

## Seleção de mapas caóticos e estratégia de controle para a composição automática de melodias

### Selection of chaotic maps and control strategy for automatic melody composition

#### RESUMO

Um importante elemento em toda obra musical é a melodia, a qual contém características subjetivas intrínsecas que lhe permitem transmitir emotividade e sentimentos à peça. No entanto, compor uma melodia com um valor preestabelecido para alguma dessas características é um grande desafio composicional. Uma tentativa para abordar esse problema é o algoritmo de composição proposto por Coca et al. (2013), o qual compõe melodias com valores predefinidos na característica de meliosidade melódica através de um controlador proporcional, uma rede *Long-Short-Term Memory* (LSTM) e um sistema caótico. Visando aprimorar a abrangência desse algoritmo, no presente artigo é apresentado o estudo e a seleção de outros sistemas caóticos discretos e com diferentes dimensões; bem como outra medida subjetiva, a originalidade melódica. Além disso, foram testados outros controladores digitais. Os resultados obtidos foram satisfatórios. Nesse meandro, espera-se proporcionar ideias e sementes musicais de cunho teórico fomentada pelo compositor artificial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmos de composição. Controladores. Redes neurais artificiais.

#### ABSTRACT

An important element in every musical work is the melody, which contains intrinsic subjective characteristics that allow it to convey emotion and feelings to the piece. However, composing a melody with a pre-established value for any of these characteristics is a great compositional challenge. An attempt to address this problem is the composition algorithm proposed by Coca et al. (2013), which composes melodies with predefined values in the melodic melody characteristic through a proportional controller, a Long-Short-Term Memory (LSTM) network and a chaotic system. In order to improve the scope of this algorithm, the present article presents the study and selection of other discrete chaotic systems with different dimensions; as well as another subjective measure, the melodic originality. In addition, other digital controllers were tested. The results obtained were satisfactory. In this meander, it is expected to provide ideas and musical seeds of a theoretical nature fostered by the artificial composer.

**KEYWORDS:** Composition algorithms. Controllers. Artificial neural networks.

Jordano Vinicius Lahm  
[lahmvini@hotmail.com](mailto:lahmvini@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Andrés Eduardo Coca Salazar  
[andressalazar@utfpr.edu.br](mailto:andressalazar@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Em toda composição musical, a melodia toma vital relevância em estruturar harmoniosamente sons musicais conforme um ritmo, desenhando, portanto, uma sequência linear de identidade própria. Apresentando esta, por sua vez, características independentes que servem de transmissores de sentimentos e emoções através da variação de parâmetros subjetivos intrínsecos. Pela sua grande relevância dentro da obra musical, algumas pesquisas relacionadas com a análise e composição de melodias podem ser encontradas, por exemplo, análise estatístico melódico [Coca et al., 2010] e composição de melodias com redes neurais recorrentes [Chen et al., 2001], dentre outros.

A pesar da abundância de estudos e pesquisas sobre a composição automática de melodias, são poucos os trabalhos que abordam a composição de melodias com características subjetivas pré-definidas, pois tal problema instiga um enorme desafio de composição, que é dada como atividade não trivial, embora a sua solução seja de grande utilidade e aplicabilidade tanto para a música quanto para a computação.

Uma das poucas pesquisas que tem abordado o problema de compor uma melodia com um valor predefinido em algumas das suas características subjetivas foi descrita por Coca et al. (2013), cujo algoritmo é denotado aqui como Compositor de Melodias com Característica Subjetiva Predefinida (CMCSP), no qual usa-se um sistema de controle composto por um controlador proporcional, um algoritmo de composição de melodias caóticas e uma rede Long-Short-Term Memory (LSTM), para compor melodias com um grau de melodiosidade pré-definido.

Neste artigo é apresentado um estudo do comportamento do CMCSP sob a operação com outros sistemas caóticos discretos, tanto unidimensionais quanto bidimensionais, sendo eles: mapa Gaussiano e mapa de Ikeda. Para cada um deles foi procurada uma curva ascendente na dinâmica da saída contra a evolução da medida de originalidade melódica. Foram selecionados os sistemas com a dinâmica mais proporcional e incorporados ao algoritmo CMCSP. Os testes foram realizados usando os controladores digitais proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID), os quais por enquanto, apenas para fim experimentais, foram sintonizados manualmente. O melhor resultado foi obtido com o mapa de Ikeda.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Em toda composição, a melodia aporta emoção e sentimentos à obra, através de características tanto objetivas quanto subjetivas. As características objetivas correspondem com as medidas que podem ser calculadas diretamente dos dados da melodia, isto é, alturas, intervalos e durações; por exemplo, histograma de alturas ou durações, medidas estatísticas e descritores melódicos. Ao contrário das anteriores, as medidas subjetivas são calculadas segundo o desvio com relação a um conceito de referência dado pela opinião ou gosto de ouvintes para um conjunto de músicas, como é o caso da originalidade melódica (Coca et al., 2013). Por ser uma medida baseada em dados concretos, é viável compor

melodias com valor pré-definido em alguma medida objetiva, no entanto, no caso de medidas subjetivas o procedimento não é direto. Desta forma, nesta seção serão descritas as alterações propostas para expandir a abrangência do algoritmo do CMCSF, bem como a contextualização de alguns tópicos relevantes para o seu entendimento.

### ALGORITMO DO CMCSF

Método computacional para compor uma melodia com um valor desejado na característica subjetiva de melodiosidade, o qual recorre a um sistema de controle cuja malha fechada é conformada por uma rede *Long-Short-Term Memory* (LSTM) (Russel, 2009), que, após ser treinada para aprender as características de uma melodia fixa e de uma melodia variável, gera uma nova melodia com características similares às duas melodias de entrada. A melodia variável corresponde com uma melodia gerada por um algoritmo de composição que mapeia as variáveis de saída de um sistema caótico tridimensional para cada uma das variáveis musicais básicas: alturas, durações e intensidade, criando assim uma melodia caótica. Como uma das principais características dos sistemas caóticos é a sensibilidade às condições iniciais e à variação de parâmetros, é possível obter infinitas melodias com pequenas mudanças em algum desses componentes. Além disso, foi demonstrado que para determinados sistemas caóticos existe uma relação relativamente proporcional entre a variação de alguns parâmetros e a complexidade da melodia de saída.

Seguidamente, para a nova melodia é calculado o grau de melodiosidade e depois comparado com o valor desejado, e a diferença entre eles é processada por um simples controlador proporcional, que produz um sinal de controle que modifica um parâmetro do sistema caótico escolhido. Desta forma, a complexidade de melodia caótica é diferente a cada iteração, fazendo com que a rede LSTM aprenda novas características musicais e altere as características de saída, objetivas e subjetivas. O ciclo é repetido até obter uma melodia com o grau de melodiosidade desejado (Coca et al., 2013).

### ALGORITMO DO CMCSF COM CONTROLADORES DIGITAIS

Conforme mencionado acima, neste artigo foram testados e selecionados sistemas caóticos discretos, e adicionados os controladores digitais (PI e PID) para modificar o grau de originalidade melódica de maneira mais adequada na sua resposta transitória, pois no algoritmo CMCSF foi testado apenas com um único sistema caótico discreto e um simples controlador proporcional, que não permite uma resposta abrangente nas características de desempenho do transitório, bem como uma maior exploração do sistema composicional.

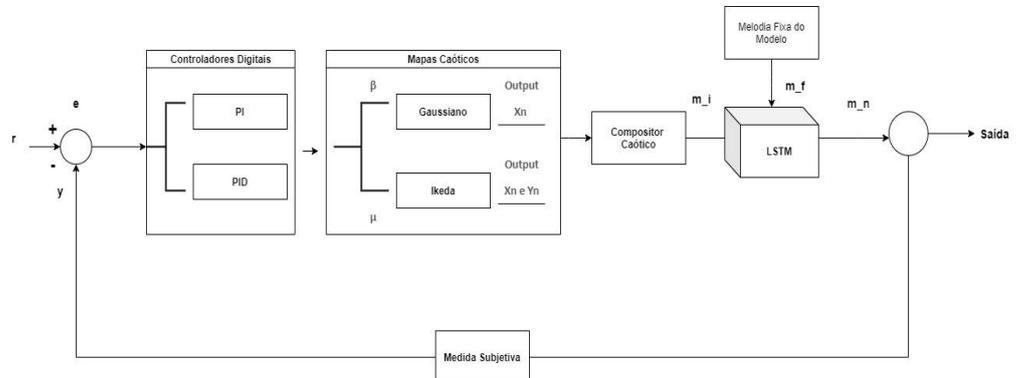
Desta forma, visando garantir uma maior abrangência, foram analisados e adicionados outros sistemas caóticos, e realizados testes usando a implementação de diferentes tipos de controladores digitais como: proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID). O algoritmo modificado proposto é mostrado na Fig. 1.

## CONTROLADORES DIGITAIS

Em teoria de controle, um controlador modifica as características da saída de um processo sem afetar diretamente a sua estrutura. Para tal, o controlador opera sobre a diferença entre o valor desejado ( $r$ ) e o valor da saída atual ( $y$ ), chamada de erro, para calcular um sinal de controle ( $u$ ). Um dos controladores mais conhecidos é o controlador PID, cuja parte proporcional multiplica o erro por uma constante  $k_p$ , a parte derivativa deriva o erro e o multiplica por uma constante  $k_d = k_p \tau_d$ , e a parte integral integra o erro e o multiplica por uma constante  $k_i = k_p / \tau_d$ . Ao zerar algumas dessas constantes é possível obter outros controladores como o PD e PI (Ogata, 1997).

Com base no esquema da Figura 1, foi escolhido o parâmetro mais adequado de ambos sistemas caóticos, visto que este conecta-se com a saída do controlador. Existindo mais de um parâmetro de comportamento, foi estudo o melhor usual para a aplicação vigente. Para o Gaussiano foi elencado ( $\beta$ ) como mostrado na Figura 2 e para o mapa de Ikeda, foi escolhido o parâmetro ( $\mu$ ). Os outros parâmetros presentes nos mapas foram fixados, no Gaussiano ( $\alpha = 0,35$ ) e para Ikeda foi estabelecido as constantes do atrator caótico. Cada mapa é aplicado individualmente no modelo, sendo a saída de grande importância para o compositor caótico.

Figura 1 – Diagrama de Bloco do algoritmo do CMCSF com controladores digitais



Fonte: Autoria própria (2020).

Para o caso de sinais discretos são usados controladores digitais, os quais são aproximações discretas das respectivas partes contínuas, e expressados em função da variável  $z$  após aplicar a transformada  $Z$ . A relação entre a saída  $U(z)$  e a entrada  $E(z)$ , isto é  $G_c(z) = U(z)/E(z)$ , é a função de transferência (FT), que representa o comportamento interno do controlador. Na Eq. (1) é mostrada a FT do controlador PID (generalizada):

$$G_c(z) = \frac{q_0 z + q_1 z^c + q_2 c}{z^c (z-1)}, \quad (1)$$

onde,

$$q_0 = k_p \left[ 1 + \frac{T}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T} c \right] \quad q_1 = -k_p \left[ 1 - \frac{T}{2\tau_i} + \frac{2\tau_d}{T} c \right] \quad q_2 = c \cdot k_p \left[ \frac{\tau_d}{T} \right] \quad (2)$$

sendo  $T$  o período de amostragem, e  $c \in \{0,1\}$  é um parâmetro de seleção, no qual com  $c = 0$  as Eq. (1) e (2) são reduzidas para as correspondentes do controlador PI.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o projeto de controladores, determinou-se o comportamento do algoritmo com outros sistemas caóticos e outros controladores, e adaptou-se as características de resposta transitória para uma nova variável subjetiva da melodia, neste caso o grau de originalidade. Em sistemas caóticos, quando os coeficientes são variados a saída varia de estado, como caos, bifurcação, estabilidade, etc. Portanto, na Tabela (1) mostra os sistemas caóticos usados [Kutnezov, 1998], e na Fig. (2) a (4) os estudos realizados com o mapa Gaussiano.

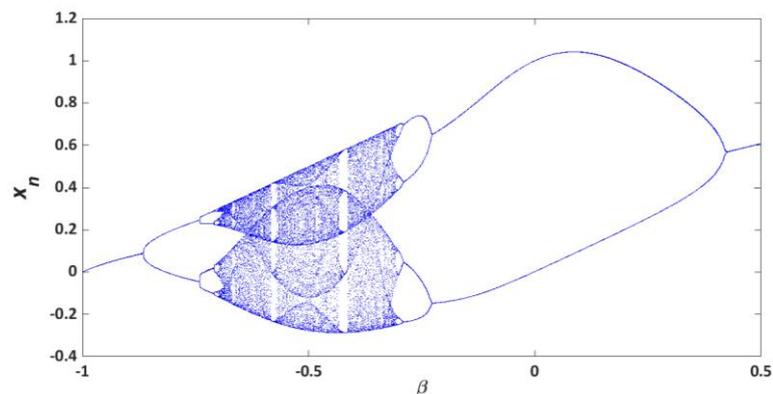
Tabela 1 – Mapas caóticos discretos analisados

Num. Vars.	Mapa Caótico	Equação	Parâmetros Região caótica
1	Gaussiano	$x_{n+1} = e^{-\alpha x_n^2} + \beta$	$\alpha = 3.5, \beta = -0.5$
2	Ikeda	$x_{n+1} = 1 + \mu(x_n \cos \theta - y_n \sin \theta),$ $y_{n+1} = \mu(x_n \sin \theta + y_n \cos \theta),$ $\theta = 0.4 - \frac{6}{1 + x_n^2 + y_n^2}.$	$\mu = 0.8$

Fonte: Adaptado de (Kutnezov, 1998).

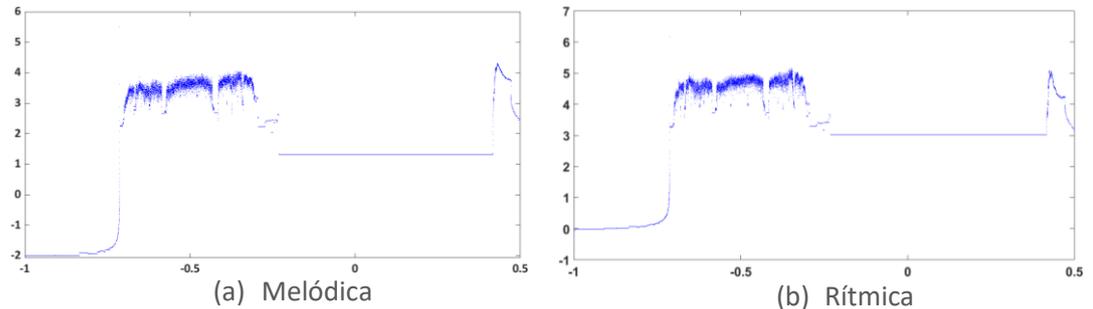
As saídas dos mapas mostrados na Tabela 1 são relacionadas a variáveis musicais, altura ou ritmo. Quando o sistema caótico apresenta uma variável, esta determina altura e ritmo. Por sua vez, quando o mesmo apresenta duas variáveis, cada uma representa uma característica. Desse modo, no método Gaussiano,  $x_n$  gera ambas características, enquanto que o mapa de Ikeda,  $x_n$  gera alturas e  $Y_n$  gera o ritmo. Para além dessa situação,  $\theta$  classifica-se como variável intermediária.

Figura 2 – Diagrama de bifurcação do mapa Gaussiano segundo  $\beta$



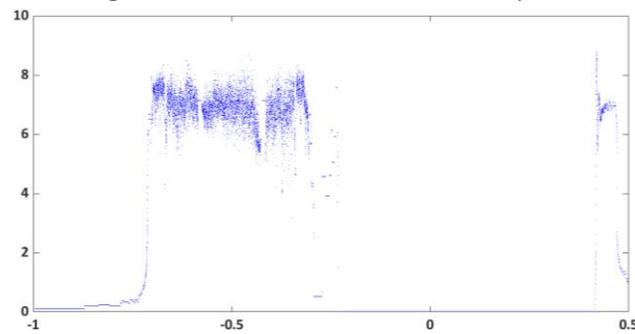
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 3 – Gráficos de complexidade obtidos com o mapa Gaussiano



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 4 – Grau de originalidade melódica obtido com o mapa Gaussiano



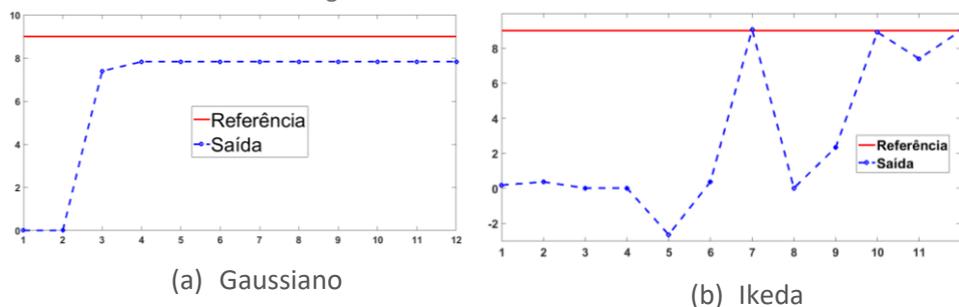
Fonte: Autoria própria (2020)

Após adição dos novos mapas caóticos, implementou-se os controladores PI e PID, conforme a Eq. (5), com  $c \in \{0,1\}$ , respectivamente.

$$m(k) = m(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \cdot c. \quad (5)$$

Segundo o modelo, utilizou-se da sintonia empírica para determinar os parâmetros dos controladores. Como melodia base foi usado um fragmento da Sonata No. 16 de Mozart, e a originalidade desejada igual a 9. A Tabela 2 mostra os resultados e a Fig. 4 o resultado com PID e o mapa Gaussiano,  $e_{ss} = 1.18$  igual ao 13.11%.

Figura 4 – Saída do sistema usando PID.



Fonte: Autoria própria (2020)

É válido ressaltar que o sistema para de compor na primeira vez que a variável do objetivo é atingida, pois nesse momento a melodia composta já cumpre

com a variável melódica desejada e, portanto, o sistema não precisa mais continuar compondo. Dessa forma, na Figura 4(a) o sistema nunca chegou ao objetivo e ficou um erro constante, enquanto na Figura 4(b) o sistema chegou no objetivo duas vezes, na iteração 7 e na iteração 10. Portanto as suas respectivas melodias cumprem com o desejado, por isso se fala que tem erro nulo. Nesse sentido, após a iteração 7 não era mais necessário continuar aplicando o sistema, no entanto, visando compreender e analisar melhor o comportamento do sistema se deixou mais algumas iterações.

Tabela 2 – Controladores digitais

Mapa	Controlador	$k_p$	$\tau_d$	$\tau_i$	$e_{ss}$ (%)
Gaussiano	PI	0.5	-	0.1	52.22
	PID	0.1	5	0.2	13.11
Ikeda	PI	4	-	4	26.44
	PID	4	10	6	0

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

Nesse meandro, expandiu-se o método de composição musical com a adição de dois novos mapas caóticos discretos e os controladores digitais PI e PID, proporcionando um algoritmo mais abrangente. Obtendo assim, um algoritmo mais completo para a continuidade em novos testes e estudos. Como trabalho futuro é proposto aplicar técnicas de projeto e sintonia de controladores.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador pelos conhecimentos repassados e auxílios às dificuldades surgidas, e principalmente, a instituição por fornecer tamanha oportunidade.

## REFERÊNCIAS

- Coca, A.; Corrêa, D.; Zhao, L. **Computer-Aided Music Composition with LSTM Neural Network and Chaotic Inspiration**. In: *Proc. International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'13)*, p. 270-276.
- Kutnezov, Y. **Elements of applied bifurcation theory**. 2ª. Ed., Springer, 1998.
- OGATA, K. **Discrete Time Control System**, Prentice-Hall, Second Edition, 1997.
- Russel, S.; Norvig, P. **Artificial intelligence**, Prentice Hall, 2009.
- CHEN C. AND R. MIIKKULAINEN. **Creating Melodies with Evolving Recurrent Neural Networks**. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'01), pp.2241-2246, 2001.
- Coca A., G. Olivar and L. Zhao. **Characterizing Chaotic Melodies in Automatic Music Composition**. CHAOS - An Interdisciplinary Journal, vol. 20, no. 3, p.033125, 2010.