UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO

PROGRAMA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES CAMINHOS DO SERTÃO

CURSO DE LICENCIATURA EM MATEMÁTICA

DOUGLAS CAVALCANTE DOS REIS

ANÁLISE DA DINÂMICA DA COVID-19 EM AMARANTE DO MARANHÃO-MA: uma abordagem via modelo SIR

AMARANTE – MA

2026

DOUGLAS CAVALCANTE DOS REIS

ANÁLISE DA DINÂMICA DA COVID-19 EM AMARANTE DO MARANHÃO-MA: uma abordagem via modelo SIR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Matemática – Licenciatura da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Matemática.

Orientador: Prof. Msc. Luis Jorge Souza dos Anjos

AMARANTE – MA

2026

R375a

Reis, Douglas Cavalcante dos

Análise da dinâmica da covid-19 em Amarante do Maranhão-MA: uma abordagem via modelo SIR. / Douglas Cavalcante dos Reis. – Amarante do Maranhão, MA, 2026.

36 f. ; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática) Programa de Formação de Professores Caminhos do Sertão – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2026.

1. Modelo SIR. 2. COVID-19. 3. Modelagem Matemática. 4. Equações Diferenciais. I. Amarante do Maranhão.

CDU 51

Ficha elaborada pelo Bibliotecário: **Mateus de Araújo Souza CRB – 13/955**

DOUGLAS CAVALCANTE DOS REIS

ANÁLISE DA DINÂMICA DA COVID-19 EM AMARANTE DO MARANHÃO-MA: uma abordagem via modelo SIR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Matemática – Licenciatura da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Matemática.

Aprovado em: 12 / 06 / 2026

BANCA EXAMINADORA

Luis Jorge Souza dos Anjos.

Prof. Msc. Luis Jorge Souza dos Anjos
Orientador – UEMASUL

Anderson BS Cavalcante

Prof. Dr. Anderson Brasil Silva Cavalcante
Membro – UEMASUL

Thalyson Patrick Martins da Silva.

Prof. Esp. Thalyson Patrick Martins da Silva
Membro – UEMASUL

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou no meu potencial e nunca desistiu de mim, mesmo eu tendo feito isso algumas vezes. Suas palavras e incentivos sempre foram e continuarão sendo o meu maior alicerce.

AGRADECIMENTOS

Nessas poucas palavras quero expressar o meu carinho e reconhecimento a algumas pessoas que contribuíram comigo nessa trajetória durante o Curso de Licenciatura em Matemática.

Primeiramente, agradeço a Deus, por toda força e coragem que Ele me proporcionou ter, não somente durante o curso, mas em toda a minha vida.

Agradeço à minha esposa Aline por sempre estar ao meu lado e sempre me impulsionar para cima e para frente. Quero dizer-lhe que você é um exemplo de esposa e que, sem a sua ajuda, eu jamais teria conseguido chegar aonde cheguei.

Agradeço também aos meus dois filhos, Anny Hadassa e Arthur Benjamin, por serem o motivo de eu suportar todas as dificuldades e desafios diários; sem a responsabilidade de cuidar de vocês, jamais teria conseguido chegar ao fim desse curso.

Agradeço à minha mãe, dona Enieres, pela ajuda em momentos tão difíceis dessa minha trajetória. Também não posso deixar de agradecer à minha irmã Deilliane, também formanda no Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas: obrigado, mana, por tudo – você é uma mulher extraordinária.

Agradeço a todos os meus professores que, durante esses quatro anos, se esforçaram para nos ensinar da melhor maneira possível, fornecendo toda a bagagem de sabedoria e conhecimento necessária para chegarmos ao final do curso aptos para a sala de aula, para a pesquisa ou para quaisquer outras carreiras que nos propusermos a seguir.

Agradeço, por fim, a todos os meus colegas e amigos de curso, irmãos nessa caminhada, com os quais dividi longas horas de estudo e muitos momentos de alegria. Levarei cada um de vocês no meu coração para toda a vida.

A todos aqui citados: **eu amo vocês**.

"Embora todo modelo seja uma simplificação da realidade e, portanto, imperfeito, sua utilidade reside na capacidade de compreender o essencial dos fenômenos."

(Adaptado de George Box e Bassanezi)

RESUMO

A pandemia da COVID-19 evidenciou a importância da utilização de modelos matemáticos para compreender e prever a propagação de doenças infecciosas em diferentes contextos sociais e geográficos. Nesse cenário, o modelo SIR (Suscetíveis–Infectados–Removidos), proposto por Kermack e McKendrick (1927), destaca-se como uma ferramenta fundamental para a análise da dinâmica epidemiológica, permitindo estimar parâmetros essenciais para a compreensão do comportamento das epidemias. O presente trabalho aplica o modelo SIR à evolução da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA, com o objetivo de analisar quantitativamente a trajetória da doença a partir de dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde. Buscam-se estimar parâmetros como a taxa de transmissão (β), a taxa de remoção (γ) e o número reprodutivo básico (R_0), fornecendo uma visão detalhada sobre a dinâmica local da epidemia. Além da relevância científica, a pesquisa contribui socialmente ao demonstrar o potencial da modelagem matemática como ferramenta de apoio à gestão pública e à formulação de estratégias de controle epidemiológico. Por fim, o estudo reforça a importância da interface entre matemática, epidemiologia e educação científica, evidenciando como modelos matemáticos aplicados a problemas reais podem fortalecer o pensamento crítico e investigativo no âmbito acadêmico.

Palavras-chave: Modelo SIR. COVID-19. Modelagem Matemática. Equações Diferenciais. Amarante do Maranhão.

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic highlighted the importance of mathematical models in understanding and predicting the spread of infectious diseases across different social and geographic contexts. In this scenario, the SIR model (Susceptible–Infected–Removed), proposed by Kermack and McKendrick (1927), stands out as a fundamental tool for analyzing epidemiological dynamics, allowing the estimation of essential parameters for understanding the behavior of epidemics. This study applies the SIR model to the evolution of COVID-19 in the municipality of Amarante do Maranhão, Brazil, with the objective of quantitatively analyzing the trajectory of the disease using data provided by the Municipal Health Department. The work seeks to estimate parameters such as the transmission rate (β), the removal rate (γ), and the basic reproductive number (R_0), offering a detailed view of the local epidemic dynamics. In addition to its scientific relevance, the research presents significant social contributions by demonstrating the potential of mathematical modeling as a tool to support public management and the formulation of epidemiological control strategies. Finally, the study reinforces the importance of the interface between mathematics, epidemiology, and scientific education, showing how mathematical models applied to real-world problems can strengthen critical and investigative thinking within the academic sphere.

Keywords: SIR model. COVID-19. Mathematical Modeling. Differential Equations. Amarante do Maranhão.

Lista de Figuras

1.1 Cerimônia de inauguração do centro de atendimento à COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA 7

4.1 Crescimento exponencial de infectados no cenário sem controle ($R_0 = 2{,}5$) . 15
4.2 Dinâmica completa do modelo SIR – cenário sem controle ($R_0 = 2{,}5$) . . . 17
4.3 Comparação entre os cenários sem controle e com controle (efeito de "achatar a curva") 18
4.4 Simulação completa do modelo SIR aplicado à COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA 19

Sumário

AGRADECIMENTOS **v**

RESUMO **vii**

ABSTRACT **viii**

LISTA DE FIGURAS **ix**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 Problema e Justificativa 2

1.2 Objetivos 3

1.2.1 Objetivo Geral 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 Estrutura do Trabalho 3

1.4 Equações Diferenciais Ordinárias 4

1.5 A Modelagem Matemática 5

1.6 A COVID-19 5

2 O MODELO SIR **8**

2.1 Propriedades Teóricas do Modelo SIR 8

2.2 Dinâmica de Transmissão e Parâmetros-Chave 10

2.3 Formulação Normalizada das Equações Diferenciais 11

3 METODOLOGIA **12**

3.1 Tipo de Estudo 12

3.2 Amostra e Fonte de Dados 12

3.3 Procedimentos e Técnicas de Análise 12

3.4 Aspectos Éticos 13

4 ANÁLISE E SIMULAÇÕES **14**

4.1 Cenário 1: Propagação sem Controle 14

4.1.1 Cálculo da Taxa de Recuperação γ 14

4.1.2 Relação entre β, γ e R_0 14

4.1.3 Cálculo da Taxa de Transmissão β 14

4.1.4 Curva de Crescimento do Número de Infectados 15
4.1.5 Sistema de Equações Diferenciais para Amarante do Maranhão – MA 15
4.1.6 Interpretação Epidemiológica para Amarante do Maranhão 16
4.1.7 Pico da Epidemia – Resultado Teórico 16
4.2 Cenário 2: Controle da Epidemia 17
4.2.1 Parâmetros no Cenário de Controle 18

5 CONCLUSÃO **20**

REFERÊNCIAS **22**

1 INTRODUÇÃO

O avanço da pandemia da COVID-19, desencadeada pelo vírus SARS-CoV-2, evidenciou a necessidade de compreender, por meio de instrumentos científicos rigorosos, a dinâmica de propagação de doenças infecciosas em diferentes contextos sociais e geográficos. Nesse cenário, a matemática aplicada assume papel central, oferecendo modelos capazes de descrever, prever e interpretar fenômenos complexos que envolvem variáveis epidemiológicas e comportamentais.

Entre os modelos mais amplamente utilizados para a compreensão do comportamento de epidemias, destaca-se o modelo SIR (Suscetíveis–Infectados–Removidos), proposto por Kermack e McKendrick (1927), cuja estrutura se baseia em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs) que descreve a variação temporal dos indivíduos em diferentes estados epidemiológicos. A simplicidade e a capacidade de generalização desse modelo fazem dele uma ferramenta robusta para a análise da disseminação de vírus em populações homogêneas (HETHCOTE, 2000).

Com o surgimento da COVID-19, pesquisadores de diversas áreas mobilizaram-se para adaptar e aplicar o modelo SIR às novas realidades epidemiológicas, considerando fatores como taxa de transmissão, tempo de recuperação e impactos de medidas de contenção (LI et al., 2020; FENG, 2020). Tais modelagens têm desempenhado papel fundamental na formulação de estratégias de controle e no suporte à tomada de decisões governamentais, especialmente em contextos de incerteza e de rápida evolução da doença.

No Brasil, pesquisadores como Massad (2020) e Ferreira (2010) destacam a relevância da modelagem matemática não apenas como ferramenta de pesquisa científica, mas também como recurso didático que aproxima o ensino da matemática de situações reais, contribuindo para a formação crítica e analítica dos estudantes. Além disso, estudos realizados por Vargas e Bastos (2020), vinculados à Fundação Oswaldo Cruz, evidenciam a eficácia do modelo SIR na representação da evolução da COVID-19 em diferentes regiões do país, reforçando a importância de análises regionais baseadas em dados locais.

Nesse contexto, surge a questão norteadora do presente trabalho: de que forma o modelo SIR pode indicar a tendência de redução ou de aumento dos casos de COVID-19 em Amarante do Maranhão? Assim, utilizando o modelo SIR, analisa-se a trajetória da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA no período de janeiro a junho de 2025. O objetivo é aplicar a modelagem matemática, por meio de EDOs, para examinar quantitativamente o comportamento da epidemia nesse contexto regional específico. A partir de dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde, o estudo busca estimar parâmetros epidemiológicos como a taxa de transmissão (β), a taxa de remoção (γ) e o número reprodutivo básico (R_0), fornecendo uma visão precisa sobre a dinâmica da doença na localidade.

Além da relevância científica, o estudo apresenta uma contribuição social significativa ao utilizar a modelagem matemática como instrumento de compreensão e prevenção de crises sanitárias. Essa abordagem reforça o papel da matemática aplicada na análise de fenômenos concretos e na construção de políticas públicas baseadas em evidências, demonstrando que o raciocínio matemático transcende os limites da abstração e se torna ferramenta indispensável na gestão da saúde pública.

Por fim, a pesquisa pretende fortalecer a interface entre matemática, epidemiologia e educação científica, mostrando que a aplicação de modelos matemáticos em problemas reais não apenas aprimora a compreensão dos fenômenos estudados, mas também estimula o desenvolvimento do pensamento crítico e investigativo no âmbito acadêmico. Além de compreender o funcionamento das EDOs em contextos epidemiológicos, serão observados possíveis cenários de controle e evolução da doença.

1.1 Problema e Justificativa

A utilização de modelos matemáticos no estudo de epidemias tem-se consolidado como uma abordagem rigorosa e eficaz para a análise da dinâmica de transmissão de doenças infecciosas. Dentre os modelos compartimentais clássicos, o modelo SIR (Suscetíveis–Infectados–Removidos), formulado por Kermack e McKendrick (1927) e fundamentado em equações diferenciais ordinárias (EDOs), destaca-se pela sua capacidade de capturar, de forma simplificada e robusta, os mecanismos fundamentais de disseminação de um agente patógeno em uma população homogênea.

A presente investigação justifica-se pela necessidade de aplicar formalismos matemáticos em contextos epidemiológicos locais, com o intuito de compreender, por meio de uma abordagem quantitativa, o comportamento temporal da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA. Ao calibrar o modelo SIR com dados empíricos da localidade, é possível estimar parâmetros epidemiológicos essenciais, como a taxa de transmissão (β) e a taxa de remoção (γ), além de derivar o número reprodutivo básico (R_0), indicador-chave para a avaliação do potencial de propagação do vírus.

A modelagem matemática, nesse contexto, viabiliza não apenas a simulação da trajetória da doença, mas, sobretudo, a projeção de cenários futuros com base em condições iniciais e parâmetros ajustados aos dados reais. Tal capacidade preditiva permite inferir a tendência de crescimento ou declínio dos casos, subsidiando políticas públicas com base em evidências quantitativas. Além disso, a abordagem contribui para o fortalecimento da interface entre matemática aplicada e epidemiologia, evidenciando o papel da análise matemática como instrumento decisório em crises sanitárias.

Assim, a investigação proposta assume relevância tanto do ponto de vista acadêmico, ao fomentar o uso de EDOs em problemas reais, quanto do ponto de vista prático, ao oferecer subsídios técnicos para o enfrentamento de epidemias em contextos regionais

específicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar a modelagem matemática por meio do modelo SIR, baseado em equações diferenciais ordinárias, para analisar a trajetória da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento das EDOs no contexto epidemiológico;
- Utilizar dados reais do período de janeiro a junho de 2025, fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde de Amarante do Maranhão – MA, como condições iniciais do modelo SIR;
- Adotar parâmetros epidemiológicos consagrados pela literatura para a COVID-19, justificando sua aplicabilidade ao contexto local;
- Estimar os parâmetros β (transmissão) e γ (recuperação) a partir da relação $R_0 = \beta/\gamma$, com R_0 referenciado na literatura;
- Avaliar a evolução da doença e possíveis cenários de controle.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, de modo a garantir uma exposição lógica e progressiva dos conceitos, métodos e resultados obtidos.

No **Capítulo 1**, apresenta-se a introdução do estudo, contemplando a contextualização do tema, a problemática, a justificativa, os objetivos geral e específicos, bem como a estrutura do trabalho.

O **Capítulo 2** é dedicado ao modelo SIR, apresentando sua formulação por meio de equações diferenciais ordinárias, bem como propriedades teóricas relevantes – tais como existência, unicidade, positividade das soluções e conservação da população total –, além da interpretação epidemiológica dos parâmetros envolvidos.

O **Capítulo 3** descreve a metodologia adotada na pesquisa, detalhando o tipo de estudo, a origem e a natureza dos dados utilizados, os procedimentos de análise e as ferramentas empregadas para a simulação do modelo.

No **Capítulo 4**, são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações do modelo SIR aplicadas ao município de Amarante do Maranhão – MA, incluindo a análise

de diferentes cenários (com e sem intervenções) e a interpretação dos resultados à luz da dinâmica epidemiológica.

Por fim, o **Capítulo 5** traz as considerações finais, destacando as principais conclusões do estudo, suas contribuições no âmbito científico e educacional, bem como possíveis encaminhamentos para pesquisas futuras.

1.4 Equações Diferenciais Ordinárias

As Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) constituem um ramo fundamental da matemática aplicado à descrição de fenômenos cuja evolução depende da variação de uma ou mais grandezas ao longo do tempo. Uma EDO é definida como uma equação que relaciona uma função desconhecida às suas derivadas, representando, portanto, taxas de variação que descrevem a dinâmica de um sistema. Segundo Boyce e DiPrima (2017, p. 3), esse tipo de equação é utilizado quando o comportamento de determinado fenômeno pode ser expresso como uma relação funcional entre a variável dependente e suas derivadas em relação a uma única variável independente, geralmente o tempo.

No contexto da epidemiologia matemática, as EDOs desempenham papel essencial na formulação de modelos como o SIR, uma vez que permitem representar a velocidade com que indivíduos transitam entre diferentes estados epidemiológicos – suscetíveis, infectados e removidos. Assim, cada equação diferencial do modelo descreve como a taxa de mudança em cada compartimento depende de parâmetros epidemiológicos, como a taxa de transmissão e a taxa de remoção. Dessa forma, as EDOs tornam-se instrumentos indispensáveis para a compreensão quantitativa da propagação de doenças e para a previsão de tendências epidemiológicas em diferentes cenários populacionais.

Conforme Massad (2020, p. 47):

> A utilização de modelos matemáticos baseados em equações diferenciais permite compreender de forma sistemática a dinâmica de transmissão das doenças infecciosas, possibilitando não apenas a descrição do fenômeno, mas também a previsão de cenários futuros. A modelagem epidemiológica, ao estruturar as relações entre suscetíveis, infectados e recuperados, oferece subsídios essenciais para a formulação de estratégias de intervenção, pois evidencia como pequenas alterações nos parâmetros de transmissão podem gerar grandes impactos no curso de uma epidemia. Nesse sentido, o emprego de equações diferenciais não representa apenas um recurso matemático, mas um instrumento de análise indispensável para o planejamento em saúde pública.

1.5 A Modelagem Matemática

A modelagem matemática consiste em um processo metodológico que busca representar fenômenos reais por meio de estruturas matemáticas capazes de descrever, interpretar e prever o comportamento desses fenômenos. Segundo Bassanezi (2002, p. 17), modelar significa "construir uma ponte entre o mundo real e o mundo matemático", transformando situações concretas em equações, funções ou sistemas que permitam analisar, com maior precisão, as relações existentes entre as variáveis envolvidas. Assim, a modelagem não se limita à aplicação direta de fórmulas, mas envolve um ciclo contínuo de simplificação, representação, análise e validação dos modelos construídos.

No contexto epidemiológico, a modelagem matemática torna-se particularmente relevante ao permitir que processos de transmissão de doenças sejam expressos de forma quantitativa. A partir de dados observados, podem-se formular modelos que traduzem a dinâmica entre indivíduos suscetíveis, infectados e recuperados, permitindo identificar padrões de disseminação, estimar parâmetros fundamentais e prever cenários futuros. De acordo com Massad, Burattini e Struchiner (2010), a modelagem aplicada à epidemiologia possibilita interpretar, de maneira lógica e sistemática, o comportamento de uma doença ao longo do tempo, avaliando o impacto de diferentes estratégias de intervenção.

Desse modo, a modelagem matemática configura-se como um instrumento científico poderoso, especialmente em períodos de crise sanitária como a pandemia da COVID-19. Ela viabiliza análises detalhadas sobre a propagação do vírus, auxilia na tomada de decisões governamentais e contribui para a elaboração de políticas públicas baseadas em evidências. Ao aplicar modelos como o SIR, fundamentados em equações diferenciais, torna-se possível compreender a dinâmica da epidemia em diferentes realidades populacionais, inclusive no contexto regional de Amarante do Maranhão, fornecendo informações confiáveis para análises epidemiológicas e educacionais.

1.6 A COVID-19

A pandemia de COVID-19, causada pelo vírus SARS-CoV-2, representou uma das mais graves crises sanitárias globais do século XXI, afetando praticamente todos os países e territórios. Desde a notificação dos primeiros casos em dezembro de 2019, organismos internacionais – em especial a Organização Mundial da Saúde (OMS) – acompanharam e consolidaram dados sobre casos confirmados, óbitos e a circulação de variantes, fornecendo um quadro comparativo entre diferentes regiões do planeta. Além do impacto sanitário direto (morbidade e mortalidade), a pandemia ensejou consequências socioeconômicas profundas: sobrecarga dos sistemas de saúde, interrupção de cadeias produtivas, aumento da pobreza e efeitos persistentes sobre a educação e a saúde mental.

No Brasil, a COVID-19 provocou elevado número de casos e óbitos, com grande heterogeneidade temporal e espacial entre estados e municípios. O acompanhamento nacional

foi centralizado, inicialmente, pelo Ministério da Saúde, que passou a consolidar boletins e painéis com casos confirmados, óbitos, recuperados e indicadores derivados (letalidade, incidência por 100.000 habitantes, ocupação de leitos). A resposta nacional incluiu, entre outras medidas, campanhas de vacinação em massa, protocolos de testagem, ações de comunicação e medidas não farmacológicas em diferentes períodos.

No estado do Maranhão, como em outros estados brasileiros, a pandemia evoluiu de modo não uniforme ao longo do tempo e entre municípios. A Secretaria de Estado da Saúde do Maranhão (SES-MA) publicou boletins epidemiológicos regulares que consolidam dados estaduais e municipais referentes a casos confirmados, óbitos e recuperados. Sobre o alcance real da doença no estado, Silva (2022, apud UFMA, 2022, grifo nosso) pondera:

> Se a gente quiser saber a real força da morte no Maranhão em 2020, temos que trabalhar com a mortalidade que excedeu o esperado e não trabalhar com o que já identificou como covid. O Maranhão foi o estado em que houve a maior subnumeração de óbito no Brasil, o que coloca em dúvida a informação de que a fatalidade aqui foi menor que em outras localidades do país.

Na Região Tocantina do Maranhão, a trajetória epidêmica seguiu tendências gerais do estado, com picos locais que refletiram fatores como fluxo interestadual, densidade urbana e capacidade de testagem. As secretarias municipais publicaram boletins epidemiológicos com séries temporais e indicadores locais (casos, óbitos, recuperados), sendo essas publicações a fonte primária para a análise local e para a aplicação do modelo SIR em um município específico.

Em Amarante do Maranhão – MA, a pandemia seguiu o ritmo da região Tocantina, com os casos aumentando de acordo com o contato entre pessoas que portavam o vírus, inclusive de forma assintomática. A Prefeitura Municipal disponibilizou testes rápidos e laboratoriais para a população, além de abrir um serviço específico para acolhimento e tratamento de pessoas infectadas.

A Figura 1.1 mostra a inauguração do centro, com autoridades cortando a fita simbólica. Segundo registros institucionais, o centro funcionou para atendimento de casos leves e moderados de COVID-19, com estrutura para coleta, observação e entrega de medicamentos.

A cidade de Amarante do Maranhão – MA possui uma população de aproximadamente 38.335 habitantes, segundo estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025). Por ser um município de pequeno porte, os cuidados em relação a vírus e doenças infecciosas devem ser tomados de forma rápida e eficaz.

No período de janeiro a junho de 2025, de acordo com dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde, foram realizados 260 testes rápidos, com 75 casos positivos. Esse número é preocupante para um município desse porte, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo e de ações preventivas. Com esses dados, é possível calibrar o

Figura 1.1: Cerimônia de inauguração do centro de atendimento à COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA



Fonte: Prefeitura Municipal de Amarante do Maranhão (2020).

modelo SIR e determinar possíveis cenários de evolução da doença, subsídios que podem ser utilizados pelos órgãos municipais para evitar a disseminação do vírus.

2 O MODELO SIR

Proposto por Kermack e McKendrick (1927), o modelo SIR divide a população em três compartimentos:

Suscetíveis (S): Indivíduos que ainda não foram expostos ao vírus e podem contrair a infecção.

Infectados (I): Indivíduos que estão com o vírus e possuem capacidade de transmiti-lo aos suscetíveis.

Removidos (R): Indivíduos que saíram do ciclo infeccioso, seja por recuperação (com imunização natural) seja por óbito.

Sua formulação baseia-se em um sistema de equações diferenciais ordinárias que descreve a dinâmica da população dividida nessas três classes. Além de sua aplicação prática na análise de epidemias, o modelo possui propriedades matemáticas importantes que garantem a consistência teórica de suas soluções.

Considere o sistema de equações diferenciais que define o modelo SIR clássico:

$$\begin{cases} \dfrac{dS}{dt} = -\beta SI \\ \dfrac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I \\ \dfrac{dR}{dt} = \gamma I \end{cases} \tag{2.1}$$

onde $S(t)$, $I(t)$ e $R(t)$ representam, respectivamente, o número de indivíduos suscetíveis, infectados e removidos no instante t, enquanto $\beta > 0$ representa a taxa de transmissão da doença e $\gamma > 0$ a taxa de recuperação (ou remoção).

2.1 Propriedades Teóricas do Modelo SIR

Teorema 2.1.1 (Existência e Unicidade das Soluções)**.** *Dadas condições iniciais $S(0) = S_0$, $I(0) = I_0$ e $R(0) = R_0$, com $S_0, I_0, R_0 \geq 0$, o sistema* (2.1) *possui uma única solução diferenciável definida para todo $t \geq 0$.*

Demonstração. O sistema pode ser escrito na forma vetorial

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = F(\mathbf{X}),$$

onde $\mathbf{X} = (S, I, R)$ e $F(\mathbf{X}) = (-\beta SI,\ \beta SI - \gamma I,\ \gamma I)$.

A função $F(\mathbf{X})$ é composta por polinômios nas variáveis S, I e R, os quais são contínuos e possuem derivadas parciais contínuas em todo domínio. Portanto, F é localmente Lipschitz contínua, satisfazendo as hipóteses do Teorema de Picard-Lindelöf. Logo, o sistema admite solução única para qualquer condição inicial. □

Teorema 2.1.2 (Positividade das Soluções)**.** *Se as condições iniciais satisfazem*

$$S_0 \geq 0, \quad I_0 \geq 0, \quad R_0 \geq 0,$$

então as soluções do sistema (2.1) *permanecem não negativas para todo* $t \geq 0$.

Demonstração. Da primeira equação do sistema,

$$\frac{dS}{dt} = -\beta\, S(t)\, I(t).$$

Como $\beta > 0$, $S(t) \geq 0$ e $I(t) \geq 0$, tem-se $dS/dt \leq 0$, ou seja, $S(t)$ é não crescente. Partindo de $S_0 \geq 0$, conclui-se que $S(t) \geq 0$ para todo $t \geq 0$.

Da terceira equação,

$$\frac{dR}{dt} = \gamma\, I(t) \geq 0,$$

de modo que $R(t)$ é não decrescente; partindo de $R_0 \geq 0$, segue que $R(t) \geq 0$.

Por fim, da segunda equação,

$$\frac{dI}{dt} = I(t)\big(\beta\, S(t) - \gamma\big).$$

Como $S(t) \geq 0$ e, por hipótese, $I_0 \geq 0$, nenhum mecanismo pode tornar $I(t)$ negativo. Portanto,

$$S(t) \geq 0, \quad I(t) \geq 0, \quad R(t) \geq 0 \qquad \forall\, t \geq 0.$$ □

Lema 2.1.1 (Conservação da População)**.** *No modelo SIR clássico, a população total* $N = S(t) + I(t) + R(t)$ *permanece constante ao longo do tempo.*

Demonstração. Derivando N em relação a t e substituindo o sistema:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = (-\beta SI) + (\beta SI - \gamma I) + (\gamma I) = 0.$$

Portanto, N é constante. □

Corolário 2.1.1 (Redução do Sistema)**.** *Como consequência do Lema 2.1.1, o sistema SIR pode ser reduzido a duas equações diferenciais, pois* $R(t) = N - S(t) - I(t)$*. Assim, a análise dinâmica pode ser realizada considerando apenas* $S(t)$ *e* $I(t)$*.*

Teorema 2.1.3 (Condição de Crescimento da Epidemia)**.** *No modelo SIR, o número de*

infectados cresce inicialmente se e somente se

$$S_0 > \frac{\gamma}{\beta}.$$

Demonstração. Da equação dos infectados, fatorando I:

$$\frac{dI}{dt} = I(t)\big(\beta\, S(t) - \gamma\big).$$

Para que $dI/dt > 0$ quando $I > 0$, é necessário e suficiente que $\beta S - \gamma > 0$, ou seja, $S > \gamma/\beta$. □

Corolário 2.1.2 (Número Reprodutivo Básico)**.** *Define-se o* ***número reprodutivo básico*** *como*

$$R_0 = \frac{\beta\, S_0}{\gamma\, N},$$

onde S_0 é o número inicial de suscetíveis e N é a população total. Esse parâmetro indica o número médio de novos casos gerados por um indivíduo infectado em uma população totalmente suscetível. Quando $S_0 \approx N$ (praticamente toda a população é suscetível no início), a expressão reduz-se à forma simplificada amplamente adotada na literatura (KERMACK; McKENDRICK, 1927):

$$R_0 \approx \frac{\beta}{\gamma}.$$

Neste trabalho, como $S_0 = 38.260 \approx N = 38.335$, adota-se essa forma simplificada sem perda de generalidade. Consequentemente:

- *se $R_0 > 1$, a epidemia tende a se expandir;*
- *se $R_0 < 1$, a epidemia tende a desaparecer.*

2.2 Dinâmica de Transmissão e Parâmetros-Chave

A transição entre os compartimentos do modelo SIR é ditada por taxas específicas que permitem quantificar a velocidade da epidemia:

- **Taxa de Transmissão (β):** representa a probabilidade de um indivíduo suscetível ser infectado ao entrar em contato com um infectado.
- **Taxa de Remoção ou Recuperação (γ):** define a velocidade com que os infectados se recuperam ou deixam de ser transmissores.
- **Número Reprodutivo Básico ($R_0 = \beta/\gamma$):** indica o potencial de propagação da doença; se $R_0 > 1$, a epidemia tende a crescer; se $R_0 < 1$, tende a regredir.

2.3 Formulação Normalizada das Equações Diferenciais

Nas simulações numéricas, é comum expressar o sistema SIR com a população total N como denominador, normalizando a força de infecção:

$$\begin{cases} \dfrac{dS}{dt} = -\beta \dfrac{S(t)\, I(t)}{N} \\ \dfrac{dI}{dt} = \beta \dfrac{S(t)\, I(t)}{N} - \gamma\, I(t) \\ \dfrac{dR}{dt} = \gamma\, I(t) \end{cases} \tag{2.2}$$

O modelo descreve como a taxa de mudança em cada compartimento depende dos parâmetros epidemiológicos:

- A variação de suscetíveis (dS/dt) é sempre não positiva, pois indivíduos deixam esse grupo ao serem infectados.
- A variação de infectados (dI/dt) depende do balanço entre novos casos (entradas) e recuperados (saídas).
- A variação de removidos (dR/dt) é sempre não negativa, acumulando aqueles que superaram a fase infecciosa.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza quantitativa, de caráter exploratório e bibliográfico, com abordagem aplicada e objetivo explicativo. Busca-se aplicar a modelagem matemática por meio do modelo compartimental SIR (Suscetíveis–Infectados–Removidos), estruturado a partir de um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs).

3.1 Tipo de Estudo

Trata-se de uma pesquisa aplicada, pois visa à utilização do conhecimento matemático para resolver um problema concreto e localizado: a análise da dinâmica da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA. A abordagem é quantitativa, uma vez que os dados serão analisados numericamente e os resultados expressos por meio de parâmetros e gráficos que descrevem o comportamento da epidemia.

3.2 Amostra e Fonte de Dados

Os dados utilizados para alimentar o modelo foram obtidos junto à Secretaria Municipal de Saúde de Amarante do Maranhão – MA, referentes ao período de janeiro a junho de 2025, e abrangem:

- Número de casos positivos confirmados;
- Número de casos recuperados;
- População total estimada do município.

A amostragem é intencional e não probabilística, voltada à totalidade dos dados reportados no período estudado.

3.3 Procedimentos e Técnicas de Análise

Os dados empíricos foram utilizados para definir as condições iniciais do modelo SIR. Os parâmetros epidemiológicos β e γ foram estimados com base na literatura científica sobre COVID-19, adotando-se $R_0 = 2{,}5$ (YANG et al., 2020) e período infeccioso médio de 14 dias (ANDERSON; MAY, 1992), conforme detalhado no Capítulo 4.

Com base nesses parâmetros, calculou-se o número reprodutivo básico R_0 por meio da relação $R_0 = \beta/\gamma$.

As simulações numéricas foram realizadas com o auxílio da linguagem **Python** (versão 3.x), utilizando as bibliotecas `scipy.integrate.odeint` para a resolução numérica do

sistema de EDOs pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, e `matplotlib` para a geração dos gráficos. As condições iniciais e os parâmetros foram inseridos diretamente no script, e os resultados foram exportados como figuras para incorporação ao texto.

> **Nota metodológica:** Uma calibração paramétrica rigorosa – isto é, o ajuste de β e γ diretamente aos dados locais por mínimos quadrados ou métodos bayesianos – exigiria uma série temporal completa de casos diários, o que extrapola o escopo deste trabalho. Os dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde foram utilizados como condições iniciais, e os parâmetros adotados são os referenciados na literatura para a cepa original do SARS-CoV-2.

3.4 Aspectos Éticos

Embora não haja envolvimento direto com sujeitos da pesquisa, o projeto respeita os princípios éticos de confidencialidade e uso responsável dos dados. Todos os dados utilizados são de domínio público ou foram fornecidos mediante autorização institucional. Quando necessário, utiliza-se o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), em conformidade com a Resolução n. 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde, que trata de pesquisas em Ciências Humanas e Sociais.

4 ANÁLISE E SIMULAÇÕES

Com os dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde, é possível simular possíveis cenários futuros para a dinâmica da COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA.

4.1 Cenário 1: Propagação sem Controle

Utiliza-se o modelo SIR com população total $N = 38.335$, infectados iniciais $I(0) = 75$ e período infeccioso médio de 14 dias. Assumindo que inicialmente não há removidos, $R(0) = 0$, os suscetíveis iniciais são:

$$S(0) = N - I(0) - R(0) = 38.335 - 75 = 38.260. \tag{4.1}$$

4.1.1 Cálculo da Taxa de Recuperação γ

No modelo SIR, a taxa de recuperação é o inverso do período infeccioso médio T:

$$\gamma = \frac{1}{T} = \frac{1}{14} \approx 0{,}0714 \text{ dias}^{-1}. \tag{4.2}$$

Isso significa que, em média, 7,14% dos infectados transitam para a classe dos removidos a cada dia.

4.1.2 Relação entre β, γ e R_0

No modelo SIR clássico, o número básico de reprodução é dado por:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \qquad \Rightarrow \qquad \beta = R_0 \cdot \gamma. \tag{4.3}$$

Para a COVID-19, valores típicos de R_0 na literatura situam-se no intervalo $2 \leq R_0 \leq 3$ (YANG et al., 2020). Adota-se:

$$R_0 = 2{,}5. \tag{4.4}$$

4.1.3 Cálculo da Taxa de Transmissão β

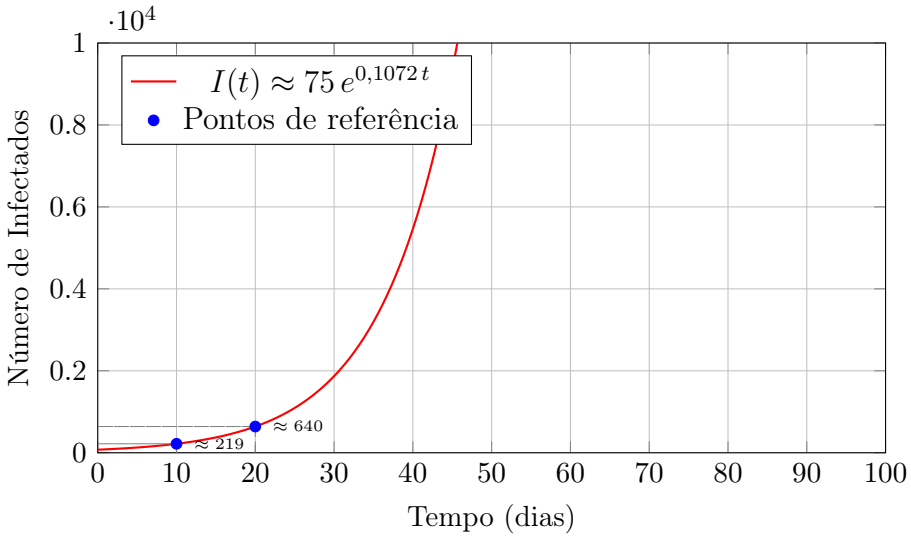
Aplicando $\beta = R_0 \cdot \gamma$:

$$\beta = 2{,}5 \times 0{,}0714 \approx 0{,}1786 \text{ dia}^{-1}. \tag{4.5}$$

Cada infectado gera, em média, contatos suficientes para transmitir a doença a 0,1786 pessoas por dia, considerando uma população totalmente suscetível.

4.1.4 Curva de Crescimento do Número de Infectados

Figura 4.1: Crescimento exponencial de infectados no cenário sem controle ($R_0 = 2{,}5$)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O gráfico da Figura 4.1 ilustra a curva de crescimento exponencial do número de infectados nesse cenário sem controle. Observa-se que:

- No dia 10, haveria aproximadamente 219 infectados;
- No dia 20, esse número cresceria para aproximadamente 640 infectados simultâneos.

Esse crescimento representa um alerta claro, pois há risco de saturação rápida do sistema de saúde do município.

4.1.5 Sistema de Equações Diferenciais para Amarante do Maranhão – MA

O sistema de equações diferenciais que descreve a dinâmica da COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA é:

$$\begin{cases} \dfrac{dS}{dt} = -0{,}1786\, \dfrac{S(t)\, I(t)}{38.335} \\ \dfrac{dI}{dt} = 0{,}1786\, \dfrac{S(t)\, I(t)}{38.335} - 0{,}0714\, I(t) \\ \dfrac{dR}{dt} = 0{,}0714\, I(t) \end{cases} \tag{4.6}$$

com condições iniciais $S(0) = 38.260$, $I(0) = 75$, $R(0) = 0$, e taxa de positividade observada:

$$\frac{75}{260} \approx 0{,}288 \quad (28{,}8\%). \tag{4.7}$$

4.1.6 Interpretação Epidemiológica para Amarante do Maranhão

Como $R_0 = 2{,}5 > 1$, a epidemia tende a crescer exponencialmente na fase inicial. O número de infectados pode ser aproximado por:

$$I(t) \approx 75\, e^{(\beta-\gamma)\,t} = 75\, e^{0{,}1072\,t} \quad \text{(em dias)}. \tag{4.8}$$

Isso implica:

- Em 10 dias: $I(10) \approx 75\, e^{1{,}072} \approx 219$ pessoas;
- Em 20 dias: $I(20) \approx 75\, e^{2{,}144} \approx 640$ pessoas.

Sem medidas de intervenção, o crescimento seria muito rápido.

4.1.7 Pico da Epidemia – Resultado Teórico

No modelo SIR, o pico de infectados ocorre quando:

$$S(t^*) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot N = \frac{N}{R_0} = \frac{38.335}{2{,}5} \approx 15.334 \text{ pessoas}. \tag{4.9}$$

Isso significa que, quando o número de suscetíveis cair para cerca de 15.334, o número de infectados atingirá seu valor máximo. O número de pessoas já infectadas até esse ponto seria:

$$38.335 - 15.334 = 23.001 \text{ pessoas}, \tag{4.10}$$

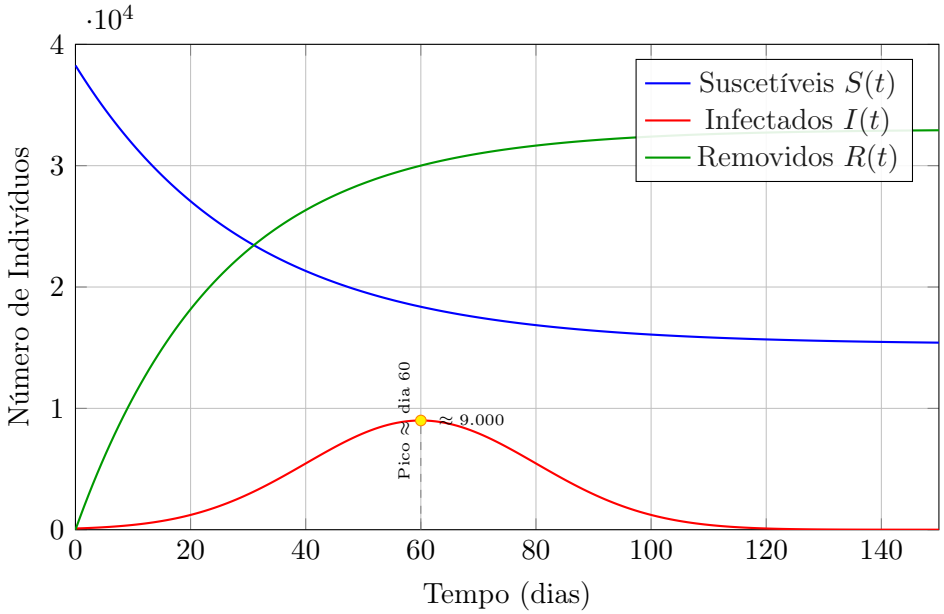
um número expressivo para um município desse porte, o que reforça a urgência de medidas de controle.

Pelos resultados da simulação da Figura 4.2:

- O número de infectados cresce rapidamente na fase inicial;
- O pico ocorre por volta do dia 60, com cerca de 9.000 infectados simultâneos;
- Ao final do surto, mais de 33.000 pessoas teriam passado pela infecção;
- Restam cerca de 4.300 suscetíveis ao final, o que é consistente com a teoria: $S_{\text{final}} \approx N/R_0^2$.

Esses números confirmam matematicamente que, sem intervenções, o vírus teria impacto devastador em um município do porte de Amarante do Maranhão.

Figura 4.2: Dinâmica completa do modelo SIR – cenário sem controle ($R_0 = 2{,}5$)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2 Cenário 2: Controle da Epidemia

Se os órgãos competentes adotarem políticas públicas para reduzir a taxa de transmissão β, tais como:

- Uso de máscaras;
- Distanciamento social;
- Redução de aglomerações;
- Testagem com isolamento rápido dos casos positivos;
- Campanhas educativas;

e medidas que favoreçam o aumento da taxa de recuperação γ, como:

- Diagnóstico precoce;
- Acesso rápido a atendimento de saúde;
- Acompanhamento domiciliar dos casos;
- Vacinação;

a doença tende a ser controlada.

4.2.1 Parâmetros no Cenário de Controle

Supondo que as políticas públicas reduzam a transmissão em 60%:

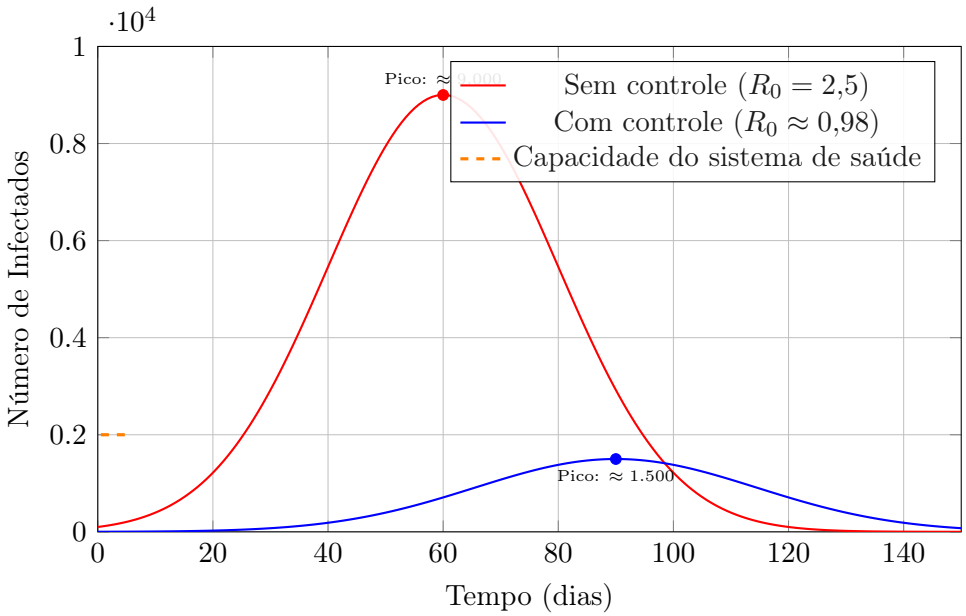
$$\beta_{\text{controle}} = 0{,}07, \qquad \gamma = 0{,}0714, \tag{4.11}$$

o número reprodutivo básico nesse cenário passa a ser:

$$R_0^{\text{controle}} = \frac{0{,}07}{0{,}0714} \approx 0{,}98 < 1. \tag{4.12}$$

Com $R_0 < 1$, o número de infectados não explode; os casos caem progressivamente e a doença torna-se epidemiologicamente estável.

Figura 4.3: Comparação entre os cenários sem controle e com controle (efeito de "achatar a curva")



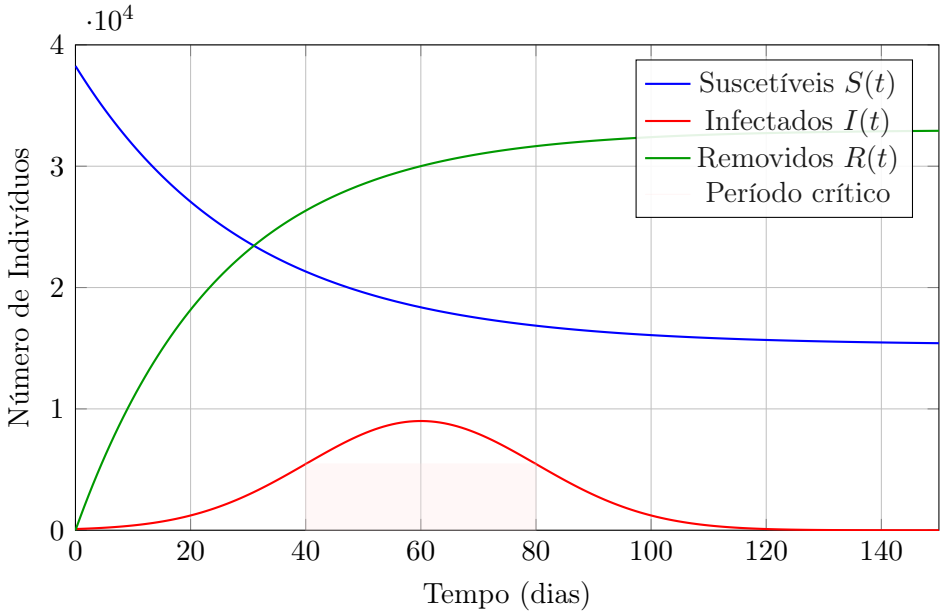
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 4.3 demonstra que, com as medidas adotadas pelos órgãos públicos, é possível:

- **Achatar a curva:** o sistema de saúde passa a suportar a demanda sem colapso;
- **Alcançar estabilidade epidemiológica:** a doença é controlada progressivamente;
- **Evidenciar o impacto das intervenções:** pequenas reduções no parâmetro β geram efeitos expressivos na trajetória da epidemia.

O gráfico da Figura 4.4 apresenta a simulação do modelo SIR aplicado à COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA, considerando os dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde (260 testes rápidos, 75 casos confirmados, janeiro a junho de 2025, população de 38.335 habitantes). O modelo utiliza:

Figura 4.4: Simulação completa do modelo SIR aplicado à COVID-19 em Amarante do Maranhão – MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

- Taxa de recuperação $\gamma = 1/14 \approx 0{,}0714$ dia^{-1} (período infeccioso médio de 14 dias);
- Taxa de transmissão $\beta \approx 0{,}1786$ dia^{-1};
- Número reprodutivo básico $R_0 = 2{,}5$.

Observação. O gráfico não representa uma previsão exata, mas uma simulação teórica baseada em parâmetros epidemiológicos consagrados na literatura, sendo útil para análise do comportamento da doença, planejamento e apoio à tomada de decisão em saúde pública.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidenciou, de forma clara e fundamentada, o potencial da modelagem matemática como instrumento analítico na compreensão de fenômenos epidemiológicos, em especial no contexto da COVID-19 no município de Amarante do Maranhão – MA. A partir da aplicação do modelo SIR, fundamentado em equações diferenciais ordinárias, foi possível descrever, interpretar e simular a dinâmica de propagação da doença, demonstrando a capacidade da matemática de transcender o campo teórico e atuar diretamente na análise de problemas reais.

Os resultados obtidos indicam que, em um cenário sem intervenções, a doença apresenta crescimento exponencial inicial, com potencial de atingir níveis críticos em curto prazo, colocando em risco a capacidade do sistema de saúde local. A estimativa do número reprodutivo básico $R_0 = 2{,}5$ evidencia um cenário de alta transmissibilidade, no qual cada indivíduo infectado contribui significativamente para a propagação da doença. Tal constatação reforça a importância de medidas de controle epidemiológico, uma vez que pequenas reduções na taxa de transmissão β podem resultar em impactos expressivos na trajetória da epidemia.

Por outro lado, ao analisar o cenário com intervenções, verificou-se que a redução da taxa de transmissão é capaz de alterar substancialmente o comportamento da doença, levando o sistema a uma condição de estabilidade epidemiológica ($R_0 < 1$). Esse resultado demonstra, de forma inequívoca, que políticas públicas baseadas em evidências científicas – como distanciamento social, uso de máscaras, testagem em massa e vacinação – não apenas são eficazes, mas indispensáveis para o controle de epidemias.

Do ponto de vista matemático, o estudo confirmou a robustez do modelo SIR como ferramenta de análise, destacando propriedades fundamentais como existência, unicidade e positividade das soluções, bem como a conservação da população total. Além disso, a relação entre os parâmetros β, γ e R_0 mostrou-se essencial para a interpretação epidemiológica dos resultados, permitindo a identificação de limiares críticos que determinam o crescimento ou o declínio da doença.

No âmbito educacional, este trabalho reafirma a relevância da modelagem matemática como estratégia pedagógica, ao aproximar conceitos abstratos – como equações diferenciais – de situações concretas e socialmente relevantes. Tal abordagem contribui significativamente para o desenvolvimento do pensamento crítico, analítico e investigativo, especialmente na formação de professores de matemática.

Por fim, conclui-se que a modelagem matemática, quando aliada a dados reais e a uma interpretação cuidadosa, constitui um instrumento poderoso não apenas para a compreensão de fenômenos epidemiológicos, mas também para o suporte à tomada de decisões em saúde pública. Nesse sentido, este estudo não apenas responde à problemática proposta,

como também abre caminhos para futuras investigações, seja por meio da incorporação de modelos mais complexos (SEIR, SIRD, com vacinação), seja pela ampliação da análise para outros contextos regionais. Assim, a matemática reafirma seu papel como ciência essencial na leitura do mundo, capaz de transformar dados em conhecimento e conhecimento em ação.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, R. M.; MAY, R. M. **Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control**. Oxford: Oxford University Press, 1992.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. São Paulo: Contexto, 2002.

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Boletim Epidemiológico Especial: doença pelo Coronavírus COVID-19**. Brasília: Secretaria de Vigilância em Saúde, 2020.

BRAUER, F.; CASTILLO-CHAVEZ, C. **Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology**. 2. ed. New York: Springer, 2008.

COUTINHO, R. C. et al. Modelagem matemática da COVID-19 no Brasil: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 23, p. e200067, 2020.

FIGUEIREDO, D. G. **Equações Diferenciais Aplicadas**. 3. ed. Rio de Janeiro: IMPA, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de população dos municípios brasileiros**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: `https://www.ibge.gov.br`. Acesso em: 15 jan. 2026.

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 Physical Character**, v. 115, n. 772, p. 700–721, 1927.

KRAUSE, M. K. et al. Modelos compartimentais aplicados à pandemia de COVID-19: uma análise do SIR e SEIR. **Revista de Matemática Aplicada**, v. 45, n. 2, p. 112–128, 2021.

LOPES, E. P.; BARROS, L. N. **Introdução à Modelagem Matemática de Epidemias**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020.

MARANHÃO. Secretaria de Estado da Saúde. **Boletim Epidemiológico da COVID-19 no Maranhão**. São Luís: SES-MA, 2025.

AMARANTE DO MARANHÃO. Secretaria Municipal de Saúde. **Dados epidemiológicos de COVID-19: período de janeiro a junho de 2025**. Amarante do Maranhão: SMS, 2025.

MASSAD, E. **Modelagem Matemática de Doenças Infecciosas**. São Paulo: Atheneu, 2020.

MASSAD, E.; BURATTINI, M. N.; STRUCHINER, C. J. **Epidemiologia Matemática Aplicada**. São Paulo: Atheneu, 2010.

MOREIRA, C. H. V. et al. Análise do número reprodutivo básico (R_0) da COVID-19 em municípios brasileiros. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, n. 4, p. e00215620, 2021.

MURRAY, J. D. **Mathematical Biology: I. An Introduction**. 3. ed. New York: Springer, 2002.

OPAS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Folha informativa: COVID-19**. Brasília: OPAS/OMS, 2020. Disponível em: `https://www.paho.org/pt/covid19`. Acesso em: 10 fev. 2026.

PERELSON, A. S. Modelling viral and immune system dynamics. **Nature Reviews Immunology**, v. 2, n. 1, p. 28–36, 2002.

RODRIGUES, H. S. Aplicação da equação de SIR em um problema de dengue. **Revista Brasileira de Biométrica**, v. 38, n. 1, p. 75–88, 2020.

SILVA, A. R.; SANTOS, F. L. Modelagem matemática aplicada ao controle de epidemias: estudo de caso COVID-19. **Revista de Saúde Pública do Maranhão**, v. 12, n. 3, p. 45–59, 2021.

UFMA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. **Grupo de Modelagem da COVID-19**: apresentação pública. São Luís: UFMA, 2022.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Coronavirus Disease (COVID-19) Situation Reports**. Geneva: WHO, 2020. Disponível em: `https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports`. Acesso em: 20 jan. 2026.

YANG, W. et al. Epidemic parameters of COVID-19 and their implications for public health interventions. **The Lancet Infectious Diseases**, v. 20, n. 8, p. 905–913, 2020.