

Composição auxiliada por inteligência artificial - CAIA: um estudo

MODALIDADE: COMUNICAÇÃO

SUBÁREA: Composição e Sonologia

Ivan Eiji Simurra

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

ieysimurra@gmail.com

Resumo. Integrar recursos computacionais na composição musical, conhecida como Composição Auxiliada por Computador (CAC), remonta à metade da década de 1950, ultrapassando os avanços digitais do século XXI. Experimentos pioneiros ilustram a aplicação de sistemas computacionais para contribuir com a criação e manipulação sonora-musical. Significativos esforços têm sido realizados para mapear a evolução e o impacto da CAC. Um exemplo particular de aplicação de modelos computacionais na composição musical é o uso de Autômatos Celulares (CA). Os avanços recentes da assim denominada inteligência artificial (IA), especialmente com a série GPT da OpenAI, pós-2018, marca também um avanço na produção música. Contudo, pesquisadores têm explorado as implicações da IA na composição musical desde os anos 1980. Nosso estudo, ainda de caráter exploratório, investiga o uso da IA na expansão da criação musical no contexto da CAC. Ao examinar a confluência de composição algorítmica e síntese sonora através da IA, planejamos novas perspectivas para pesquisas em música, explorando as possibilidades criativas na interseção entre composição musical e inteligência artificial. Apresenta-se, assim, uma implementação em Python que usa padrões de CA para ajustar parâmetros de síntese granular, demonstrando como a IA pode interagir com a criação sonora-musical.

Palavras-chave. Composição-auxiliada por computador, Inteligência artificial, Síntese granular, Autômatos celulares, Python

Title. Artificial Intelligence-Aided Composition - AIAC: A Preliminary Study

Abstract. Integrating computational resources in musical composition, known as Computer-Aided Composition (CAC), dates back to the mid-1950s, surpassing the digital advancements of the 21st century. Pioneering experiments illustrate the application of computational systems to assist in the creation and manipulation of musical sound. Significant efforts have been made to map the evolution and impact of CAC. A particular example of the application of computational models in musical composition is the use of Cellular Automata (CA). The recent advances of so-called artificial intelligence (AI), especially with OpenAI's GPT series post-2018, also marks an advancement in music production. However, researchers have been exploring the implications of AI in musical composition since the 1980s. Our exploratory study investigates the use of AI in expanding musical creation within the context of CAC. By examining the confluence of algorithmic composition and sound synthesis through AI, we plan new perspectives for music research, exploring the creative possibilities at the intersection of musical composition and artificial intelligence. Thus, we present a Python implementation that uses CA patterns to adjust granular synthesis parameters, demonstrating how AI can interact with musical sound creation.

Keywords. Computer-aided music composition, Artificial intelligence, granular synthesis, Cellular automata, Python

Introdução

Incluir os recursos e processamento computacionais nas práticas criativas composicionais, conhecida como Composição Auxiliada por Computador (CAC), vai além dos avanços digitais do século XXI, que remontam à metade da década de 1950. Experimentos pioneiros de Hiller e Isaacson (1993), Pinkerton (Youngblood, 1958), e os trabalhos de Xenakis, Koenig e Murail ilustram a adoção inicial de sistemas computacionais para facilitar a criação, manipulação e produção de música. A CAC envolve uma ampla gama de atividades, desde técnicas de composição algorítmica até a síntese e processamento digital de som.

Algumas iniciativas tem sido desenvolvidas para mapear a evolução e o impacto da CAC, com contribuições de Roads (1996), Assayag (1998), Miranda (2001), entre outros, oferecendo levantamentos abrangentes do desenvolvimento do campo. O advento recente das ferramentas da assim denominada “inteligência artificial” (IA), especialmente com o surgimento da série GPT da OpenAI pós-2019, marca um avanço notável na música computacional, atraindo a atenção de pesquisadores como Miranda, Roads e Cope, que exploram as implicações da IA nos processos de composição musical desde pelo menos os anos de 1980.

Uma aplicação particular de modelos computacionais na composição musical é o uso de Autômatos Celulares (CA), tal como proposto por Miranda para gerar material composicional (2016). O método, que aplica CA para modular parâmetros de síntese granular, ou seja, sons de curta duração, produz texturas sonoras exclusivas, demonstrando o potencial para novas ferramentas e técnicas composicionais. Nosso estudo busca discutir a participação da IA na expansão da tecnologia musical criativa. Ao examinar a confluência de composição algorítmica e síntese sonora através da perspectiva da IA, planejamos alternativas para pesquisas em música que visem as possibilidades criativas na interseção entre composição musical e inteligência artificial. Este estudo apresenta um protótipo de implementação em Python que usa padrões de CA para ajustar parâmetros de síntese granular. Por enquanto, adotaremos o nome *Cellular Automata Python Grain System* ou CAPyGrain. Nas próximas seções apresentamos uma breve discussão sobre Composição Auxiliada por Computador. Em seguida, discutimos os avanços do uso das ferramentas e técnicas de IA nos processos criativos musicais. Após este contexto, apresentamos a metodologia do nosso estudo

contextualizando o tipo dos materiais sonoros definidos para o estudo: a síntese granular. Logo depois, apresentamos a proposta de organização dos materiais sonoros baseados em CA. Em seguida, apresentamos a arquitetura e a linguagem de computação utilizada para que a interação com a IA fosse realizada, a saber: Python e ChatGPT. Apresentamos os resultados obtidos neste estágio de pesquisa além de estabelecer uma discussão sobre a dinâmica do nosso estudo. Por fim, se estabelece as considerações finais do atual estágio da nossa pesquisa vislumbrando possibilidades e projeções de perspectivas futuras de trabalho interagindo as técnicas e ferramentas de IA voltadas à composição musical.

Composição Auxiliada por Computador

A Composição Auxiliada, ou assistida, por Computador (CAC) é um campo que integra recursos computacionais e processamento digital para a criação musical, e suas origens remontam à metade da década de 1950, com experimentos pioneiros de Hiller e Isaacson (1957) e Pinkerton (Youngblood, 1958). Tais trabalhos ilustram a aplicação de sistemas computacionais para facilitar a criação e manipulação de materiais e dados simbólico-musicais eventualmente úteis para um potencial projeto composicional. Nas décadas de 1970 e 1980, sintetizadores digitais e software de composição algorítmica, como o sistema UPIC de Xenakis, permitiram uma exploração mais profunda da síntese sonora e da composição baseada em algoritmos (Hoffmann, 2012).

William Buxton (1977) argumenta que a CAC deve auxiliar a elaboração de projetos musicais, oferecendo ferramentas intuitivas e amigáveis. Otto Laske (1981) destaca a interação entre compositor e máquina, equilibrando intuição e participação da “máquina computacional”.

Nos anos 1990, o aumento do poder de processamento dos computadores pessoais possibilitou implementar técnicas mais complexas de síntese e processamento de áudio. Roads (1996) e Assayag (1998) documentaram esses avanços, destacando o potencial da CAC em contextos performativos. Mikhail Malt (2000) discute que a CAC deve ampliar as possibilidades do compositor, otimizar cálculos e manipular informações simbólicas e musicais.

Tristan Murail (2005) sugere que ambientes de CAC devem ser abertos e flexíveis, atendendo às necessidades individuais dos compositores, semelhante aos sistemas CAD na arquitetura e design industrial. Modelos matemáticos podem ser usados para composição e análise musical, como sugerido por Padovani e Manzolli (2015) em seus ambientes de Assistência Computacional a Contextos Musicais (CAM).

No entanto, tal complexo estrutural da Composição Auxiliada por Computador (CAC), se assim o considerar como tal, só será relevante para um processo composicional específico se repercutir, de alguma maneira, nos processos criativos do compositor, seja de forma ativa ou reflexiva. Quando assimiladas, tais técnicas ampliam a paleta de recursos disponíveis para a heurística do compositor. Portanto, para além dos aspectos técnicos e tecnológicos, é necessário desenvolver uma heurística composicional e analítica clara e manifesta. Esta, por sua vez, deve incorporar um repertório cada vez mais amplo e sortido de recursos técnicos e instrumentais. Desenvolver e aplicar essas novas técnicas e ferramentas da CAC pode expandir a prática composicional, oferecendo aos compositores/as uma maior variedade de recursos criativos. É neste contexto que urge uma discussão acerca das ferramentas de inteligência artificial, especificamente, aplicadas para o processo criativo composicional.

Inteligência Artificial e os processos criativos musicais

Alan Turing, na década de 1950, foi o pioneiro em realizar pesquisas substanciais no estudo sobre “inteligência de máquina” (Copeland, 2004). Apesar do impacto na comunidade científica com os avanços em discussões e desenvolvimentos tecnológicos, o financiamento e o interesse, econômico e comercial, aumentaram significativamente após 2012, quando técnicas computacionais, especialmente, o aprendizado de máquina e o aprendizado profundo superaram as técnicas anteriores da IA, e após 2017, com a expansão de técnicas, arquiteturas e estruturas de programação computacional. Isso levou ao “boom” da IA no final da década de 2010 e início dos anos 2020, com empresas, universidades e laboratórios liderando avanços significativos em inteligência artificial. Um dos exemplos de desenvolvimento/aplicação são os transformadores generativos pré-treinados ou GPTs. Trata-se de modelos de linguagem baseados nas relações semânticas entre palavras em frases, ou seja, processamento de linguagem natural. Os modelos GPT são pré-treinados em um grande corpus de texto, geralmente da internet. Durante esse pré-treinamento, os modelos GPT acumulam dados e estabelecem conexões que podem gerar texto “semelhante ao humano”. Uma fase subsequente de treinamento, utilizando uma técnica chamada aprendizado por reforço com feedback humano, ou *reinforcement learning from human feedback - RLHF*, torna o modelo mais alto-nível e “profícuo”. Embora ainda possam gerar falsidades conhecidas, ou mesmo “alucinações”, o modelo pode ser aprimorado com RLHF, dados de qualidade e recursividade no treinamento. Modelos atuais e serviços incluem Gemini (anteriormente Bard), ChatGPT,

Grok, Claude, Copilot e LLaMA. Modelos GPT multimodais podem processar diferentes tipos de dados, como imagens, vídeos, sons e textos.

A pesquisa emergente sobre co-criação humano-máquina está sempre em atualização com a indústria criativa, permitindo que computadores contribuam para a produção de música, arte e cultura de maneiras antes inimagináveis (Comitê Gestor da Internet no Brasil, 2022). Pesquisadores da ciência da computação e outras áreas tecnológicas têm buscado fundamentos nas humanidades para apoiar seus estudos (Caramiaux & Donnarumma, 2021).

Assim, as IAs estão sendo aplicadas no contexto da arte, tais como nas artes visuais e música. Tal contexto tem sido representativo e criado uma importante discussão em diversos aspectos da produção artística e indústria criativa, compelindo artistas e criadores/as a, se não uma adaptação ou empenho, pelo menos um mínimo contato com tal cenário emergente (Miranda, 2021). Tal discussão tornou-se ainda mais relevante com o advento das tecnologias modernas de IA na produção musical (Santos & Simurra, 2024). Naturalmente, iniciativas de pesquisa já tinham sido exploradas e conduzidas em décadas anteriores à virada para o Século XXI.

Curtis Roads, ainda no início da década de 1980 em seu artigo “Research in Music and Artificial Intelligence” (1985), realiza uma revisão dos estudos sobre IA e música desenvolvidos até então, apontando o uso de tais ferramentas em quatro áreas da pesquisa musical: composição, performance, teoria musical e processamento digital de som. Roads declara que embora os limites da IA permaneçam indefinidos, os computadores realizam tarefas musicais anteriormente atribuídas exclusivamente a músicos naturalmente “inteligentes” expandido e fomentando potencialmente a base de conhecimento das estruturas dos sistemas musicalmente inteligentes. Neste contexto dos “sistemas musicais inteligentes”, David Cope, compositor e pesquisador pioneiro na interseção entre música e computação, avançou no campo da composição musical algorítmica por meio do desenvolvimento de sistemas que emulam estilos composicionais. O exemplo singular, “Experiments in Musical Intelligence”, EMI, utiliza algoritmos para analisar obras existentes e gerar novas composições que referenciam, estilística e tecnicamente, obras de outros compositores/as. Este sistema, iniciado na década de 1980, emprega técnicas que podem ser relativizadas pelo escopo de IA para recombinar elementos musicais, resultando em novas composições reminiscentes das influências analisadas (Cope, 1987).

Em 2016, uma máquina recebeu os direitos autorais de uma canção, “Daddy’s Car”, gerada pela tecnologia “Flow Machines” de François Pachet (AÇOS, 2021; LIMON, 2016).

Pachet já havia desenvolvido o sistema precursor, *Continuator*, que levou a abordagem simbólica a um novo nível (Miranda, 2021).

Embora haja IAs capazes de criar música, por assim dizer “autonomamente”, o trabalho artístico humano ainda é, do nosso ponto de vista, indispensável. A pesquisa sobre criatividade computacional tem focado cada vez mais nos processos colaborativos entre humanos e máquinas, como demonstrado por vários estudos (Roads, 1980; Bridget, Blevins & Zahler, 1993; Biles, 2003; Lubart, 2005; Hoffman & Weinberg, 2010; Davis, 2013; Davis & Mohammad, 2014; Lubart et al, 2021; Moura, Castrucci & Hindley, 2023).

A integração de algoritmos de IA na criação e produção musical introduziu abordagens e ferramentas inovadoras. A revolução tecnológica observada desde o final de 2018 até os anos 2020 exemplifica a atuação das ferramentas de IA na produção musical. Pesquisas sobre a interação da criatividade humana com os recursos computacionais no contexto das IAs mostram como tal tecnologia pode facilitar interações significativas entre humanos e máquinas (Nicholls & Cunningham, 2018 e Cai & Cai, 2019). A perspectiva convergente e multidisciplinar na criação de sistemas musicais baseados em IA integra diversas áreas de pesquisa como teoria da informação, ciência cognitiva e musicologia, ressaltando a natureza interdisciplinar deste campo (Kayak et al., 2020).

A capacidade da IA de ampliar as possibilidades, técnicas e materiais, na composição musical (Gioti, 2021) e a crescente utilização de IA na geração musical, tanto de materiais quanto de produtos sonoros considerados “prontos” ou “imutáveis”, incluindo análise e exploração cultural e afetiva, destacam os diversos encargos que a IA potencialmente pode desempenhar na criação musical (Kumar & Kumar, 2024).

Tais desenvolvimentos apresentam o potencial uso da IA na criação, produção e difusão musical, levantando questões importantes sobre a perspectiva da música, o papel da criatividade humana e as implicações socioeconômicas dos avanços tecnológicos neste contexto. Assim, presume-se, nesta discussão que a tecnologia da IA é um recurso potencialmente integrante ao âmbito da CAC. A seguir, detalhamos um estudo piloto centrado na elaboração de um ambiente computacional, em linguagem Python com o uso de IA, para gerar materiais sonoros.

Metodologia

Nesta seção apresentamos as etapas para elaborar nossa proposta de um sistema computacional para gerar materiais sonoros a partir do auxílio de IA. Para tanto, faz-se necessário descrever uma breve contextualização acerca dos materiais sonoro-musicais que

foram propostos para realizar este experimento como um estudo piloto. Arbitariamente, selecionou-se algumas técnicas para produzir e organizar tais materiais que julgamos pertinentes para o estudo, a saber, (a) geração de material: síntese granular e (b) organização dos materiais: autômatos celulares.

Material

Síntese granular - GS

Dentre as diversas técnicas de síntese sonora na literatura especializada, tais como aditiva, subtrativa, por modulação de frequência, de amplitude, de fase, de modelagem física, a síntese granular, *granular synthesis* ou GS, nos causa particular interesse por conta de sua característica conceitual e técnica. Fernando Falci define a GS como “uma técnica que manipula o material sonoro em seu limite micro-temporal” (de Souza, 2010, pg. 1). Tal técnica, flexibiliza a exploração sonora de curta duração a partir de parâmetros como duração, amplitude, forma de onda e envoltória destes mesmos grãos, bem como organizá-los em estruturas complexas e variadas, como nuvens, por exemplo (Roads, 2001, pp.87-178). A identidade ou singularidade de um único grão individual não é relevante no contexto da sua macroestrutura, contudo, ao considerá-lo como o viés do arcabouço de referência sônica, sua densidade gera texturas sonoras distintivas. Diversas iniciativas realizaram experimentos e elaboraram obras composicionais significativas de contexto granular. Karlheinz Stockhausen colaborou consideravelmente ao utilizar geradores de impulso analógicos conectados a componentes eletrônicos como filtros passa-baixa, filtros passa-alta, gravadores de fita em loop e circuitos de realimentação com diferentes arquiteturas (Roads, 2001, pp. 70; Tissot, 2008). Iannis Xenakis formalizou um modelo de composição granular, dividindo o tempo em unidades iguais chamadas telas, representada por uma matriz de grãos sonoros, formando sequências (Xenakis, 1992). Horacio Vaggione utilizou técnicas que podem ser associadas com a música concreta experimental para trabalhar com excertos sonoros gravados de curta duração denominada micromontagem (Vaggione, 1996). Barry Truax foi pioneiro a realizar síntese granular em tempo real com o uso de um microprocessador de sinal digital (Truax, 1988). Curtis Roads realizou extensivos estudos nessa área, estabelecendo um vocabulário de tipos de grãos e formas complexas de organização, como nuvens e pulsares. Seu livro "Microsound" compila essas contribuições e apresenta métodos variados de síntese, granulação de sons gravados, e análise e ressíntese sonora (Roads, 2001).

Portanto, a nossa escolha do material sonora parte da síntese granular, uma técnica que se baseia na combinação de uma grande quantidade de sons de curta duração. As suas

amostras são divididas em pequenos fragmentos com duração de aproximadamente 1 a 100 ms. Vários grãos podem ser sobrepostos e reproduzidos em diferentes velocidades, fases, volumes e frequências, entre outros parâmetros. Após definir qual o material sonoro do nosso estudo, ponderamos como organizar tal material e como estabelecer seu perfil dinâmico-temporal. Para tanto, optamos pelos Autômatos Celulares, *cellular automata* - CA.

Organização

Autômatos celulares - CA

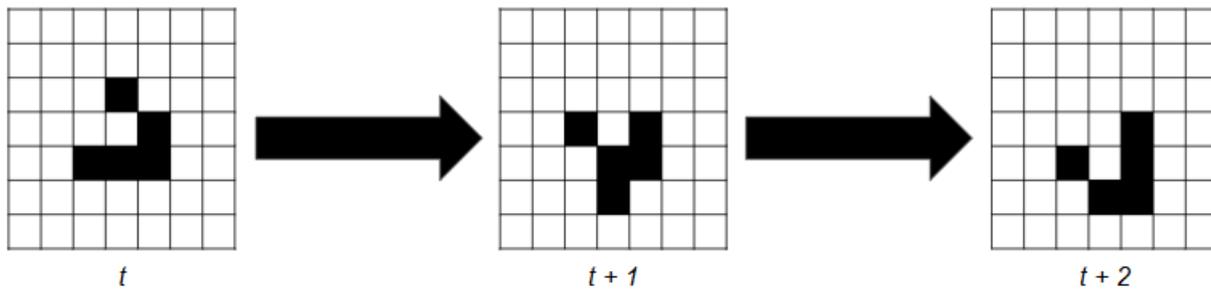
Trata-se de um modelo computacional discreto que consiste em uma grade regular de “células”, cada uma em um estado finito, no caso de um modelo bifásico, de presença ou ausência. A grade pode ser visualizada intuitivamente como uma matriz de dimensões variadas, na qual cada posição coordenada no espaço pode ser descrita como uma célula. Cada célula possui uma vizinhança definida e um estado inicial atribuído a cada uma. Por exemplo, quando desligado ou ausente a célula está vazia, quando ligado ou presente a célula está preenchida. Uma nova geração do comportamento da grade de células, então, é criada subsequentemente com base em uma regra de comportamento definida previamente. Assim, o estado atual de cada célula, bem como o estado de cada uma de suas células vizinhas são atualizadas. Descoberto por Stanislaw Ulam e John von Neumann na década de 1940, o conceito ganhou destaque na década de 1970 com o Jogo da Vida de Conway (SCHIFF, 2011, von Neumann, 2017).

No domínio das aplicações, os CA têm sido utilizados para tarefas como processamento de imagens, encriptação de dados e simulação de fenômenos naturais como dinâmica de fluidos e propagação de doenças (Ilachinski, 2001).

Especificamente na composição musical, os CA têm sido explorados como uma ferramenta generativa para criar estruturas complexas e em evolução. O seu uso leva em consideração sua capacidade de produzir padrões e sequências que podem ser mapeados para parâmetros musicais como altura, ritmo, dinâmica e timbre, dentre outras características. Diversos estudos têm usado modelos de CA, incluindo autômatos unidimensionais, bidimensionais e de dimensões superiores, para gerar melodias, harmonias e texturas que exibem um alto grau de variabilidade e imprevisibilidade (Miranda, 1993; Burton & Vladimirova, 1999; Burraston & Edmonds, 2005; French, 2013; Miranda & Miller-Bakewell, 2022). Importantes e significativos trabalhos têm sido desenvolvidos neste contexto, em especial, do entrelaçamento da síntese granular e os autômatos celulares. Eduardo Miranda, em particular, tem avançado de maneira importante (1995, 1999, 2000, 2001, 2016). A Figura

1, baseada no trabalho de Miranda (2016), ilustra um exemplo de perfil do comportamento em três períodos distintos no tempo de uma célula no contexto dos CA.

Figura 1 – sequência de estados de um autômato celular em uma grade 7x7, começando de um estado inicial (t) e evoluindo através dos tempos $t+1$, $t+2$. Cada célula pode estar viva (preta) ou morta (branca) de acordo com regras previamente determinadas.



No contexto do nosso estudo, integrar o modelo CA com técnicas de síntese granular nos permitiu estabelecer um interessante desenho de estrutura. A síntese granular, que envolve a geração de sons complexos pela combinação de muitos grãos de sons, pode ser efetivamente controlada pelos CA para produzir timbres e texturas em evolução. Apesar de não ser uma perspectiva inovadora e uma aplicação inédita, acreditamos que o entrelaçamento entre a GS e os CA podem ser abordagem instigante para o desenvolvimento do nosso sistema computacional com auxílio de IA ou CAPyGrain.

Arquitetura

Nosso protótipo de estudo foi implementado em linguagem Python 3.12.4 e editado em ambiente Visual Code Studio com diversas bibliotecas de funções específicas para criar interfaces gráficas, imagens, cálculos matemáticos, processamento e síntese de som. A interação com as ferramentas de IA se deu por meio do ambiente virtual operacionalizado pela empresa OpenAI, via aplicativo computacional que tenta simular uma conversa natural entre usuário e máquina, denominada como “chatbot” via ChatGPT versão 4.0. A dinâmica de interação foi desenvolvida pela comunicação via caixa de mensagem do aplicativo, denominado “prompt”. A cada rodada de interação entre usuário e o ChatGPT, uma nova solicitação foi adicionada para atualizar ou integrar novas funcionalidades no nosso sistema, que se relaciona, recapitulando, com a criação de um sistema computacional na linguagem Python para gerar material sonoro baseado em síntese granular cujo comportamento dinâmico temporal se estabelece no modelo de autômatos celulares.

Etapas do desenvolvimento do sistema com auxílio de IA

O código é estruturado em torno de uma interface gráfica de usuário (GUI) que possibilita configurar os parâmetros dos CA e da síntese granular. Definimos constantes para a geração de áudio e funções de mapeamento para frequência e amplitude. Cria-se a função “frequency_mapping” que mapeia as coordenadas da grade do CA para frequências sonoras. Os sinais sonoros são gerados como ondas senoidais na função “generate_sine”. Para criar uma maior diversidade, adicionamos a técnica de modulação de frequência (FM) na função “generation_to_audio”, onde o sinal senoidal gerado é modulado por outro sinal senoidal. A amplitude dos grãos, definida pela função “amplitude_mapping” é mapeada de várias maneiras, dependendo do método escolhido. Em seguida, a “função panning_mapping” determina a posição estéreo dos grãos sonoros. Posteriormente, diversas regras para a evolução dos CA são definidas. A duração de cada grão é definida pela variável “grain_duration_var”, que pode ser configurada pelo usuário na interface gráfica. A duração de cada instância pode ser fixa ou aleatória. Isso é definido pela variável “random_duration_var” e pelos sliders para valores mínimo e máximo de duração. A função “adjust_grain_duration” ajusta a duração do grão para cada instância. O tempo de duração entre as camadas, “tempo de intervalo”, é definido pelas variáveis “fixed_time_span_var”, “random_time_span_var”, “min_random_time_span_var” e “max_random_time_span_var”. A função “insert_silence” é usada para inserir uma duração de silêncio entre as instâncias. A função “generation_to_audio” converte uma geração do CA em áudio, aplicando as funções apresentadas. A interface gráfica é criada utilizando a biblioteca Tkinter, permitindo ao usuário configurar parâmetros como a duração dos grãos, o número de gerações e instâncias, e os métodos de amplitude e panorâmica. Após definir os parâmetros iniciais, o sistema processa e retorna resultados em diversos formatos multimídia: áudio, imagem, gif e vídeo. A seguir, a Figura 2 ilustra as principais funções apresentadas nesta seção. Importante destacar que todas as estruturas e funções foram solicitadas via prompt do ChatGPT no qual cada retorno foi revisado e testado individualmente pelo usuário antes que fosse implementado na versão atual do código do nosso sistema.



Figura 2 – Estrutura das principais funções no sistema computacional com auxílio do ChatGPT

```
SAMPLE_RATE = 44100
GRAIN_DURATION = 1.0
width, height = 50, 50

def frequency_mapping(x, y, gen_width, gen_height):
    freq_x = np.interp(x, [0, gen_width - 1], [60, 3600])
    freq_y = np.interp(y, [0, gen_height - 1], [60, 3600])
    return np.sqrt(freq_x * freq_y)
```

(a)

```
def generate_fm_sine(carrier_freq, mod_freq, mod_index, duration):
    t = np.linspace(0, duration, int(SAMPLE_RATE * duration), endpoint=False)
    mod_signal = mod_index * np.sin(2 * np.pi * mod_freq * t)
    return np.sin(2 * np.pi * carrier_freq * t + mod_signal)
```

(b)

```
def generate_sine(freq, duration):
    t = np.linspace(0, duration, int(SAMPLE_RATE * duration), endpoint=False)
    return np.sin(2 * np.pi * freq * t)

def amplitude_mapping(x, y, method, ca_state, gen_width, gen_height):
    if method == 'Default':
        amp_x = np.interp(x, [0, gen_width - 1], [0.1, 1])
        amp_y = np.interp(y, [0, gen_height - 1], [0.1, 1])
        return np.sqrt(amp_x * amp_y)
    elif method == 'Linear Mapping':
        return (x + y) / (gen_width + gen_height)
    elif method == 'Non-linear Mapping':
        return np.sin(x / gen_width) * np.sin(y / gen_height)
    elif method == 'Conditional Mapping based on CA State':
        return 1 if ca_state == 1 else 0.1
    elif method == 'Frequency-Dependent Mapping':
        freq = frequency_mapping(x, y, gen_width, gen_height)
        return np.log1p(freq) / np.log1p(np.sqrt(gen_width * gen_height))
    elif method == 'Random Variability':
        return np.random.uniform(0.1, 1)
    else:
        return 1
```

(c)

```
def generate_fm_sine(carrier_freq, mod_freq, mod_index, duration):
    t = np.linspace(0, duration, int(SAMPLE_RATE * duration), endpoint=False)
    mod_signal = mod_index * np.sin(2 * np.pi * mod_freq * t)
    return np.sin(2 * np.pi * carrier_freq * t + mod_signal)
```

(d)

```
def panning_mapping(x, y, gen_width, gen_height, method="Default"):
    if method == "Default":
        return np.interp(x, [0, gen_width - 1], [-1, 1])
    elif method == "Conditional Mapping based on CA State":
        return 1 if y > gen_height // 2 else -1
    elif method == "Frequency-Dependent Mapping":
        freq = frequency_mapping(x, y)
        return np.interp(freq, [60, 3600], [-1, 1])
    elif method == "Non-linear Mapping":
        return np.sin(np.pi * x / (gen_width - 1))
    elif method == "Random Variability":
        return random.uniform(-1, 1)
```

(e)

```
def adjust_grain_duration(self, instance_num, total_random_duration):
    if self.random_duration_var.get():
        min_random_duration = self.min_random_duration_var.get()
        max_random_duration = self.max_random_duration_var.get()
        GRAIN_DURATION = round(random.uniform(min_random_duration, max_random_duration), 2)
        total_random_duration += GRAIN_DURATION
        print(f"Instance {instance_num + 1} Duration: {GRAIN_DURATION} seconds")
    else:
        GRAIN_DURATION = self.grain_duration_var.get()
    return GRAIN_DURATION, total_random_duration
```

(f)

```
def insert_silence(self, instance_num):
    # calculate time span duration
    if self.random_time_span_var.get():
        # If random time span is selected, choose a random duration within the specified range
        min_random_time_span = self.min_random_time_span_var.get()
        max_random_time_span = self.max_random_time_span_var.get()
        time_span_duration = round(random.uniform(min_random_time_span, max_random_time_span), 2)
    else:
        # If fixed time span is selected, use the fixed duration
        time_span_duration = self.fixed_time_span_var.get()

    # Create a silence array with the calculated duration
    silence = np.zeros((int(time_span_duration * SAMPLE_RATE), 2))

    # Append silence to the audio
    self.all_audio = np.vstack([self.all_audio, silence])

    # Return the duration of the silence inserted
    return time_span_duration
```

(g)

```
def generation_to_audio(generation, GRAIN_DURATION, amp_method, pan_method):
    gen_width, gen_height = generation.shape
    audio = np.zeros((int(GRAIN_DURATION * SAMPLE_RATE), 2))
    for x in range(gen_width):
        for y in range(gen_height):
            if generation[x, y] == 1:
                freq = frequency_mapping(x, y, gen_width, gen_height)
                amp = amplitude_mapping(x, y, amp_method, generation[x, y], gen_width, gen_height)
                pan = panning_mapping(x, y, gen_width, gen_height, method=pan_method)
                grain = amp * generate_sine(freq, GRAIN_DURATION)
                audio[:, 0] += grain * (1 - pan)
                audio[:, 1] += grain * pan
            hanning_window = np.hanning(audio.shape[0])
            audio[:, 0] *= hanning_window
            audio[:, 1] *= hanning_window
    return audio
```

(h)

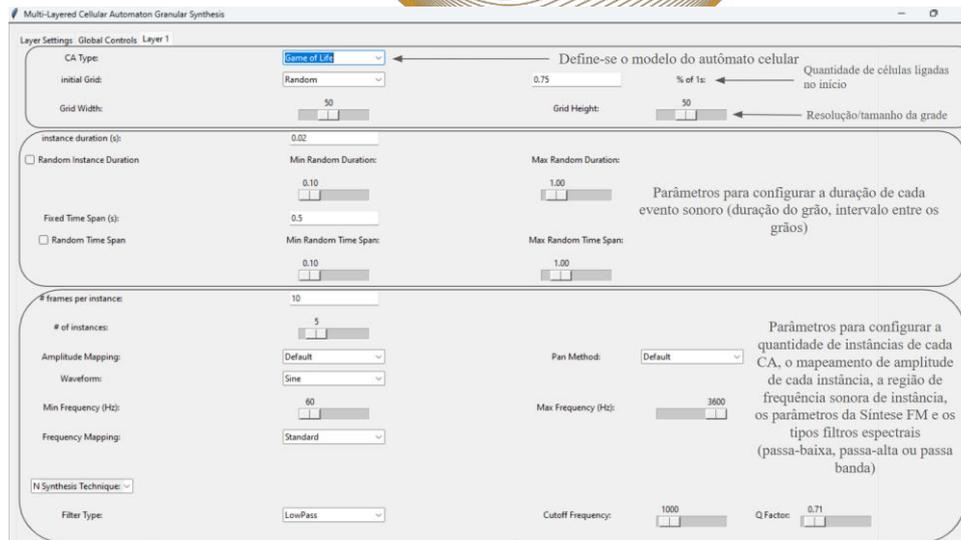
Resultados

Toda a arquitetura da estrutura computacional apresentada na seção anterior objetiva definir funções para a criação de um ambiente computacional para gerar material sonoro a partir das características específicas de síntese granular e autômatos celulares. As saídas recebidas como resultados da interação com os prompts da plataforma de IA retornou um roteiro de código que foi utilizado no ambiente Visual Studio. Cada iteração da dinâmica *prompt-processamento/resposta da IA-atualização do código* permitiu uma rotina de trabalho onde a revisão de cada “resposta” da IA fosse verificada pelo trabalho manual, ou seja, sempre priorizou-se a supervisão humana em cada etapa do desenvolvimento do código. Como resultado, criamos uma interface gráfica de interação com o usuário (GUI) na qual pode-se definir os principais parâmetros de GS e CA. A Figura 3 ilustra a visualização atual do nosso sistema.

Figura 3 – Interface Gráfica de usuário para interação com os parâmetros de GS e CA no sistema. As subfiguras indicam (a) configuração inicial da quantidade de camadas sonoras; (b) definição de parâmetros de GS e CA pelo usuário e (c) executar a tarefa de processamento e formatos de saída multimídia.



(a)



(b)



(c)

Disponibilizamos a versão piloto do sistema no link:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.13290050>.

Discussão

Implementar técnicas de síntese granular no contexto de organização dinâmico-temporal com o modelo de autômatos celulares apresentou-se interessante e efetiva para um estudo de interação das ferramentas de IA, via prompt de comando em aplicativo ChatGPT, com os nossos interesses de construir uma interface computacional, em linguagem Python, para gerar material sonoro. Tais contextos técnicos, a partir de nossa leitura, permitiram que as instruções para a IA fossem restritas de modo que os avanços puderam ser verificados, revisados e atualizados a partir do nosso crivo pessoal e não somente automatizado. Os resultados, tanto sonoros quanto visuais, são promissores e não se afastaram das referências

utilizadas, sejam elas do ponto de vista da GS quanto dos CA. A criação de uma interface gráfica intuitiva e funcional foi essencial para permitir que usuários/as interajam com o sistema de maneira eficiente e lúdica. No entanto, garantir que todas essas opções funcionem de maneira equilibrada é um desafio, especialmente em termos de layout e resposta da interface.

Considerações Finais e perspectivas de trabalhos futuros

Este trabalho, ainda em andamento, apresentou uma proposta de um sistema computacional de síntese granular (GS) baseado em autômatos celulares (CA), para criar materiais sonoros potencialmente utilizados para composição musical. Para tanto, o uso de IA como ferramenta computacional e tecnológica para a composição musical auxiliada por computador demonstrou-se promitente, permitindo a automação e otimização de processos com o crivo e escolhas definidas pelo/a usuário/a. O desenvolvimento do algoritmo, em Python, foi realizado a partir da interação com as sugestões de respostas do chatbot do ChatGPT. Para trabalhos futuros, uma das perspectivas a ser explorada é a expansão das regras de autômatos celulares. Explorar uma maior variedade de regras e parâmetros, como multidimensionais e sistemas não-lineares, pode potencializar nosso estudo. Destaca-se que todas essas propostas podem ser discutidas e implementadas a partir do próprio ambiente de IA, no qual permite que usuários/as e desenvolvedores/as possam utilizar a tecnologia para seus próprios projetos criativos.

Algoritmos de IA podem analisar grandes volumes de dados, identificar padrões e sugerir novas direções criativas, tornando o processo de composição e/ou estrutura composicional mais otimizado. A integração de IA não só automatiza processos complexos, mas também abre perspectivas para a criação musical, destacando-se como “mais um” recurso na composição auxiliada por computador. Por um lado, consideramos a tecnologia atual como uma potencial ferramenta, até certo limite, democrática, considerando que pessoas sem o domínio específico pode desenvolver e implementar projetos específicos. Contudo, de outra maneira, cria-se um viés de domínio e posse dos direitos de uso onde os interesses financeiros e do mercado global, atualmente, governam o controle amplo do seu uso. Este trabalho, apesar de preliminar, estabelece uma base ou ponto de partida para a exploração de IA em várias direções para pesquisas futuras em composição musical auxiliada por computador.

Referências

- AÇOS, Luc. Foreword: From Audio Signals to Musical Meaning. In: MIRANDA, Eduardo Reck (ed.). Handbook of artificial intelligence for music: foundations, advanced approaches, and developments for creativity. Springer: Switzerland, 2021, p. V-XVIII.
- ASSAYAG, G. (1998). Computer assisted composition today. Paper presented at the First Symposium on Music and Computers, Corfu, Greece.
- BAIRD, Bridget; BLEVINS, Donald; ZAHLER, Noel. Artificial intelligence and music: Implementing an interactive computer performer. *Computer Music Journal*, v. 17, n. 2, p. 73-79, 1993.
- BILES, John A. GenJam in perspective: a tentative taxonomy for GA music and art systems. *Leonardo*, v. 36, n. 1, p. 43-45, 2003.
- BURRASTON, Dave; EDMONDS, Ernest. Cellular automata in generative electronic music and sonic art: a historical and technical review. *Digital Creativity*, v. 16, n. 3, p. 165-185, 2005.
- BURTON, Anthony R.; VLADIMIROVA, Tanya. Generation of musical sequences with genetic techniques. *Computer Music Journal*, v. 23, n. 4, p. 59-73, 1999.
- BUXTON, William. A composer's introduction to computer music. *Journal of New Music Research*, v. 6, n. 2, p. 57-71, 1977.
- CAI, Lin; CAI, Qi. Music creation and emotional recognition using neural network analysis. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, p. 1-10, 2019.
- CARAMIAUX, Baptiste; DONNARUMMA, Marco. Artificial Intelligence in Music and Performance Art-Research Inquiry. In: MIRANDA, Eduardo Reck (ed.). Handbook of artificial intelligence for music: foundations, advanced approaches, and developments for creativity. Springer: Switzerland, 2021, p. 75-96.
- COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL (ed.). Inteligência artificial e cultura: perspectivas para a diversidade na era digital. E-book. Multiple Collaborators. Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR. São Paulo: Comitê Gestor da Internet no Brasil 2022. <https://www.cgi.br/publicacao/inteligencia-artificial-e-cultura-perspectivas-para-a-diversidade-cultural-na-era-digital/>
- COPELAND, Jack, ed. (2004). *The Essential Turing: the ideas that gave birth to the computer age*. Oxford, England: Clarendon Press
- DAVID, Cope. Experiments in Music Intelligence. In: *Proceedings of the International Computer Music Conference*. 1987.
- DAVIS, Hannah; MOHAMMAD, Saif M. Generating music from literature. arXiv preprint arXiv:1403.2124, 2014.

DAVIS, Sharon. Informal learning processes in an elementary music classroom. *Bulletin of the Council for Research in Music Education*, n. 198, p. 23-50, 2013.

DE SOUZA, Fernando Falci. Síntese Granular em tempo real no espaço de Gabor estendido. 2010. Tese de Doutorado. [sn].

FRENCH, Richard. *Cellular Automata and Music: A New Representation*. 2013.

GIOTI, Artemi-Maria. Artificial intelligence for music composition. *Handbook of Artificial Intelligence for Music: Foundations, Advanced Approaches, and Developments for Creativity*, p. 53-73, 2021.

HILLER, Lejaren; ISAACSON, Leonard. *Musical composition with a high-speed digital computer*. 1993.

HOFFMAN, Guy; WEINBERG, Gil. Synchronization in human-robot musicianship. In: 19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication. IEEE, 2010. p. 718-724.

HOFFMANN, Boris. The Electroacoustic works by Iannis Xenakis and their instrumental" contemporaries". In: *Proceedings of the international Symposium Xenakis. Xenakis. The electroacoustic music.*—Université Paris. 2012. p. 11-17.

ILACHINSKI, Andrew. *Cellular automata: a discrete universe*. World Scientific Publishing Company, 2001.

KAYAK, Anneta; FADYUSHIN, Sergey; VERESHCHAGINA, Elena Arina. Analytical framework of the convergent approach to the creation of musical systems based on artificial intelligence. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2020. p. 1-4.
2020.10.1109/FarEastCon50210.2020.9271097

KUMAR, Sameer & KUMAR, Suman. AI Generated Music. *International Journal of Research in Science & Engineering*, v. 4, n. 1, 2024.
<https://doi.org/10.55529/ijrise.41.10.12>

LASKE, Otto. Composition Theory in Koenig's Project One and Project Two. *Computer music journal*, v. 5, n. 4, p. 54-65, 1981.

LIMON, Jaime Diaz. Daddy's car: la inteligencia artificial como herramienta facilitadora de derechos de autor. *Revista La Propiedad Inmaterial*, n. 22, p. 83-100, 2016.
<https://ssrn.com/abstract=2900283>

LUBART, Todd, ESPOSITO, Dario; GUBENKO, Alla; HOUSSEMAND, Claude. Creativity in humans, robots, humbots. *Creativity. Theories—Research—Applications*, v. 8, n. 1, p. 23-37, 2021.

LUBART, Todd. How can computers be partners in the creative process: classification and commentary on the special issue. *International journal of human-computer studies*, v. 63, n. 4-5, p. 365-369, 2005.

MALT, Mikhail. Les mathématiques et la composition assistée par ordinateur (concepts, outils et modeles). 2000. Tese de Doutorado. Paris, EHESS.

MIRANDA, Eduardo Reck. (2001). Composing music with computers. Oxford: Elsevier/Focal Press

MIRANDA, Eduardo Reck. (2016). Mind Pieces: The Inside Story of a Computer-Aided Symphony. Intelligent Arts

MIRANDA, Eduardo Reck; MILLER-BAKEWELL, Hector. Cellular automata music composition: From classical to quantum. In: Quantum Computer Music: Foundations, Methods and Advanced Concepts. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 105-130.

MIRANDA, Eduardo Reck. Cellular automata music: An interdisciplinary project. Journal of New Music Research, v. 22, n. 1, p. 3-21, 1993.

MIRANDA, Eduardo Reck. Evolving cellular automata music: From sound synthesis to composition. In: Proceedings of 2001 Workshop on Artificial Life Models for Musical Applications. 2001.

MIRANDA, Eduardo Reck. Evolving Complex Sounds with Cellular Automata: an Approach to Granular Synthesis. In: Journées d'Informatique Musicale. 1999.

MIRANDA, Eduardo Reck. Granular synthesis of sounds by means of a cellular automaton. Leonardo, v. 28, n. 4, p. 297-300, 1995.

MIRANDA, Eduardo Reck. Preface. In: MIRANDA, Eduardo Reck (ed.). Handbook of artificial intelligence for music: foundations, advanced approaches, and developments for creativity. Springer: Switzerland, 2021, p. XIX-XXI.

MIRANDA, Eduardo Reck. The art of rendering sounds from emergent behaviour: Cellular automata granular synthesis. In: Proceedings of the 26th Euromicro Conference. EUROMICRO 2000. Informatics: Inventing the Future. IEEE, 2000. p. 350-355.

MOURA, Francisco; CASTRUCCI, Chiara; HINDLEY, Clare. Artificial intelligence creates art? An experimental investigation of value and creativity perceptions. The Journal of Creative Behavior, v. 57, n. 4, p. 534-549, 2023.

MURAIL, Tristan. Spectra and sprites. Contemporary Music Review, v. 24, n. 2-3, p. 137-147, 2005.

NICHOLLS, Steven; CUNNINGHAM, Stuart; PICKING, Richard. Collaborative artificial intelligence in music production. Proceedings of the Audio Mostly 2018 on Sound in Immersion and Emotion. p. 1-4. 2018. 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271097

PADOVANI, José Henrique; MANZOLLI, Jônatas. Symbolic regression as a computer-aided music tool for analysis and composition. NICS Reports, v. 6, n. 19, p. 1-11, 2017.

ROADS, Curtis. (1996). The computer music tutorial. Chapter 18 'Algorithmic Composition Systems' and Chapter 19 'Representation and Strategies for Algorithmic Composition'. Cambridge, MA: The MIT Press.

ROADS, Curtis. Artificial intelligence and music. *Computer Music Journal*, v. 4, n. 2, p. 13-25, 1980.

ROADS, Curtis. Research in music and artificial intelligence. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 17, n. 2, p. 163-190, 1985.

SANTOS, Marília Paula dos; SIMURRA, Ivan Eiji. Music, Humans, and Machines: Initial Reflections for the Development of Research with Collaboration between Composers and Artificial Intelligence in the Creative Process of Brazilian Music (Comunicação de pesquisa). IV Ciclo Música em Movimento - Projeções Sonoras. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. 2024

SCHIFF, Joel L. *Cellular automata: a discrete view of the world*. John Wiley & Sons, 2011.

TRUAX, Barry. Real-time granular synthesis with a digital signal processor. *Computer Music Journal*, v. 12, n. 2, p. 14-26, 1988.

VAGGIONE, Horacio. Articulating microtime. *Computer Music Journal*, v. 20, n. 2, p. 33-38, 1996.

VON NEUMANN, John. The general and logical theory of automata. In: *Systems research for behavioral science*. Routledge, 2017. p. 97-107.

XENAKIS, Iannis. *Formalized music: thought and mathematics in composition*. Pendragon Press, 1992.

Youngblood, J. E. (1958). Style as information. *Journal of Music Theory*, 2(1), 24-35.