

# Um Sistema de Simulação de Epidemias Utilizando Sistemas Multiagentes

Marcelo Silva Custódio

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
marcelo.custodio@grad.ufsc.br

Alexandre Leopoldo Gonçalves

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
a.l.goncalves@ufsc.br

Jhennifer Matias

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
jhennifercristinematias@gmail.com

Alison R. Panisson

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
alison.panisson@ufsc.br

## RESUMO

The virus SARS-CoV-2 caused a pandemic that started in 2019, it has crowded hospitals, and caused millions of deaths around the world. This disease has promoted an immeasurable impact on people's lives. One of the most important aspects of combating an epidemic is to understand how the virus is transmitted, and how fast it propagates through the environment, considering the large number of variables involved that can be observed by scientific methods. Aiming to provide this understanding, in this work, we propose an epidemic simulation system, focusing on the COVID-19 scenario, implemented using multi-agent systems. The epidemic simulation system is based on the well-known SIR transmission model. Also, to evaluate the proposed simulation system, we took into consideration the main causes pointed out by the Mundial Health Organization about the transmission of COVID-19, simulating different scenarios related to the pandemic, validating the implementation of the simulation system.

## KEYWORDS

Sistemas Multiagentes, Sistema de Simulação, COVID-19, SIR

## 1 INTRODUÇÃO

A COVID-19 é uma infecção respiratória aguda causada pelo vírus SARS-CoV-2 que atingiu a população global a partir do ano de 2019, causando uma grande crise sanitária e levando a uma superlotação nos hospitais ao redor do mundo. No Brasil esta realidade não foi diferente. Durante o momento mais severo da pandemia houve registro de mais de 4 mil mortes diárias, o que após aproximadamente 3 anos do surgimento da doença somou um total de aproximadamente 680 mil mortes. Na Figura 1 é apresentado o gráfico de mortes por COVID-19 no Brasil, durante o período da pandemia entre 2019 e 2022.

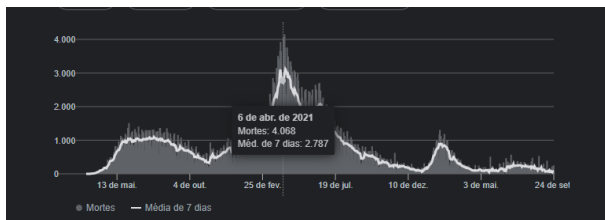


Figura 1: Mortes por COVID-19 no Brasil

Após o desenvolvimento da vacina e início da sua aplicação no Brasil, em 17 de janeiro de 2022, ainda foram registrados mais de 14 mil casos diários de COVID-19 no final de agosto de 2022. Este número é um reflexo tanto pelo fato das vacinas não serem capazes de proteger 100% um indivíduo, como pela falta de testagem em massa para o devido período de isolamento das pessoas infectadas. Sendo assim, de forma a entender quais as variáveis que mais afetam a transmissão da COVID-19, este estudo visa avaliar diversos contextos em que há contaminação pela doença, tais como diferentes tipos de ambientes, a utilização de máscara pelos indivíduos, a interação entre indivíduos vacinados e não vacinados, entre outros. Para isso desenvolveu-se um sistema de simulação utilizando sistema multiagentes [25], implementado na plataforma de desenvolvimento Jason [6].

O sistema desenvolvido tem como base o modelo de propagação de infecções Suscetível-Infetado-Removido (do inglês *Susceptible-Infected-Removed* - SIR), o qual é bem conhecido e amplamente utilizado [11]. O emprego de sistemas multiagentes para realizar simulações é uma técnica bem estabelecida, conhecida como Modelagem e Simulação Baseada em Agentes (do inglês *Agent-Based Modeling and Simulation* - ABMS) [1]. Essa técnica fornece uma série de benefícios oriundos da modelagem de indivíduos na abstração de agentes, os quais podem ser modelados com diferentes características físicas e comportamentais, possibilitando também a simulação de diferentes perfis de indivíduos.

Esse artigo é estruturado como segue. Primeiramente, na Seção 2 são descritos os trabalhos relacionados a esse estudo, descrevendo as principais diferenças em relação ao mesmo. Na Seção 3 é introduzido o modelo de transmissão utilizado neste trabalho, o SIR, incluindo as equações diferenciais que possibilitam a implementação e simulação do modelo de transmissão. Na Seção 4 são descritos os principais aspectos relacionados à COVID-19, utilizado como estudo de caso deste estudo, com o objetivo de avaliar o sistema de simulação desenvolvido. Na Seção 5 é descrito o sistema desenvolvido, incluindo a modelagem de agentes e ambiente computacional para simulação de contágio. Na Seção 6 são apresentados os resultados do estudo. Por fim, na Seção 7 são realizadas as colocações finais, apontando também trabalhos futuros.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem sistemas de simulação utilizando sistemas multiagentes que já exploraram o domínio da epidemias, observando tanto aspectos mais complexos como contextos em que os agente precisam se locomover em dadas situações que as chances de transmissão de

COVID-19 se altera, quanto mais simples em que agentes da simulação apenas possuem uma probabilidade fixa de serem contagiados. Os principais deles são destacados abaixo.

Em [15], os autores desenvolveram um sistema de simulação para a pandemia por COVID-19 na Polônia, utilizando tecnologias de sistemas multiagentes. A principal característica do trabalho reside na apresentação de um mapa onde agentes andam livremente realizando tarefas diárias, tais como ir ao trabalho e à escola, durante a semana e, aos finais de semana, tarefas como ir ao shopping. No trabalho apresentado pelos autores cada agente possui a capacidade de receber 8 estados em relação a infecção, sendo eles: imune, suscetível, exposto, infectado, sintomático, infectado e assintomático, diagnóstico positivo ou morto. O sistema foi desenvolvido utilizando a plataforma GAMA [21].

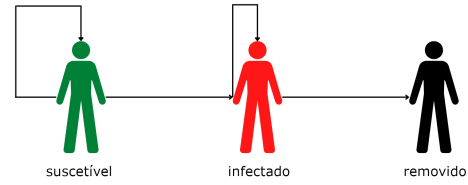
Em [7], os autores também trabalharam com a ferramenta GAMA [21], que é especializada em modelagem e simulação espacial baseada em agentes. No trabalho apresentado pelos autores, eles optaram por seguir o modelo SIR, em que os agentes só podem receber três estados em relação à infecção, sendo estes: Suscetível, Infectado e Removido. Também, os autores optaram por definir o controle do raio de contágio como uma variável da simulação, utilizando também uma probabilidade fixa de 50% de contrair a doença. Por fim, outra variável da simulação utilizada pelos autores foi a velocidade de locomoção dos agentes, onde a velocidade dos agentes variava conforme a proporção de agentes infectados se tornavam removidos.

Em [3], os autores utilizaram o ambiente de modelagem multi-agente conhecido como NetLogo [24] para o desenvolvimento de um sistema de simulação baseado em agentes. No trabalho, foram controlados os parâmetros de quantidade média de contatos entre indivíduos suscetíveis e infectados por dia, razão de indivíduos inicialmente infectados, chance de contaminação, chance de recuperação e chance de ganhar alguma resistência contra a infecção. Os autores tiveram como objetivo verificar quais variações desses parâmetros teriam maior impacto na duração da pandemia, no percentual médio de infectados, no percentual máximo de infectados, e no período em que haveria o maior número de infectados.

Em [13], os autores apresentam uma ferramenta de simulação chamada de MD Corona, desenvolvida também com NetLogo [24], que possui o objetivo de ser utilizadas por outros usuários. A simulação é situada em um *grid* fixo de 41x41 em que os agentes andam livremente, o número de agentes infectados inicialmente também é fixo, mas a quantidade de agentes no *grid* pode ser configurada para diferentes simulações. No modelo proposto pelos autores, os agentes podem assumir 3 estados: infectados, imune ou suscetível.

**Tabela 1: Relação de estados de infecção e número de variáveis por trabalho relacionado.**

Trabalho	Estados da infecção	Ferramenta	Número de variáveis
[15]	8	GAMA	10
[7]	3	GAMA	5
[3]	3	netlogo	5
[13]	3	netlogo	7



**Figura 2: Estados possíveis no modelo SIR**

Na Tabela 1 é apresentada uma súmula dos trabalhos relacionados apresentados, destacando a quantidade de estágios (fases) consideradas para a infecção, como também a quantidade de variáveis utilizadas.

O trabalho desenvolvido se assemelha aos demais por também se basear no modelo SIR, sendo implementado de forma estocástica e não analítica, mas difere nos seguintes pontos: (i) utiliza o framework de sistemas multiagentes Jason, em vez das plataformas GAMA ou NetLogo; (ii) avalia medidas de prevenção na disseminação da doença, como a vacinação dos indivíduos, utilização de máscaras, e o distanciamento social; (iii) faz uso de variáveis de controle baseadas em estudos sobre a COVID-19, que podem ser modificados facilmente para valores de referência de outras doenças infecciosas.

### 3 MODELO SIR

Desenvolvido por McKendrick e Kermack no ano de 1927 [11], o modelo SIR refere-se a doenças onde o indivíduo adquire imunidade após a cura de uma infecção. Os estados possíveis do modelo SIR são apresentados na Figura 2. Pode-se observar que existe a transição entre os diferentes estados, mas também um indivíduo pode permanecer em um mesmo estado, como são os casos dos estados suscetível e infectado do modelo. Caso um indivíduo esteja no estado de removido, isto pode representar tanto a recuperação como a morte do indivíduo.

O modelo SIR tem se demonstrado adequado para simular uma epidemia, como a pandemia causada pela COVID-19, pois permite uma visão sobre como ocorre a transmissão da doença, refletindo na sua utilização em inúmeros trabalhos envolvendo a modelagem e simulação de epidemias. Entretanto, existem outros modelos como o Suscetível-Infectado-Removido-Suscetível (do inglês *Susceptible-Infectious-Recovered-Susceptible* - SIRS) que permite analisar tanto a taxa de recuperados como a taxa de óbitos, porém outras variáveis são agregadas ao modelo, apresentando um maior número de equação.

Além disso, o modelo SIR pode ser implementado de forma analítica, como demonstrado em [12], por meio das equações diferenciais apresentadas nas equações (1), (2), (3) e (4). Em todas as equações apresentadas,  $t$  se refere ao tempo em dias.

A equação (1) representa a derivada dos indivíduos suscetíveis ( $s$ ) em relação ao tempo ( $t$ ), ou seja,  $s(t)$ , sendo relacionada a uma constante  $b$  que representa um número fixo de contatos por dia entre um indivíduo suscetível ( $s$ ) e um indivíduo infectado ( $i$ ).

$$\frac{ds}{dt} = -b \cdot s(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Na equação (2), é representada a derivada dos indivíduos removidos ( $r$ ) pelo tempo, ou seja  $r(t)$ , onde  $k$  representa a quantidade

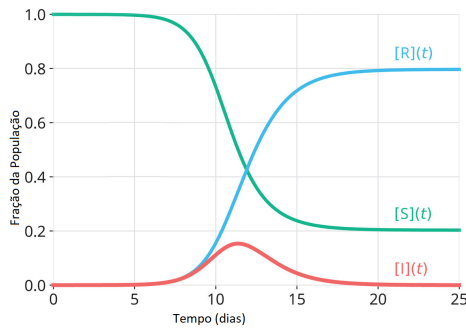


Figura 3: Gráfico do modelo SIR

de indivíduos infectados ( $i$ ) que se recuperam ou morrem por dia.

$$\frac{dr}{dt} = k \cdot i(t) \quad (2)$$

Já na equação (3), é representada a derivada de indivíduos infectados ( $i$ ) pelo tempo ( $t$ ), ou seja  $i(t)$ , que relaciona o número de infectados ( $i$ ) com o número de removidos ( $r$ ).

$$\frac{di}{dt} = b \cdot s(t) \cdot i(t) - k \cdot i(t) \quad (3)$$

Por fim, na equação (4), pode se observar que a soma de indivíduos em cada um dos 3 estados representa a quantidade total de indivíduos no sistema analisado, ou seja, a população é constante.

$$s(t) + i(t) + r(t) = N \quad (4)$$

As equações são apresentadas graficamente na Figura 3.

## 4 COVID-19

COVID-19 é uma infecção respiratória aguda causada pelo vírus SARS-CoV-2. A doença causou grandes problemas na saúde mundial levando hospitais a alcançarem superlotação. Sua transmissão ocorre de forma similar a gripe comum, isto é, através de gotículas contendo o vírus expelidas no ar ou no ambiente pelos indivíduos infectados, a qual pode ocorrer devido a tosse, fala ou respiração.

Há uma grande variedade de sintomas apresentados pelos pacientes de COVID-19, com diferentes severidades. Enquanto algumas pessoas são assintomáticas, outras apresentam sintomas severos e necessitam de cuidados médicos. Essa característica dificultou o rastreamento da doença durante a pandemia. Segundo [22], os sintomas mais comuns são febre (83%), tosse (82%) e respiração curta (31%). Outro sintoma que se tornou recorrente durante a pandemia foi a perda de paladar e olfato, como discutido em [8].

### 4.1 Medidas de Prevenção Imediatas

Segundo [18], existem algumas medidas de prevenção que podem ser aplicadas para evitar a transmissão da doença, considerando que a transmissão pode ocorrer por contato, fômites e por gotículas. Técnicas de higiene das mãos, assim como tomar cuidados ao tossir e/ou espirrar, ajudam a prevenir a transmissão da COVID-19.

Outra forma de prevenção são as máscaras, entretanto, estas apresentam diferentes níveis de proteção. De acordo com [14], as máscaras PFF2 e PFF3 oferecem 98% de proteção contra a transmissão, as máscaras cirúrgicas, apesar de serem indicadas, precisam

Tabela 2: Relação entre tipos de máscara e probabilidade de proteção.

Tipo de máscara	Proteção
PFF2/N95	98%
Cirúrgica	89%
Pano/Algodão	40%

Fonte: [14].

ser trocadas a cada 4 horas, e as máscaras de tecidos não oferecem uma proteção muito alta.

## 4.2 Vacinas

Desde do início da pandemia foram desenvolvidas diversas vacinas, sendo que algumas delas estão sendo aplicadas no Brasil. Na Tabela 3 são apresentadas as vacinas e a probabilidade de proteção de cada uma delas.

Tabela 3: Relação entre vacinas e probabilidade de proteção.

Fabricante	Proteção
Astrazeneca	70.42%
Pfizer	95%
Janssen	94%
Sinovac	50.38%

Fontes: [4, 23].

## 5 SISTEMAS DE SIMULAÇÃO DE EPIDEMIAS

### 5.1 Sistemas Multiagentes

Sistemas multiagentes são sistemas compostos por agentes (inteligentes) que estarão situados em um ambiente e são capazes de interagir para resolver problemas complexos [25]. Um agente pode ser visto como um sistema de computador capaz de responder a estímulos de entrada (chamadas percepções), e por meio de um processo de raciocínio e planejamento, gerar uma saída no formato de ações no ambiente [25]. O paradigma de sistemas multiagentes fornece os benefícios de: (i) possibilitar resolver problemas complexos de forma distribuída, sem ponto central de processamento e falha, onde recursos e capacidades são distribuídos pela rede de agentes interconectados; (ii) permitir a modelagem de sistemas através da concepção de agentes autônomos inteligentes, capazes de se comunicar, como principal componente; e (iii) dentro do contexto deste trabalho, permitir a simulação de comportamentos de entidades complexas, como seres humanos.

Existem muitas plataformas e linguagens de programação orientada a agentes, como por exemplo NetLogo [24], GAMA [21], Jason [6], Jadex, GOAL, 2APL, MetateM, como discutido em [5]. Para o desenvolvimento do sistema de simulação proposto nesse estudo, a plataforma Jason [6] foi escolhida. A plataforma Jason [6] oferece um *framework* para implementação de sistemas multiagentes, onde cada agente é implementado a partir da definição

**Tabela 4: Variáveis de entrada utilizadas pelo sistema de simulação de epidemias.**

Variável	Tipo	Descrição
Tamanho do <i>grid</i>	Inteiro	Controla o tamanho dos lados do ambiente.
Número de indivíduos	Inteiro	Controla a quantidade de agentes presentes no <i>grid</i> .
Paciente 0	Inteiro	Controla a quantidade inicial de agentes infectados.
Protegidos	Inteiro	Define a quantidade de indivíduos utilizando máscara.
Vacinados	Inteiro	Define a quantidade de indivíduos vacinados.
Área de contágio	Inteiro	Define a distância (Manhattan) mínima para que 2 ou mais agentes estejam em contato.

de atitudes mentais, como crenças, desejos, intenções [17]. Jason estende a linguagem de programação de agentes AgentSpeak introduzida por Rao [16], que é baseada em um paradigma declarativo de fácil compreensão.

Uma das grandes vantagens da utilização da plataforma Jason [6], em virtude da arquitetura de agentes e linguagem de programação utilizada é que ela simplifica a implementação de sistemas de simulação por pessoas não especialistas, consequência da programação ser baseada em conceitos humanos (atitudes mentais). Outra vantagem da utilização dessa plataforma é a integração facilitada com ambientes, utilizados para criar interfaces com o mundo real em aplicações reais, ou mesmo simular ambientes reais ou virtuais. Para este estudo, é de fundamental interesse simulações com interfaces que demonstram o avanço de uma epidemia. O mesmo pode, inclusive, ser utilizado para conscientização das pessoas quanto às medidas preventivas apresentadas na Seção 4.1 e quanto à vacinação apresentadas na Seção 4.2.

O sistema de simulação implementado consiste em um sistema multiagente, onde os indivíduos de uma sociedade são modelados a partir de comportamentos simples, e considerando suas interações através do ambiente, e as características atribuídas a eles, o modelo de contaminação descrito na Seção 3 é verificado. Basicamente, no sistema de simulação proposto possui um ambiente monolítico, onde agentes (simulando indivíduos) se movimentam através do ambiente, sendo a movimentação realizada com auxílio da geração de números aleatórios. Deste modo, tornando os encontros entre os indivíduos aleatórios. As transições de estados dos agentes ocorrem por meio do modelo SIR. Na próxima seção são apresentadas as variáveis utilizadas no sistema de simulação de epidemias desenvolvido.

## 5.2 Variáveis utilizadas

Para o desenvolvimento do sistema de simulação de epidemias, foram modeladas algumas variáveis que permitem calcular a transição de estado do modelo SIR dado a interação dos indivíduos no ambiente. As variáveis de entrada utilizadas neste estudo, seu tipo e descrição são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 5: Variáveis comportamentais do sistema de simulação de epidemias.**

Variável	Tipo	Descrição
Vacina	Átomos	Permite ao agente saber se está vacinado.
Tipo de Máscara	Átomos	Permite ao agente saber se está de máscara e de qual tipo: PFF2, Pano ou Cirúrgica.
Período de Incubação	Inteiro	Define a quantidade de dias para o início de transmissão desde que o agente foi infectado.
Período de Transmissão	Inteiro	Define a quantidade de dias para que o agente transite para o estado removido desde que o agente começou a transmitir.
Estado do SIR	Átomos	Define em qual categoria o agente está no modelo SIR (suscetível - infectado - removido).

A partir das variáveis apresentadas na Tabela 4, foi possível implementar agentes que simulam o comportamento dos indivíduos, bem como a transição entre os estados do modelo SIR apresentados na Figura 2. Por exemplo, a utilização de máscaras, que reduz a de determinado indivíduo contaminar outros indivíduos, caso este esteja no estado “infectado” do modelo SIR, bem como evitar que o mesmo transite do estado “suscetível” para o estado “infectado”, considerando que a máscara fornece um meio de proteção, como descrito na Seção 4.1. Na Tabela 5 são apresentadas as variáveis utilizadas para a modelagem de comportamentos, e transição de estados do modelo SIR, onde são apresentados seus tipos e uma breve descrição de cada variável.

## 5.3 Agentes

Os agentes desenvolvidos possuem o objetivo de simular os indivíduos de uma sociedade passando por uma epidemia. Na simulação, não são simulados somente os encontros e interações entre indivíduos dessa sociedade, atualizando o modelo SIR, mas também os comportamentos mais complexos que indivíduos podem realizar para o controle da epidemia.

Neste estudo, cada agente modelado no sistema de simulação equivale a um indivíduo na sociedade, e considera diversas variáveis relacionadas à transmissão da COVID-19, levando em consideração principalmente os dados de prevenção definidos pela OMS, ou seja: (i) utilização de máscara; (ii) manter o distanciamento social sempre que possível; e (iii) utilizar ambiente abertos sem aglomerações. Além disso, durante a simulação, a condição dos indivíduo como vacinados ou não foi considerada, assim como o quanto isso reflete na transmissão do vírus.

Do ponto de vista do comportamento dos agentes simulando indivíduos, basicamente, um agente tem o objetivo de se mover pelo ambiente pré-definido de forma aleatória, gerando encontros com outros indivíduos também movimentando-se pelo ambiente. Na seção seguinte, o ambiente modelado para a simulação de epidemias é descrito.

## 5.4 Ambiente

Neste trabalho, o ambiente desenvolvido foi modelado de forma monolítica, pois trata-se de um ambiente sem divisões, onde todos os agentes têm acesso a todo o ambiente e podem interagir no mesmo. Esta abordagem foi selecionada exatamente para simular situações reais, onde os indivíduos de uma sociedade normalmente não são impedidos de se movimentar pelo ambiente.

Para promover um aspecto de análise, que possibilite a visualização do avanço de uma epidemia em relação ao estado dos indivíduos (de acordo com os estados previstos no modelo SIR e suas respectivas cores), utilizou-se um ambiente de tamanho pré-definido no formato de um *grid* computacional simples. Nesse ambiente simulado, os agentes são capazes de se mover e interagir com outros agentes. Os agentes não são capazes de influenciar o ambiente de forma ampla, mas apenas em sua área de contágio.

A Figura 4 demonstra um exemplo da interface gráfica para visualização da evolução de uma epidemia, correspondente a execução do sistema de simulação de epidemias. Além disso, pode-se observar cada agente da simulação, os quais correspondem os pontos verdes, vermelhos e pretos, onde agentes na cor vermelha correspondem à indivíduos no estado de “infetado”, ou seja, indivíduos positivados para COVID-19, agentes na cor verde correspondem à indivíduos “susceptíveis” e agentes na cor preta correspondem à indivíduos “removidos”, de acordo com o modelo SIR. Quando um agente “susceptível” (na cor verde) entra na área de contágio de um agente “infetado” (na cor vermelha), o sistema calcula a probabilidade de contágio baseada nas características dos agentes e na probabilidade de infecção. Caso o agente “susceptível” seja infetado, ele passa para o estado “infetado” do modelo SIR, passando a ter a cor vermelha na simulação visual, após um período de dias de transmissão o agente transita para o estado “removido”, passando a ter a cor preta na simulação.

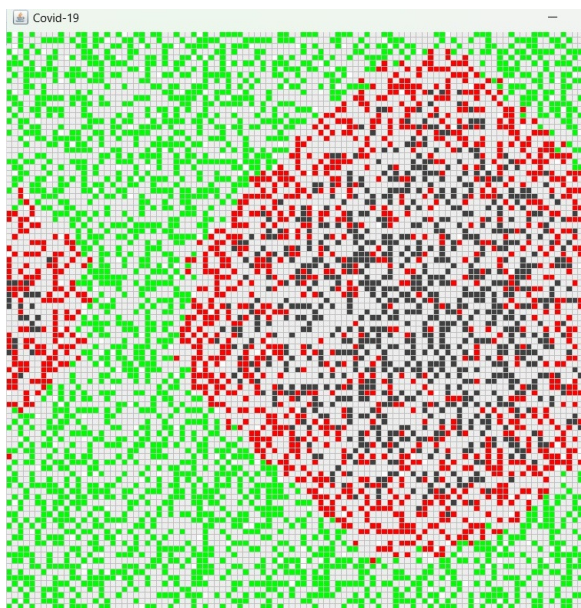


Figura 4: Ambiente para visualização de transmissão.

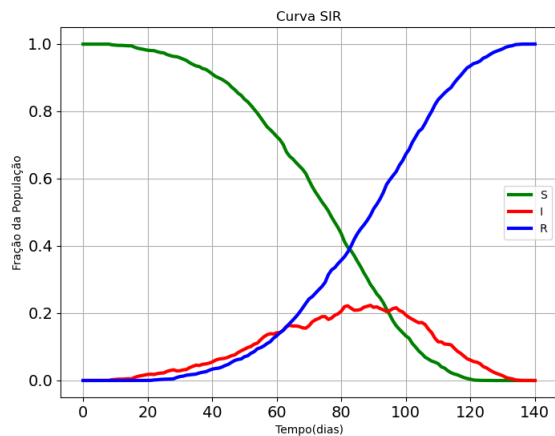


Figura 5: Validação do sistema em relação ao modelo SIR.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar o sistema proposto, foram realizadas várias simulações de transmissão da COVID-19, demonstrando-se a evolução da pandemia através do modelo SIR. Nessa seção são apresentadas algumas das simulações realizadas e os resultados obtidos.

Os experimentos realizados objetivam verificar o efeito da utilização de máscaras, vacinas e distanciamento social na evolução do contágio. Para os experimentos, o tamanho dos lados do *grid* foi fixado em 100 unidades, o número de pacientes 0 (pacientes inicialmente infetados) foi fixado em 1 agente, a distância de contágio foi definida em 3 unidades, e a probabilidade de infecção da doença havendo um contato foi fixada em 63.2% [2]. Essa probabilidade é ajustada de acordo com as medidas de prevenção e vacinação dos indivíduos.

A distribuição dos tipos de máscara utilizadas foi baseada em [10] e a distribuição das vacinas aplicadas baseada em [20], onde as vacinas Pfizer®, Astrazeneca® e Sinovac® tiveram seu valor absoluto reduzido pela metade, já que as mesmas precisam de pelo menos 2 doses para garantir imunidade. Já o período de incubação do vírus no agente e de transmissão do vírus foram definidos em 6 e 5 dias, respectivamente, baseados nos valores médios demonstrados em [9].

Nos experimentos em que apenas a fração de agentes utilizando máscaras ou vacinas foi alterada, a população foi mantida constante em 5000 agentes (50% das posições do *grid* ocupadas). Um exemplo que demonstra o resultado de uma simulação, respeitando o modelo SIR, onde o número de agentes vacinados ou utilizando máscara é 0, pode ser observado na Figura 5.

Com a finalidade de avaliar tanto os aspectos de prevenção de transmissão, destacados como medidas imediatas descritas na Seção 4.1, como também a progressão de uma epidemia em uma população (parcialmente) imunizada a partir de vacinas, foram elaborados os seguintes experimentos: (i) na Seção 6.1, é analisado a transmissão da COVID-19 em uma população onde (alguns) indivíduos utilizam máscaras como medida de proteção imediata, considerando as proporções de 50% e 100% dos indivíduos utilizando máscaras; (ii) na Seção 6.2, é analisado a transmissão da

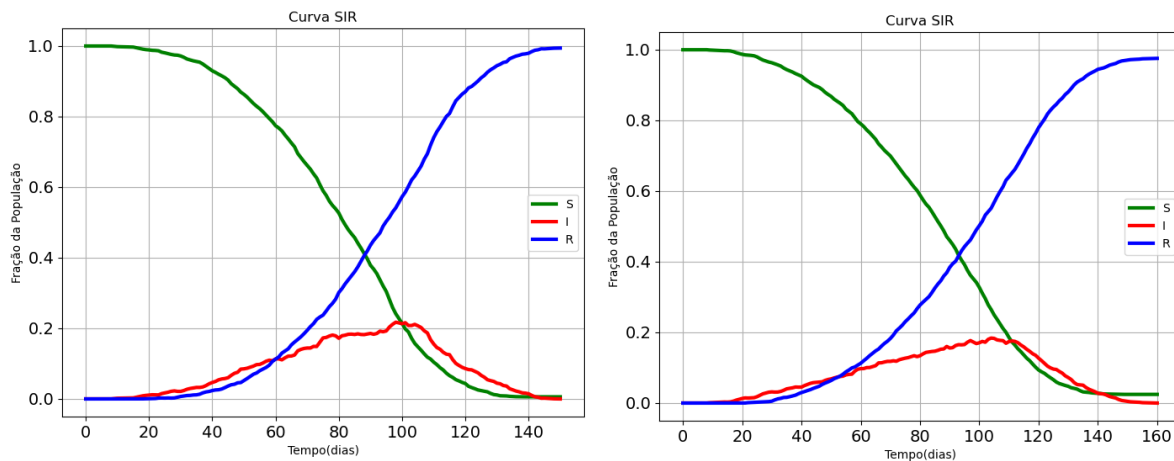


Figura 6: Resultado da simulação para uma população com 50% (esquerda) e 100% (direita) dos indivíduos utilizando máscara.

COVID-19 em uma população onde (alguns) indivíduos estão vacinados, considerando as proporções de 50%, 75%, 85% e 100% dos indivíduos da população vacinados; e (iii) na Seção 6.3, é analisada a transmissão da COVID-19 em um ambiente com diferentes proporções de ocupação pelos indivíduos, ou seja, a existência de um distanciamento social adequado ou não.

É importante ressaltar que em todos os gráficos apresentados nesta seção são resultantes das simulações realizadas, demonstradas através do modelo SIR. Nos gráficos, a linha em verde representa os indivíduos suscetíveis, em vermelho os infectados e, por fim, em azul os removidos.

### 6.1 A relação da máscara e o contágio da COVID-19

Um fator relevante para a prevenção da transmissão da COVID-19, como descrito na Seção 4.1, é a utilização de máscaras de proteção. Com o intuito de simular o avanço de uma epidemia onde diferentes proporções da população seguem as medidas preventivas, é possível configurar o sistema de simulação desenvolvido especificando a porcentagem de indivíduos da população com máscaras durante a simulação.

Para explorar esse aspecto do sistema de simulação de epidemias, executou-se 2 experimentos considerando a utilização de máscaras pelos indivíduos. Cabe salientar que existem diferentes tipos de máscaras com diferentes níveis de proteção, como apontado por [14]. Nas simulações executadas, a população utiliza 3 tipos diferentes de máscaras: a PFF2, a cirúrgica e a de algodão, onde a probabilidade de proteção associada a cada uma delas corresponde a 98%, 89% e 40%, respectivamente. Esses valores também são apresentados na Tabela 2.

Na Figura 6 são apresentados os resultados das simulações realizadas considerando o uso de máscaras, onde: (i) na simulação da esquerda, 50% da população está utilizando máscaras; e (ii) na simulação da direita, 100% da população está utilizando máscaras. Pode-se observar que o aumento de indivíduos utilizando máscara reflete diretamente em uma menor taxa de infectados e removidos.

### 6.2 A relação da vacina e o contágio da COVID-19

Outro fator de extrema importância, como fortemente destacado durante o período de pandemia por todos os órgãos de saúde mundiais, é a vacinação. Porém, no contexto da pandemia por COVID-19, dada a velocidade de transmissão da doença, mesmo com a produção de vacinas em tempo recorde, o avanço em relação a vacinação da população foi bastante lento. Em um sistema de simulação de epidemias, é muito importante poder incorporar esse tipo de informação, configurando a porcentagem da população vacinada, observando o comportamento da transmissão sobre essa população. Isso permite não só entender o fenômeno de transmissão sobre uma população já (parcialmente) vacinada, mas também permite tomar ações estratégicas para reduzir a transmissão da mesma.

Para explorar esse aspecto do sistema de simulação de epidemias desenvolvido, foram executados alguns experimentos alterando a porcentagem de indivíduos da população vacinados, considerando as proporções de 50%, 75%, 85% e 100%. Para essas simulações os indivíduos poderiam receber qualquer uma das 4 vacinas apresentada na Tabela 3, ou nenhuma vacina, ficando imunizados de acordo com a proteção contra contágio conhecida para cada vacina. Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os resultados dessas simulações. Pode-se observar através das projeções gráficas baseadas no modelo SIR que o número de infectados diminui de forma significativa para todas as simulações, onde, para a simulação com 100% de indivíduos vacinados (gráfico direito da Figura 8) o número de indivíduos infectados é próximo a zero.

### 6.3 A relação do distanciamento social e o contágio da COVID-19

Outro fator relevante enfatizado durante a pandemia por COVID-19 foi o distanciamento social. Enquanto vacinas não eram produzidas, o distanciamento social se tornava uma das medidas imediatas de prevenção, como descrito na Seção 4.1.

O aspecto de distanciamento social pode ser analisado no simulador de epidemias desenvolvido através da especificação da proporção do *grid* que é ocupado por agentes. Ou seja, é possível

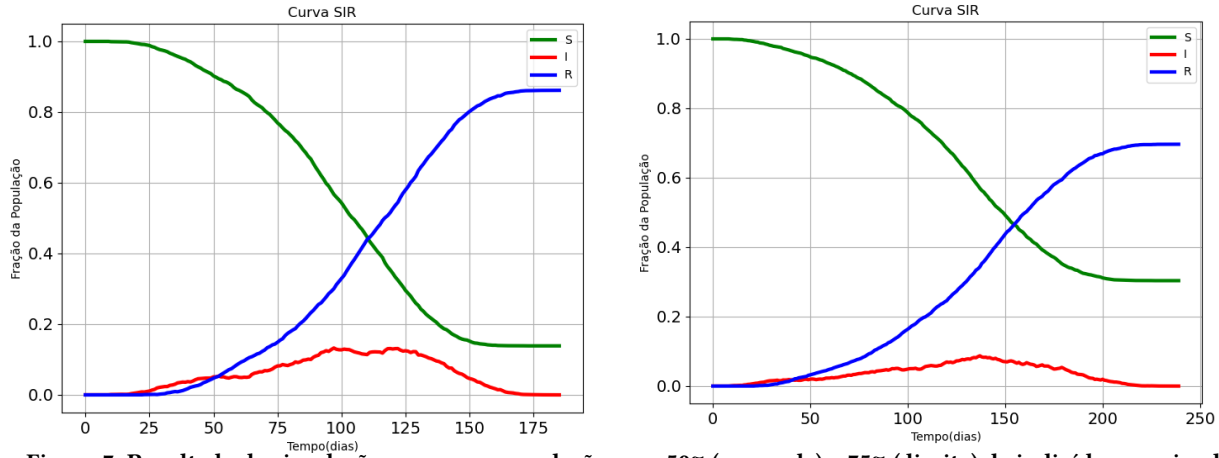


Figura 7: Resultado da simulação para uma população com 50% (esquerda) e 75% (direita) de indivíduos vacinados.

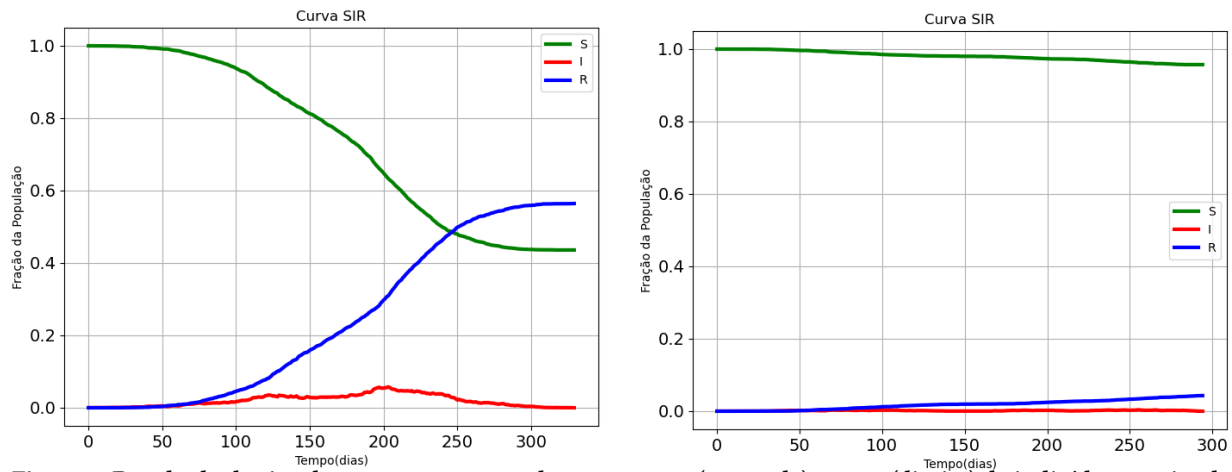


Figura 8: Resultado da simulação para uma população com 85% (esquerda) e 100% (direita) de indivíduos vacinados.

especificar valores que indicam a proporção de ocupação do *grid*, representando o distanciamento social em que, quanto maior a proporção ocupada por indivíduos no ambiente, menor é o distanciamento social na simulação.

Na Figura 9 pode-se observar os resultados das simulações realizadas, sendo configuradas para uma proporção de 25% do ambiente ocupado por indivíduos (gráfico superior na Figura 9), 12.5% (gráfico central na Figura 9) e 10% (gráfico inferior na Figura 9). A partir da variação da proporção de ocupação do espaço do ambiente, é possível notar que ela é proporcional à taxa de indivíduos infectados.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu avaliar três fatores propostos pela OMS em relação à prevenção da COVID-19, sendo a utilização de máscara, o distanciamento social e a vacinação<sup>1</sup>. Foi possível observar que, se os métodos de prevenção forem bem empregados, eles permitem a

diminuição tanto dos números de infectados quanto de removidos dentro da população.

Existem inúmeras direções de trabalhos futuros para o sistema desenvolvido, entre elas: (i) incorporar outras variáveis nas simulações, onde são muitas as variáveis que podem ser incorporadas a este modelo, tornando ele cada vez mais realistas; (ii) analisar comportamentos mais complexos, simulando diferentes perfis de indivíduos na população, como por exemplo, comportamentos associados à utilização de máscaras de forma correta ou a resistência em vacinar-se; (iii) simular diferentes formatos de ambiente, como locais de trabalho e hospitais, onde estes podem influenciar na disseminação da doença, aumentando ou diminuindo o contágio devido às suas características e papéis no ambiente; (iv) Implementar outros modelos analíticos de contaminação e comparar com o modelo desenvolvido, como por exemplo o SIRD que adiciona um grupo de indivíduos que faleceram, o SIRV que adiciona um estado final imune para quem for vacinado, ou o SEIR que adiciona um estado transitório de exposto entre o suscetível e o infectado.

<sup>1</sup>Enquanto alguns dos experimentos executados são apresentados, pode-se observar que inúmeros outros podem ser realizados, combinando esses diferentes fatores.

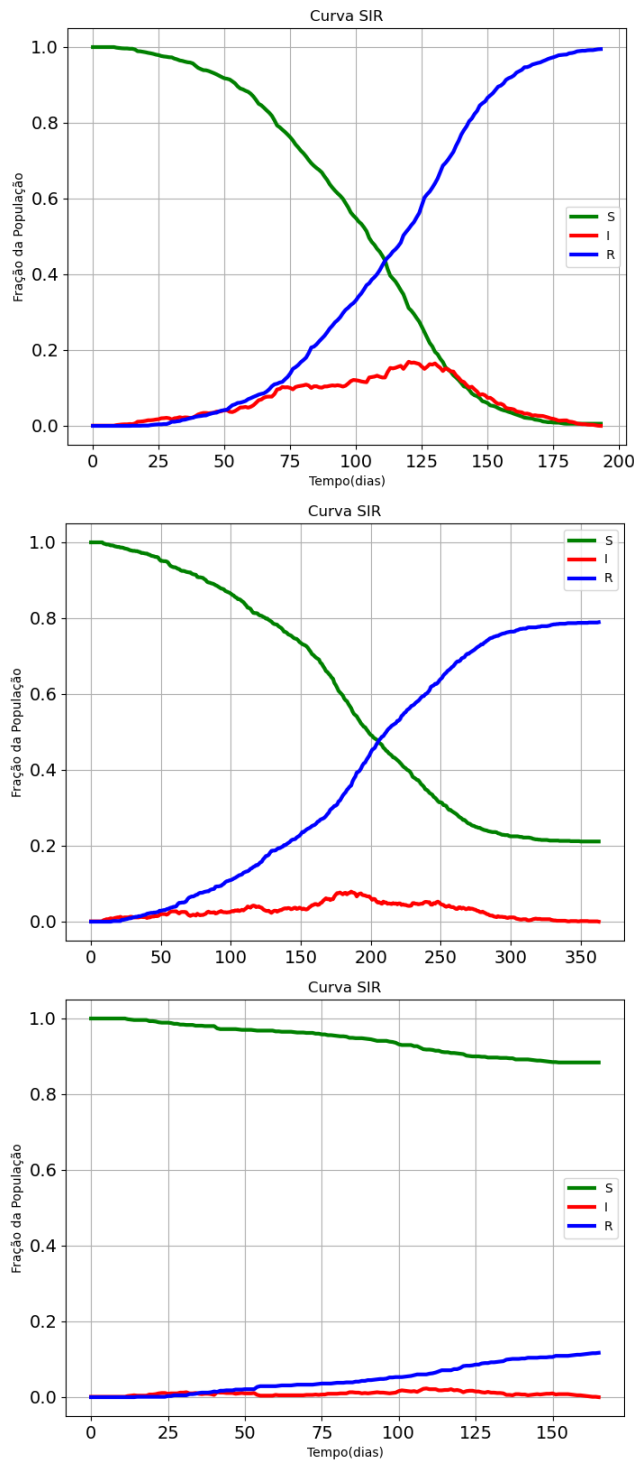


Figura 9: Simulação com um ambiente ocupado por indivíduos nas proporções de 25% (superior), 12.5% (central) e 10% (inferior).

## REFERÊNCIAS

- [1] Abar, S., Theodoropoulos, G.K., Lemariniere, P., O'Hare, G.M.: Agent based modelling and simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review* **24**, 13–33 (2017)
- [2] Agrawal, A., Bhardwaj, R.: Probability of covid-19 infection by cough of a normal person and a super-spreader. *Physics of Fluids* **33**(3), 031704 (2021).
- [3] Altun, K., Altuntaş, S., Dereli, T.: An interaction-oriented multi-agent sir model to assess the spread of sars-cov-2. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics* **50**(5), 1548 – 1559 (2021).
- [4] de Azevedo, T.C.P., de Freitas, P.V., da Cunha, P.H.P., Moreira, E.A.P., Rocha, T.J.M., Barbosa, F.T., de Sousa-Rodrigues, C.F., da Silva Ramos, F.W.: Efficacy and landscape of covid-19 vaccines: a review article. *Revista da Associação Médica Brasileira* **67**(3), 474–478 (2021).
- [5] Bordini, R.H., Dastani, M., Dix, J., Seghrouchni, A.E.F.: *Multi-Agent Programming: Languages, Tools and Applications*. 1st edn. (2009)
- [6] Bordini, R.H., Hübner, J.F., Wooldridge, M.: *Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason*. John Wiley & Sons (2007)
- [7] Bădică, A., Bădică, C., Ganzha, M., Ivanović, M., Paprzycki, M.: Multi-agent simulation of core spatial sir models for epidemics spread in a population. In: *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, pp. 1–7 (2020).
- [8] Costa, K.V.T.d., Carnaúba, A.T.L.: Transtornos do olfato e do paladar: sinais de alerta para infecção por sars-cov-2 (2020)
- [9] Ferretti, L., Ledda, A., Wymant, C., Zhao, L., Ledda, V., Abeler-Dörner, L., Kendall, M., Nurtay, A., Cheng, H.Y., Ng, T.C., Lin, H.H., Hinch, R., Masel, J., Kilpatrick, A.M., Fraser, C.: The timing of covid-19 transmission. *medRxiv* (2020).
- [10] Jacques, N., da Silveira, M.F., Hallal, P.C., Menezes, A.M.B., Horta, B.L., Mesenburg, M.A., Hartwig, F.P., Barros, A.J.D.: Uso de máscara durante a pandemia de covid-19 no brasil: resultados do estudo epicovid19-br. *Cadernos de Saúde Pública* **38**(6) (2022).
- [11] Kermack, W.O., McKendrick, A.G.: A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character* **115**(772), 700–721 (1927)
- [12] M Kröger, R.S.: Analytical solution of the sir-model for the temporal evolution of epidemics. part a: time- independent reproduction factor. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **53**(50), 505601 (2020)
- [13] Magalhães, P., Pinto, J.P.G., Angel, D.M.S.: A multiagent coronavirus model with territorial vulnerability parameters. *medRxiv* (2020)
- [14] Morais, F.G., Sakano, V.K., de Lima, L.N., Franco, M.A., Reis, D.C., Zanchetta, L.M., Jorge, F., Landolfo, E., Catalani, L.H., Barbosa, H.M.J., John, V.M., Artaxo, P.: Filtration efficiency of a large set of covid-19 face masks commonly used in brazil. *Aerosol Science and Technology* **55**(9), 1028–1041 (2021).
- [15] Palka, P., Olszewski, R., Kęsik-Brodacka, M., Wendland, A., Nowak, K., Szczepankowska-Bednarek, U., Liebers, D.T.: Using multiagent modeling to forecast the spatiotemporal development of the covid-19 pandemic in poland. *Scientific Reports* **12**(1), 1–18 (2022)
- [16] Rao, A.S.: AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language. In: *Proceedings of the 7th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World : agents breaking away: agents breaking away*, pp. 42–55. MAAMAW '96, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA (1996)
- [17] Rao, A.S., Georgeff, M.P.: Modeling rational agents within a bdi-architecture. *KR* **91**, 473–484 (1991)
- [18] Soares, K.H.D., da Silva Oliveira, L., da Silva, R.K.F., de Assis Silva, D.C., do Nascimento Farias, A.C., Monteiro, E.M.L.M., Compagnon, M.C.: Medidas de prevenção e controle da covid-19: revisão integrativa. *Revista eletrônica acervo saúde* **13**(2), e6071–e6071 (2021)
- [19] de Sousa Neto, A.R., de Freitas, D.R.J.: Utilização de máscaras: indicações de uso e manejo durante a pandemia da covid-19. *Cogitare enfermagem* **25** (2020)
- [20] SUS: Painel de distribuição de vacinas covid-19. [https://infoms.saude.gov.br/extensions/DEMAS\\_C19VAC\\_Distr/DEMAS\\_C19VAC\\_Distr.html](https://infoms.saude.gov.br/extensions/DEMAS_C19VAC_Distr/DEMAS_C19VAC_Distr.html)
- [21] Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., Drogoul, A.: Building, composing and experimenting complex spatial models with the gama platform. *GeoInformatica* **23**(2), 299–322 (2019)
- [22] Velavan, T.P., Meyer, C.G.: The covid-19 epidemic. *Tropical medicine & international health* **25**(3), 278 (2020)
- [23] WHO: The janssen ad26.cov2.s covid-19 vaccine: What you need to know. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/the-j-j-covid-19-vaccine-what-you-need-to-know>
- [24] Wilensky, U., Rand, W.: *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. Mit Press (2015)
- [25] Wooldridge, M.: *An introduction to multiagent systems*. John wiley & sons (2009)