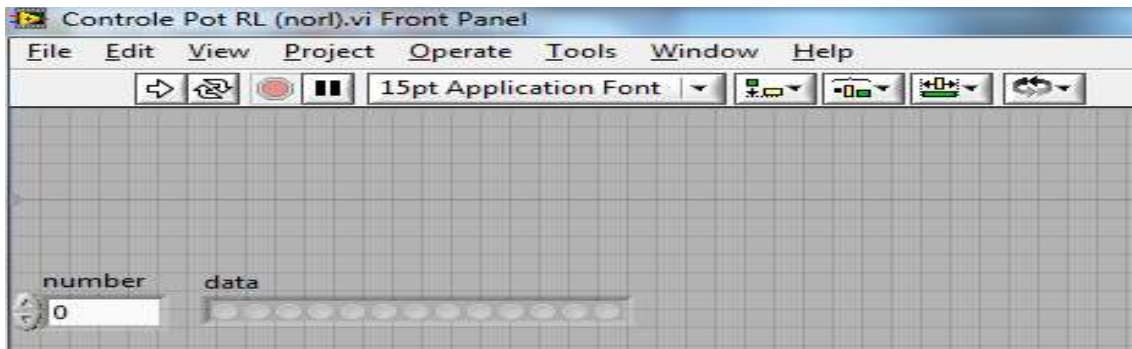


Figura 16: Painel principal do controle do usuário que seleciona os pinos da placa DAQ e a informação data na tela da informação dos bits que estão sendo acionados.

O Segundo passo é a calibração dos potenciômetros com auxílio do programa em Labview®. Na tela do programa o usuário seleciona a medida de 4 fios do equipamento da Keithley 2100 com conexão USB e a pasta onde o arquivo será salvo.

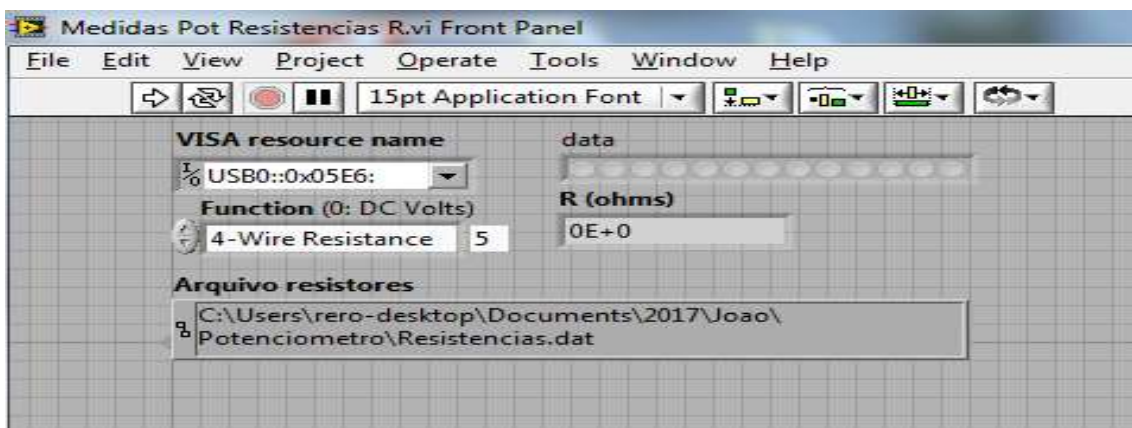


Figura 17: Tela principal do programa no qual se faz a calibração do potenciômetro.

Com as medidas realizadas obtém-se os seguintes resultados:

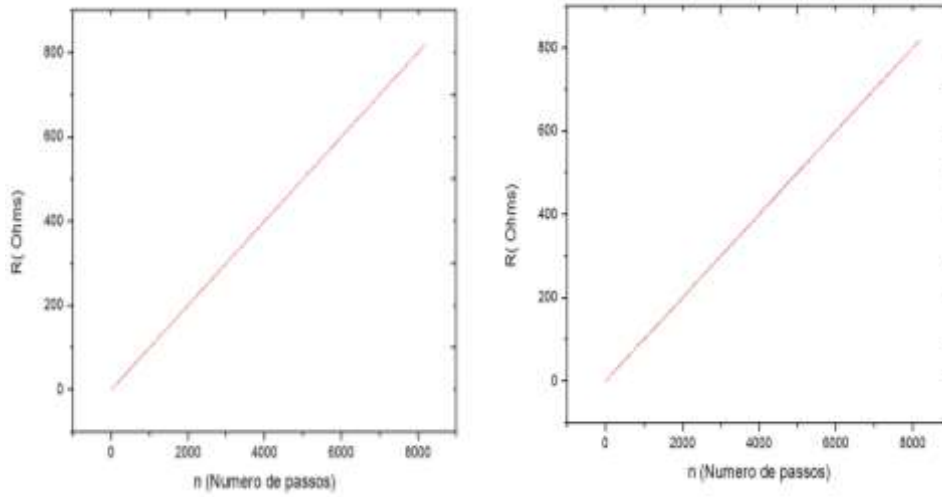


Figura 18: Ajuste dos potenciômetros para parâmetro r_L .

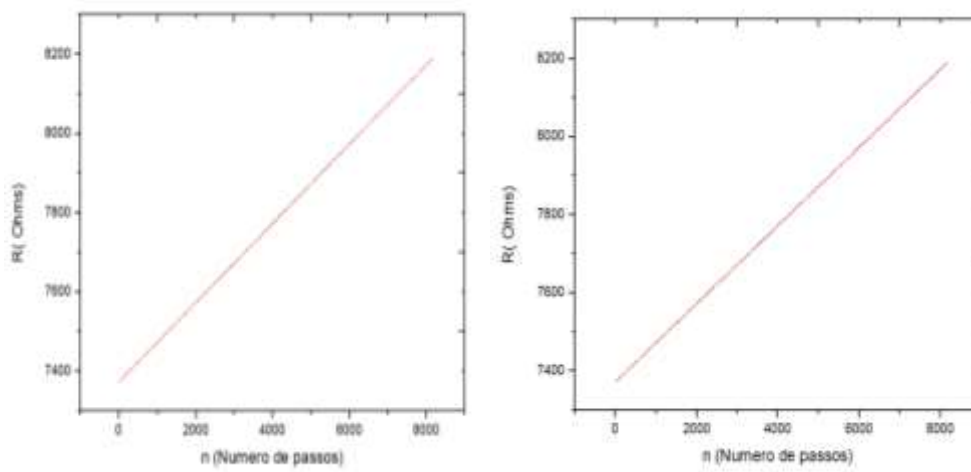


Figura 19: Ajuste dos potenciômetros para parâmetro R .

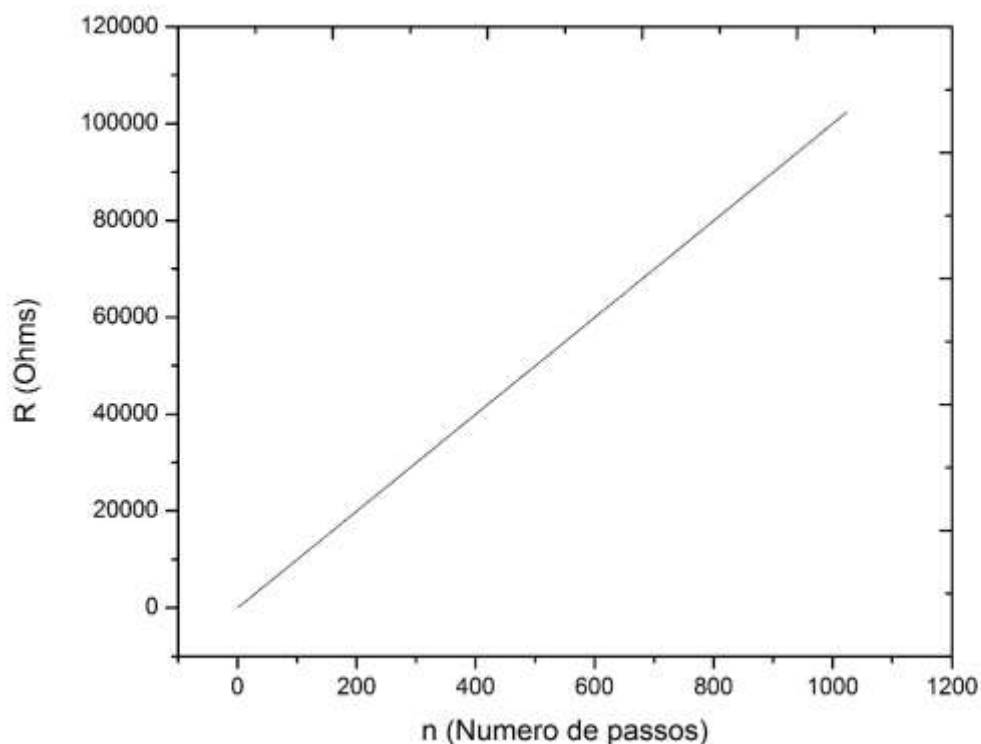


Figura 20: Ajuste dos potenciômetros para controle da resistência de acoplamento.

3.3 CONTROLADOR DE TENSÃO

Para controle da tensão do circuito de Chua e dos potenciômetros foi construído um controlador de tensão. As baterias de carro que em média fornecem por volta de 13,4 volts e a alimentação do nosso sistema, para o circuito de Chua -12v, +12v e terra e os potenciômetro com +12v e terra.

As baterias foram ligadas de forma simétrica, no qual forneceram um sinal negativo, positivo e terra. O circuito que faz o controle de tensão garante que tenha 12 volts na saída, desde que a bateria estivesse fornecendo uma tensão acima ou igual a 12,5 volts, por isso, em alguns momentos, foi preciso dar uma carga nas baterias para garantir essa tensão de saída, que era importantíssima para a medida. A Figura 21 mostra o esquemático do regulador de tensão.

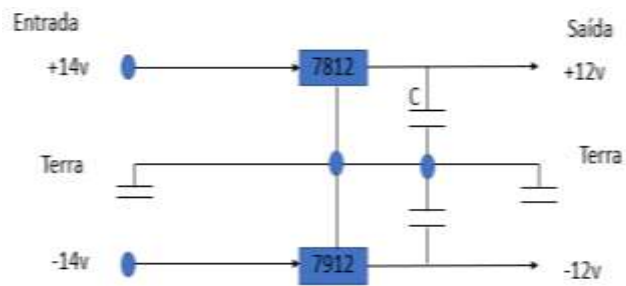


Figura 21: Esquemático do regulador de tensão.

O regulador de tensão foi construído com os seguintes componentes: L7812 que controla a tensão positiva do circuito; L7912 que controla a parte negativa e dois capacitores de 100 nF que fazem o papel de filtrar essa tensão. A Figura 22 mostra o circuito montado com os respectivos componentes.

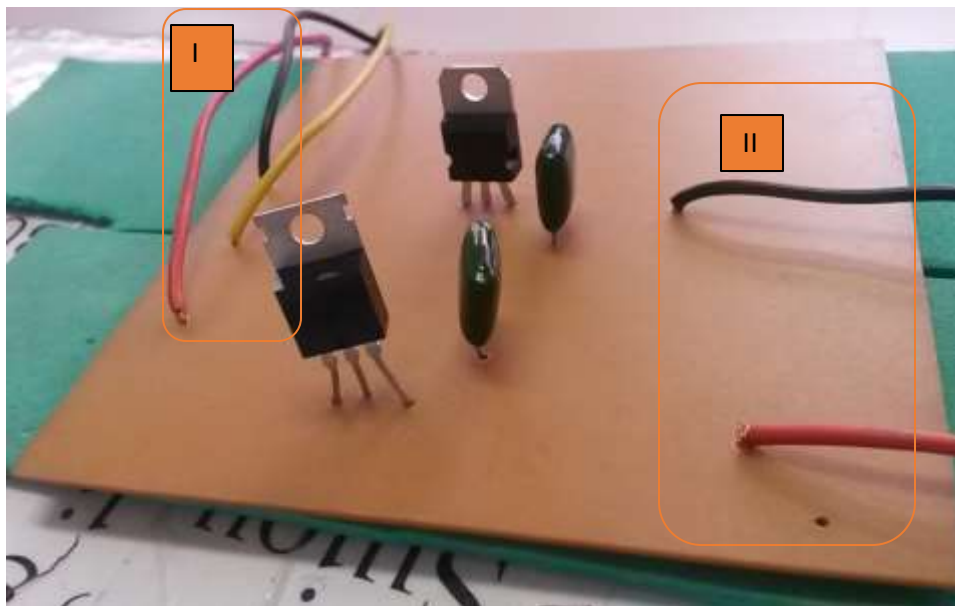


Figura 22: Regulador de tensão montado, parte I tensão de entrada e II tensão de saída, não tem o fio terra na tensão de saída pois terra é comum.

3.4 MONTAGEM E AQUISIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS

Foi desenvolvido um programa em Labview® para aquisição das séries temporais, a montagem experimental contém os seguintes equipamentos- um computador com placa DAQ-NI modelo PCI-6259 e para controle dos potenciômetros foi usada uma placa DAQ com blocos de conectores do modelo NI SCB 68 que aciona a placa como comentado na secção anterior. A Figura 23 mostra todos os equipamentos utilizados na montagem experimental e a Figura 24 detalhe experimental do circuito de Chua acoplado ligado aos potenciômetros.

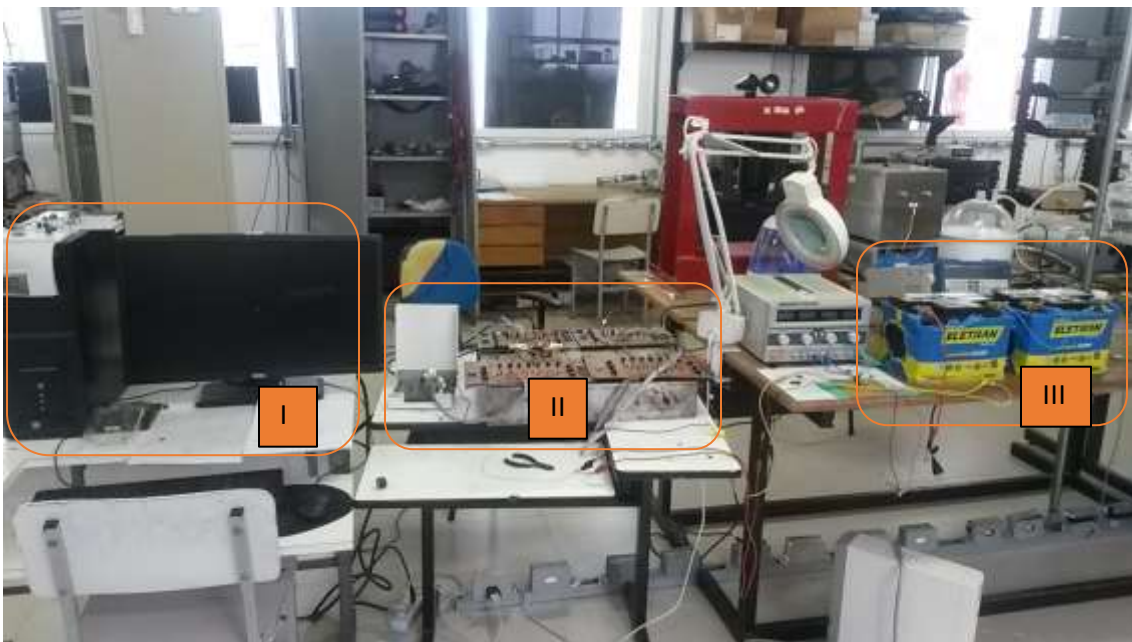


Figura 23: Montagem experimental para a medição das séries temporais. I é o computador com programa da Labview®, II os dois circuitos de chua com os quatro potenciômetros e a placa DAQ e III bateria simétrica -12v, +12v e fio terra que alimenta os itens II.

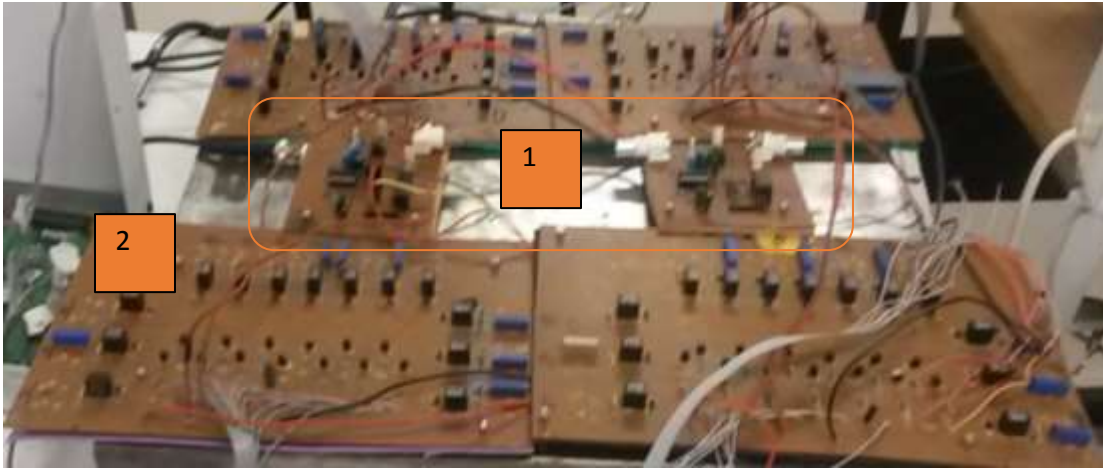


Figura 24: Detalhe do item II da figura23 no qual 1 são os dois circuitos de Chua e 2 referentes aos potenciômetros que fazem o controle do circuito.

Na Figura 25 o usuário define os intervalos de r_L e R que deseja analisar, a próxima etapa é definir o valor de r_L e R e escolher o local onde o arquivo vai ser salvo, por fim, definir o número de medidas por ponto.

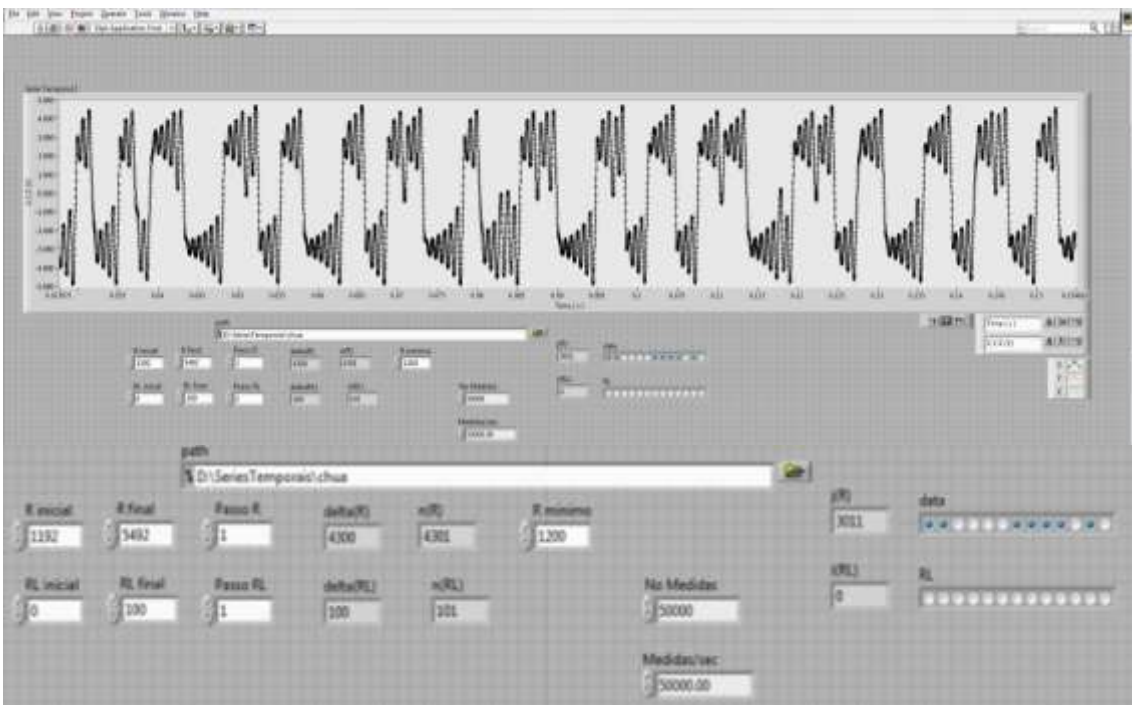


Figura 25: Programa que faz leitura das series temporais do circuito de Chua.

3.5 DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO E PERIODICIDADE.

3.5.1 DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO

Para descrever todo sistema em estudo é preciso conhecer os comportamentos possíveis ao longo de um determinado intervalo de tempo ou perceber algum tipo de alteração no parâmetro de controle, tal conhecimento é obtido com o diagrama de bifurcação.

Contudo, foi desenvolvido um programa em Labview® que faz essa análise. Com o programa aberto o primeiro passo do usuário na tela principal é definir o caminho de leitura do arquivo; segundo passo é definir um valor fixo para τ_L e um intervalo de variação de R , em seguida, definir o passo de τ_L e R como o mesmo utilizado para obtermos as séries temporais. No terceiro e último passo é definido o nome do arquivo de saída e local a ser salvo as informações obtidas.

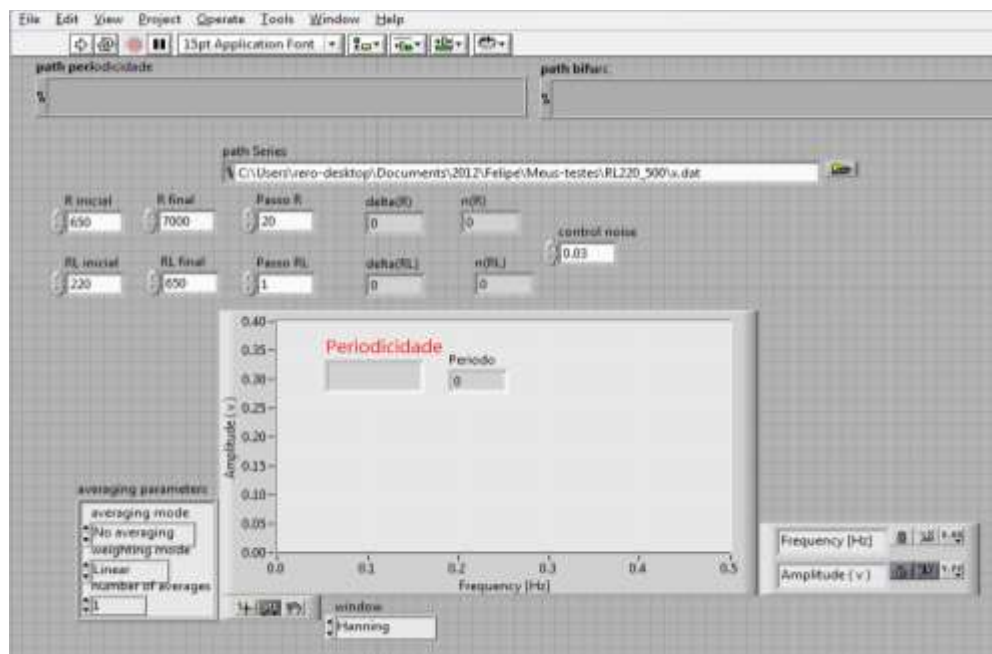


Figura 26: Tela principal do programa que faz o diagrama de bifurcação.

Analisando o ponto com valores de $r_L = 36 \Omega$ e R variando de 1320Ω até 1900Ω , obtivemos o diagrama de bifurcação experimental, vejamos a Figura 27.

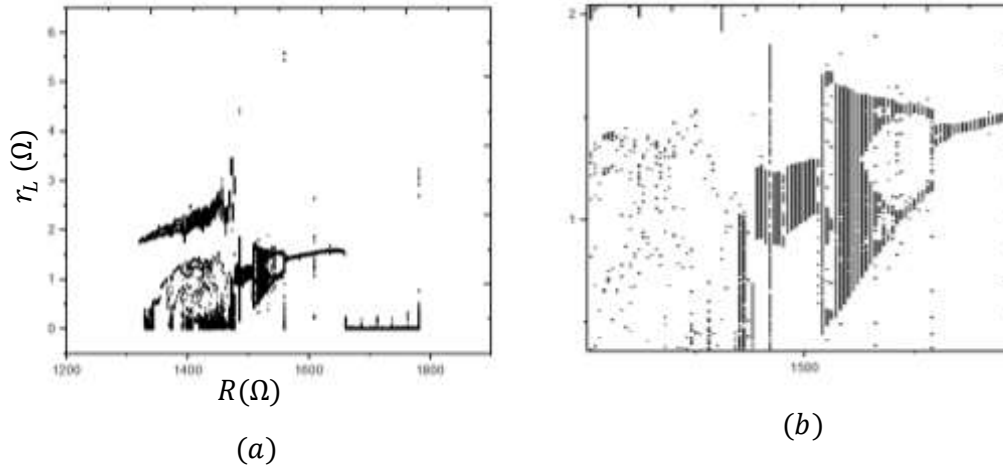


Figura 27: A Figura 27 (a) é o diagrama de bifurcação inteiro e (b) diagrama de bifurcação com zoom com variação de 1400Ω até 1600Ω para o parâmetro de controle R .

3.5.2 PERIODICIDADE

Um conceito muito utilizado nas ciências é a periodicidade, ela possibilita a previsão de acontecimentos ou situação de um dado sistema. Podemos entender periodicidade como a característica de acontecimentos ou situações que se repetem após determinado tempo ou medida.

As séries temporais podem apresentar órbitas periódicas, então podemos calcular seu período, construir um mapa e identificar os diversos períodos existentes no sistema. Junto ao programa que analisa o diagrama de bifurcação foi criado uma sub-rotina que calcula a periodicidade, então ao mesmo tempo que temos o diagrama de bifurcação, temos um arquivo com nome de saída `periodic.dat` que traz a periodicidade.

3.6 CALCULO DO EXPOENTE DE LYAPUNOV E DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE

Foi desenvolvido um script em python que faz os cálculos dos expoentes de lyapunov pelo comando **lyap_spec** do pacote de programação TISEAN (Nonlinear Times Series Analysis) que é um software que faz análise de sistemas não lineares. Para o cálculo dos expoentes de lyapunov é preciso conhecer a série temporal do sistema e os valores que descrevem as suas condições iniciais. O expoente de lyapunov então é definido como a taxa de divergência de trajetórias próximas.

No script, o primeiro passo é escolher o intervalo que se quer obter o valor dos expoentes de lyapunov das variáveis r_L e R , os arquivos de leituras estão definidos, como por exemplo, "ChuaRL360R14500.dat". Os comandos do **lyap_spec** estão definidos na tabela abaixo.

Tabela 6: Parâmetros de análises das series temporais

Comandos		Valores
-x#	Número de linhas a ser ignorada	20000
-m#,#	Número de componentes, dimensão de imersão	1,3
-k#	Número de vizinho	80
-d#	Delay	120
-o	Nome do arquivo que vai ser salvo	
Lyap_spec -m1,3 -k80 -d120 -x20000 chuaRL360R17000.dat -o		

Depois dessa análise é gerado um arquivo de saída que guarda os três valores do expoente de lyapunov, dado por λ_1, λ_2 e λ_3 e respectivos valores de r_L e R .

A dimensão de Kaplan-Yorke é calculada a partir dos expoentes de lyapunov, como mostra na sessão 1.6. Foi desenvolvido um script em python que faz esse cálculo segundo a equação 1.9. Temos, então, um arquivo de saída com os valores de r_L, R e DK .

CAPITULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - PERIODICIDADE DE UM CIRCUITO DE CHUA

Como visto no capítulo 3, a partir das séries temporais pode-se gerar muitos resultados importantes para o trabalho, um deles é a análise do espaço de parâmetros da periodicidade, esse resultado nos dá uma ideia geral do comportamento do circuito, com respeito ao seu período, podendo assim diferenciar o comportamento caótico do periódico. A Figura 28 mostra o espaço de parâmetros da periodicidade experimental do circuito de Chua 1, com os parâmetros de R e r_L , em que R varia com passo de 1Ω e r_L e com passo de $0,1 \Omega$.

Na Figura 28 podemos identificar escalas de cores que se alteram quando há transição de período. Na escala de cores a cor bege escura é a região caótica e as outras cores, que tem sua variação da cor amarela para a cor violeta, são regiões periódicas que tem sua variação do período 1 até o período 14. No qual obtivemos.

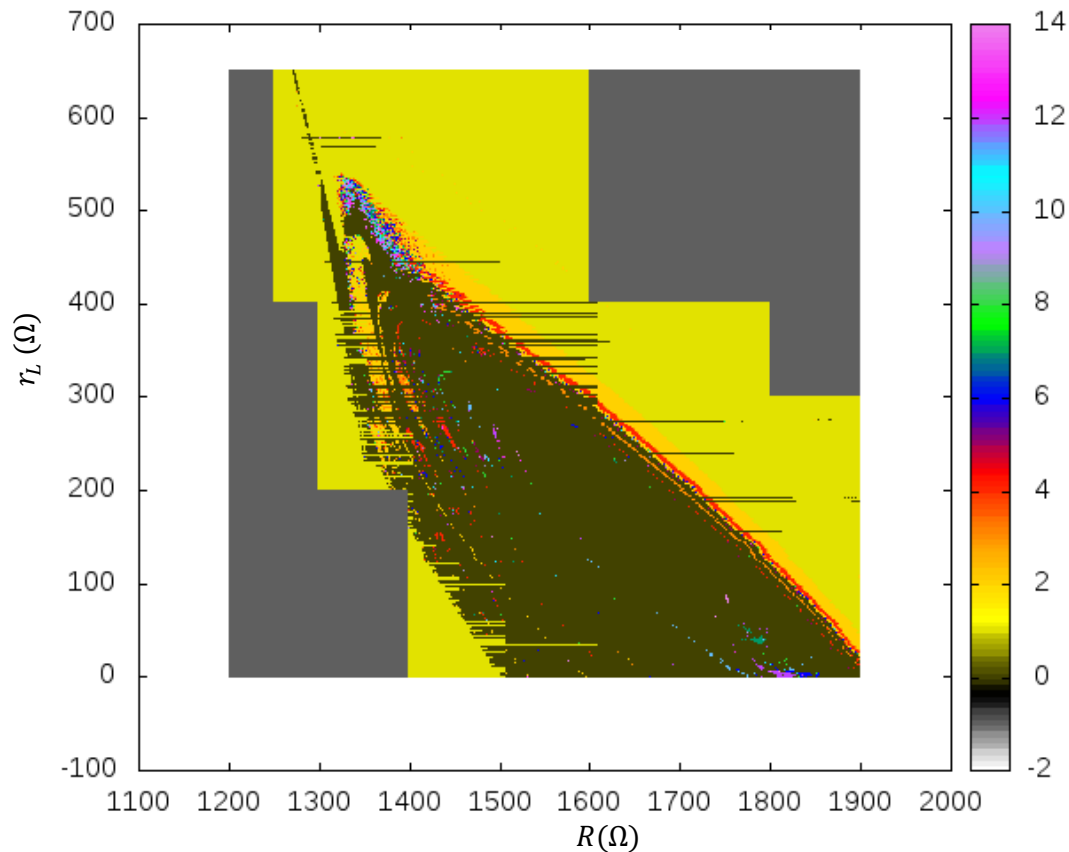


Figura 28: Espaço de parâmetros da periodicidade para o circuito de Chua1 experimental.

4.2- ESPAÇOS DE PARÂMETROS DO EXPOENTE DE LYAPUNOV

Um sistema dinâmico pode ser expresso pelos expoentes de Lyapunov, esses expoentes descrevem a velocidade de fase com a qual dois pontos muito próximos se aproximam ou se afastam. Como visto no capítulo 1, para determinação se um é sistema caótico é preciso pelo menos um expoente de Lyapunov positivo. A Figura 29 representa o espaço de parâmetro do maior expoente de Lyapunov, simulado obtido a partir da equação 3.1 que representa o circuito de Chua 1 e a Figura 30 obtida da equação 3.2 que representa o espaço de parâmetros do maior expoente de Lyapunov do circuito de Chua 1. Na escala de cores das Figuras 29 e 30 a cor branca indica pontos fixos, a cor preta indica que é uma região periódica do sistema e a escala de cores que abrange do amarelo até o vermelho, indicam as regiões de menor para maior intensidade do expoente de Lyapunov, variando do amarelo para o vermelho.

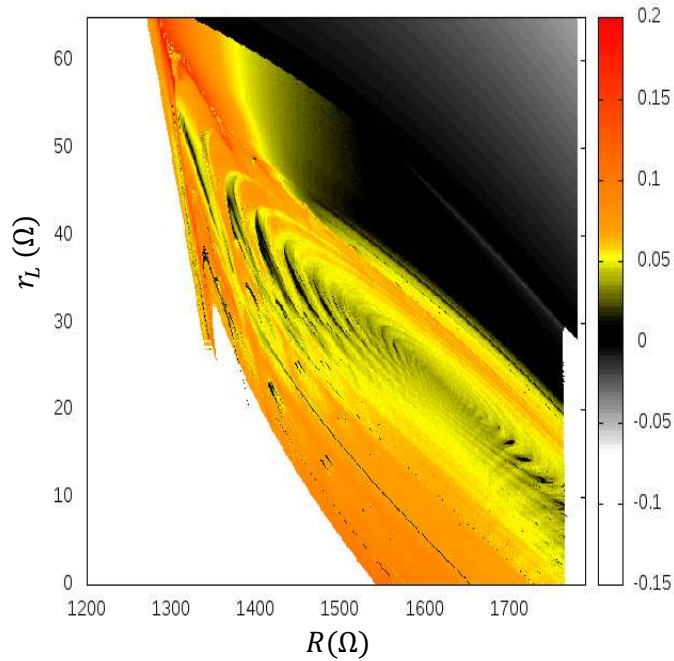


Figura 29: Espaço de parâmetro do expoente de Lyapunov de simulações do circuito de Chua 1.

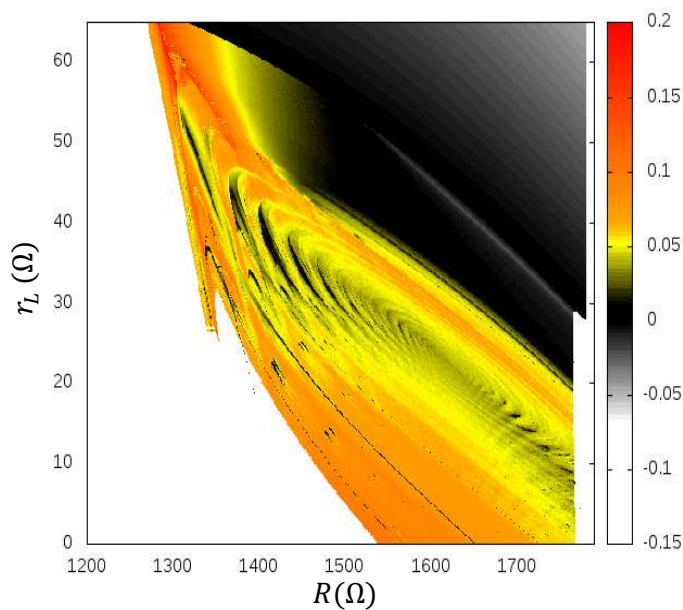


Figura 30: Espaço de parâmetro do expoente de Lyapunov de simulações do circuito de Chua 2.

A Figura 31 foi obtida de forma experimental a partir da curva $i(v)$, referente ao circuito de Chua 1. A partir das series temporais, foi obtido o espaço de parâmetros do maior expoente de Lyapunov experimental. Comparando o espaço de parâmetros do expoente de Lyapunov simulado com o experimental, percebemos que as estrutura da Figura 29 e 31, elas estão dentro do esperado, assim como as regiões que variam de menor para maior intensidade, do maior expoente de Lyapunov.

Uma característica interessante que aparece ao analisar o espaço de parâmetros são estruturas periódicas que possuem uma forma conhecida na literatura como camarão (shrimp em inglês) que pode ser analisada nas figuras de análise de parâmetros. Camarões são formados por um conjunto regular de janelas adjacentes centradas ao redor do par principal de arcos parabólicos superstáveis que se interseccionam. Um camarão é um mosaico infinito de domínios de estabilidade duplamente composto por um domínio mais interno principal mais todos os domínios de estabilidade adjacentes que surgem de duas cascatas de dobramento de período juntamente com seus correspondentes domínios caóticos. Esta estrutura é recorrente em planos de parâmetros de sistemas dinâmicos contínuos e discretos [15].

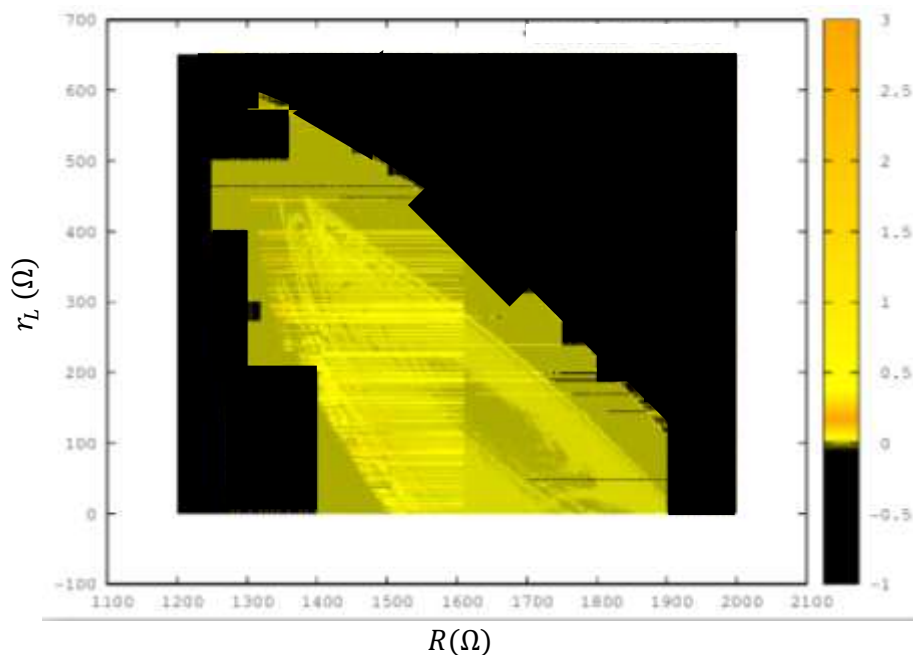


Figura 31: Espaço de parâmetros do expoente de Lyapunov para o circuito de Chua1.

Analisando a Figura 31 o parâmetro r_L é dividido por dez. Com r_L variando de 0Ω a 10Ω e R variando de 1400Ω a 2000Ω , percebemos estruturas periódicas imersa em uma região caótica que está representada pela cor verde escuro, ela na literatura é conhecida como camarões, também podemos identificar estruturas periódicas em espiral.

A equação 3.4 está em uma região no espaço de parâmetros definida pela curva i_v diferente do esperado, pois a equação que modela meu sistema tem valores diferentes por conta do deslocamento da da curva i_v . Se na simulação usarmos a primeira e a quinta linha da equação 3.2 que é referente ao contorno do desenho e aplicarmos na equação 3,4, obtemos a Figura 32.

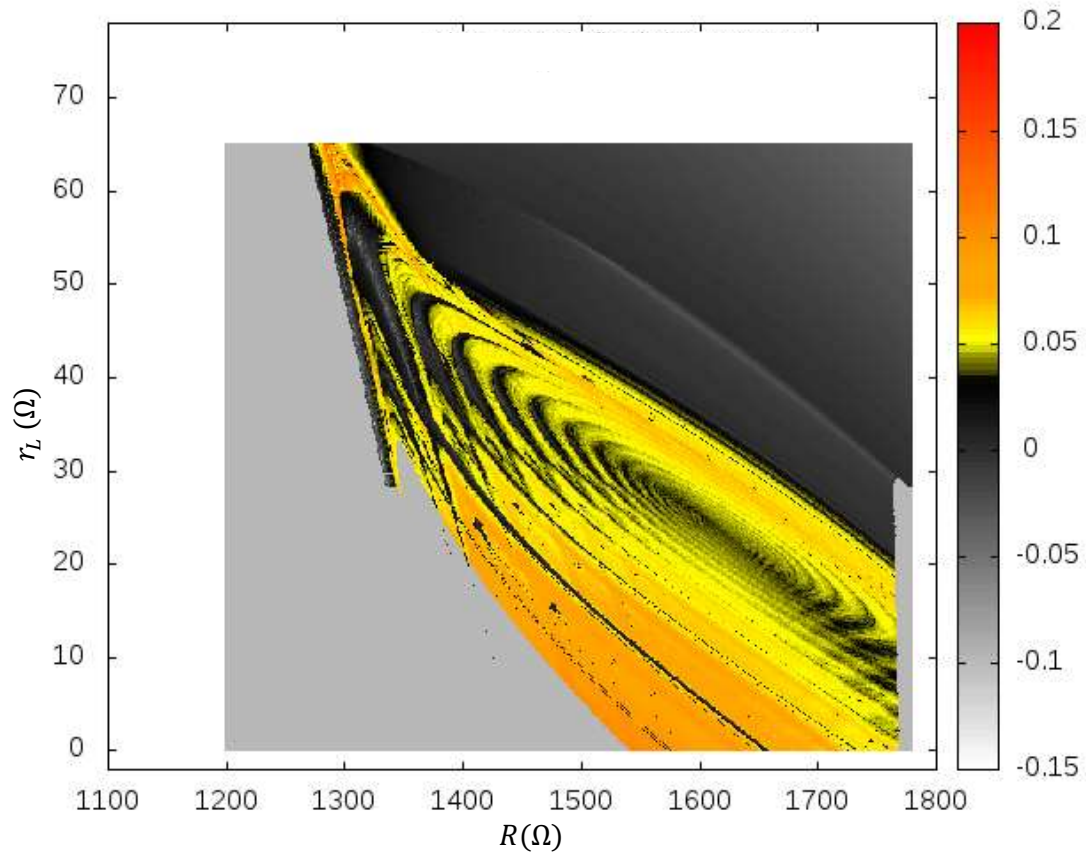


Figura 32: Espaço de parâmetros do expoente de Lyapunov do circuito de Chua 3.

Analisando a Figura 32 percebemos melhor as estruturas definidas como camarão, por tanto esse resultado obtido é uma curva i_v simétrica.

4.3- ESPAÇOS DE PARAMETROS DA ENTROPIA DE KOLMOGOROV-SINAI

Os sistemas caóticos são sensíveis as suas condições iniciais, como vimos, isso gera uma falta de informação, acerca de sua trajetória e posição. Para evidenciar essa perda de informação durante o caminho em um sistema dinâmico, foi introduzido a definição de entropia de Kolmogorov-Sinai ou também conhecida como entropia métrica, essa medida é em relação a quantidade de bits de informação perdida por unidade de tempo em sua serie temporal.

Se a probabilidade é pequena, a informação é grande. Além das probabilidades serem aditivas, elas podem se somar. A tabela a baixo representa uma breve informação dos resultados que podem ser obtidos para três tipos de comportamentos: regular, caótico e estocástico, onde cada um deles tem dependência dos expoentes de Lyapunov.

Comportamento	Expoente de Lyapunov	Entropia de KS
Regular	$\forall \lambda_i > 0$	$KS = 0$
Caótico	$\exists \lambda_i > 0$	$0 < KS \leq \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$
Estocásticos	—	$KS \rightarrow \infty$

Tabela 5: Mostra informação de um sistema dinâmico m dimensional com informações a respeito do expoente de lyapunov, entropia e sua dimensão. Fonte: FGE417- Fenômenos Não-Lineares em Física: Introdução ao Caos Determinístico e aos Sistemas Dinâmicos Prof. Reynaldo Daniel Pinto Notas de Aula - Parte 17

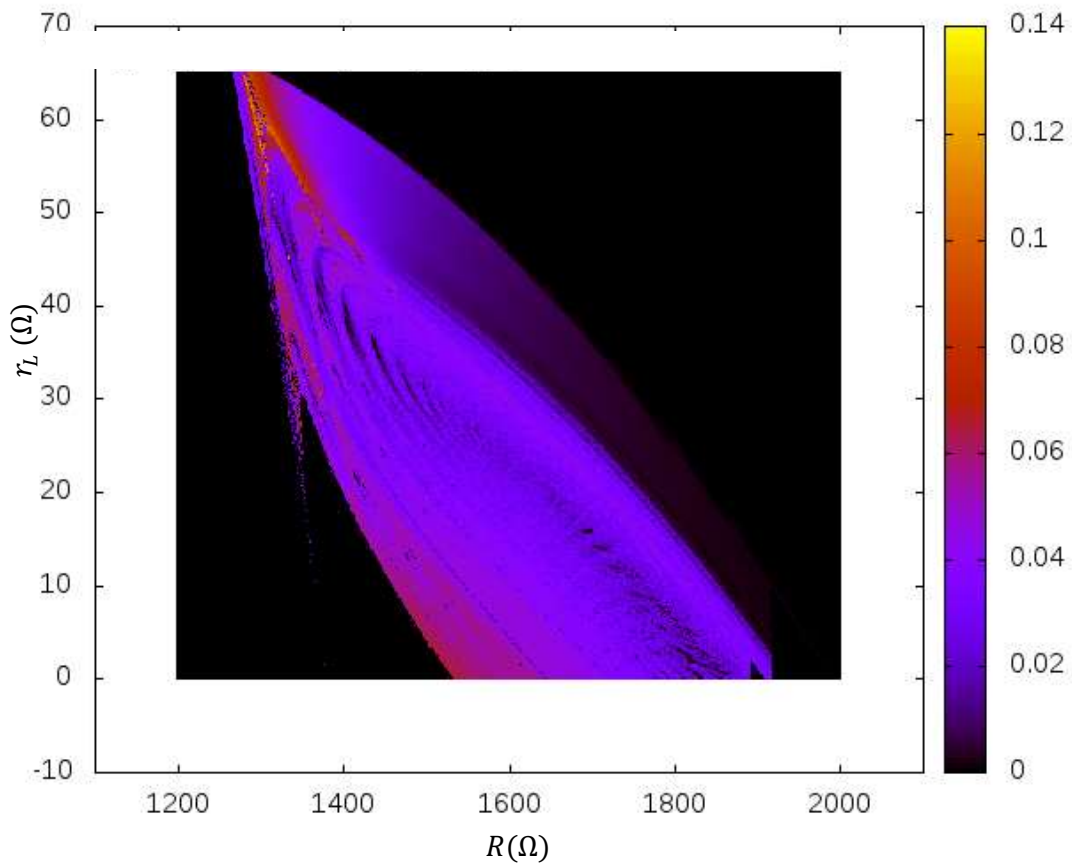


Figura 33: Entropia de Kolmogorov-Sinai de simulações para o circuito de Chua 1.

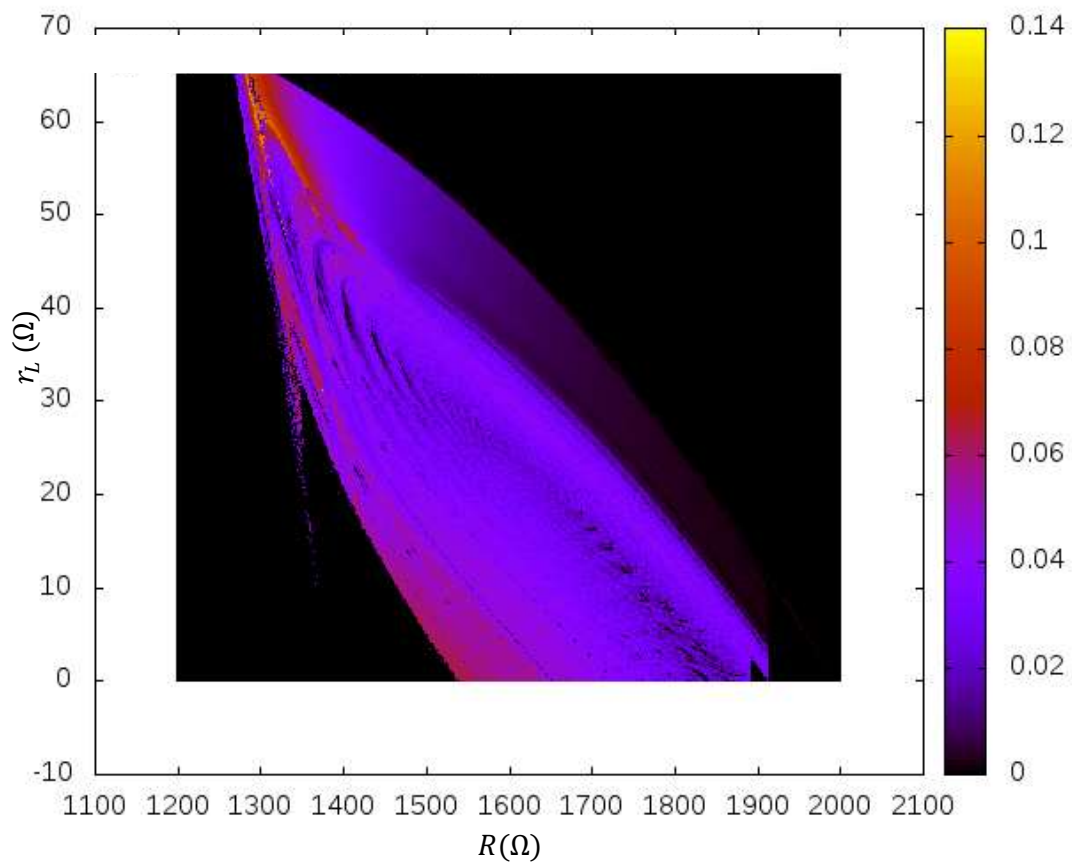


Figura 34: Entropia de Kolmogorov-Sinai de simulações para o circuito de Chua 2.

Com simulação do resultado obtido da equação 3.4 sem alteração, foi obtido a análise que é a plotagem da dimensão de Kaplan-Yorke (DKY) que é a relação dos expoentes de Lyapunov.

4.4- ESPAÇOS DE PARÂMENTROS DA DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE

A dimensão de Kaplan-Yorke, apresentada nos capítulos anteriores é uma relação entre os expoentes de Lyapunov que são definidos pela equação 1.9, essa relação com os três expoentes de Lyapunov tem como informação e dimensão do atrator. As Figuras 35 e 36, representam os espaços de parâmetros da dimensão de Kaplan-Yorke em simulação.

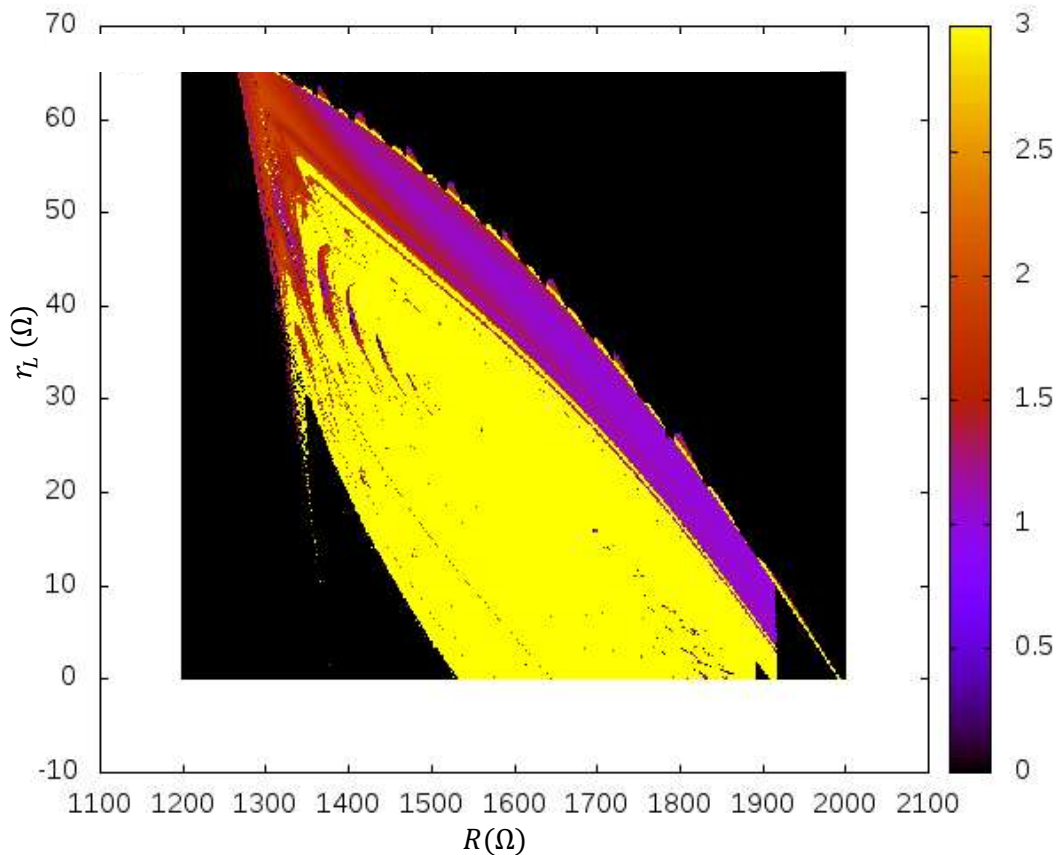


Figura 35: Dimensão de Kaplan-Yorke de simulações para o circuito de Chua 1.

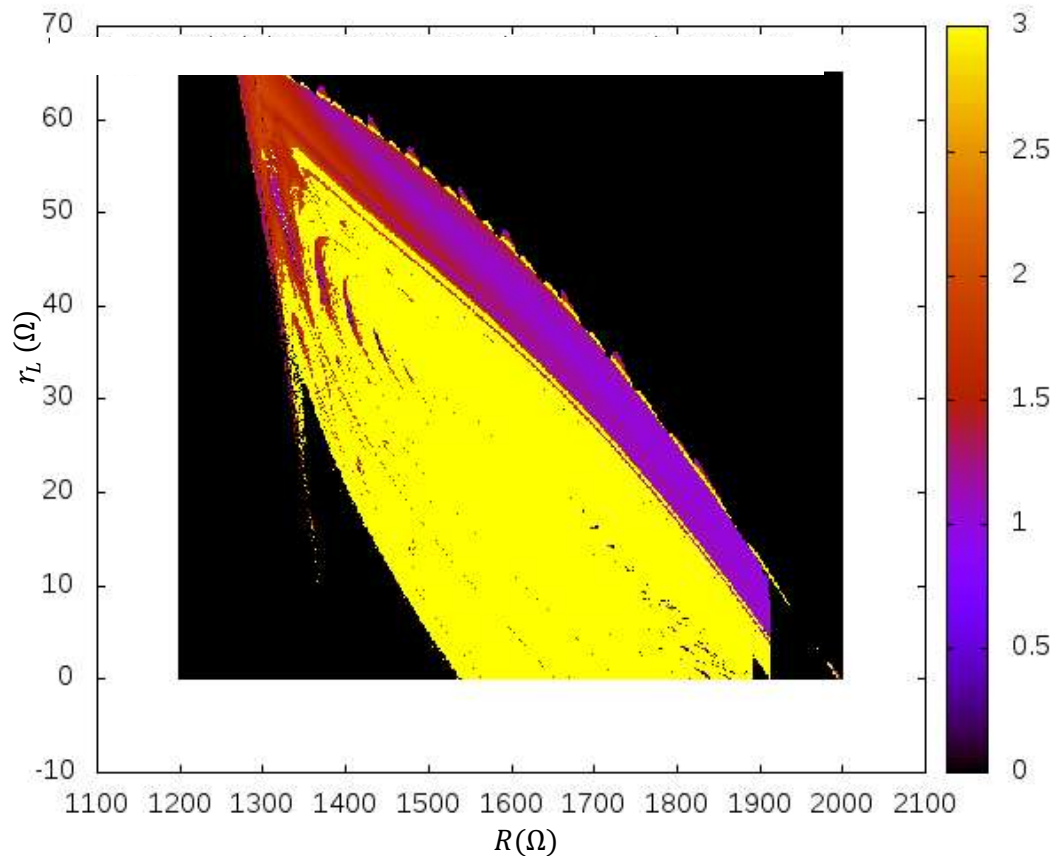


Figura 36: Dimensão de Kaplan-Yorke de simulações para o circuito de Chua 2.

A relação dos expoentes de Lyapunov que gera o espaço de parâmetros da DKY comparado com o resultado obtido pelo espaço de parâmetros do expoente de Lyapunov, trazem estruturas iguais quando se analisa as estruturas definidas como camarões que aparecem nas duas simulações. Na simulação do expoente de Lyapunov aparece a estrutura que define bem uma região periódica em meio ao caos e na simulação do DKY a estrutura define uma taxa de divergência maior para esse ponto em que se forma o desenho do camarão.

Com simulação do resultado obtido da equação 3.4 sem alteração, foi obtido a análise que é a plotagem da dimensão de Kaplan-Yorke (DKY) que é a relação dos expoentes de Lyapunov visto na Figura 37.

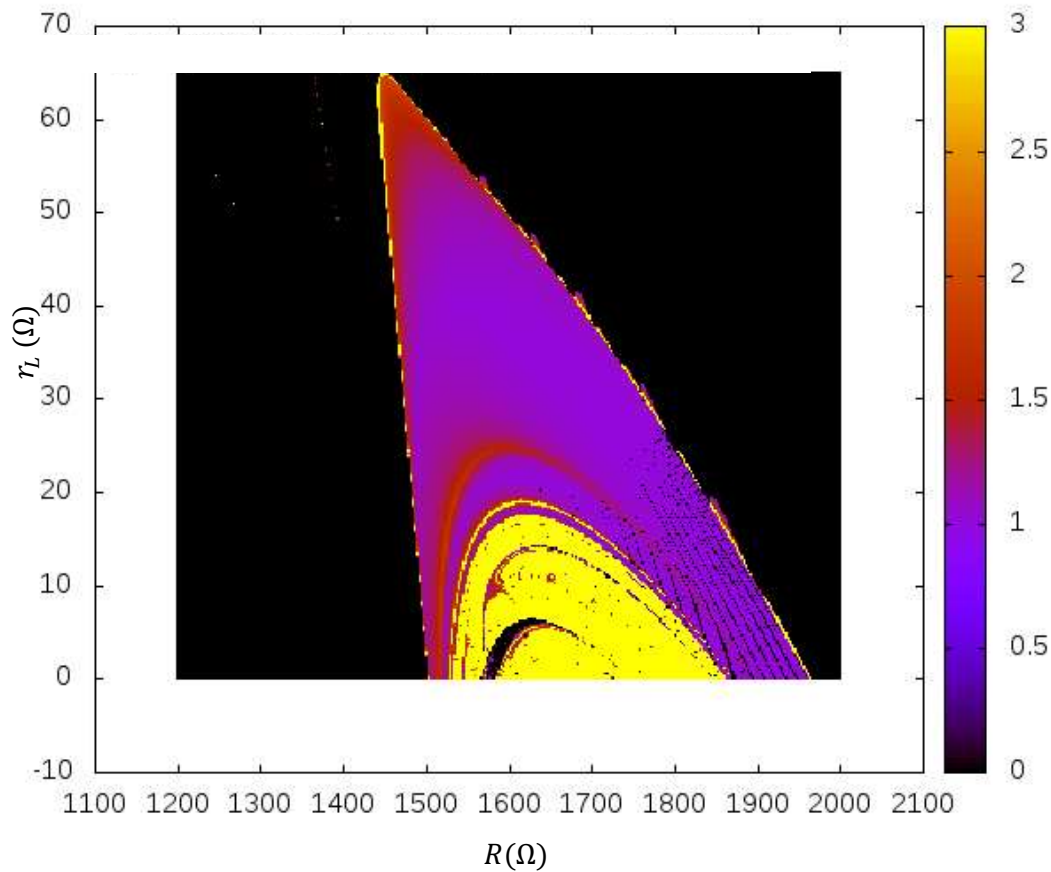


Figura 37: Gráfico que mostra o espaço de parâmetro do circuito de Chua 3 em função do DKY.

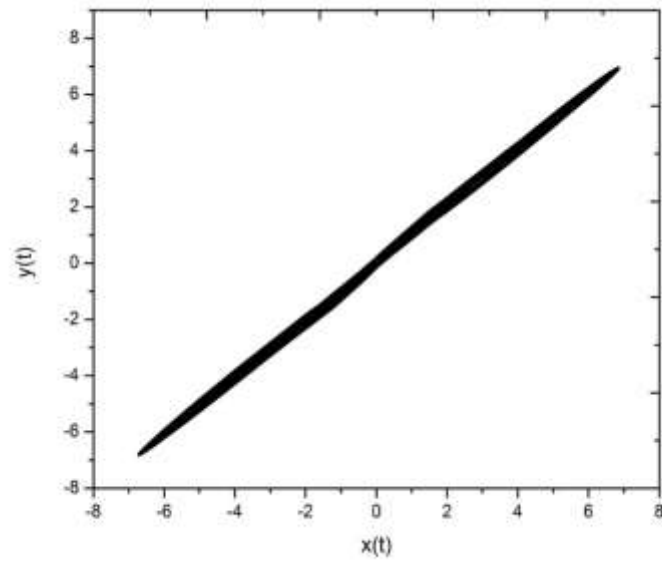
Percebemos que a informação gerada a partir da curva i_v , no qual a partir de simulação é gerado a Figura 37 é bem interessante e diferente do esperado, isso acontece que por conta da correção do *offset* que gera um deslocamento na curva i_v , refletindo também diretamente no resultado, fazendo uma análise é possível observar uma estrutura, a qual é conhecida na literatura como camarão bem definida na região de r_L variando de 0Ω a 20Ω e R variando de 1550Ω a 1700Ω .

4.5- SINCRONISMOS NO CIRCUITO DE CHUA

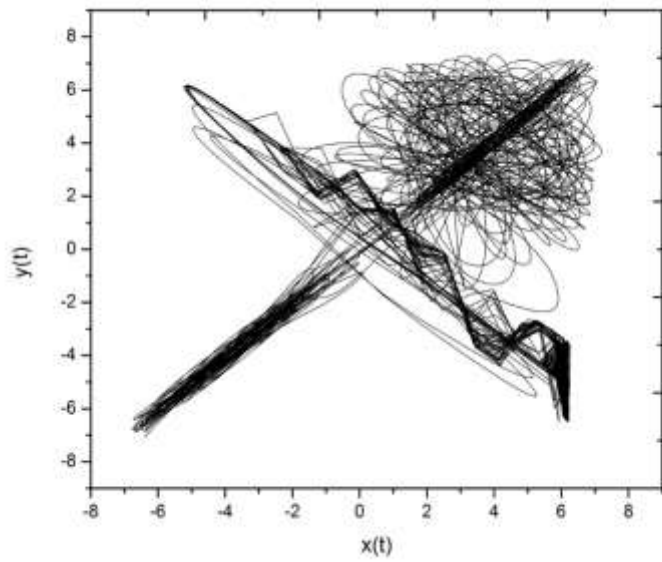
Foram construídos dois circuitos de chua, os mais próximos possíveis de seus valores com a curva $i(v)$, como vimos nos capítulos anteriores, a Figura 11 mostra esse resultado.

A evolução temporal de ambos os circuitos de Chua resulta nas Figuras 38 e 39, no qual mostram diferentes valores de resistência de acoplamento. As medidas foram feitas para os parâmetros $r_L = 50\Omega$ e $R = 1700\Omega$ fixos, variando apenas as resistências de acoplamento de 0Ω à $1K\Omega$.

Na Figura 38(a) mostra o sincronismo perfeito dos dois circuitos de Chua, para resistência de acoplamento igual a 30Ω . Na Figura 38(b) mostra a transição que ocorre na faixa dos 50Ω , em que alguns pontos das séries temporais são iguais e outros não, fazendo com que seja identificada uma oscilação em anti-fase. Já para a Figura 39(a) mostra o circuito oscilando em ante fase para resistência de acoplamento em 80Ω e 39(b) o circuito totalmente sem sincronismo permanecendo assim até $1K\Omega$.



(a)



(b)

Figura 38: Sincronização perfeita do circuito de Chua para (a) e para (b) mostra a mudança de oscilação do circuito.

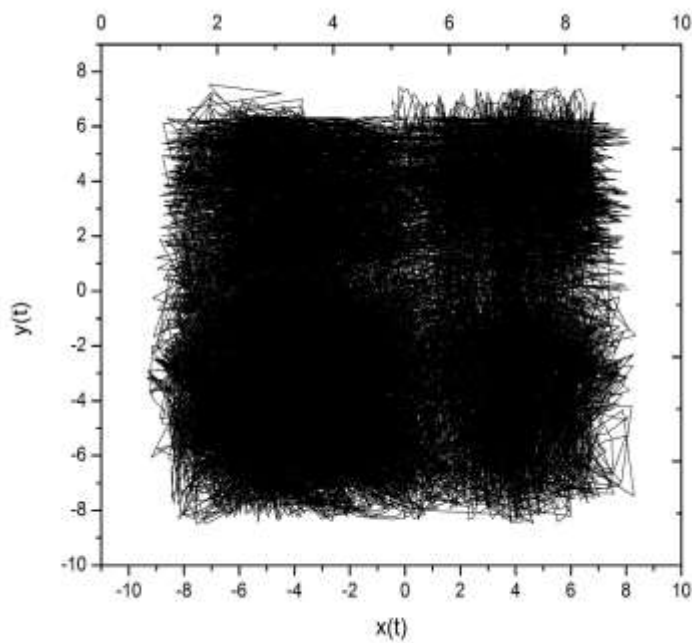
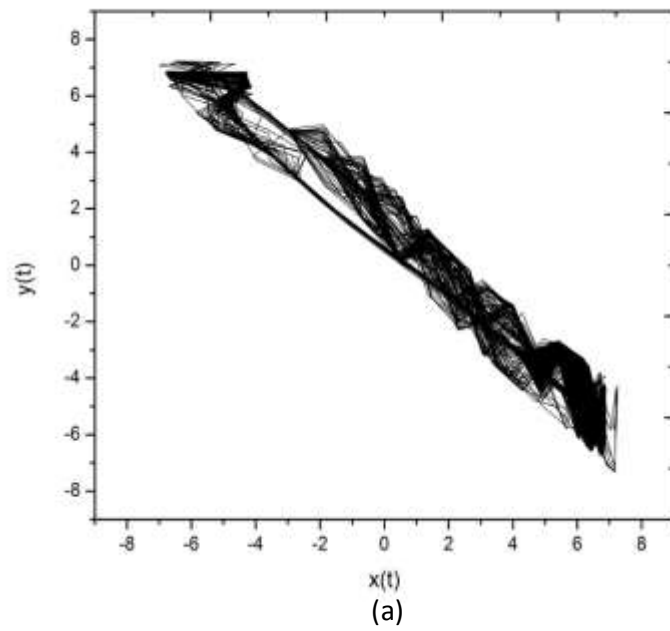


Figura 39: Sincronismo do circuito de Chua para (a) oscilando em ante fase e (b) o circuito totalmente sem sincronismo.

Tivemos alguns resultados importantes ao analisarmos os valores para resistência de acoplamento para os intervalos dos parâmetros r_L e R .

Avaliando as faixas de resistência de acoplamento que variam de 0Ω a $1K\Omega$ e com $r_L = 50\Omega$ e $R = 1800\Omega$ fixos, os circuitos começam oscilando com acoplamento total com oscilações caóticas na faixa de 0Ω a 60Ω de resistência de acoplamento. Ao passar para oscilação periódica, em um dado ciclo limite na faixa de 90Ω e ao chegar em 460Ω sai desse ciclo limite e vai até $1K\Omega$, com oscilação caótica em anti-fase terminando com desacoplado. O mesmo acontece quando se altera os valores dos parâmetros de controle com r_L de 0Ω a 20Ω e R de 1500Ω a 1700Ω . Já nos valores em $r_L = 30\Omega$ a $r_L = 65\Omega$ e $R = 1350\Omega$ a $R = 1500\Omega$ os circuitos Começam oscilando com acoplamento total com oscilações caóticas na faixa de 0Ω a 60Ω , depois passa para oscilação periódica em um dado ciclo limite com faixa de resistência de acoplamento em 100Ω e vai até $1K\Omega$ com oscilação periódicas em anti-fase e termina com desacoplado. Escolhemos essa região para análise, pois é a parte inferior da Figura 31 que demonstra um comportamento caótico.

4.6- ESPAÇO DE PARÂMETROS DA DIMENSÃO DE KAPLAN-YORKE COM CIRCUITO DE CHUA SINCRONIZADO.

Para o circuito de Chua sincronizado obtivemos por meio de simulação a Figura 40 que representa o espaço de parâmetros da dimensão de Kaplan-Yorke.

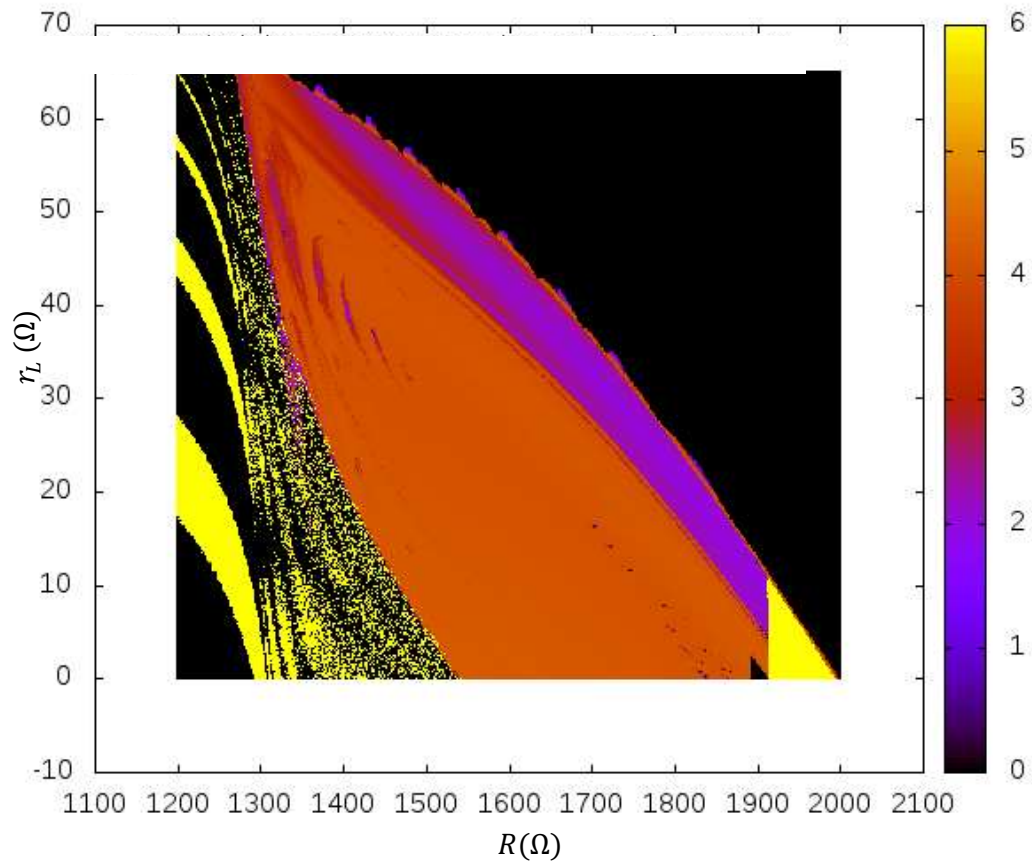


Figura 40: Espaço de parâmetros da dimensão de Kaplan-Yorke para os circuitos de Chua acoplado.

Na Figura 35 podemos observar estruturas finas como camarões que são regiões periódicas em meio a um mar de caos, no qual para a Figura 40 essa região que era periódica passa a ter um comportamento não periódico, no qual a intensidade da tabela de cores indo do menos intenso que é a cor roxa até de maior intensidade de cor amarela revelam um aumento nos valores dos expoentes de Lyapunov, comportamento esperando já que acoplamos dois sistemas.

CAPITULO 5

CONCLUSÃO

Tendo em vista os aspectos observados, os circuitos de Chua construídos fornecem curvas $i(v)$ similares, isso permite que fenômenos como sincronismo possam ser observados e estudados. O desenvolvimento dos programas computacionais de simulação pela linguagem de programação Fortran e análise experimental feitos tanto em Labview® quanto em *script* python fornecem bons resultado para o trabalho. Dentre esses resultados pode-se obter os espaços de parâmetros da periodicidade e do maior expoente de Lyapunov de forma experimental e a partir de simulações, bem como os espaços de parâmetros da entropia de Kolmogorov-Sinai e da dimensão de Kaplan-Yorke apenas para simulações de um circuito de Chua. Considerando o acoplamento de dois circuitos de Chua acoplados foram analisados a dependência do sincronismo com a resistência de acoplamento para escolha de uma situação onde observou um sincronismo total, ou seja, para qual ocorre travamento de fase. Simulações realizadas nesta condição de sincronismo total foram realizadas e o espaço de parâmetro da dimensão de Kaplan-Yorke observando-se as mesmas estruturas de circuitos independentes porém apresentando o dobro do valor da dimensão de Kaplan-Yorke para um circuito isolado. Isso está relacionado provavelmente ao sistema acoplado possuir 6 graus de liberdade enquanto um circuito isolado possui apenas 3 graus de liberdade.

Para trabalhos futuros, pode-se analisar a simetria para o circuito de Chua 3 que foi encontrada a partir da curva i_v gerado por uma correção de *offset*, isso faz com que a sua equação gere um espaço de parâmetros diferentes do esperado como mostra a Figura 37.

BIBLIOGRAFIA

1. SZMOSKI, R. M.; FERRARI, F. A. S.; PINTO, S. E. DE S.; BAPTISTA, M. S.; VIANA, R. L. Secure Information Transfer Based On Computing Reservoir. *Physics Letters A* 377 (2013) 760.
2. LEON O. CHUA. The genesis of chua's circuit. *Archiv für elektrotechnik und Übertragungstechnik*, 46(4):250–257, 1992.
3. HILBORN, ROBERT C. *Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers*. s.l. : Oxford University, 1994.
4. EDWARD N LORENZ. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2):130-141, 1963.
5. FIEDLER-FERRARA, N.; CINTRA DO PRADO C, P. *Caos uma introdução*: São Paulo: Editora EDGARD BLUCHER LTDA, 1994.
6. *Pendulum Clocks, or Geometric Proofs Relating to the Motion of Pendula Adapted to Clocks-Oeuvres Complètes*, vol.18.
7. PIKOVSKY, A.; ROSENBLUM, M. G.; KURTHS, J. *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. New York: Cambridge University Press, 2001. 1, 2, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 31.

8. BUCK, J. Synchronous rhythmic flashing of fireflies. ii. *The Quarterly Review of Biology*, v. 63, n. 3, p. 265–289, 1988. 1, 22, 24.
9. PECORA, L.; CARROLL, T. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, nr. 8, pag. 821-824, 1990.
10. GREBOGI, C.; OTT, E.; YORKE, J. Controlling chaos. *Phys. Rev. Lett.* 64, 2837 - 2837 (1990).
11. KANDEL, E.R., SCHWARTZ, J.H., JESSELL, T.M. *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 4th Edition, 2000.
12. LIPNACK, J. & STAMPS, J. *Networks: Redes de Conexões*. São Paulo: Aquariana, 1992.
13. WIENER, Norbert, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1a. edição: 1948. 2ª edição revista e aumentada: 1961. Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley
14. ROSENBLATT, F., "The Perceptron: A Theory of Statistical Separability in Cognitive Systems, " CAL Report No. VG-1196-G-1; January 1958; 263 pp.; ASTIA No. AD 204076; OTS No. PB 151247; OTS Price.
15. ROSENBLATT, F., "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain, " *Psychological Review*, Vol. 65, No. 6; November 1958; pp. 386-408.
16. FRANCISCO FELIPE GOMES DE SOUSA. *Análise do espaço de parâmetros de um circuito de chua experimental*. Universidade Federal de Itajubá, 2016.

17. FAÇANHA, W.; OLDMAN, B.; GLASS, L. Bifurcation structures in two-dimensional maps: the endoskeletons of shrimps. *Physics Letters A* v. 377, p. 1264, 2013.
18. CHUA, LEON O. *IECE Trans. Fundamentals. Chua's Circuit: Ten Years Later.* 11, 1994, Vols. E-77A, pp. 1811-1822.
19. L.A.B. Torres, L.A. Aguirre. *Electronics Letters. Inductorless Chua's Circuit.* 2000, Vol. 36, pp. 1915-1916.
20. T MATSUMOTO. A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 31(12):1055-1058, 1984.
21. OTTO E RÖSSLER. An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57(5):397{398, 1976.
22. G-Q ZHONG AND FARHAD AYROM. Experimental confirmation of chaos from Chua's circuit. *International journal of circuit theory and applications*, 13(1):93-98, 1985.
23. C.E. SHANNON E W WEAVER, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press (1949).
24. ATHANASIOS ANTONIOU. Gyration using operational amplifiers. *Electronics Letters*, 3(8):350-352, 1967.
25. A, ANTONIOU. Realisation of gyrators using operational amplifiers, and their use in rc-active-network synthesis. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 116(11):1838-1850, 1969.

26. ATHANASIOS ANTONIOU. Stability properties of some gyrator circuits. *Electronics Letters*, 4(23):510-512, 1968.
27. BERNARD DH TELLEGEN. The gyrator, a new electric network element. *Philips. Rep*, 3(2):81-101, 1948.
28. HOLOKX A ALBUQUERQUE, RERO M RUBINGER, AND PAULO C RECH. Self-similar structures in a 2d parameter-space of an inductorless Chua's circuit. *Physics Letters A*, 372(27):4793-4798, 2008.
29. LIPNACK, J. & STAMPS, J. *Networks: Redes de Conexões*. São Paulo: Aquariana, 1992.
30. CASTELLS, M. *A sociedade em rede*. São Paulo: Paz e Terra, 1999.
31. FACHINELLI, A.C. et al. A prática da gestão de redes: uma necessidade estratégica da Sociedade da Informação In: *Revista Com Ciência*, 2000.
32. KOCAREV, L.; PARLITZ, U. General approach for chaotic synchronization with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.* vol. 74, nr. 25, junho de 1995.
33. KOCAREV, L.; PARLITZ, U.; BROWN, R. Robust synchronization of chaotic systems. *Physical Review E*, vol. 61, nr. 4, abril, 2000.
34. KURTHS, J. Control and synchronization in chaotic dynamical systems. *Chaos*, vol. 13, nr. 1, março de 2003.

35. KWAKERNAAK, H.; SIVAN. R. Linear optimal control systems. New York: John Wiley and Sons, 1972.
36. NIJMEIJER, H. A dynamical control view on synchronization. *Physica D* 154 (2001), 219-228.
37. STROGATZ, Steven H. Sync: the emerging science of spontaneous order. 1st Edition. New York: Hyperion Books, 2003.
38. PECORA, L.; CARROLL, T. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, nr. 8, pag. 821-824, 1990.
39. GREBOGI, C.; OTT, E.; YORKE, J. Controlling chaos. *Phys. Rev. Lett.* 64, 2837 - 2837 (1990).
40. KOVÁCS, ZSOLT L. - redes Neurais Artificias. Segunda edição, editora Collegium Cognitio, 1996.
41. BARRETO, JORGE M., Introdução às Redes Neurais Artificiais. Anais V Escola Regional de Informática da SBC Regional Sul, 5 a 10 de maio de 1997. Páginas 41 - 71.
42. SZMOSKI, R. M.; FERRARI, F. A. S.; PINTO, S. E. DE S.; BAPTISTA, M. S.; VIANA, R. L. Secure Information Transfer Based On Computing Reservoir. *Physics Letters A* 377 (2013) 760.

43. WARREN S. MCCULLOCH E WALTER PITTS, publicado em 1943: “a logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, bulletin of mathematical biophysics, 5: 115-133.