

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CHAPECÓ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL- PROFMAT**

LUIZ HENRIQUE MOREIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVOLUÇÃO DA PANDEMIA DE COVID-19 NO
BRASIL**

CHAPECÓ

2021

LUIZ HENRIQUE MOREIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVOLUÇÃO DA PANDEMIA DE COVID-19 NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional, da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, como requisito para obtenção do título de Mestre em Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Vitor José Petry

CHAPECÓ

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Moreira, Luiz Henrique
MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVOLUÇÃO DA PANDEMIA DE
COVID-19 NO BRASIL / Luiz Henrique Moreira. -- 2022.
91 f.:il.

Orientador: Doutor Vitor José Petry

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da
Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação Profissional
em Matemática em Rede Nacional, Chapecó, SC, 2022.

1. Modelagem. 2. Covid-19. I. Petry, Vitor José,
orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III.
Título.

LUIZ HENRIQUE MOREIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVOLUÇÃO DA PANDEMIA DE COVID-19
NO BRASIL**

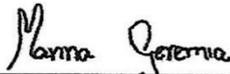
Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional, da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, como requisito para obtenção do título de Mestre em Matemática, sob a orientação do Prof. Dr. Vitor José Petry.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 09/02/2022.

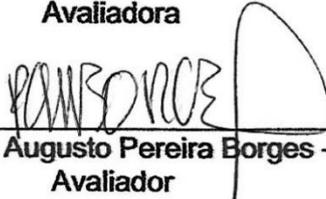
BANCA EXAMINADORA



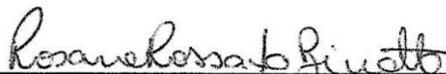
Prof. Dr. Vitor José Petry – UFFS
Orientador



Prof.ª Dr.ª Marina Geremia – IFSC
Avaliadora



Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges – UFFS
Avaliador



Prof.ª Dr.ª Rosane Rossato Binotto – UFFS
Avaliadora

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pois sua Graça tem me alcançado de forma inimaginável, aos meus pais pelos seus exemplos de simplicidade, coragem e ousadia em suas metas e a minha esposa, por todo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele isso não seria possível, toda honra e glória ao seu Nome, pois me trouxe paciência, ânimo e Graça em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, pelo cuidado, amor e dedicação para com a minha vida em todos esses anos, graças a vocês me tornei o homem que sou. Obrigado por todo o apoio que me deram, amo vocês.

A minha esposa, por todo apoio e incentivo nesta etapa da minha formação, louvo a Deus pela sua vida, sendo que tenho comigo a certeza de que Ele não une pessoas, mas sim propósitos.

Aos amigos sinceros que fiz durante esses anos, e que hoje comemoraram comigo, em especial meu caro Oséias, pois, com toda certeza fez diferença nos momentos mais difíceis.

Aos meus pastores que não mediram esforços em estarem orando pela minha vida durante esse percurso, sou grato pela vida de vocês.

A todos os professores que fizeram parte da minha vida escolar e acadêmica, em especial aos professores Cláudio Joel de Oliveira, Darci Martinello, Eda Drehmer e Vitor José Petry, incluso aqui todos os docentes do Curso de Mestrado Profissional em Matemática da Universidade Federal Fronteira Sul – UFFS, agradeço todo conhecimento transmitido, o apoio, e principalmente toda a inspiração que me foi proporcionada, pois permitiram que eu chegasse até aqui. Agradeço grandemente a todos, sem exceção.

Ao meu orientador, por aceitar essa missão de me orientar e me auxiliar na elaboração desse projeto, sendo feito com excelência! Obrigado por todo conhecimento transmitido, e por todo o zelo neste processo. Posso afirmar com toda a certeza, de que é uma das grandes inspirações para mim.

RESUMO

Após o surgimento de uma nova doença infecciosa, causada pelo Coronavírus SARS-COV-2, em que as autoridades médicas mundiais perceberam seu rápido contágio, uma taxa de mortalidade significativa e seu potencial risco para um colapso dos Sistemas de Saúde de todo o mundo, em março de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou pandemia mundial da doença COVID-19. A tomada de decisões por autoridades em momentos de crise sanitária, como a causada pela COVID-19, requer ações rígidas na tentativa de restringir o contato entre pessoas de diferentes grupos familiares, com o intuito de interromper o ciclo de contágio. Por outro lado, é preciso ficar atento aos impactos dessas medidas nas sociedades afetadas, principalmente nos setores produtivos e na educação, causando efeitos econômicos, sociais, culturais e de saúde decorrentes do isolamento social, além da própria doença. A modelagem matemática com modelos da epidemiologia permite fazer simulações de diferentes cenários, constituindo-se em uma das ferramentas que podem auxiliar os gestores na tomada de decisões, permitindo uma análise mais equilibrada e embasada sobre os possíveis impactos de suas decisões a respeito da epidemia. Neste trabalho, após um estudo de diferentes modelos, fez-se uma adaptação do modelo SIR, que descreve a dinâmica entre indivíduos suscetíveis, infectados e removidos, com a finalidade de simular o desenvolvimento da pandemia no Brasil. Ao resolver o problema inverso, foram ajustadas funções para modelar as taxas de transmissão e de letalidade, de acordo com o modelo adaptado, tendo como parâmetro de comparação os dados oficiais de casos e de óbitos disponibilizados pelo Ministério da Saúde. Nas simulações realizadas, observou-se a influência dessas taxas (que são diretamente influenciadas pelas medidas de controle) nas curvas de contágio e de óbitos provocados pela doença. A importância da imunização da população através da aplicação das vacinas é um dos resultados mais expressivos observados nas simulações, sugerindo-se que com o avanço da vacinação, foi possível flexibilizar regras de isolamento social, e conseqüente retomada de atividades econômicas, sociais e de ensino, sem uma retomada significativa de crescimento das curvas de contágio e de óbitos. Dessa forma, os dados obtidos no modelo corroboram com a situação real vivenciada no Brasil, confirmando ser a vacinação em massa uma das formas mais eficazes de controle de uma epidemia, juntamente com as demais medidas adotadas que impactam diretamente na taxa de transmissão, como o isolamento social, uso de máscaras e reforço nos hábitos de higiene em geral.

Palavras-chave: Epidemiologia, modelagem, Coronavírus, simulações.

ABSTRACT

After the emergence of a new infectious disease, caused by the SARS-COV-2 coronavirus, the world's medical authorities realized its rapid contagion, significant mortality rate and potential risk for the collapse of Health Systems worldwide. Thus in March 2020, the World Health Organization (WHO) declared a worldwide pandemic of the disease COVID-19, caused by this virus. Decision-making by authorities in times of health crisis, such as those caused by COVID-19, requires strict actions to interrupt the contagion cycle, for example restricting contact between people from different family groups. On the other hand, one must be aware of the impacts of these measures on affected societies, especially in the productive and educational sectors, balancing the harmful effects of these measures as well as the disease itself. One of the tools to help managers make decisions is mathematical modeling with epidemiology models to simulate different scenarios. These tools allow for a more balanced and grounded analysis of the potential impacts of their decisions on the epidemic. In this work, after a study of different models, an adaptation of the SIR model was made. This model describes the dynamics between susceptible, infected and removed individuals, so as to simulate the development of the pandemic in Brazil. When solving the inverse problem, functions were adjusted to reflect the transmission and lethality rates, according to the adapted model. These numbers could then be compared to the official data on cases and deaths provided by the Ministry of Health. In the simulations carried out, he noted the influence of these rates (which are directly influenced by the control measures) on the contagion and death curves caused by the disease is considerable. The importance of immunizing the population through administering vaccines is one of the most expressive results observed in the simulations. This suggests that with the advance of vaccination, it was possible to loosen social isolation rules, and consequently resume economic, social and educational activities, without a significant rise in the contagion and death curves. Thus, the data obtained in the model corroborate the actual situation experienced in Brazil, confirming that mass vaccination is one of the most effective ways to control an epidemic, together with other measures adopted that directly impact the transmission rate, such as social isolation, use of masks and reinforcement of hygiene habits in general.

Keywords: Epidemiology, modeling, Coronavirus, simulations.

LISTA DE SÍMBOLOS

$S(n)$	Suscetíveis ativos no período n
$I(n)$	Infectados ativos no período n
$R(n)$	Removidos ativos no período n
α	Coefficiente de transmissão
β	Coefficiente de recuperação
τ	Tempo médio de recuperação
p	Probabilidade de contágio
c	Taxa de contato
N	População total
γ	Taxa de natalidade
δ	Taxa de perda de imunidade
I'_n	Quantidade de infectados no dia n
R'_n	Quantidade de removidos no dia n
M'_n	Quantidade de óbitos no dia n
μ	Taxa de letalidade
RC'_n	Quantidade de indivíduos recuperados no $n - \text{ésimo}$ dia
a_i :	Dados oficiais no período i
b_i :	Dados obtidos pelo modelo no período i
\bar{a} :	Média aritmética dos dados oficiais
R^2	Coefficiente oriundo da comparação dos dados de infectados diários
R'^2	Coefficiente oriundo da comparação dos dados de infectados acumulados
R''^2	Coefficiente oriundo da comparação dos dados de óbitos diários

- R''^2 Coeficiente oriundo da comparação dos dados de óbitos acumulados
- ω Parcela da população vacinada no período
- σ Eficácia da vacina
- $\omega * \sigma$ Parcela da população imunizada (em taxa unitária)
- S''_n Quantidade de indivíduos suscetíveis ativos no modelo incluso a vacina
- RC''_n Quantidade de recuperados diários no modelo mediante a vacina
- φ Primeiro dia de imunização
- ω_n Parcela de indivíduos vacinados no dia n em taxa unitária
- V_n Quantidade de indivíduos vacinados no dia n

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ASPECTOS GERAIS DA PANDEMIA DA COVID-19	12
2.1	REINFECÇÕES POR SARS-COV-2.....	15
2.2	FORMAS DE PREVENÇÃO E TRATAMENTO	17
2.3	CARACTERIZAÇÃO DA PANDEMIA DA COVID-19.....	19
2.4	SUBNOTIFICAÇÕES.....	22
2.5	A PANDEMIA DA COVID-19: IMPACTO NO CONTEXTO ORGANIZACIONAL	25
2.6	A VACINA	30
3	MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS	34
3.1	MODELO SIR	37
3.2	MODELO SIS.....	39
3.2.1	Modelo SIS (Com População Variável)	41
3.3	MODELO SIRS	42
4	PROCEDIMENTOS DE SOLUÇÃO	44
4.1	A DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES	45
4.2	A DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES.....	49
4.3	A INCLUSÃO DA VACINA NO MODELO	54
5	RESULTADOS	56
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O novo Coronavírus (SARS-CoV-2) é um patógeno que causa a COVID-19, de modo que tem um risco em grande potencialidade, principalmente pela sua transmissão rápida, o que afetou consideravelmente a população mundial. Trata-se de uma doença infecciosa cujos sintomas mais frequentes são a tosse seca, febre, dor de cabeça, cansaço, entre outros. Entretanto, há infectados que são considerados assintomáticos, ou seja, não demonstram qualquer tipo de sintoma, porém desenvolvem a doença e são agentes transmissivos (BRASIL, 2020e).

Em 11 de março de 2020, a Organização Mundial da Saúde declarou o surto do novo Coronavírus como uma pandemia, sendo necessária a adoção de medidas preventivas de contenção da doença na tentativa de achatar a curva de transmissão. Tais medidas implicaram em impactos socioeconômicos, mudando assim completamente a maneira pela qual os serviços são prestados e a maneira como ocorre a interação entre as pessoas (UNA-SUS, 2020).

Um dos fatores que pode ter colocado este vírus como um dos que causou maior repercussão no mundo, é sua elevada transmissibilidade, e a gravidade da infecção em alguns pacientes, que precisam ficar em unidades de tratamento intensivo (UTI).

Para compreender as curvas de contágio e de óbitos causados pelas infecções, com o objetivo de traçar estratégias para enfrentar a doença, são desenvolvidos ou adaptados modelos matemáticos. Como ferramenta, a modelagem tem ajudado a entender diversas situações reais da Epidemiologia, onde é possível modelar a dinâmica de transmissão em uma determinada população (RAMON, 2011).

A motivação deste trabalho está baseada no interesse pessoal pelo estudo da aplicação prática da Matemática. Dessa forma, o objetivo principal consiste em elaborar um modelo matemático para descrever o contágio e óbitos por Coronavírus no Brasil, para viabilizar a simulação de diferentes situações/cenários, e com isso subsidiar a tomada de decisões.

Para isso foi necessário estudar alguns modelos matemáticos aplicados a Epidemiologia, verificar quais destes representam melhor as hipóteses que se apresentam razoáveis para a descrição da infecção causada por este vírus, determinar os coeficientes para que tais modelos se ajustem melhor aos dados da

amostra, e se necessário, fazer adaptações nos modelos e nas hipóteses que os sustentam.

No presente capítulo é apresentada uma introdução ao tema do trabalho, a motivação deste estudo, bem como os seus objetivos. No capítulo 2 estão descritos alguns aspectos gerais da pandemia da COVID-19, observados no período 2020/2021. No capítulo 3 aborda-se a Modelagem Matemática como ferramenta, assim como descrevem-se alguns modelos aplicados a Epidemiologia. No capítulo 4 apresentam-se as características principais de solução, considerando o método escolhido para a discretização das equações, a determinação dos coeficientes e a adaptação do modelo para a inclusão da imunização dos grupos vacinados. No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações numéricas, considerando diferentes cenários, sua influência nas curvas de contágio e conseqüentemente de óbitos. Por fim, são apresentadas algumas considerações finais do trabalho.

2 ASPECTOS GERAIS DA PANDEMIA DA COVID-19

O Coronavírus integra um grupo de vírus que podem causar diversos sintomas, como: pneumonia, febre, problemas respiratórios e infecção nos pulmões. São conhecidos somente 7 tipos de coronavírus que causam doença infecciosa em seres humanos, quatro causam sintomas do resfriado comum, e três são bem mais graves, sendo que estes ocasionaram surtos de pneumonia mortal. São eles:

- SARS-CoV-2 é um coronavírus novo que foi identificado pela primeira vez em Wuhan, China, no final 2019, como a causa da doença pelo coronavírus de 2019 (COVID-19) e se espalhou por todo o mundo.
 - MERS-CoV foi identificado em 2012 como a causa da síndrome respiratória do Oriente Médio (MERS).
 - O SARS-CoV foi identificado em 2003 como a causa de um surto de síndrome respiratória aguda grave (severe acute respiratory syndrome, SARS) que começou na China aproximadamente no fim de 2002.
- Esses coronavírus que causam infecções respiratórias graves são transmitidos por animais para os seres humanos (patógenos zoonóticos) (TESINI, 2020, p. 1).

O Coronavírus foi detectado primeiramente em um surto em indivíduos com pneumonia de causa desconhecida, ligado a um mercado que vendia animais exóticos para consumo humano em Wuhan, na China, no final da segunda quinzena de dezembro de 2019, sendo denominado pela OMS – Organização Mundial da Saúde como Coronavírus (COVID-19) (MACIEL; CASTRO-SILVA; FARIAS, 2020).

A OMS confirmou que o surto da epidemia de coronavírus foi associada ao mercado, mas nenhuma associação animal específica foi identificada. Os cientistas imediatamente começaram a pesquisar a fonte do novo coronavírus e o primeiro genoma da COVID-19 foi publicado pela equipe de pesquisa liderada pelo Prof. Yong-Zhen Zhang, em 10 de janeiro de 2020. Dentro de 1 mês, este vírus se espalhou rapidamente por toda a China durante o Ano Novo Chinês - um período em que há um alto nível de mobilidade humana entre os chineses. A COVID-19 então foi declarada pela OMS como Emergência de Saúde Pública de Preocupação Internacional (ADHIKARI *et al.*, 2020, p. 2).

Diante da problemática exposta até o começo de 2020, “em 11 de março de 2020, a OMS classificou a doença causada pelo Coronavírus 2 (SARSCoV-2) - COVID-19 como uma pandemia” (MACIEL; CASTRO-SILVA; FARIAS, 2020, p. 2).

A sintomatologia indica que o período de incubação da doença é variável de dois a quatorze dias para as pessoas infectadas apresentarem sintomas (ALEXANDRE *et al.*, 2020). Contudo:

A maioria das pessoas infectadas com COVID-19 tem sintomas leves ou nenhum sintoma, mas algumas ficam gravemente doentes e morrem. Os

sintomas podem incluir os seguintes: febre, tosse, falta de ar ou dificuldade para respirar, calafrios ou tremores repetidos com calafrios, fadiga, dor muscular, dor de cabeça, inflamação da garganta, perda do olfato ou do paladar, congestão nasal ou coriza, náusea, vômito e diarreia (TESINI, 2020, p. 1).

As principais formas de transmissão para a COVID-19 são através de gotículas de saliva, pelo contato com pessoas infectadas e transmissão por vias aéreas. A transmissão pode se dar quando as gotinhas respiratórias contaminadas se misturam no ar (pela tosse, espirro, pela fala ou pelo cantar) formando aerossóis que podem causar infecção nos pulmões quando inalados em alta dose em um ambiente relativamente fechado. A transmissão de contato pode acontecer quando são tocados locais expostos ou objetos que estejam contaminados com o vírus e após a pessoa levar sua mão à boca, nariz ou olhos (ADHIKARI *et al.*, 2020).

No que tange à suscetibilidade de ocorrência da COVID-19, tem-se que:

idosos e imunodeprimidos são os mais suscetíveis. As crianças, por sua vez, são menos vulneráveis à contaminação pelo vírus. Todavia, crianças e jovens, quando infectados, podem permanecer assintomáticas e funcionarem como agentes transmissores do SARS-CoV-2 para outras pessoas (ALEXANDRE *et al.*, 2020, p. 2).

O Coronavírus produz sintomas que parecem com os da gripe, incluindo tosse, febre, dispneia, mialgia e fadiga. Perda repentina de cheiro e sabor também foram observados (sem o muco sendo a causa). Até o período 2020/2021 mantém-se que em casos graves, a COVID-19 caracteriza-se por causar pneumonia, “síndrome de angústia respiratória aguda, sepse e choque séptico que leva cerca de 3% dos infectados à morte, embora a taxa de mortalidade está em 4,48% e continua subindo” (PÉREZ ABREU; TEJEDA; DIEGUEZ GUACH, 2020, p. 3).

A Organização Pan-Americana da Saúde – OPAS (OPAS, 2021, p. 1), alerta:

A maioria das pessoas (cerca de 80%) se recupera da doença sem precisar de tratamento hospitalar. Uma em cada seis pessoas infectadas por COVID-19 fica gravemente doente e desenvolve dificuldade de respirar. As pessoas idosas e as que têm outras condições de saúde como pressão alta, problemas cardíacos e do pulmão, diabetes ou câncer, têm maior risco de ficarem gravemente doentes. No entanto, qualquer pessoa pode pegar a COVID-19 e ficar gravemente doente.

A respeito do surgimento da nova variante do Coronavírus chamada Delta VOC (Variante de Preocupação) pela OMS, explicam Dourado, Ricco e Vieira (2021, p. 1), da Secretaria do Estado de Saúde de Goiás CONECTA-SUS:

De acordo com a Organização Mundial da Saúde – OMS, um aumento geral nos casos de COVID-19 devido à variante de preocupação (VOC) Delta (B.1.617.2), identificada pela primeira vez na Índia, é relatado em todas as

regiões da OMS. Até 20 de julho de 2021, pelo menos 124 países, territórios e áreas relataram a detecção da variante Delta (figura 1), e isso deve continuar a aumentar, tornando-a a variante dominante globalmente nos próximos meses (DOURADO; RICO; VIEIRA, 2021, p. 1).

Os mesmos autores alertam que a Delta está se disseminando com rapidez na Europa e, com isso, pode trazer sérios prejuízos ao controle da pandemia:

As evidências sugerem que ela é 40% a 60% mais transmissível do que a variante Alpha, que foi a primeira grande preocupação na União Europeia – UE, e a estimativa é de que, até o final de agosto, a variante Delta representará 90% de todos os vírus SARS-CoV-2 em circulação na região (DOURADO; RICCO; VIEIRA, 2021, p. 2).

No Brasil, a Prefeitura de São Paulo informa que a variante Delta “está se espalhando na cidade, mas não se sabe em que dimensão, e nem se ela vai se tornar dominante. Até o começo de julho de 2021, a mais prevalente é a chamada Gamma (ou P.1), que foi descoberta em Manaus” (MAGENTA, 2021, p. 1).

França e Souza (2021, p. 5) relatam que a Secretaria de Vigilância e Regulação em Saúde – SEVIR do Estado do Ceará emitiu nota de alerta, informando que: “até 9 de agosto 2021, foram registrados vários casos da COVID-19 pela variante de preocupação (VOC) Delta, sendo 13 casos no Paraná, 2 em Pernambuco e a maior parte concentra-se no Rio de Janeiro, com 123 casos”. Esclarecem que a prevalência foi dos casos no sexo masculino com faixa etária de 20 a 29 anos.

Segundo Therrie (2021, p. 1), “os principais sinais e sintomas são febre, dor de cabeça, coriza e dor de garganta. Com a variante Delta, os casos têm menor ocorrência de tosse e perda de paladar e olfato”. No entanto,

A variante Delta é mais transmissível que as demais por possuir mutações na região do genoma responsável pela produção da proteína S (ou spike), localizada na superfície da membrana do Sars-CoV-2. Este é o local de aderência do vírus à célula humana. Dessa forma, as mutações aumentam a capacidade viral de infectar células com adesão aos receptores celulares humanos, gerando maior transmissão e maior facilidade de escapar do sistema imune (THERRIE, 2021, p. 1).

Conforme o autor, a grande preocupação com a variante Delta é o seu alto poder de transmissão, ou seja, com maior capacidade de agressão ao organismo humano do que o SARSCoV-2.

2.1 REINFECÇÕES POR SARS-COV-2

Em fevereiro de 2021, o Ministério da Saúde (2021), orientou sobre a importância de definir critérios para confirmação, tipo e sequenciamento genômico, para poder comprovar que são infecções em ocorrências diversas, e também por diferentes linhagens virais. No entanto, os estudos não permitiam ainda, definir com clareza aspectos como o tempo mínimo entre as duas contaminações, consequências da reinfecção, gravidade dos casos e os exames mais adequados para confirmação do evento, para poder ajustar processos de vigilância, medidas preventivas, controle e atenção aos pacientes.

No Brasil, o primeiro caso de reinfecção pelo vírus SARSCoV-2 foi identificado na Semana Epidemiológica (SE) 50 de 2020, sendo um caso residente no estado do Rio Grande do Norte (RN) – o qual teve a coleta e exames confirmatórios da reinfecção do estado da Paraíba (PB). E desde então, até a Semana Epidemiológica 8 de 2021 foram registrados mais 5 casos de reinfecção, um residente em Goiás (GO) e um residente São Paulo (SP), esses respectivamente pelas variantes de circulação no país; e outros três casos identificados no Amazonas (AM) pela variante de atenção e/ou preocupação P.1 (VOC) (BRASIL, 2021d, p. 54).

De acordo com Toueg (2021, p. 1), da Revista Veja Saúde, até 5 de abril de 2021 o Ministério da Saúde confirmou que 8 brasileiros tiveram confirmação de um segundo diagnóstico da COVID-19. Explica também que “segundo a agência de notícias holandesa BNO News, há 69 casos confirmados no mundo, dois resultantes em morte - um homem israelense de 74 anos e uma mulher holandesa de 89”.

Uma das exigências para realização do diagnóstico de reinfecção é um intervalo de 90 dias entre a infecção e a reinfecção da COVID-19, bem como é necessário que o paciente tenha realizado os dois resultados pelo exame de RT-PCR na primeira e a segunda infecção. A hipótese para a segunda infecção é que o sistema imunológico do indivíduo não produziu barreiras apropriadas contra o vírus, ou, perdeu-as com o passar do tempo (TOUEG, 2021).

Também em abril de 2021, Azevedo (2021, p. 1), da Agência Fiocruz de Notícias, mostrou um artigo referente a reinfecção com SARS-CoV-2 publicado no corrente ano na revista *Emerging Infectious Disease* (EID), dos Centros de Controle e Prevenção de Doenças dos Estados Unidos (CDC/EUA), indicando que a reinfecção pode “provocar sintomas mais fortes do que a primeira”.

O artigo foi coordenado por pesquisadores do Centro de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde (CDTS/Fiocruz), envolvendo pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), do Instituto D'Or de Ensino e Pesquisa (Idor) e da empresa chinesa MGI Tech Co.

Os pesquisadores acompanharam semanalmente um grupo de 30 pessoas de março de 2020, no início da pandemia, até o fim do ano. Destas, quatro contraíram o Sars-CoV-2, sendo que algumas foram infectadas pela mesma variante. Os pesquisadores, então, sequenciaram o genoma do vírus no caso da primeira infecção e depois na segunda para poder compará-los. O método de sequenciamento genético desenvolvido pela MGI permitiu detectar o vírus mesmo em amostras com baixa carga viral. Hoje, Bio-Manguinhos ([Instituto de Tecnologia em Imunobiológicos da Fiocruz] tem algumas dessas máquinas (AZEVEDO, 2021, p. 1).

Esses dados evidenciaram que para a parcela de indivíduos que tiveram a doença na forma leve, não significa que estejam imunes a uma reinfecção. Detectaram quatro casos de reinfecção, sendo que para o primeiro foram sintomas leves e, no segundo, se deram mais frequentes e mais fortes, mas não foram hospitalizados. No entanto, o estudo leva a crer que para parte dos indivíduos que teve a doença de forma leve “não basta uma exposição ao vírus, e sim mais de uma, para ter um grau de imunidade. Isso permite que uma parcela da população que já foi exposta sustente uma nova epidemia” (AZEVEDO, 2021, p. 1). No entanto, salienta que “para isso, seria necessário um estudo, com uma grande parte da população, a fim de investigar uma base genética para essa predisposição entre as pessoas que não geraram uma resposta ao vírus” (AZEVEDO, 2021, p. 1).

De acordo com Rocha (2021), da CNN Brasil, há relatos de que o Instituto Oswaldo Cruz confirmou em dezembro de 2020 o primeiro caso de reinfecção pela COVID-19, ocasionado pelas linhagens diferentes do vírus, ou seja, B.1.1.33, no mês de junho de 2020, e B.1.1.28, no mês de outubro do mesmo ano.

De acordo com os primeiros estudos apresentados, o risco de reinfecção é incerto e pode ser alto até toda a população ser vacinada, enquanto os sintomas podem ser mais fortes na reinfecção e podem variar de uma pessoa para outra, dependendo também da duração dos anticorpos produzidos pelo organismo contra a COVID-19. Rocha (2021) sugere que essa diminuição pode ocorrer em poucos dias, ou até em 9 meses, variando de uma pessoa para outra, apesar de que nenhum exame de anticorpos é garantido para falar se uma pessoa está protegida ou não. Ainda está em investigação quantas vezes uma pessoa pode se reinfetar, sendo necessários estudos mais prolongados enquanto durar a pandemia. A reinfecção pode

ser mais comum em idosos com mais de 65 anos, conforme publicado na revista científica Lancet do Instituto Statens Serum, da Dinamarca, em que foi constatada 72 casos de reinfecção em 11.068 indivíduos estudados. Neste estudo, pondera-se ainda que as medidas de prevenção são as mesmas para quem já pegou COVID-19 (ROCHA, 2021).

Em agosto de 2021, o portal Vivabem (2021, p. 1) salientou que em estudo publicado pelos Centros de Controle e Prevenção de Doenças (CDC), dos Estados Unidos, “Pessoas não vacinadas têm duas vezes mais risco de serem reinfectedas com o vírus da COVID-19 do que aquelas que estão totalmente imunizadas”. O estudo foi baseado em amostra de 246 indivíduos adultos de Kentucky reinfectedados em maio e junho de 2021, após primeira contaminação em 2020, seus resultados indicaram:

Eles foram comparados com 492 pessoas em um grupo de "controle", conforme sexo, idade e data em que a infecção foi detectada. [...] as pessoas não vacinadas tiveram 2,34 vezes mais probabilidade de serem reinfectedadas em comparação com aquelas completamente imunizadas com vacinas da Pfizer, Moderna ou Johnson & Johnson (VIVABEM, 2021, p. 1).

No entanto, de acordo com os pesquisadores, não há clareza em relação à imunidade exata adquirida depois de uma infecção, e tal fator pode ter alteração devido ao surgimento de novas variantes, sendo que o estudo foi realizado antes de surgir a variante Delta.

2.2 FORMAS DE PREVENÇÃO E TRATAMENTO

De acordo com Adhikari *et al.* (2020), várias medidas de saúde pública que podem prevenir ou retardar a transmissão da COVID-19 foram usadas. Estas incluem isolamento de caso, identificação e acompanhamento dos que contraíram o vírus, assepsia do local e uso de equipamentos de proteção individual.

Matos (2020, p. 242) esclarece sobre recomendações também nas áreas da Saúde.

[...] as orientações realizadas pelas autoridades da saúde pública, tais como: evitar aglomerações nos serviços de saúde e, para isso, a suspensão de atividades em que isso for possível; utilização correta dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) em todos os atendimentos; tomar medidas de higienização (lavagem de mãos e etc.), dentre outras. Portanto, isso envolve a exigência desses insumos nos locais de trabalho e apropriação correta da sua forma de uso.

A prevenção mais viável é evitar a exposição à COVID-19. Precauções e outras medidas preventivas têm sido veiculadas para que se possa reduzir o risco de exposição. Estas incluem o uso de máscaras faciais; cobrir tosses e espirros com lenços que são então descartados com segurança ou na falta deles, usar a parte interior do cotovelo ao tossir ou espirrar; lavagem regular das mãos com sabão ou desinfecção para as mãos contendo pelo menos 70% de álcool; evasão de contato com pessoas infectadas e manter uma distância apropriada tanto quanto possível e abster-se de colocar as mãos sujas nos olhos, nariz e boca. (OPAS, 2020; BRASIL, 2020).

De acordo com Tesini (2020, p. 1).

Para ajudar a prevenir a transmissão, as pessoas estão sendo colocadas em quarentena (isoladas) quando tiverem sido expostas a pessoas com o vírus ou se tiverem um resultado positivo para o vírus no exame. A melhor maneira de prevenir a infecção é evitar a exposição a esse vírus, o que pode ser difícil, porque algumas pessoas infectadas não sabem que têm o vírus.

Da mesma forma, Alexandre *et al.* (2020, p. 2), citam também que “as principais recomendações são o distanciamento físico, o confinamento domiciliar, a prática de higiene das mãos, o uso de máscaras e a detecção precoce de pessoas infectadas”.

Até meados de 2020, nenhum tratamento antiviral específico foi confirmado como eficaz contra a COVID-19, entretanto, vários medicamentos foram propostos e testados. Vários estudos foram publicados sobre Cloroquina e Hidroxicloroquina com ou sem Azitromicina após estudos iniciais na China, no entanto, havia preocupações com a falta de comparações em estudos iniciais e efeitos colaterais, incluindo problemas cardíacos, com estudos mais recentes documentando problemas com sua eficácia (CORRÊA; VILARINHO; BARROSO, 2020).

O Ministério da Economia (BRASIL, 2020d) em sua página sobre medicamentos, apontou o Remdesivir, mostrando resultados encorajadores obtidos por pesquisadores nos EUA, e a terapia antiviral tripla também estaria se mostrando promissora, ainda que o número de pacientes das amostras tenha sido baixo. Posteriormente, a Dexametasona melhorou os resultados de cura em pacientes que recebem oxigênio. No entanto, segundo a postagem, mais estudos são necessários antes que tratamentos específicos possam ser fortemente recomendados.

A Fiocruz – Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ, 2020, p. 1), informou que “Estudos com número limitado de pacientes, e sem o adequado controle, como são a maior parte dos estudos registrados até o momento, podem demorar a conseguir uma

resposta, ou nem mesmo chegar nela” apontou a diretora da Fundação. Esclareceu também que o Ministério da Saúde fez orientações para que sejam incluídos na pesquisa:

[...] centros de pesquisa em todas as regiões do país e a contribuir com o maior número possível de pacientes. Colabora-se assim com o esforço global de ter uma resposta rápida e aplicável à população brasileira. Em um primeiro momento, serão testados a cloroquina, o Remdesivir, a combinação liponavir e ritonavir, isolado ou combinado ao Interferon Beta1a (FIOCRUZ, 2020, p. 1).

Essa falta de tratamentos recomendados resultou em empresas e indivíduos explorando a oportunidade, muitas vezes com informações incorretas (HAQUE, *et al.*, 2020).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA PANDEMIA DA COVID-19

Para se ter uma noção da gravidade da situação mundial provocada pela pandemia, a Organização Mundial da Saúde – OMS, em 30 de agosto de 2021, informou que 217.038.138 casos da doença estavam confirmados mundialmente e 4.508.896 mortes (WHO, 2021, p. 1).

Da mesma forma, no Brasil, o Ministério da Saúde, em seu Painel Coronavírus, relatou em data de 30 de agosto de 2021, 579.574 mortes por COVID-19 e 20.752.281 casos confirmados, sendo que no mesmo dia, 30 de agosto, registraram-se 10.466 novos casos, onde, apesar disso, houveram 19.692.898 casos recuperados e 479.809 casos em acompanhamento (BRASIL, 2021c, p. 1).

As medidas necessárias para enfrentar a pandemia da COVID-19, o novo Coronavírus SARS-CoV-2, modificaram drasticamente, e de forma inimaginável, a vida de milhões de indivíduos no mundo, ocasionando mortes, modificando rotinas, causando impacto social e na saúde, infligindo assim complicados desafios para o funcionamento das economias locais e globalizada “comandada por empresas transnacionais a partir de “corredores econômicos” espalhados em vários pontos do mundo” (RODRIGUES; STAMPA, 2020, p. 82).

De acordo com Lole *et al.* (2020, p. 7) no momento que “a pandemia da COVID-19 exige o distanciamento e isolamento social, como medida indispensável para a prevenção do contágio, ela causa um impacto negativo sobre a economia que já estava combalida”. As organizações aqui entendidas como as empresas e os serviços

realizados por inúmeros trabalhadores, dispersos pelo mundo inteiro, estão todos mergulhados neste ano de 2020 na crise imposta pela pandemia da COVID-19 que fragiliza toda a economia e que faz refletir sobre o valor da vida frente à produção.

Sobre isso Fresu (2020, p. 41) afirma que

em meio à pandemia da COVID-19, uma das argumentações mais recorrentes [...], é a necessidade de retomar as atividades produtivas. “A vida não pode parar”, como nesses dias eles vão repetindo, apesar do drama que atinge a realidade atual onde o dado mais visível é que a vida, sem os devidos cuidados e um planejamento político emergencial racional e fundamentado nas indicações da ciência, não apenas pode parar, mas acabar.

No início da pandemia, os meios de comunicação traziam diversas reportagens sobre um vírus democrático, que atingia qualquer classe social, no entanto, essa doença atinge principalmente os mais pobres, pois quem está sofrendo realmente com “os erros políticos e da insensatez social difundida pelo Brasil são as periferias, as favelas, as áreas rurais largadas ao seu próprio destino e, nelas, os homens condenados a comer seu pão com o suor de seu rosto” (FRESU, 2020, p. 52).

Quanto à economia, o FMI - Fundo Monetário Internacional (2020) projetou, já em meados de abril, que a economia mundial sofrerá a maior compressão econômica desde a crise de 1929, pressupondo a queda de 3% no PIB mundial, prevendo seus efeitos na economia brasileira com o aumento do desemprego de 12,2% para 14,7% e queda do PIB em 5,3%.

Como aponta Gomes (2020b, p. 118), “ninguém em sã consciência pode desmerecer o evidente impacto econômico da pandemia, não apenas no Brasil, mas no planeta”. Em relação à situação do trabalho em meio à pandemia, Silva (2020b, p. 130), sugere que

O trabalho nunca esteve tão desvalorizado, mas também nunca provou ser tão importante como hoje, em plena pandemia da COVID-19. A humanidade vive o 1º de Maio de 2020 em crise civilizatória. A COVID-19, associada aos interesses do capital, dissolve a vida; as fakenews globalizadas obscurecem a verdade destruindo as relações sociais; o capitalismo pandêmico de caráter neoliberal solapa direitos do trabalho, fomenta a “escravidão digital”, exacerbando a exploração da mão de obra uberizada e destrói a mãe natureza.

O setor da educação, da mesma forma, foi atingido gravemente pela COVID-19, conforme representação nos dados da UNESCO, que mostram que a maior parte dos governos tiveram que suspender as atividades educacionais como forma de conter a pandemia, sendo que em 09/11/2020, um total de 224.068.338 estudantes no mundo ainda se encontravam longe das salas de aula em decorrência desta paralisação (UNESCO, 2020).

Nesta conjuntura, as situações encaradas pelas crianças e adolescentes em situação de vulnerabilidade se tornaram mais difíceis.

[...] seja para aqueles que estão em situação de rua, que sofreram rompimentos familiares e vivem em abrigos oficiais, aqueles que estão sujeitos à violência de adultos durante a quarentena, ou que simplesmente tem na escola o espaço onde faz suas refeições principais. Para estas crianças e adolescentes, a situação educativa já é extremamente difícil, tornando-se inviável durante a pandemia (GOMES, 2020a, p. 141).

Novas formas de ensino foram delegadas pelas escolas aos seus professores para ministrar aulas aos alunos em meio à pandemia da COVID-19, as aulas on-line para as turmas, bem como exercícios e provas, como apontam Freitas, Almeida e Lole (2020, p. 282): “dar aulas, participar de longas reuniões on-line, bancas de avaliação de trabalhos e por aí vai”.

Contudo, tais condições aliadas a suspensão de trabalho em diversos setores, implicam diretamente na saúde emocional da população, e sobre isso tem-se que:

Assim, em tempos de escolas fechadas, de expressas orientações para que a população idosa não saia de casa, de suspensão do trabalho das trabalhadoras domésticas e diaristas, há uma tendência maior ainda de sobrecarga em todas as dimensões: física, emocional etc. (MATOS, 2020, p. 243).

Diante dessa situação, “pessoas têm sido atingidas, sobretudo aquelas com menores rendas e em condições sociais desfavoráveis, o que sinaliza para a reflexão dos marcadores que geram as desigualdades sociais” (ESTRELA, 2020, p. 3432).

De acordo com a Fiocruz (2021a, p. 1):

A estimativa de infectados e mortos concorre diretamente com o impacto sobre os sistemas de saúde, com a exposição de populações e grupos vulneráveis, a sustentação econômica do sistema financeiro e da população, a saúde mental das pessoas em tempos de confinamento e temor pelo risco de adoecimento e morte, acesso a bens essenciais como alimentação, medicamentos, transporte, entre outros.

Em meados de 2021, o Ministério de Educação recomendou a volta às aulas presenciais, mas que isto seja feito com segurança, ou seja, alunos vacinados e orientados quanto aos cuidados necessários, uso de máscaras, distanciamento de 1,5m entre as mesas, álcool gel, salas ventiladas e todas as precauções para evitar aglomerações. Também recomendou alternar dias letivos para que seja menor o número de estudantes nas salas (BRASIL, 2021b).

Além da reviravolta de todos os setores econômicos e sociais, “o novo Coronavírus trouxe impactos profundos em nossa sociedade, por exemplo, os

problemas psicológicos decorrentes do distanciamento social e do receio da doença” (SALVADOR; GONÇALVES; BASTOS, 2020, p. 146).

Em uma emergência mundial de saúde pública como a que se apresenta durante a pandemia da COVID-19, é importante perceber-se o impacto psicológico que a pandemia está produzindo, a fim de que sejam desenvolvidas estratégias, visando reduzir o impacto psicológico que ocorre durante a crise.

2.4 SUBNOTIFICAÇÕES

De acordo com a Fiocruz (2021b, p. 1), as primeiras cidades brasileiras a notificar casos de mortes por COVID-19 foram São Paulo e Rio de Janeiro, “ambas têm sido vistas como as principais portas de entrada do novo Coronavírus no Brasil ou os principais pontos de difusão da epidemia”.

Lacerda (2020, p. 201) sugere que

[...] possivelmente, nunca tenhamos a real dimensão das mortes decorrentes desta pandemia acirrada pela omissão do Estado no enfrentamento ao vírus, a despeito da crescente subnotificação dos casos confirmados e da subnumerificação das mortes.

Diversos artigos e publicações veicularam nos anos de 2020 e 2021, com informações sobre a subnotificação de casos da COVID-19. Veloso, Lima e Pimenta (2021), realizaram pesquisa bibliográfica objetivando investigar no Brasil, a subnotificação de casos da COVID-19, em março de 2021. Estes, informam que o ritmo acelerado da disseminação do vírus e o número reduzido de testes efetuados no país, contribuem para a dificuldade em avaliar o número real de casos e geram as subnotificações.

Seus resultados indicaram que,

De acordo com os estudos analisados, o número de casos confirmados de COVID-19 no Brasil tem sido amplamente subnotificado. Autores afirmam que o número real de casos é cerca de 11 vezes maior do que os atualmente informados. Um outro estudo prévio estimou que apenas 7,8% dos casos no Brasil são notificados. Os dados notificados também revelam divergências em relação aos estados brasileiros, onde a diferença entre a taxa mais alta 31,7% em Roraima e a mais baixa 3,4% na Paraíba (VELOSO; LIMA; PIMENTA, 2021, p. 1).

O portal IG Saúde (2021), mencionando estudo realizado em maio de 2021 pela Vital Strategy, instituição internacional de saúde, indica que no Brasil, em 2020, foram

subnotificados em torno de 70% dos episódios graves da COVID-19 e 38% da subnotificação de mortes ocasionados pela doença.

Na referida pesquisa foram analisados índices de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) de 2018 e 2019 antes da pandemia, sendo que a diferença é correspondente ao número de notificações. A subnotificação dos casos foi maior entre a faixa etária de 15 a 29 anos, sendo que a mesma lidera as subnotificações de óbitos em que 4.360 indivíduos teriam falecido por COVID-19 no Brasil e não 2.435 como indicado nos registros no período estudado, o que pode ser devido ao fato dos mais jovens serem menos diagnosticados e testados do que os de mais idade. Os estados de São Paulo, Pernambuco e Paraná seriam os que mais subnotificaram mortes em consequência do Coronavírus (Sars-Cov-2) (IGSAÚDE, 2021).

Orellana *et al* (2021) efetuaram estudo com objetivo de verificar o excesso de mortes e suas diferenças em adultos com 20 anos ou mais em Manaus, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, conforme o local do óbito, características demográficas e trajetória. A pesquisa foi realizada junto ao Sistema de Informações sobre Mortalidade e na Central de Informações do Registro Civil Nacional. Obtiveram as estimativas das mortes através do modelo quasi-Poisson com ajuste de sobredispersão.

Segundo os autores, o Brasil é um dos países mais afetados pela pandemia da COVID-19 e o real número de mortes pela doença torna o cenário ainda mais desafiador.

O estudo indicou que no período de fevereiro a junho de 2020 houve registros de:

[...] 74.410 mortes naturais nas quatro cidades, com excesso de mortes de 46% (IC95%: 44-47). O maior excesso de mortes ocorreu em Manaus, 112% (IC95%: 103-121), seguido por Fortaleza, 72% (IC95%: 67-78), Rio de Janeiro, 42% (IC95%: 40-45) e São Paulo, 34% (IC95%: 32-36). O excesso de mortes foi maior nos homens e não significativo nas Semanas Epidemiológicas (SE) 9-12, exceto em São Paulo, 10% (IC95%: 6-14) (ORELLANA *et al.*, 2021, p. 4).

No geral, verificaram que o pico de mortes não explicados diretamente pela COVID-19 aconteceu em Manaus (AM) na Semana Epidemiológica n. 17-20, sendo que os óbitos excedentes não explicados pelo vírus e óbitos fora do hospital, sugerem alta subnotificação e dispersão do SARS-CoV-2, bem como serem necessário revisar todas as causas de óbitos que sejam associadas ao SARS-CoV-2 (ORELLANA *et al.*, 2021).

Para Bernardo e Oliveira (2020, p. 275):

Lamentavelmente, esses dados ainda não revelam a realidade. A subnotificação pela falta de testagem em massa e outras variáveis é fator inquietante, pois impede o monitoramento adequado do espriamento da epidemia do novo coronavírus no Brasil. Segundo estimativas de pesquisadores da UERJ e outras instituições, esses números podem ser ampliados em até dezesseis vezes, em especial se persistirem as lacunas na rede assistencial.

A Fiocruz (2021c, p. 1), também cita que “no período de 19 a 25 de abril de 2020, constatou-se um aumento de 360% no número de mortes em Manaus, após disseminação descontrolada e colapso do sistema de saúde”.

Nogueira *et al.* (2020), objetivaram em seu estudo, propor duas abordagens sistêmicas para estimar os valores da subnotificação do número de óbitos e de indivíduos infectados pelo SARS-CoV-2. Para avaliar a subnotificação de ocorrência da COVID-19 em Santa Catarina, a metodologia foi comparar o número de óbitos por SRAG e COVID-19 que tiveram registro nas primeiras 16 Semanas Epidemiológicas no ano de 2020 com o número de óbitos por SRAG nos anos de 2015 a 2019, exceto 2016 (Surto de H1N1).

Os resultados indicaram que, “ao se utilizar o número de óbitos por SRAG em 2020, estima-se que o número real de óbitos decorrente do novo Coronavírus em Santa Catarina deve ser em torno de 278% acima do número de registros oficiais” (NOGUEIRA *et al.*, 2020, p. 6). Concluíram haver uma subnotificação de “aproximadamente 300% no número de óbitos por COVID-19 no estado”.

Fernandes, Salazar e Benedetti (2021) efetuaram estudo com o objetivo de estimar o número de casos subnotificados da COVID-19 no estado de Roraima e na capital, Boa Vista, através de modelos matemáticos e o uso do *software Microsoft Excel para Windows* e do *Simple Interactive Statistical Analysis*. Analisaram boletins epidemiológicos sobre a COVID-19 expedidos pela Secretaria de Estado da Saúde daquele estado no período de 21.03 a 17.08.2020.

Ressaltaram nos resultados que “mais de 86 mil casos da doença foram subnotificados em Roraima, e destes, mais de 58 mil em Boa Vista. O que representa uma taxa de subnotificação de 68% e 66%, respectivamente” (FERNANDES; SALAZAR; BENEDETTI, 2021, p. 44). Concluem que houve significativa subnotificação dos casos da COVID-19 no estado de Roraima, bem como na capital Boa.

De acordo com Oliveira e Araújo (2020, p. 3):

Essa subnotificação dos casos é causada por alguns fatores, como a falta de testes de diagnósticos, em um cenário em que apenas pacientes com quadros sintomáticos e manifestações graves da doença são priorizados para testagem. Além disso, os casos assintomáticos de COVID-19 acabam passando despercebidos pelo sistema de saúde, não sendo contabilizados pelos órgãos competentes. Como consequências teremos a persistência da doença e a sobrecarga nos serviços de saúde, por isso é necessário aumentar a sensibilidade de detecção de casos assintomáticos e sintomáticos diminuindo as possibilidades de colapsos nos sistemas hospitalares no Brasil e no mundo.

No entanto, a subnotificação de casos, nomeadamente assintomáticos ou poucos sintomáticos, e as diferentes políticas de realização de exames diagnósticos em cada Estado, não permitiram obter uma resposta clara sobre a distribuição dos casos por faixa etária em cada um deles.

Outra explicação possível para a subnotificação de casos da COVID-19 pode ter sido a saturação dos serviços de saúde, de fato diminuindo a qualidade do atendimento e no registro dos casos.

2.5 A PANDEMIA DA COVID-19: IMPACTO NO CONTEXTO ORGANIZACIONAL

Em relação à pandemia da COVID-19, Amitrano, Magalhães e Silva (2020, p. 9) assinalam:

Trata-se de uma pandemia com alta transmissibilidade e severidade nas fatalidades, em que a estratégia disponível é a contenção social, que tem implicações profundas para a atividade econômica dos países com transmissão comunitária.

Através da Portaria nº 454 de 20 de março de 2020 (BRASIL, 2020b) foi declarado estado de transmissão comunitária do novo Coronavírus, logo na sequência, entrou em vigor a Lei nº 13.979 (BRASIL, 2020c) que estabeleceu a quarentena com o objetivo de evitar a contaminação e propagação da COVID-19. Estas duas regras colocaram o povo brasileiro em isolamento social, recomendando que atos corriqueiros como aperto de mão, abraços e cumprimentos mais efusivos fossem evitados (FARO *et al.*, 2020).

De acordo com Werneck e Carvalho (2020), as normas de enfrentamento da pandemia da COVID-19 podem ser subdivididas em quatro fases seguindo orientações da OMS (Organização Mundial da Saúde) sendo elas: contenção, mitigação, supressão e recuperação. Cada fase tem suas próprias estratégias de ação:

1ª Fase: Contenção - Ocorre a notificação de um surto por um novo vírus, e os países começam a tomar medidas, tais como, portos, aeroportos e terminais rodoviários passam a monitorar os recém-chegados, e os turistas vindos do país onde iniciou o surto são postos em quarentena. A medida visa atrasar a contaminação e a transmissão comunitária (quando uma pessoa transmite para outra o vírus) permitindo um planejamento de enfrentamento.

2ª Fase: Mitigação – Inicia-se quando já existe a transmissão comunitária, os contaminados são isolados de maneira vertical. Evita-se diminuir o contato social: eventos são cancelados e locais com grande trânsito de pessoas são fechados (shoppings, academias, escolas, cinemas, clubes, restaurantes) nas empresas recomenda-se o distanciamento entre os funcionários e a diminuição do número de pessoas trabalhando, só os serviços essenciais são mantidos. É a fase de quarentena.

3ª Fase: Supressão - Visa interromper a cadeia de transmissão. Todas as atividades são suspensas, mantêm-se somente os serviços essenciais. Ocorre quando não existem testes suficientes que permitam identificar os contaminados, também para permitir que os órgãos de saúde tenham tempo para atender a demanda de pessoas doentes. O fechamento total foi denominado de *lockdown*. Essa fase mais radical apresenta fortes repercussões econômicas, sociais e psicológicas na população.

4ª fase: Recuperação - É a fase final, quando ocorre uma diminuição significativa dos casos e as atividades são retomadas de forma gradativa através de um planejamento por parte de toda a sociedade e chefiado pelo governo, visando reestruturar o país em seu nível social e econômico.

A necessidade de retomar as atividades econômicas e produtivas durante a pandemia, bem como a necessidade de isolamento para manter a vida e evitar o contágio do vírus que causa a COVID-19 tem colocado milhões de trabalhadores em meio a uma pressão muito grande, gerando quadros de ansiedade e estresse. Sobre o trabalho no Brasil durante a pandemia os dados do IBGE, apontam que:

[...] cerca de 11 milhões foram para a inatividade, sem trabalhar ou procurar emprego; outros 8 milhões foram para o trabalho em casa (home office); quase 10 milhões tiveram seu contrato de trabalho suspenso ou redução da jornada de trabalho. Outros 13 milhões continuaram desempregados. (LUCIO, 2020, p. 1).

De acordo com Bonatelli (2020) o isolamento social, rompe os vínculos essenciais para manter o equilíbrio emocional, desta forma influencia no bem-estar psicológico, levando as pessoas a experimentarem um estado de solidão e desolação.

Ocorre uma sensação de insegurança em todos os aspectos da vida, tanto da perspectiva coletiva à individual, do funcionamento diário da sociedade até nas modificações nas relações interpessoais (FARO *et al.*, 2020). Medidas fiscais como o auxílio emergencial e a desoneração da folha de pagamento e outras foram tomadas para evitar um colapso maior na área social e econômica; criado pela Lei nº 13.982 (BRASIL, 2020a), garantindo a renda mínima para a sobrevivência dos trabalhadores informais e de baixa renda, microempreendedores individuais e contribuintes individuais do Instituto Nacional do Seguro Social (INSS) e de suas famílias, beneficiando aqueles que foram impedidos de trabalhar durante a pandemia. O isolamento social ocasiona perturbações psicológicas e sociais que afetam a capacidade de enfrentamento de toda a sociedade, em variados níveis de intensidade e propagação (FARO *et al.*, 2020).

Na medida em que a saúde mental da população é afetada, as organizações também o são, pois uma organização é formada em grande parte por seus colaboradores que realizam as atividades produtivas. De acordo com Werneck e Carvalho (2020, p. 3) o momento de pandemia da COVID-19 encontra “a população brasileira em situação de extrema vulnerabilidade, com altas taxas de desemprego e cortes profundos nas políticas sociais”.

Werneck e Carvalho (2020, p. 4) ressaltam ainda ser “indispensável minimizar os danos econômicos, sociais e psicológicos das populações mais vulneráveis, por meio da adoção de medidas fiscais e sociais”. Corroboram Castro *et al.* (2020, p. 1060) ao alegar que:

Os efeitos do novo coronavírus (COVID-19) estão produzindo impactos devastadores na saúde, na economia e na dinâmica do comportamento dos profissionais e das organizações. A aplicação de medidas restritivas ao deslocamento das pessoas voltadas ao isolamento social busca mitigar os efeitos da exposição ao contágio e promover o controle da pandemia [...].

Os autores ressaltam ainda o que Silva (2020a apud CASTRO *et al.* 2020, p. 1060) cita sobre os efeitos econômicos: “Os efeitos da atual crise certamente se estenderão por meses e talvez anos, comprometendo cenários socioeconômicos anteriormente previstos”. Considerando que as organizações fazem parte do cenário socioeconômico, o futuro se mostra como algo incerto, exigindo dos gestores públicos

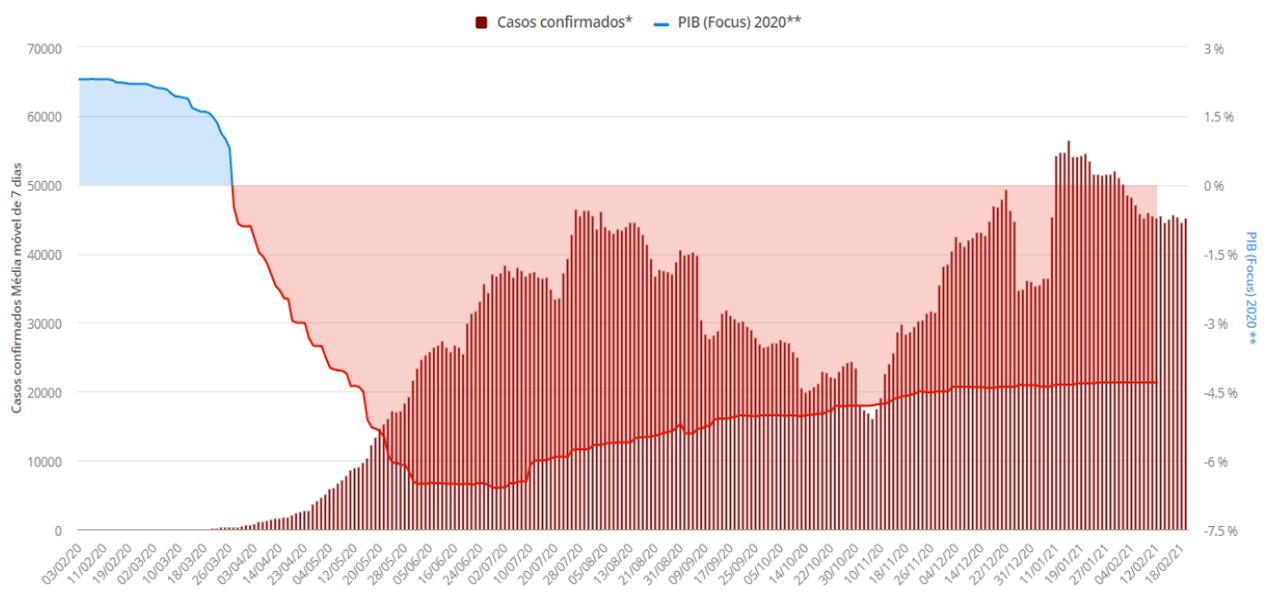
e das organizações repensar todo um planejamento organizado, onde a pandemia não fazia parte, fazendo surgir a necessidade de reinventar-se em meio à crise.

Em pesquisa realizada pelo Sebrae entre os dias 3 e 7 de abril de 2020, obteve-se em um universo de 17,2 milhões de empresas que,

Diante da pandemia da COVID-19 cerca de 5,3 milhões de pequenas empresas no Brasil, o que equivale a 31% do total tiveram seu funcionamento modificado. Outras 10,1 milhões, ou 58,9%, interromperam as atividades temporariamente (SEBRAE, 2020, p. 1).

A COVID-19 não somente tem uma taxa de contágio alto podendo levar a saúde pública e privada ao caos, mas também afetar o sistema econômico com desemprego, endividamento e fome, conforme segue a Figura 1 a seguir, que retrata o contraste da evolução da pandemia com o do PIB em 2020 no Brasil:

Figura 1 – Virada no cenário econômico



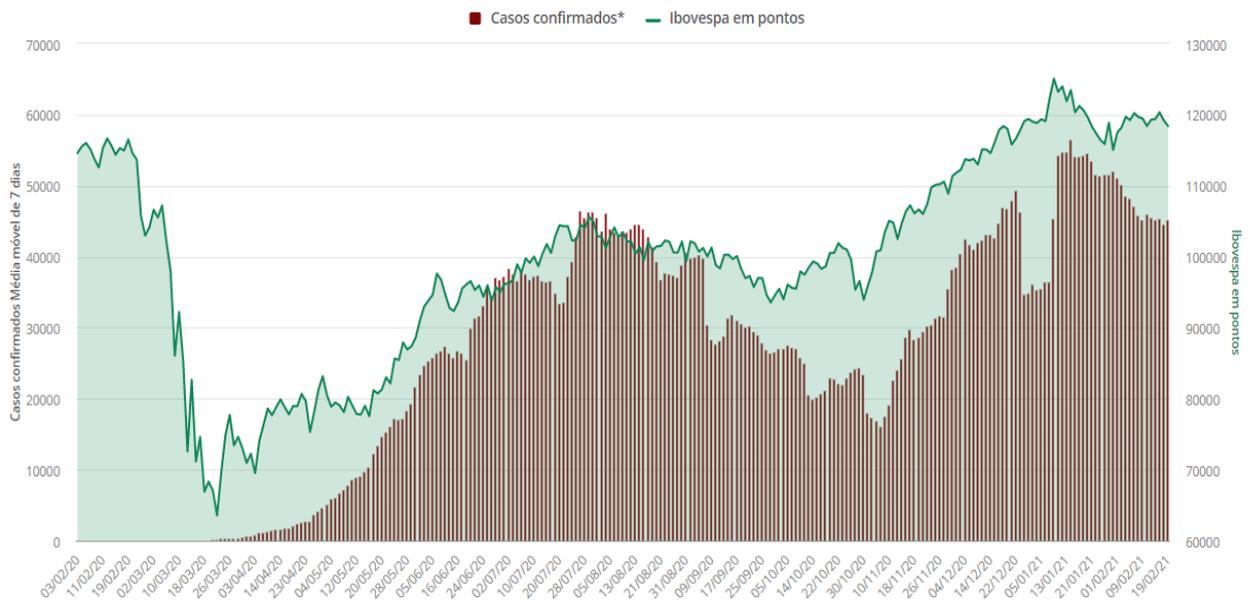
Fontes: Consórcio de veículos de imprensa e boletim Focus do Banco Central. (*) Média móvel de sete dias. (**) Projeção

Na Figura 1, fica evidente a influência da quantidade de casos de infectados notificados sobre o PIB do Brasil em 2020, e isto fica ainda mais notável no início da pandemia, onde enquanto a quantidade de casos aumentava, o PIB decrescia de modo estrondoso.

Cada estado pode descrever os impactos sofridos por causa da pandemia de um modo diferente, mas a economia brasileira de um modo geral sofreu um tombo histórico. Uma queda de 4,3%, como prevista por analistas, a colocaria em patamar

similar ao dos dois piores anos do PIB nacional: 1990 (-4,35%) e 1981 (-4,25%). Mesmo para um país que acumula resultados insatisfatórios desde 2014, o desempenho de 2020 foi fora da curva.

Figura 2 – Influência da COVID-19 no mercado acionário



Fontes: Consórcio de veículos de imprensa, B3 e Valor PRO. Elaboração: Valor Data (2021)(*) Média móvel de sete dias

A bolsa de valores reflete as principais empresas do país. Nela vemos uma amostra do preço que as empresas estão sendo negociadas. Observa-se na Figura 2, que, assim que as taxas de contágio da COVID-19 começaram a crescer, o mercado financeiro se adiantou com relação à precificação das empresas, e a queda foi bastante acentuada. A Bolsa sempre reage à queda nos preços das empresas, toda vez que o número de contágios começa a crescer.

Diante dessa situação, muitas empresas começaram a se preocupar com relação ao distanciamento nos postos de trabalho, ventilação de ambiente e controle de entradas com barreiras sanitárias. Neste cenário de pandemia da COVID-19 uma das estratégias de diminuir o impacto econômico para as organizações em decorrência das medidas de isolamento social é a utilização de recursos disponíveis entre os quais destacam-se “os ambientes digitais” (CASTRO *et al.*, 2020).

Nessa situação de crise, uma das formas de potencializar as vendas e minimizar perdas financeiras é investir em marketing por meio de mídias digitais. Com essa estratégia, os e-business utilizam-se da análise de dados para publicitar e manter suas transações mercadológicas ativas (CASTRO *et al.*, 2020, p. 1061).

As redes sociais, têm permitido o contato virtual e aos poucos faz com que o hábito de compras on-line se torne corriqueiro, bem como o trabalho em home office. Nesta modalidade literalmente o escritório, a sala de aula, o consultório, foram transferidos para dentro da casa dos trabalhadores. Desta forma preserva-se a vida e os postos de trabalho configurando-se como uma das principais estratégias para continuação das atividades laborais (CASTRO *et al.*, 2020).

Dados do SEBRAE (2020, p. 1) apontam que as empresas e organizações que mantêm seu funcionamento: “41,9% realizam apenas entregas via atendimento on-line. Outros 41,2% estão trabalhando com horário reduzido, enquanto 21,6% estão realizando trabalho remoto”.

Os efeitos econômicos podem ser contornados, o maior desafio é manter a saúde mental dos colaboradores das organizações, pois, de acordo com Castro *et al.* (2020), a nova realidade tem gerado alterações de humor e dificuldade de reação aos sintomas de ansiedade e estresses contribuindo para a instabilidade das organizações, de forma que encontrar meios de reduzir os impactos negativos sobre a saúde mental das pessoas constitui-se em um grande desafio para as políticas organizacionais.

2.6 A VACINA

O Ministério da Saúde iniciou oficialmente a campanha de vacinação contra a COVID-19 no Brasil no dia 18 de janeiro de 2021. O governo federal começou a distribuir as doses disponíveis aos estados. Inicialmente, foram vacinados os “trabalhadores de saúde; pessoas de 60 anos ou mais que vivem em instituições de longa permanência; indivíduos com deficiência que vivem em instituições de longa permanência e população indígena aldeada” (BRASIL, 2021a, p. 1).

Segundo a Organização Mundial da Saúde,

As vacinas contêm pequeníssimos fragmentos do organismo que causa a doença ou as matrizes para fazer esses fragmentos. Também contêm outros ingredientes que tornam a vacina segura e eficaz. Estes últimos ingredientes estão incluídos na maioria das vacinas e têm sido usados há décadas em milhares de milhões de doses de vacinas. Cada componente da vacina serve um propósito específico e cada ingrediente é testado durante o processo de fabrico. São feitos testes à segurança de todos os ingredientes. (WHO, 2021, p. 1)

As vacinas aprovadas pela ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária são: Astrazeneca/Oxford (Fiocruz), Pfizer (BioNTech), Coronavac (Butantan), Janssen (Johnson & Johnson). Ainda estão sendo analisadas a Covaxin (Bharat Biotech) e a Sputnik-V (União Química) Conforme o Ministério da Saúde, até 31 de agosto de 2021, foram distribuídas no país 233.265.798 doses de vacinas, sendo aplicadas 187.838.344 em todo o Brasil, sendo 128.416.448 da primeira dose e 59.583.382 da segunda dose (BRASIL, 2021a). Mundialmente, de acordo com o Ministério da Saúde, foram 5.236.019.787 doses de vacinas administradas na população até a referida data (BRASIL, 2021a).

Para a população idosa, infectologistas do Instituto Butantan recomendaram a 3ª dose da vacina, pois a quantidade de anticorpos de alguém que foi vacinado com qualquer vacina, tem a tendência de queda com o passar do tempo.

Diante das novas variantes como, por exemplo, a variante Delta, a população precisa de uma quantidade maior de anticorpos, portanto, uma dose de reforço em especial na população acima de 60-80 anos, que após aproximadamente seis meses, tendem a estar mais desprotegidos. Essa 3ª dose (dose de reforço), segundo o Ministério da Saúde, teve início em outubro/2021, após a aplicação da segunda dose, ou dose única, dependendo do laboratório de fabricação.

É possível afirmar que a vacina é de extrema importância em escala global, visto que controla, combate e ainda elimina grande parte das doenças pré-existentes, além de ser uma grande aliada dos cientistas quando surgem doenças novas, como o caso da COVID-19. Duarte (2021, n. p) explica como funciona a produção das vacinas mais recentes para a população:

As vacinas mais recentes de RNAm utilizam a tecnologia do DNA recombinante (clonagem molecular). Para a vacina contra a Covid- 19, por exemplo, a sequência que codifica a proteína Spike (importante para a sobrevivência viral) do vírus SARS-COV-2 é clonada em um plasmídeo (DNA circular bacteriano). Esse plasmídeo é propagado em bactérias para aumentar a sua quantidade.

Posteriormente, a sequência de DNA que codifica a proteína é retirada do plasmídeo e esse DNA servirá de molde para síntese de RNAm in vitro utilizando enzimas específicas (proteínas que regulam reações químicas do organismo). Esse RNAm é o princípio ativo das vacinas e será envolto em lipídeos para facilitar sua entrada nas células de pessoas vacinadas, que irão produzir a proteína Spike que servirá como antígeno e irá induzir a resposta imune.

De acordo com reportagem realizada pelo jornalista Felipe Grandin para o site G1, em 18 de Agosto de 2021, o Brasil atingiu 55,58% da população vacinada com

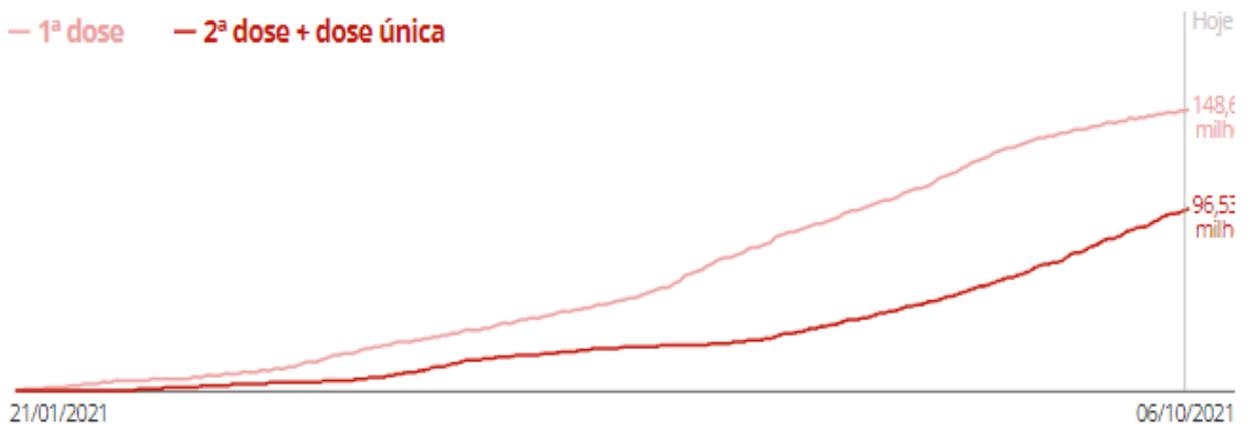
pelo menos uma dose. Pode-se observar no gráfico da Figura 3, o desenvolvimento da campanha de vacinação, seja com dose única ou mais que uma dose, assim como a sua maior aceitação e busca pela total imunização. (GRANDIN, 2021).

Figura 3 – Doses de vacina aplicadas no Brasil (Dados acumulados) até o dia 06/10/2021

Total de doses aplicadas: 245.169.325

Vacinas aplicadas

— 1ª dose — 2ª dose + dose única

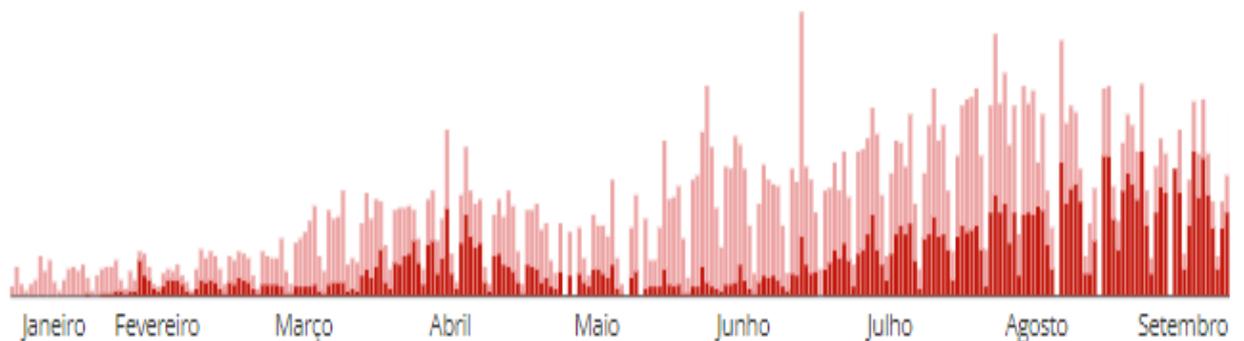


Fonte: Consórcio de veículos de imprensa a partir de dados das secretarias estaduais de Saúde.

Figura 4 – Doses de vacina aplicadas no Brasil 2021 (Dados diários)

Vacinação por dia

■ 1ª dose ■ 2ª dose + dose única



Fonte: Consórcio de veículos de imprensa a partir de dados das secretarias estaduais de Saúde.

No entanto, mesmo com a vacinação, é muito importante manter o uso de máscaras, álcool em gel, lavar as mãos com sabão e manter o distanciamento. Essa situação é reforçada pelos resultados que serão apresentados oportunamente neste trabalho. Por estes motivos, é muito importante tomar cuidado com a comunicação essencial dos riscos para a saúde pública e, para isso, os médicos e as autoridades precisam preparar-se para que sejam transmitidas informações públicas em ocasiões emergenciais, tal como a que estamos vivendo, de maneira efetiva e direta (CANTERAS, 2021).

3 MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS

Um modelo matemático, em tese, é a interpretação matematizada de determinadas situações, podendo ser fenômenos físicos, químicos, biológicos, humanos ou sociais, no entanto, “[...] matematizar não significa apenas traduzir a situação em linguagem matemática. É muito mais que isso, pois consiste em desvelar possíveis estruturas matemáticas contidas na situação [...]” (NOGUEIRA; MARTINS; BRENZIKOFER, 2008, p. 15). Deduzindo tais estruturas, a partir de teorias das ciências físicas, pode-se conseguir informações, previsões e estratégias.

De acordo com Vieira (2016, p. 9):

A modelagem matemática aplicada à epidemiologia tem grande relevância, pois possibilita identificar características importantes da propagação de doenças infecciosas e analisar os resultados obtidos com a introdução de medidas de controle, por exemplo, a vacinação.

A epidemiologia é considerada uma disciplina científica que estuda a distribuição, frequência, determinantes, relacionamentos, previsões e controle de fatores relacionados à saúde e às doenças nas populações humanas. Ela tem um lugar relevante em ciências biomédicas, ciências sociais e ciências exatas. Em geral, os problemas de saúde pública têm sido tratados pela epidemiologia (LEDO *et al.*, 2020).

O objetivo da modelagem matemática epidemiológica é analisar o comportamento e a evolução de uma doença dentre indivíduos de uma população ao longo do tempo. Essa análise tem o propósito de auxiliar no controle da propagação da doença, de modo a evitar o avanço de epidemias (DIAS; ARAÚJO, 2020, 19).

Segundo o Ministério da Saúde, epidemiologia é uma parte da ciência que estuda:

[...] o processo saúde-doença na sociedade, analisando a distribuição populacional e os fatores determinantes das enfermidades, danos à saúde e eventos associados à saúde coletiva, propondo medidas específicas de prevenção, controle ou erradicação de doenças e fornecendo indicadores que sirvam de suporte ao planejamento, administração e avaliação das ações de saúde (BRASIL, 2005, p. 4).

Os modelos matemáticos epidemiológicos buscam descrever o comportamento de uma doença em uma população por meio de equações matemáticas ou outros elementos de abstração. Sua utilidade está como ferramenta para a tomada de decisões que permitem avaliar e definir a melhor estratégia de controle para limitar o

impacto econômico ou à saúde gerado por uma doença, ou como um instrumento analítico que permite melhorar a percepção da dinâmica que as doenças se apresentam, e assim validar a relação dos sistemas preceptores com a ocorrência da doença, principalmente no que se refere ao manejo da reprodução, que deve ser considerado para o controle da doença e sua erradicação (RINCÓN-TOBO; BALLESTEROS-RICAURTE; CASTRO-ROMERO, 2017).

A modelagem matemática epidemiológica é bastante eficiente no auxílio do processo de tomada de decisões. A aplicação de modelos analíticos na análise do desenvolvimento de epidemias pode representar importante ferramenta para decisões, permitindo a análise equilibrada e embasada do impacto da epidemia na saúde, na economia, além de entre outras áreas da sociedade (DIAS; ARAÚJO, 2020, p. 18).

Muitas das doenças infecciosas que assolaram a humanidade, como varíola, catapora, poliomielite ou tuberculose, gradualmente desapareceram do mundo moderno graças aos programas de vacinação e medicina preventiva. No entanto, outras doenças persistem em grande escala, como as de natureza parasitária em países de terceiro mundo. Algumas se tornaram endêmicas, como a malária ou dengue em regiões tropicais. Doenças que se acreditava estarem controladas voltaram a emergir, preocupando os sistemas e programas de saúde, como o sarampo e a tuberculose. A este panorama deve-se adicionar o surgimento de novas doenças epidêmicas como HIV/AIDS (1983), influenza aviária (H5N1) (1997), SARS (2002), influenza A H1N1 (2009), e atualmente o COVID-19 (2019) (UGALDE; DÍAZ; LEZCA, 2020).

Considerando as definições de endemia e epidemia que são a descrição sobre a saúde da comunidade, que ocorre quando uma doença atinge um número de indivíduos maior do que o esperado, Moura e Rocha (2012, p. 15), esclarecem que:

Endemia pode ser conceituada como a ocorrência de um agravo dentro de um número esperado de casos para aquela região, naquele período de tempo, baseado na sua ocorrência em anos anteriores não epidêmicos. Desta forma, a incidência de uma doença endêmica é relativamente constante, podendo ocorrer variações sazonais no comportamento esperado para o agravo em questão. Epidemia representa a ocorrência de um agravo acima da média (ou mediana) histórica de sua ocorrência. O agravo causador de uma epidemia tem geralmente aparecimento súbito e se propaga por determinado período de tempo em determinada área geográfica, acometendo frequentemente elevado número de pessoas. (MOURA; ROCHA, 2012, p. 15).

Todas as doenças de caráter epidêmico impõem desafios às políticas públicas de saúde. A COVID-19 destacou a interconexão global e a fragilidade dos sistemas

nacionais de saúde, mesmo em países com maior nível de desenvolvimento econômico e maior potencial científico. Em muitos desses países, os modelos matemáticos de epidemia não foram levados em consideração, pois implicavam em medidas antiepidêmicas de saúde pública que afetavam os interesses econômicos (UGALDE; DÍAZ; LEZCA, 2020).

Para Vieira (2016, p. 10):

O papel da modelagem matemática em epidemiologia é basicamente estudar e determinar características do processo de interação entre indivíduo e natureza, a fim de obter informações, previsões e projeções que deem respaldo para a criação de mecanismos de controle para combater a transmissão de doenças infecciosas.

Uma das vantagens em utilizar os modelos matemáticos segundo Nogueira, Martins e Brenzikofer (2008, p. 15), é a economia: “[...] situações diferentes podem admitir um mesmo modelo. Em tais casos, as várias situações podem ser estudadas englobadamente [...] E as conclusões obtidas serão válidas para cada situação em particular”.

De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2010, p. 96):

Um dos precursores na utilização de modelos matemáticos em epidemiologia foi Daniel Bernoulli (1700-82), que em 1760 propôs e estudou um modelo matemático a fim de avaliar os efeitos da varíola. Seu objetivo era influenciar as políticas de saúde pública. Em 1840 William Farr trabalhou com curvas de dados de epidemias de varíola na Inglaterra e no País de Gales. No começo do século XX, Hamer e Ross formularam equações matemáticas para descrever a propagação de agentes infecciosos dentro de populações [...]. Ross Ronald, ao descrever a propagação da malária, foi o primeiro a utilizar um modelo contínuo. Em 1927 Kermeck McKendrick fundamentou um quadro teórico da epidemiologia.

Silva (2010) esclarece que em 1906, Hamer postulou que, para que seja desenvolvida uma epidemia, a taxa de transmissão depende do contato entre sujeitos propensos e infectados. “O Princípio de Ação das Massas de Hamer foi originalmente formulado através de um modelo de tempo discreto, mas em 1908, Sir Ronald Ross o generalizou para tempo contínuo em seus trabalhos sobre a dinâmica da malária” (SILVA, 2010, p. 7).

No entanto, “entre 1900 e 1935, profissionais da saúde pública como Sir Ross, Hamer, Kermack e McKendrick introduziram os fundamentos dos modelos compartimentais. Um exemplo clássico é o modelo SIR, proposto por Kermack e McKendrick em 1927” (SILVA, 2010, p. 7).

Em 1952, George Macdonald introduziu o conceito de número de reprodutibilidade basal de uma infecção, R_0 , que representa o número

esperado de casos secundários de uma doença produzidos por um indivíduo infectado em uma população suscetível durante seu período de infecciosidade (SANCHES, 2015, p. 16).

A última grande e devastadora pandemia de gripe foi a gripe espanhola, que na Europa deixou 20 milhões de mortes em 1919, mais do que as causadas pela Primeira Guerra Mundial que acabava de terminar em 1918. Muitos pesquisadores acrescentam o número de mortes por gripe com as produzidas pela conflagração, pois, não sem razão, o estado em que a Europa se encontrava impossibilitou a tomada de medidas efetivas para o enfrentamento da catástrofe (UGALDE; DÍAZ; LEZCA, 2020).

Desde então, vários modelos matemáticos foram sugeridos para “os diversos tipos de doenças infecciosas que afetam a população humana, seja em nível comunitário (epidemia local) ou mundial (pandemia), como a que o mundo enfrenta atualmente com a COVID-19” (DIAS; ARAÚJO, 2020, 19).

Neste viés, seguem alguns modelos epidemiológicos encontrados na literatura:

3.1 MODELO SIR

No modelo SIR, a população considerada no domínio é dividida em três grupos, sendo que os elementos de cada grupo se alternam de forma dinâmica. Os grupos são compostos por indivíduos suscetíveis, infectados e removidos, respectivamente, o que dá origem ao nome do modelo.

O modelo é composto por três equações diferenciais ordinárias, conforme o sistema representado na equação (3.1).

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\alpha \cdot \frac{S(t) \cdot I(t)}{N} \\ \frac{dI}{dt} = \alpha \cdot \frac{S(t) \cdot I(t)}{N} - \beta \cdot I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \beta \cdot I(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

No sistema (3.1), N representa a população total do domínio, considerada constante no modelo, α e β são os coeficientes de proporcionalidade. $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ são funções que representam a quantidade de indivíduos suscetíveis, infectados e removidos, respectivamente, em função do tempo t , com $N = S(t) + I(t) + R(t)$.

$R(t)$ para qualquer t . Em uma epidemia (ou pandemia), de acordo com esse modelo, tem-se que, inicialmente (no instante $t = 0$), $S(t)$ compreende ao total da população do domínio. A partir da infecção do primeiro indivíduo, $I(t)$ cresce em função do tempo.

A taxa de decrescimento da população infectada é proporcional (com taxa de proporcionalidade α , também conhecida por coeficiente de transmissão) à população suscetível e à população infectada em cada instante de tempo, ou seja, quanto mais indivíduos suscetíveis ou infectados estiverem no domínio, maior será essa taxa de infecção, representada pelo primeiro termo do segundo membro na segunda equação do sistema (3.1). A divisão por N é uma forma de normalização das equações.

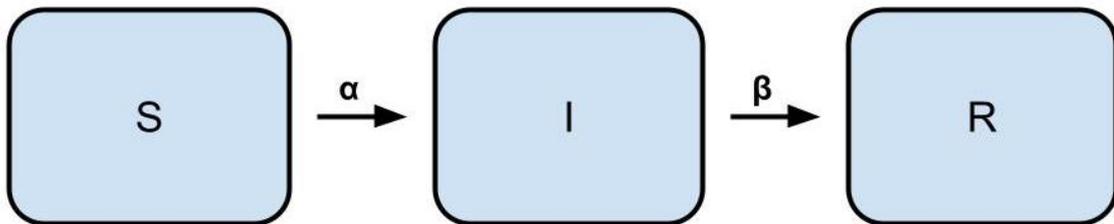
Os indivíduos que acabam sendo infectados saem, portanto, do grupo de suscetíveis e passam para o grupo dos infectados. Dessa forma, a taxa de decrescimento da função de suscetíveis é proporcional (com taxa de proporcionalidade α) à população suscetível e à população infectada em cada instante de tempo. Já a taxa de remoção de indivíduos do grupo de infectados para o grupo de removidos é proporcional (com taxa de proporcionalidade β , ou coeficiente de remoção) à quantidade de infectados no instante t . Essa taxa depende do tempo médio (τ) que cada indivíduo fica acometido pela infecção, sendo portanto, $\beta = \frac{1}{\tau}$.

Os indivíduos que passam de infectados para removidos consistem nos que se recuperam da infecção e os que evoluem para óbito. Como o modelo considera a população total constante, supõe-se que a taxa de natalidade seja igual à taxa de mortalidade na população. De forma geral, cada membro da população passa do estado suscetível para infeccioso, e deste para o removido.

O coeficiente de transmissão depende do poder de transmissibilidade (p) do vírus quando um indivíduo infectado tem contato com um indivíduo suscetível (e portanto, é uma característica de cada doença, ou mesmo de uma determinada cepa do vírus) e da taxa de contato (c) entre esses indivíduos, ou seja, da chance de um indivíduo infectado entrar em contato com um indivíduo suscetível de forma que $\alpha = cp$. Assim, justifica-se a importância do isolamento social durante uma pandemia, uma vez que este influencia diretamente no valor de c , visto que, quanto maior for o isolamento, menor será a chance de um indivíduo suscetível entrar em contato com um indivíduo infectado.

O fluxograma da Figura 5 mostra como ocorre a dinâmica entre os grupos de indivíduos no modelo SIR.

Figura 5 – Fluxograma modelo SIR



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.2 MODELO SIS

Neste modelo, considera-se N como sendo a população total constante e sem dinâmica vital, ou seja, não são considerados nascimentos nem mortes na população em questão. Neste modelo, não se contempla o grupo de indivíduos removidos, pois considera-se que ao deixar de participar do grupo dos infectados, o indivíduo volta imediatamente para o grupo dos suscetíveis. O conjunto de equações diferenciais ordinárias não lineares que descrevem este modelo é dado na equação (3.2).

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha S(t)I(t)}{N} + \beta I(t) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha S(t)I(t)}{N} - \beta I(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

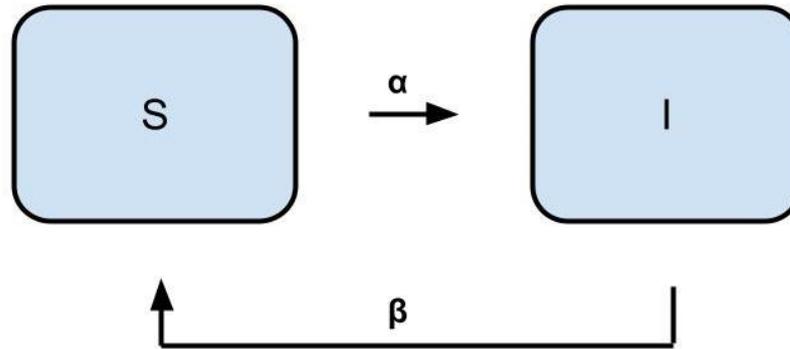
Onde $\alpha, \beta > 0$ e $N = S(t) + I(t)$.

Neste modelo, considera-se que um indivíduo suscetível que se torna infectado, quando se recupera, não ganha imunidade para a doença, retornando ao grupo de suscetíveis.

Seja α o coeficiente de proporcionalidade em que um indivíduo passa de $S(t)$ para $I(t)$, logo a variação indivíduos que se infectam em relação ao tempo t é

dada por $\frac{\alpha S(t)I(t)}{N}$. Sendo β a taxa de recuperação da doença, então $\beta I(t)$ modela a volta para o grupo de suscetíveis, considerando o fato de que a variação de $I(t)$ é proporcional ao próprio número de indivíduos infectados. O fluxograma a seguir mostra a dinâmica entre os compartimentos neste modelo:

Figura 6 – Fluxograma modelo SIS



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Uma variação possível, é a de considerar nascimentos e mortes, porém com a população constante, neste caso, tem-se dinâmica vital, ou seja, é considerado nascimentos e mortes, porém como a população N é constante, a taxa de natalidade é igual a taxa de mortalidade, além do mais, todos os nascidos não possuem a doença, ou seja, não há contágio vertical.

O conjunto de equações diferenciais para este modelo modificado é apresentado na equação (3.3)

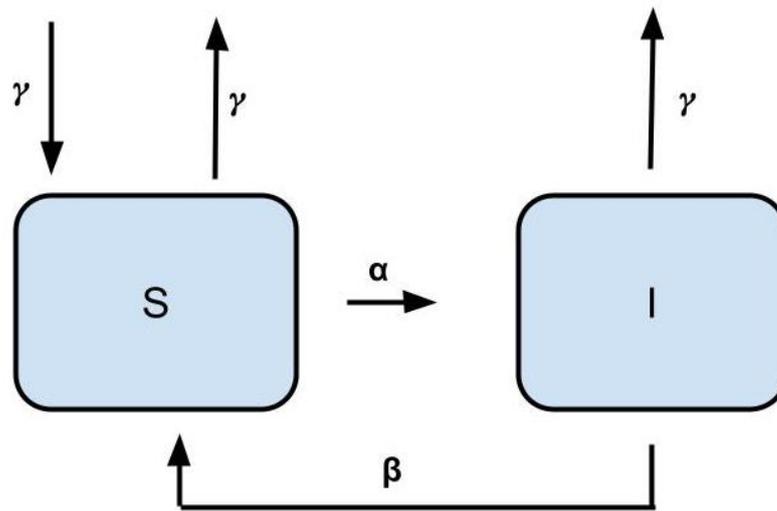
$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha S(t)I(t)}{N} + \beta I(t) + \gamma N - \gamma S(t) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha S(t)I(t)}{N} - \beta I(t) - \gamma I(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde $\alpha, \beta, \gamma > 0$ e $N = S(t) + I(t)$. Onde α é a taxa de transmissão, β a taxa de remoção, e γ a taxa de natalidade e mortalidade simultaneamente.

Um indivíduo em $S(t)$, é retirado do grupo em duas situações, seja por morte (por motivo alheio à epidemia/pandemia) ou por ter sido infectado. Neste segundo caso, passa para o grupo $I(t)$. Observa-se que há uma quantidade de nascidos que

entram em $S(t)$, a uma mesma taxa em que os indivíduos morrem. O mesmo ocorre com um indivíduo que estava infectado e após curar-se volta para $S(t)$, pois não ganhou imunidade à doença. O fluxograma a seguir mostra a dinâmica neste modelo:

Figura 7 – Fluxograma modelo SIS, com dinâmica vital e N constante



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.2.1 Modelo SIS (Com População Variável)

Nesta situação, tem-se que N não é mais uma constante, mas sim uma variável. Contudo, ainda permanece a relação $N = S(t) + I(t)$. Porém, considera-se taxas de natalidade e mortalidade diferentes.

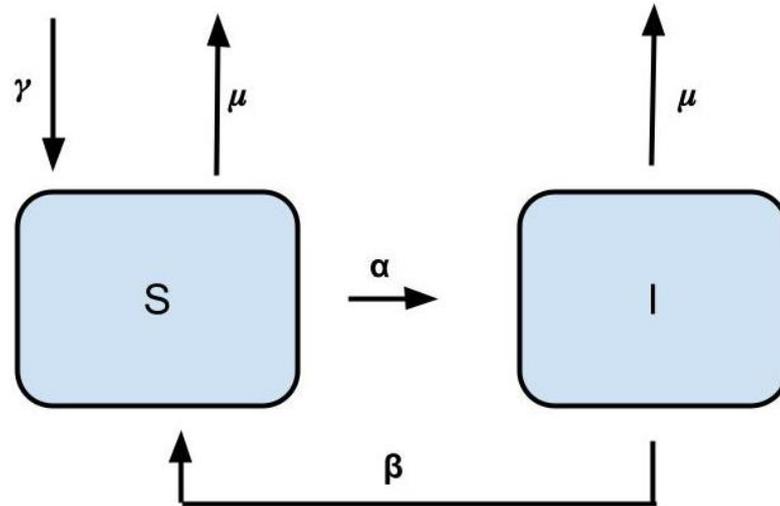
Seja γ a taxa de natalidade e μ a taxa de mortalidade, α e β os mesmos valores definidos anteriormente, segue o modelo com as equações diferenciais dado pela equação (3.4).

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha S(t)I(t)}{N} + \beta I(t) + \gamma N - \mu S(t) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha S(t)I(t)}{N} - \beta I(t) - \mu I(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde $\alpha, \beta, \gamma, \mu > 0$ e $N = S(t) + I(t)$.

O fluxograma a seguir mostra a dinâmica neste modelo:

Figura 8 – Fluxograma modelo SIS, com dinâmica vital e N variável



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3 MODELO SIRS

Nesta situação, tem-se que parte dos indivíduos, após infectados e recuperados, não exibem imunidade à doença infecciosa, e estes, retornam ao $S(t)$. Considera-se ainda, uma população constante e sem dinâmica vital.

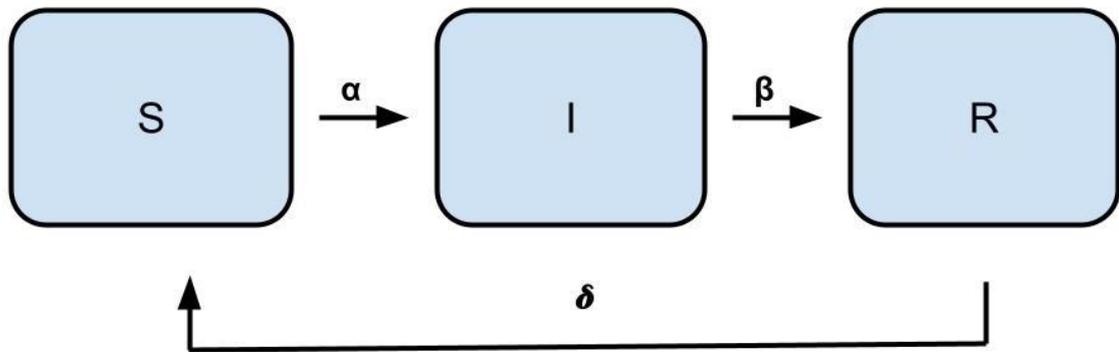
Outro fator a considerar é que a quantidade de recuperados que não adquirem imunidade é proporcional ao próprio valor $R(t)$, e a uma taxa δ , que é definida como taxa de perda de imunidade. Tendo isto em vista, sua modelagem fica como $\delta R(t)$. Logo, considerando α e β , como definidos anteriormente, tem-se o sistema de equações diferenciais dado na equação (3.5).

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha S(t)I(t)}{N} + \delta R(t) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha S(t)I(t)}{N} - \beta I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \beta I(t) - \delta R(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde $\alpha, \beta, \delta > 0$ e $N = S(t) + I(t) + R(t)$

O fluxograma do modelo SIRS é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma modelo SIRS, sem dinâmica vital



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4 PROCEDIMENTOS DE SOLUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os principais aspectos da solução do problema: Métodos, discretização das equações, a obtenção dos coeficientes e das funções para ajuste das curvas de infectados (casos) e de óbitos. No entanto, para escolher a equação governante, se fez necessária a análise de algumas hipóteses, tais como, a ocorrência ou não da imunização após um infectado se tornar recuperado, seja por um período de tempo determinado, ou definitiva (no caso de um recuperado nunca mais se infectar), pois a diferença nos modelos apresentados no capítulo anterior, está na dinâmica entre os grupos que os compõem.

Iniciando os estudos de modelagem, e considerando o comportamento no começo da pandemia, o modelo SIR se mostrava uma escolha razoável, pois acreditava-se que um indivíduo, após infectado, e curado, não retornava ao grupo de suscetíveis, o que com o avanço da pandemia se mostrou errôneo, sendo documentados diversos casos de reinfecção conforme evidenciado no capítulo 2.

Porém, os estudos disponíveis, sugerem que o retorno de um indivíduo curado para o grupo de suscetíveis não ocorre de modo imediato, conforme proposto no modelo SIRS, por isso, é essencial uma nova adaptação ao modelo SIR, incluindo a passagem do grupo de recuperados para o de suscetíveis, porém, diferentemente do que ocorre no modelo SIRS, com uma translação no tempo de k dias. Simulações usando esse modelo mostraram que a fixação desse valor em $k = 180$, apresentaram os melhores índices de aproximação. Ressalta-se que se trata de um tempo médio, e que pequenas alterações desse valor, alteram os coeficientes, porém, mantém formatos de curvas similares. Dessa forma, optou-se em usar nesta pesquisa, uma adaptação do modelo SIRS (que é consequência de uma adaptação do modelo SIR), com essa translação no tempo, podendo ser entendido como uma situação intermediária entre os modelos SIR e SIRS. Nesta adaptação, optou-se por discretizar as equações do modelo SIR (equação (3.1)), para na sequência, incluir a referida adaptação de retorno de indivíduos removidos ao grupo de suscetíveis. Isso implica que para esse retorno, não se consideram os estágios intermediários do método de Runge-Kutta, usado para a resolução do problema.

4.1 A DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Quanto ao método numérico usado para a resolução das equações diferenciais, dentre os métodos testados, o método de Runge-Kutta de 4ª ordem se mostrou mais eficiente, pois em uma comparação com o método de Euler, por exemplo, este apresentou convergência mais rápida, sem necessitar de um passo de tempo tão pequeno, quanto o necessário no método de Euler para chegar a valores próximos. Isto implica diretamente no tempo de resolução e capacidade de processamento das informações, pois, com um passo maior, há menos dados a serem processados. Com esse método, foi possível usar um intervalo de tempo de um dia, coincidindo assim, o espaçamento usado no modelo numérico com o espaçamento de tempo da disponibilidade dos dados referente à evolução dos casos de infectados e de óbitos, facilitando a sua comparação.

Considerando um problema de valor inicial:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0 \quad (4.1)$$

O método de Runge Kutta de 4ª ordem é dado por:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(j_1 + 2j_2 + 2j_3 + j_4) \quad (4.2)$$

Onde $t_{n+1} = t_n + h$ e y_{n+1} é a aproximação pelo método de Runge Kutta de 4ª ordem de $y(t_{n+1})$, e:

$$j_1 = f(t_n, y_n) \quad (4.3)$$

$$j_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right) \quad (4.4)$$

$$j_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right) \quad (4.5)$$

$$j_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3) \quad (4.6)$$

Aplicando o método nas equações do modelo, segue que:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha S(t)I(t)}{N} - \beta I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \beta I(t) \end{cases} \quad (4.7)$$

Sendo as condições iniciais: $S_0 = N - 1$, $I_0 = 1$, $R_0 = 0$, segue que:

$$\begin{cases} S_n = S_{n-1} + \frac{h}{6}(A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4) \\ I_n = I_{n-1} + \frac{h}{6}(B_1 + 2B_2 + 2B_3 + B_4) \\ R_n = R_{n-1} + \frac{h}{6}(C_1 + 2C_2 + 2C_3 + C_4) \end{cases} \quad (4.8)$$

Onde,

$$A_1 = -\frac{\alpha S_{n-1}I_{n-1}}{N} \quad (4.9)$$

$$A_2 = -\frac{\alpha \left(S_{n-1} + \frac{A_1 h}{2} \right) \left(I_{n-1} + \frac{B_1 h}{2} \right)}{N} \quad (4.10)$$

$$A_3 = -\frac{\alpha \left(S_{n-1} + \frac{A_2 h}{2} \right) \left(I_{n-1} + \frac{B_2 h}{2} \right)}{N} \quad (4.11)$$

$$A_4 = -\frac{\alpha (S_{n-1} + A_3 h) (I_{n-1} + B_3 h)}{N} \quad (4.12)$$

$$B_1 = \frac{\alpha S_{n-1}I_{n-1}}{N} - \beta I_{n-1} \quad (4.13)$$

$$B_2 = \frac{\alpha \left(S_{n-1} + \frac{A_1 h}{2} \right) \left(I_{n-1} + \frac{B_1 h}{2} \right)}{N} - \beta \left(I_{n-1} + \frac{B_1 h}{2} \right) \quad (4.14)$$

$$B_3 = \frac{\alpha * \left(S_{n-1} + \frac{A_2 h}{2}\right) \left(I_{n-1} + \frac{B_2 h}{2}\right)}{N} - \beta \left(I_{n-1} + \frac{B_2 h}{2}\right) \quad (4.15)$$

$$B_4 = \frac{\alpha(S_{n-1} + A_3 h)(I_{n-1} + B_3 h)}{N} - \beta(I_{n-1} + B_3 h) \quad (4.16)$$

$$C_1 = \beta I_{n-1} \quad (4.17)$$

$$C_2 = \beta \left(I_{n-1} + \frac{B_1 h}{2}\right) \quad (4.18)$$

$$C_3 = \beta \left(I_{n-1} + \frac{B_2 h}{2}\right) \quad (4.19)$$

$$C_4 = \beta(I_{n-1} + B_3 h) \quad (4.20)$$

Usando as equações (4.8) até (4.20), é possível propor expressões para os casos diários, e removidos diários, visto que S_n , I_n , R_n são expressões para os suscetíveis ativos, infectados ativos e removidos ativos, respectivamente. Portanto, sendo I'_n o número de infectados no dia n e R'_n o número de removidos no dia n , têm-se que estes valores são calculados de acordo com as equações (4.21) e (4.22).

$$I'_n = \frac{h}{6}(B'_1 + 2B'_2 + 2B'_3 + B'_4) \quad (4.21)$$

$$R'_n = \frac{h}{6}(C_1 + 2C_2 + 2C_3 + C_4) \quad (4.22)$$

considerando que:

$$B'_1 = \frac{\alpha S_{n-1} I_{n-1}}{N} \quad (4.23)$$

$$B'_2 = \frac{\alpha \left(S_{n-1} + \frac{A_1 h}{2}\right) \left(I_{n-1} + \frac{B_1 h}{2}\right)}{N} \quad (4.24)$$

$$B'_3 = \frac{\alpha \left(S_{n-1} + \frac{A_2 h}{2} \right) \left(I_{n-1} + \frac{B_2 h}{2} \right)}{N} \quad (4.25)$$

$$B'_4 = \frac{\alpha (S_{n-1} + A_3 h) (I_{n-1} + B_3 h)}{N} \quad (4.26)$$

Outra curva a ser modelada, é a de óbitos causados pela doença, porém pode-se determinar esta curva em função do número de casos de infectados diários. Sendo assim, tem-se que:

$$M'_n = \mu I'_n \quad (4.27)$$

Onde μ é a taxa de letalidade e M'_n é a quantidade de mortes diárias no período (dia) n .

Com isto, pode-se determinar o grupo de recuperados diários, ou seja, os indivíduos que passam de I_n para R_n por terem se recuperado da doença. Tem-se então a equação (4.28):

$$RC'_n = R'_n - M'_n \quad (4.28)$$

Onde RC'_n representa a quantidade de indivíduos recuperados no n – éximo dia.

Considerando a hipótese de que após $k = 180$ dias, há a perda de imunidade, tem-se que os recuperados (removidos que não foram à óbito) retornam ao grupo de suscetíveis após este período. O equacionamento dessa situação é obtido acrescentando esta informação nas equações que descrevem S_n e R_n do sistema (4.8), para $n \geq 180$, obtendo as equações (4.29) e (4.30).

$$S_n = S_{n-1} + \frac{h}{6} (A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4) + RC'_{n-180} \quad (4.29)$$

$$R_n = R_{n-1} + \frac{h}{6} (C_1 + 2C_2 + 2C_3 + C_4) - RC'_{n-180} \quad (4.30)$$

4.2 A DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES

Nas primeiras simulações, ainda no início da pandemia, foi possível observar que o coeficiente de transmissão não seria uma constante. Porém, nesta fase, o modelo SIR se mostrou bastante eficiente ao considerar este coeficiente como função exponencial no tempo.

Contudo, à medida que a pandemia foi evoluindo, o comportamento da taxa de transmissão começou a se mostrar um pouco diferente, revelando-se um perfil cíclico, visto que observou-se várias “ondas” de contágio, possivelmente devido ao aparecimento de novas cepas surgidas pelas diferentes mutações do vírus. Outro possível fator para esse fenômeno pode estar relacionado ao fato de que quando o crescimento das curvas de contágio se tornava elevado, algumas medidas mais rígidas de controle eram tomadas por autoridades responsáveis, e à medida que as curvas de contágio começavam a decrescer, estas medidas acabavam por serem flexibilizadas. Esse fenômeno, com perfil cíclico, indicou a possibilidade de se considerar uma parcela periódica para modelar o coeficiente de transmissão. Associado a isso, considerou-se ainda a adaptação do modelo com a possibilidade de reinfeção após um determinado período. Após testar várias funções e diferentes períodos para a reinfeção, os melhores resultados foram obtidos ao considerar um período médio de 180 dias para a reinfeção. Dentre as funções testadas para modelar o coeficiente de transmissão, a que conseguiu melhor aproximação foi a função dada pela equação (4.31).

$$\alpha(t) = k_1 * e^{k_4 * t} + k_2 * (1 - \cos(k_3 * t)) + k_5 \quad (4.31)$$

Onde k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 são constantes.

Quanto a taxa de remoção, esta é o inverso multiplicativo do tempo médio em que um indivíduo se mantém infectado pelo vírus e apresenta capacidade de transmiti-lo para outro indivíduo suscetível. Para as simulações apresentadas neste trabalho, este tempo médio foi estimado em doze dias, de forma que $\beta = 1/12$.

Para a aproximação da taxa de letalidade, novamente observou-se um comportamento cíclico, sugerindo-se a adoção de uma função periódica. Observou-se ainda que esse período coincide com o período da função usada para descrever

o coeficiente de transmissão. Assim, após testar diferentes funções, optou-se pela equação (4.32) para descrever o coeficiente que fornece a taxa de letalidade.

$$\mu(t) = p_1 * (1 - \cos(k_3 * t)) + p_2 \quad (4.32)$$

Com p_1 e p_2 constantes.

A COVID-19 apresenta uma alta taxa de contágio, o que pode sobrecarregar o sistema de saúde, fragilizando, ou até mesmo restringindo, o atendimento às pessoas com sintomas médios e graves. Com isso, dependendo da quantidade de infectados ativos, a taxa μ aumenta consideravelmente. Isso ocorre quando a quantidade de casos ativos em estado grave supera a capacidade de atendimento do sistema hospitalar de forma a sobrecarregar o sistema de saúde. Dessa forma, pacientes com sintomas graves que não conseguem atendimento adequado tende ir à óbito. Esse fato foi observado em alguns momentos da pandemia em diferentes regiões do país.

Nas simulações realizadas, observou-se a necessidade da inclusão de um gatilho que considerasse essa situação nos momentos em que a quantidade de infectados fosse muito elevada, pois ao não considerar esse crescimento acentuado na taxa de letalidade nos períodos de alto contágio, as curvas de mortalidade do modelo ficavam significativamente abaixo das curvas reais de mortalidade. Fazendo uma estimativa do quantitativo de leitos hospitalares (de enfermaria e UTI) disponíveis no país e do percentual aproximado de infectados que necessitam de atendimento especializado, definiu-se que o gatilho seria acionado sempre que o número de infectados do momento ultrapassasse a quantidade de 1.800.000 indivíduos, considerando ainda a taxa de notificação adotada no trabalho em sendo de 30%. Sendo assim, sempre que $I(t)$ ultrapassasse esse valor, um fator de ampliação na função μ era inserido. Dessa forma, as simulações realizadas na resolução do problema inverso com diferentes formatos de funções, levaram a definir a equação (4.33) para descrever a taxa de letalidade, sempre que $\frac{I(t)}{0,30} \geq 1800000$.

$$\mu(t) = \left(\frac{I(t) - 1800000}{1800000} \right)^2 * [p_1 * (1 - \cos(k_3 * t)) + p_2]. \quad (4.33)$$

Resolvendo o problema inverso, buscou-se aproximar as constantes k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 da equação (4.31) e em seguida, de forma independente, as constantes p_1 e p_2 da equação (4.33), porém em um segundo momento foi feito um

refinamento, buscando a maximização da aproximação de todas as constantes ao mesmo tempo. Inicialmente foi usada a função “solver” disponível na planilha eletrônica do Excel, seguido do refinamento usando o software Scilab. Para a solução do problema inverso, adotou-se o Método de Procura em Rede proposto por Borges, Cervi e Vione (2008), que consiste em definir para cada parâmetro a ser estimado, um intervalo que supostamente contenha um valor ótimo do parâmetro em questão, construindo então uma rede de intervalos particionados (um intervalo particionado para cada parâmetro). Com essa rede, o problema direto é resolvido com todas as combinações possíveis dos valores que compõe a rede, fazendo a busca pelo “menor erro” de acordo com o critério estabelecido. O critério usado para verificar o grau de aproximação foi o dos mínimos quadrados.

Sendo o R^2 de um conjunto de dados definido pela equação (4.34):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (4.34)$$

Onde:

a_i : Dados oficiais no período i .

b_i : Dados obtidos pelo modelo no período i .

\bar{a} : Média aritmética dos dados oficiais

Com isso, segue que, os dados do modelo se aproximam dos dados oficiais, quando R^2 se aproxima de 1.

Para o ajuste dos coeficientes, comparou-se os dados fornecidos na resolução das equações do modelo, considerando a equação (4.31) com os dados oficiais de casos diários no período de 26/02/2020 a 20/05/2021 (num total de 450 dias), disponíveis no site do Ministério da Saúde, considerando uma taxa de notificação de 30%. Determinou-se o valor de R^2 oriundo desta comparação, e o R'^2 obtido pela comparação dos casos acumulados oficiais com os determinados pelo modelo. Os valores dos coeficientes ajustados para a função da taxa de transmissão (equação 4.31), usando o método da procura em rede são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Coeficientes da taxa de transmissão ajustados

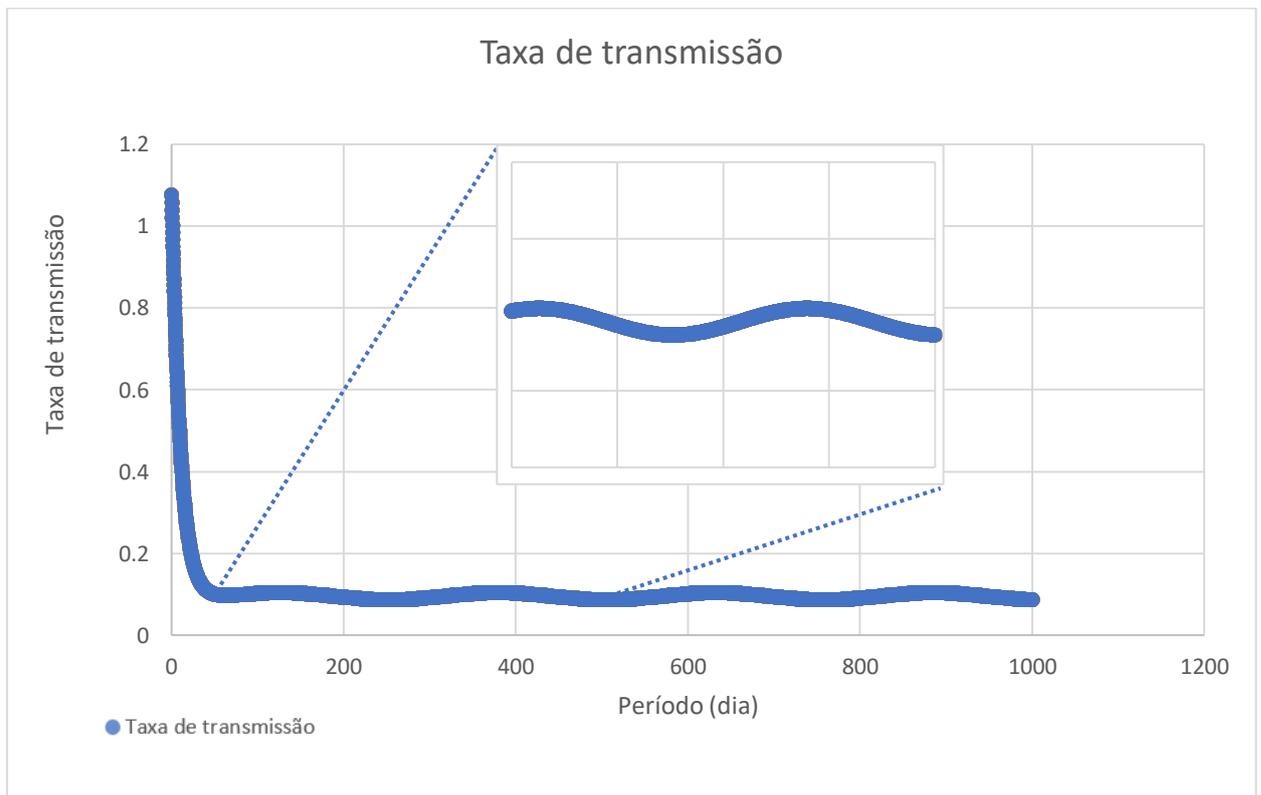
k_1	0,990000000
-------	-------------

k_2	0,008715788
k_3	0,024850418
k_4	0,096794832
k_5	0,086578529
R^2	0,723875275
R'^2	0,987634275

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 10 representa a função da taxa de transmissão (equação 4.31), com os coeficientes ajustados do Quadro 1:

Figura 10 – Função da taxa de transmissão com os coeficientes ajustados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para determinar os coeficientes da taxa de letalidade dados pelas equações (4.32) e (4.33), a comparação foi com os dados fornecidos pelo modelo e os dados oficiais de óbitos diários disponíveis no site do Ministério da Saúde, obtendo assim o R''^2 , e a comparação dos óbitos acumulados obtendo o R'''^2 . Os valores dos coeficientes ajustados pelo método da procura em rede para a função da taxa de letalidade são apresentados no Quadro 2.

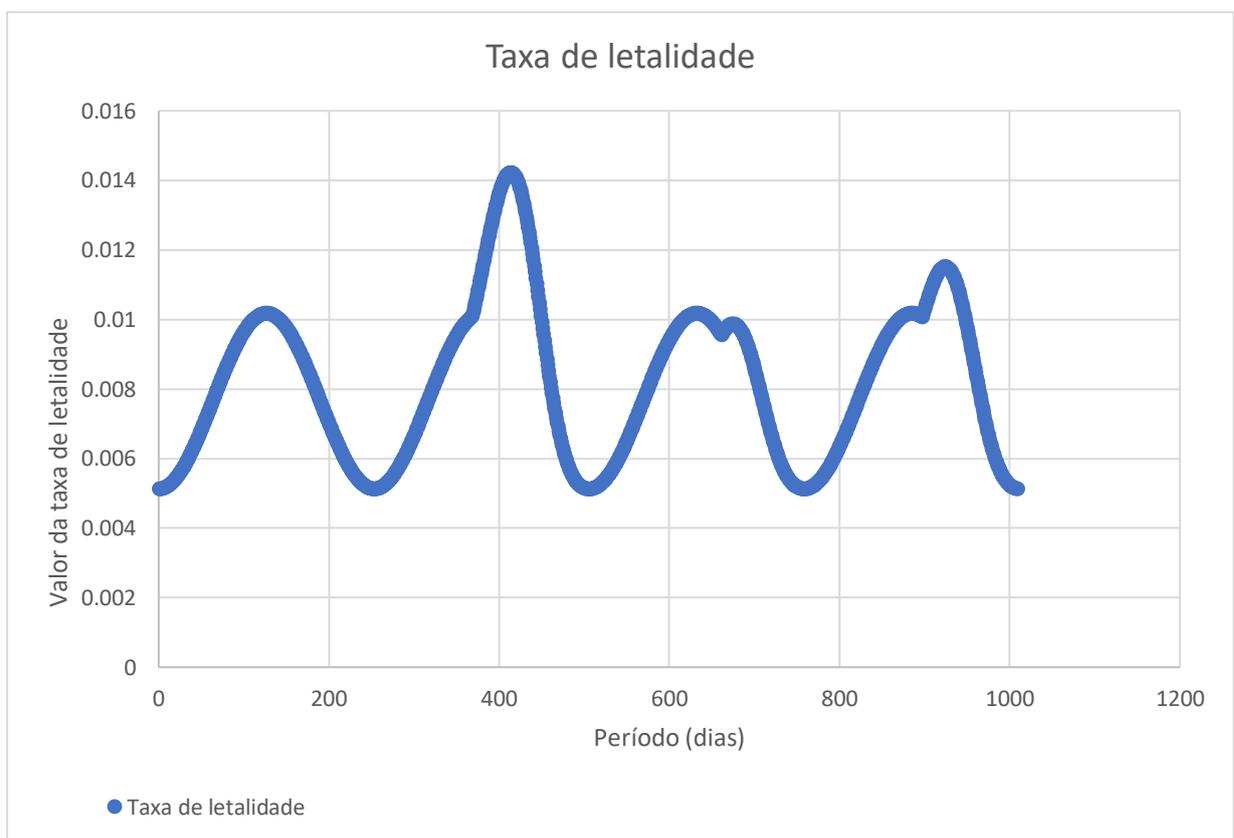
Quadro 2 – Coeficientes da taxa de letalidade ajustados

p_1	0,002525
p_2	0,005136
R''^2	0,817567
R'''^2	0,983100

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 11 representa a função da taxa de letalidade (equações 4.32 e 4.33), com os coeficientes ajustados o Quadro 2:

Figura 11 – Função da taxa de letalidade com os coeficientes ajustados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os coeficientes acima apresentados nos Quadros 1 e 2 foram determinados de modo a maximizar a média aritmética simples de R^2 , R'^2 , R''^2 e R'''^2 . Na Figura 11 é possível observar claramente três momentos em que o gatilho dado na equação (4.33) é acionado.

4.3 A INCLUSÃO DA VACINA NO MODELO

Para a inclusão da vacina no modelo, se fez necessário uma adaptação da quantidade de suscetíveis e recuperados, ou seja, como a vacina implica na alteração da quantidade de pessoas passivas de se infectarem, a cada dia em que há pessoas sendo imunizadas, estas saem dos grupos de suscetíveis e recuperados, isto considerando o fato de que quem está no grupo de infectados não é imunizado.

Diante disso, é válido pensar que, se no dia n foi vacinada certa quantidade de pessoas (uma parcela ω da população) com uma taxa σ de eficácia da vacina, assim, neste mesmo período (dia) é retirada da população suscetível a proporção de $\omega * \sigma$, ou seja, a quantidade de indivíduos é multiplicada pelo $(1 - \omega * \sigma)$. Assim a quantidade de indivíduos suscetíveis ativos no modelo (S''_n), considerando a vacina, é dado pela equação (4.35). Isto significa que após a resolução da equação (4.29) essa quantidade é atualizada pela equação (4.35) em cada iteração, considerando a imunização tenha iniciado no dia φ .

$$S''_n = (1 - \omega * \sigma) * (S_n + RC''_{n-180}), \text{ se } n \geq \varphi \quad (4.35)$$

Onde RC''_n , representa os recuperados diários no modelo mediante a vacina.

Os indivíduos recuperados do dia $\varphi - 180$, estão retornando para o grupo dos suscetíveis, como já foi previsto nas hipóteses do modelo. Assim, no primeiro dia de imunização estarão também no grupo de suscetíveis os indivíduos recuperados a 180 dias, de forma que a equação que descreve a quantidade de suscetíveis, juntamente com a equação que descreve a quantidade de recuperados será multiplicada pelo fator $(1 - \omega * \sigma)$, como representado na equação (4.34). Já os recuperados do dia $\varphi - 179$ serão reduzidos ao fator $(1 - \omega * \sigma)$ antes de retornar ao grupo de suscetíveis no dia $\varphi + 1$, bem como os recuperados do dia $\varphi - 178$, no dia $\varphi + 2$ foram reduzidos no fator $(1 - \omega * \sigma)^2$ antes de retornarem ao grupo de suscetíveis, e assim por diante, o que implica na inclusão das equações (4.35) e (4.36) para calcular o termo RC''_n .

$$RC''_n = RC'_n * (1 - \omega * \sigma)^{(n-\varphi+180)}, \text{ se } \varphi - 180 < n < \varphi. \quad (4.35)$$

$$RC''_n = RC'_n * (1 - \omega * \sigma)^{180}, \text{ se } n \geq \varphi. \quad (4.36)$$

Considera-se neste caso, a hipótese de que a saída dos indivíduos imunizados ocorre de forma homogênea em cada grupo descrito acima. Portanto, para as situações que não estão previstas nas equações (4.34), (4.35) e (4.36), considera-se as expressões para S_n, I_n, R_n já descritas anteriormente.

Para o uso dos dados oficiais para incluir a vacina no modelo, ou seja, se no dia n foram vacinadas V_n pessoas, tem-se que ω varia em função de n , sendo dado por $\omega_n = \frac{V_n}{N}$. Neste caso, a atualização de RC''_n é adaptada para considerar essa variação diária.

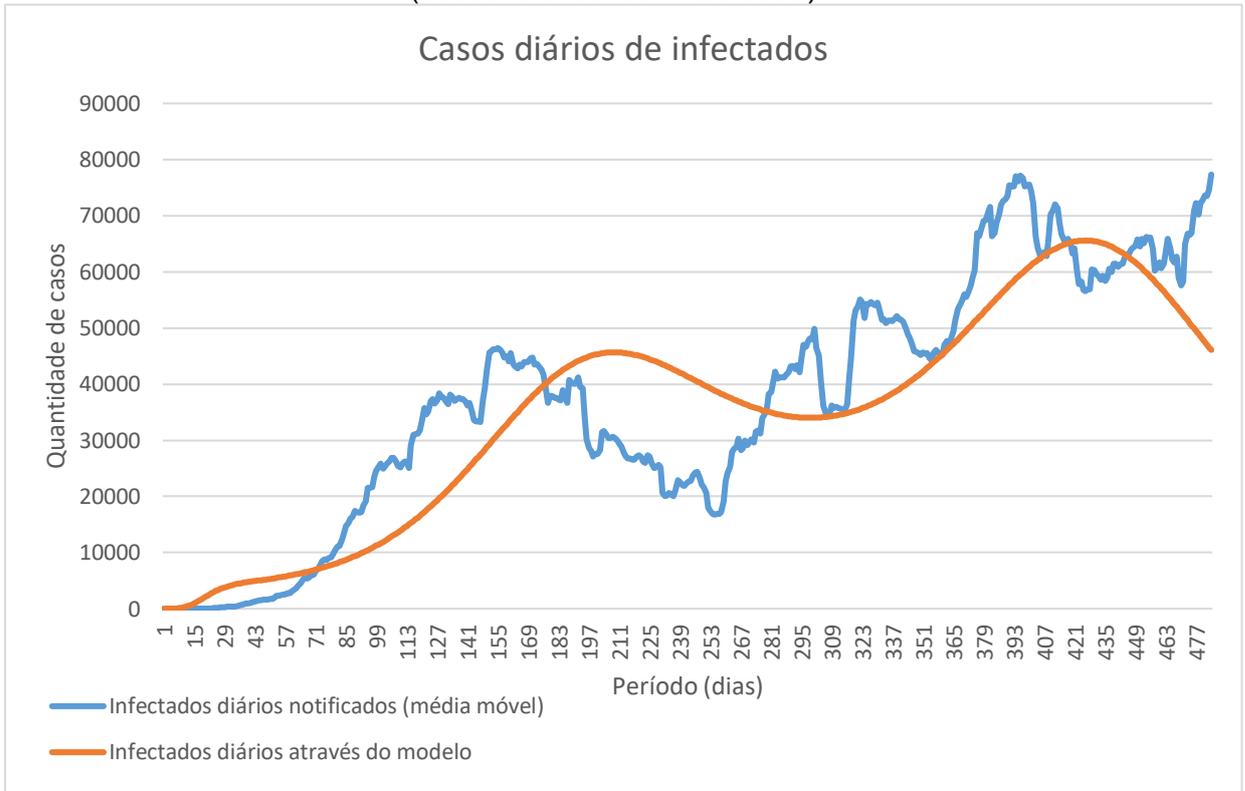
5 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se as simulações numéricas desenvolvidas a partir do modelo adotado, descrito nos capítulos anteriores. Para as situações em que havia disponibilidade, as curvas obtidas nas simulações são comparadas com os dados oficiais notificados pelo ministério da saúde, disponíveis em <https://covid.saude.gov.br/>. As simulações foram obtidas, considerando como hipóteses, a taxa de notificação de 30%, o tempo médio de remoção de 12 dias e o tempo médio da perda de anticorpos de 180 dias. Considera-se que as influências quanto as restrições estabelecidas pelos órgãos do governo e flexibilizações das mesmas, ficam implícitas nos termos periódicos dos coeficientes ajustados. A menos que se informe o contrário, nos gráficos apresentados neste capítulo, considera-se as curvas ajustadas segundo os coeficientes dos quadros 1 e 2.

Nas primeiras simulações são mostradas as curvas obtidas no ajuste dos coeficientes do modelo, comparando-se os valores calculados pelo modelo com os dados oficiais notificados pelo Ministério da Saúde. Neste sentido, na Figura 12, são comparados os dados do modelo e das notificações oficiais para o número de casos diários de infectados. Considera-se como dia 1, a data de 26/02/2020. Já os dados relativos aos casos acumulados nestas condições são mostrados na Figura 13.

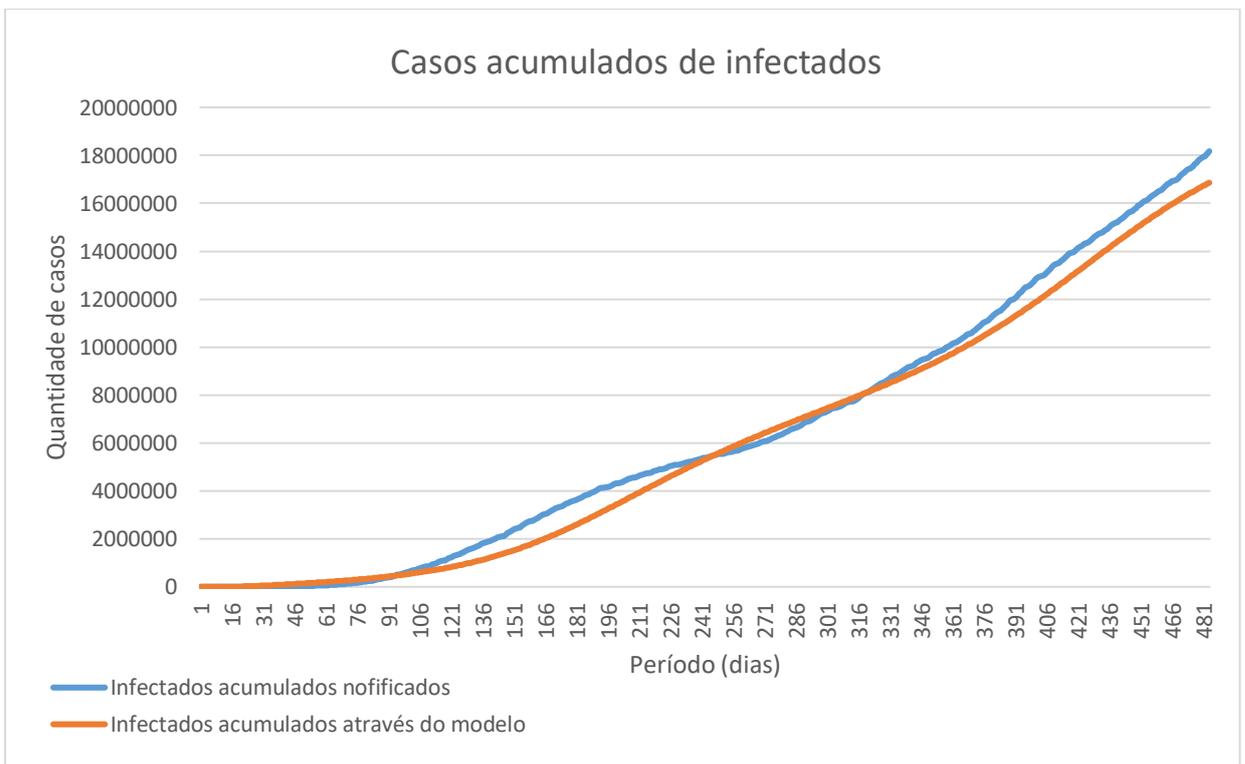
Observa-se que a tendência das curvas obtidas através dos dados calculados pelo modelo acompanha de forma satisfatória as tendências de crescimento e decréscimo dos dados notificados, contudo, na Figura 13, no período 460 (31/05/2021) aproximadamente, o modelo previa uma queda nos casos diários, e, conseqüentemente, na taxa de variação dos acumulados, porém os dados da amostra tornaram a subir. Um fato que pode justificar tal discrepância, é, que quando os casos subiam muito alguns governos locais determinavam o fechamento do comércio em geral, e restringiam ao máximo a circulação de pessoas, porém, naquele período observou-se maior flexibilização de tais restrições em diferentes estados, o que pode ter influenciado nessa diferença apresentada.

Figura 12 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo (casos diários de infectados)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 13 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo (casos acumulados de infectados)

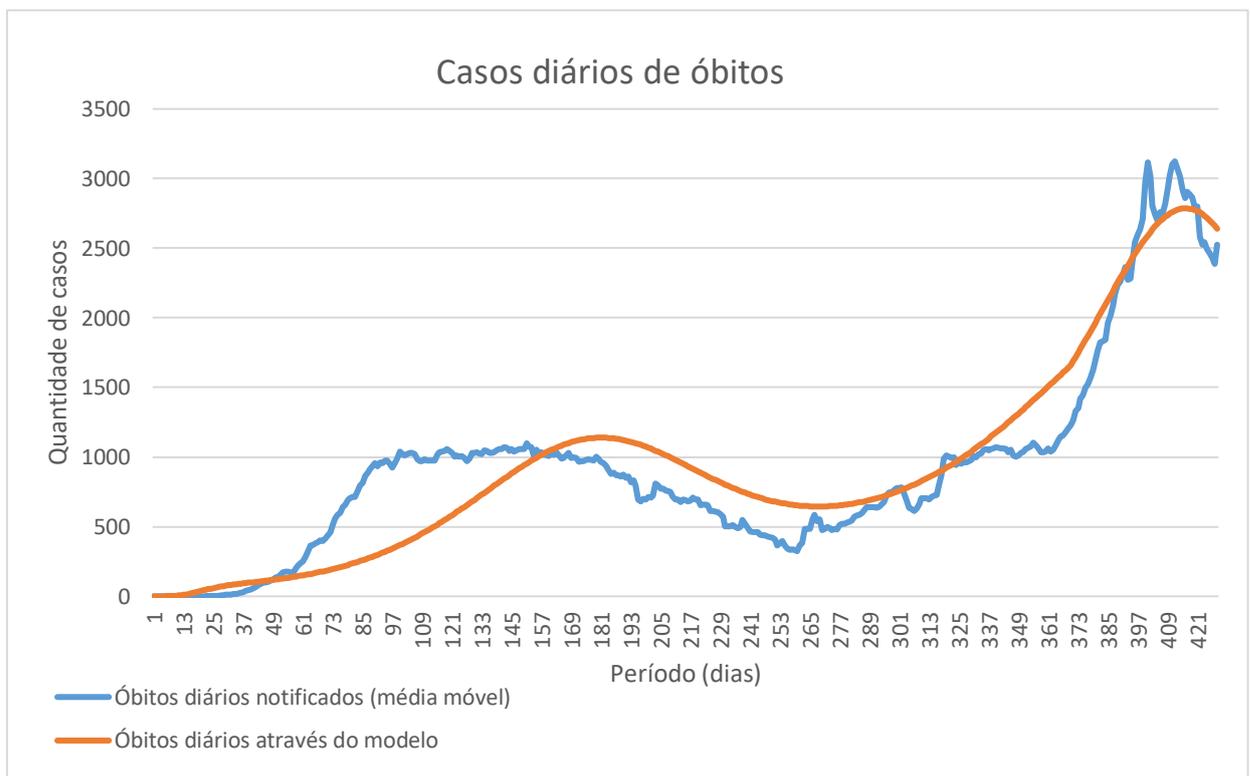


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na Figura 14, são comparados os dados do modelo e das notificações oficiais para o número de óbitos, considerando as mesmas condições e hipóteses adotadas nas simulações anteriores. Já os dados relativos ao quantitativo de óbitos acumulados, decorrentes de complicações da COVID-19, nestas mesmas condições e hipóteses, são mostrados na Figura 15.

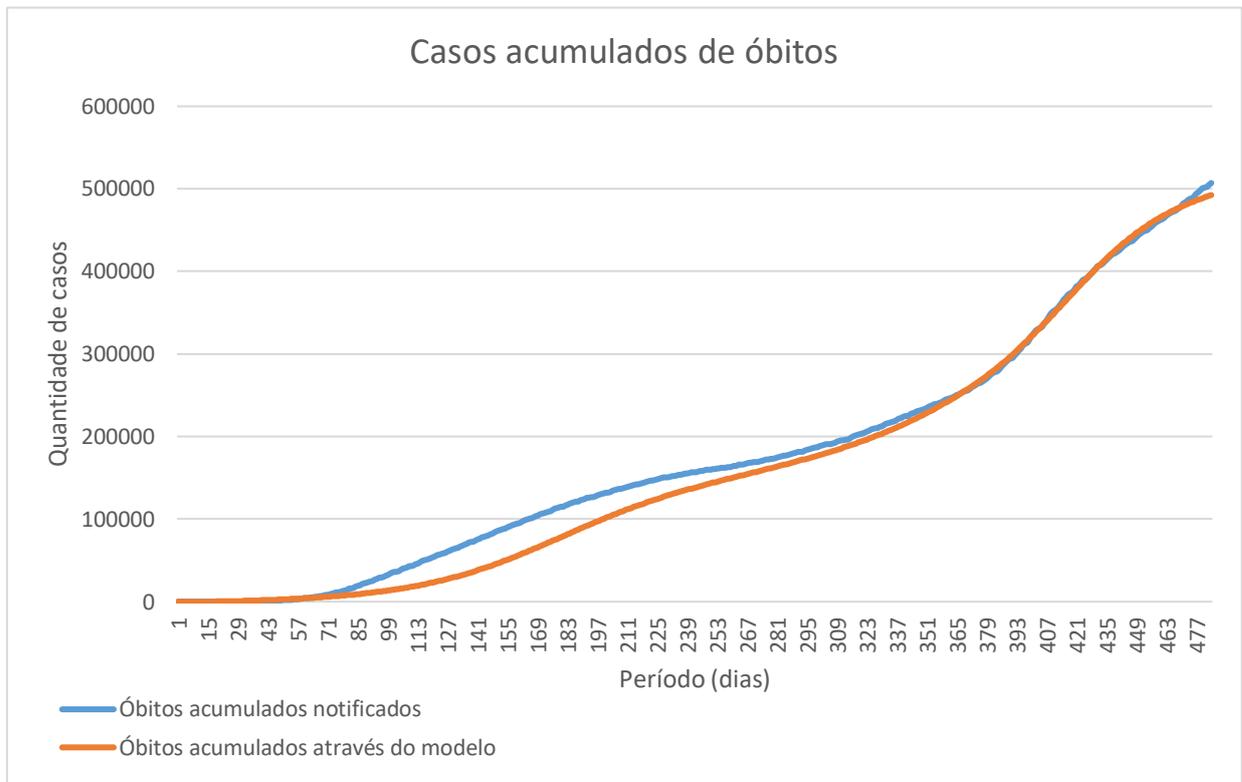
Novamente verifica-se que as linhas de tendência das curvas calculadas pelo modelo acompanham de forma satisfatória, as linhas de tendência dos casos de óbitos notificados, inclusive nos picos de contaminação, em que passa a ser usada a equação (4.33).

Figura 14 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo (casos diários de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

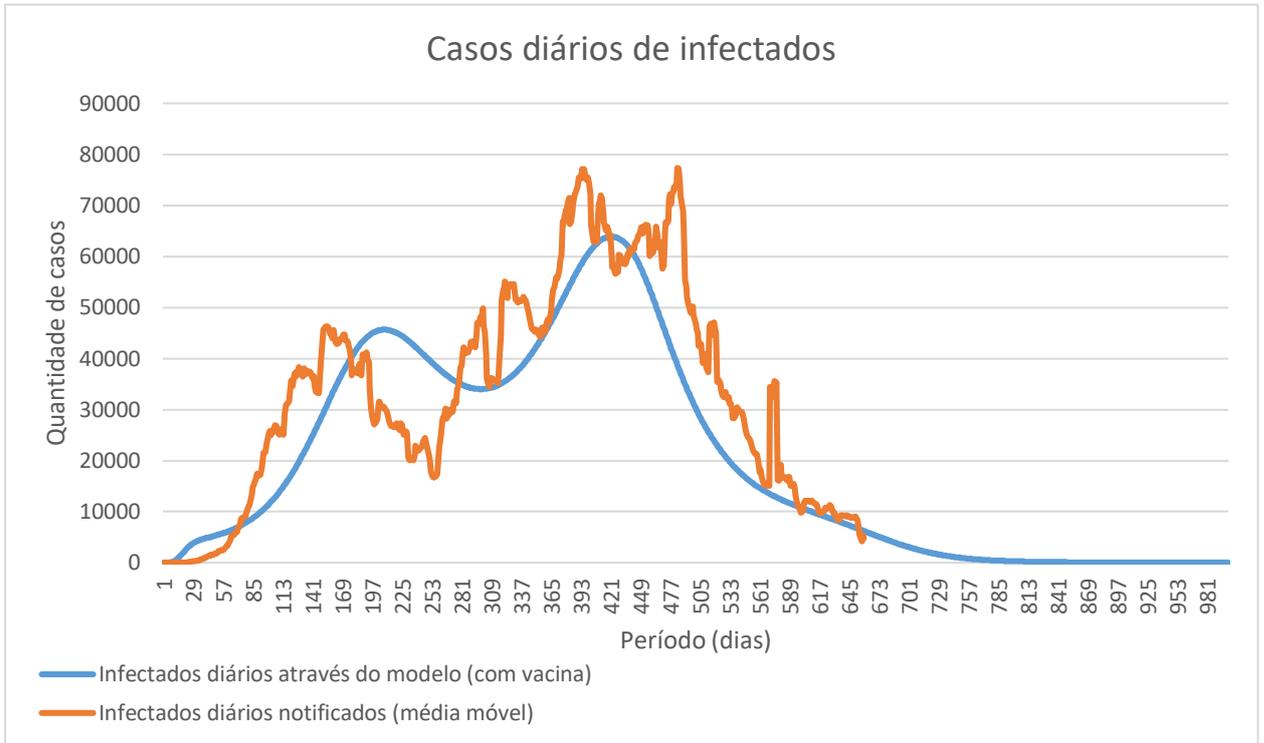
Figura 15 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo (casos acumulados de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

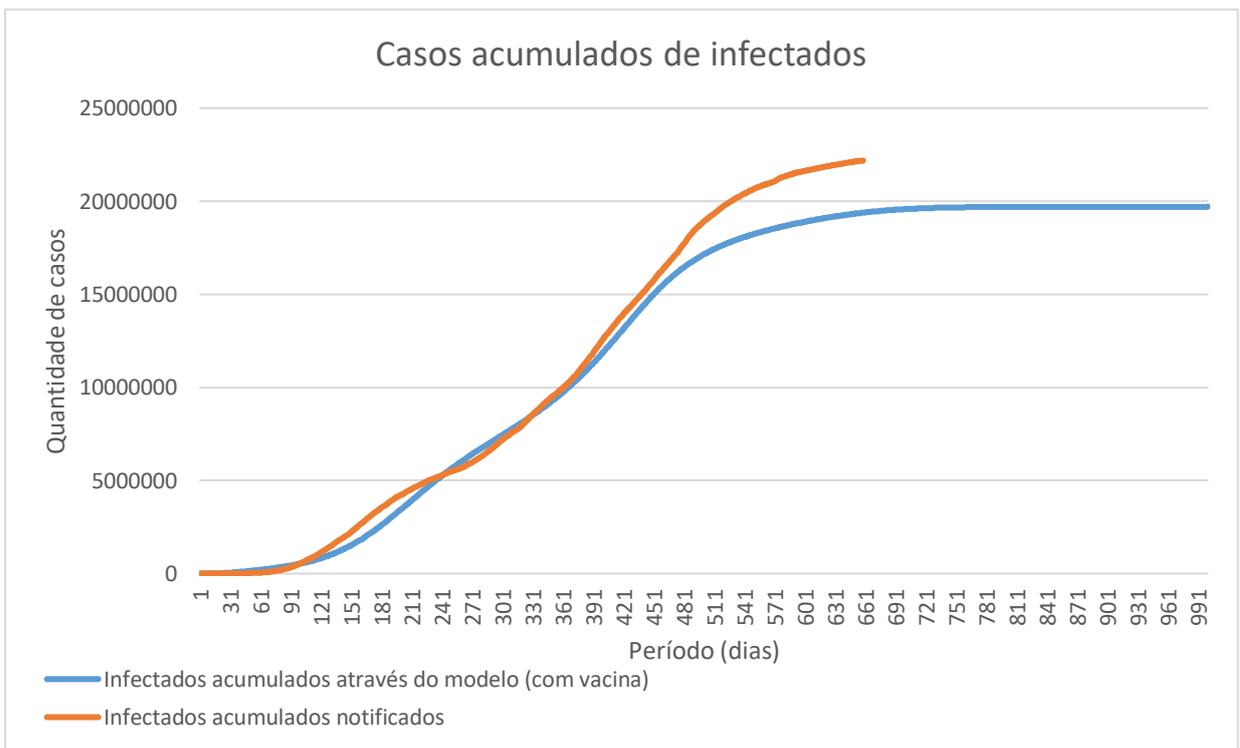
Com a finalidade de simular os efeitos da vacinação, foram desenvolvidas diversas simulações, usando o modelo ajustado neste trabalho. Nas primeiras simulações com esta finalidade, considera-se o número de vacinados V_n de acordo com os dados oficiais de vacinação disponíveis no site do Ministério da Saúde. Para estas simulações, considerou-se o efeito da vacina para fins de imunização de 20 dias após a aplicação da segunda dose, ou dose única e a eficácia média das vacinas aplicadas, conforme dados apresentados pelos fabricantes das vacinas em seus pedidos de autorização junto à ANVISA. Considera-se o início da vacinação com a segunda dose, ou dose única, o dia 355 das simulações (15/02/2021), porém com os efeitos da imunização, conforme descrito anteriormente, 20 dias a partir da aplicação. Evidentemente, que este efeito é pequeno no início e vai sendo ampliado ao longo do tempo, quando um número maior de indivíduos é imunizado. Com base nesta situação, nas Figuras 16 e 17, são apresentadas as curvas de comparação dos casos diários e acumulados de indivíduos infectados, respectivamente.

Figura 16 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo com vacina (casos diários de infectados).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 17 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo com vacina (casos acumulados de infectados)

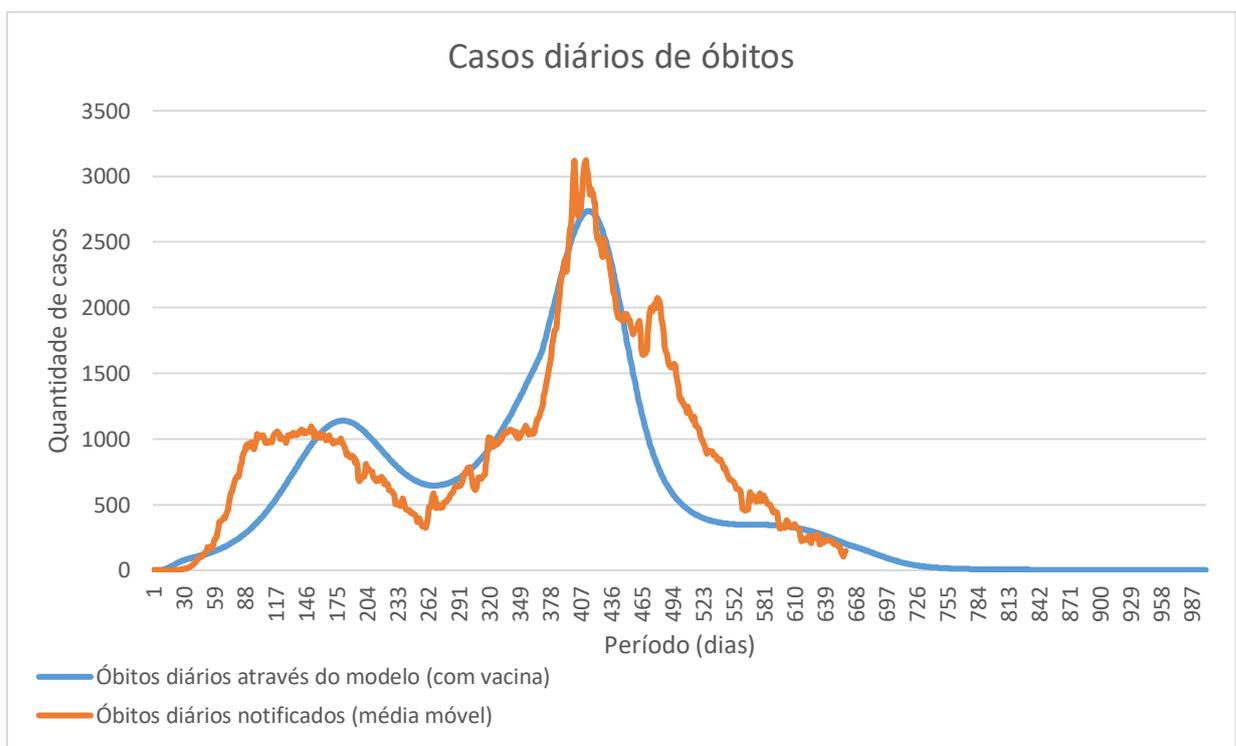


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A curva calculada pelo modelo, mostrada na Figura 17, revela uma tendência de estabilidade do número de casos acumulados, em consequência da tendência da curva mostrada na Figura 16 tender ao controle da pandemia em função da vacinação. Isto reforça a hipótese da importância da vacinação como uma das formas mais eficazes de contenção da transmissão de uma doença em uma dada população.

A comparação dos dados das notificações oficiais, com os dados do modelo (considerado o esquema oficial de vacinação), para as curvas de ocorrência de óbitos diários, considerada a vacinação é mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo com vacina (casos diários de óbitos)

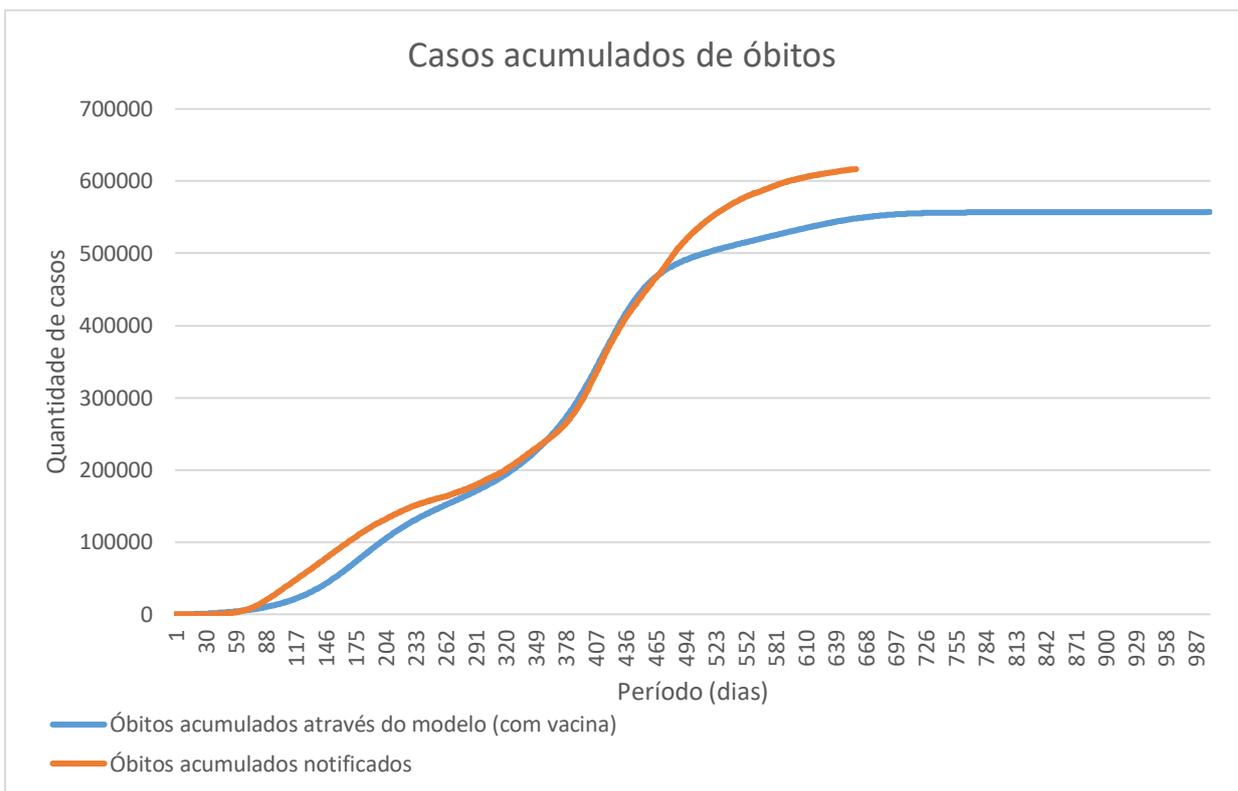


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Observando a Figura 18, novamente é possível verificar a influência da hipótese, segundo a qual, ao se atingir uma certa quantidade de infectados no Brasil, (sendo esta quantidade fixada em 1.800.000, conforme mencionado no capítulo 4 e que desconsiderado a subnotificação, corresponde à 540.000 casos notificados). Sem essa hipótese, nos dois picos observados no gráfico, a curva em azul ficava significativamente abaixo do observado neste gráfico. Observa-se ainda que a partir do período 460 (31/05/2021), aproximadamente, a curva de notificações oficiais apresenta tendência com taxa de decréscimo significativamente inferior à taxa de

decrescimento da curva obtida pelo modelo. Uma das hipóteses, para essa discrepância, é de que ela esteja relacionada às flexibilizações das restrições que foram acentuadas com o avanço da vacinação. Esta flexibilização não foi captada pelo modelo, visto que os coeficientes foram ajustados com os dados notificados até a data (20/05/2021). Apesar de certa discrepância observada, ressalta-se que mesmo assim, a curva de novos casos diários, mostrada na Figura 16 e a curva de óbitos diários, mostrada na Figura 18, evidenciam que com o avanço da vacinação, foi possível flexibilizar as restrições de circulação das pessoas, sem que isso, implicasse em uma nova onda significativa de contágio. O reflexo da situação em tela também é observado nas curvas de óbitos acumulados, que são mostradas na Figura 19.

Figura 19 – Comparação dos dados notificados com os dados do modelo com vacina (casos acumulados de óbitos)

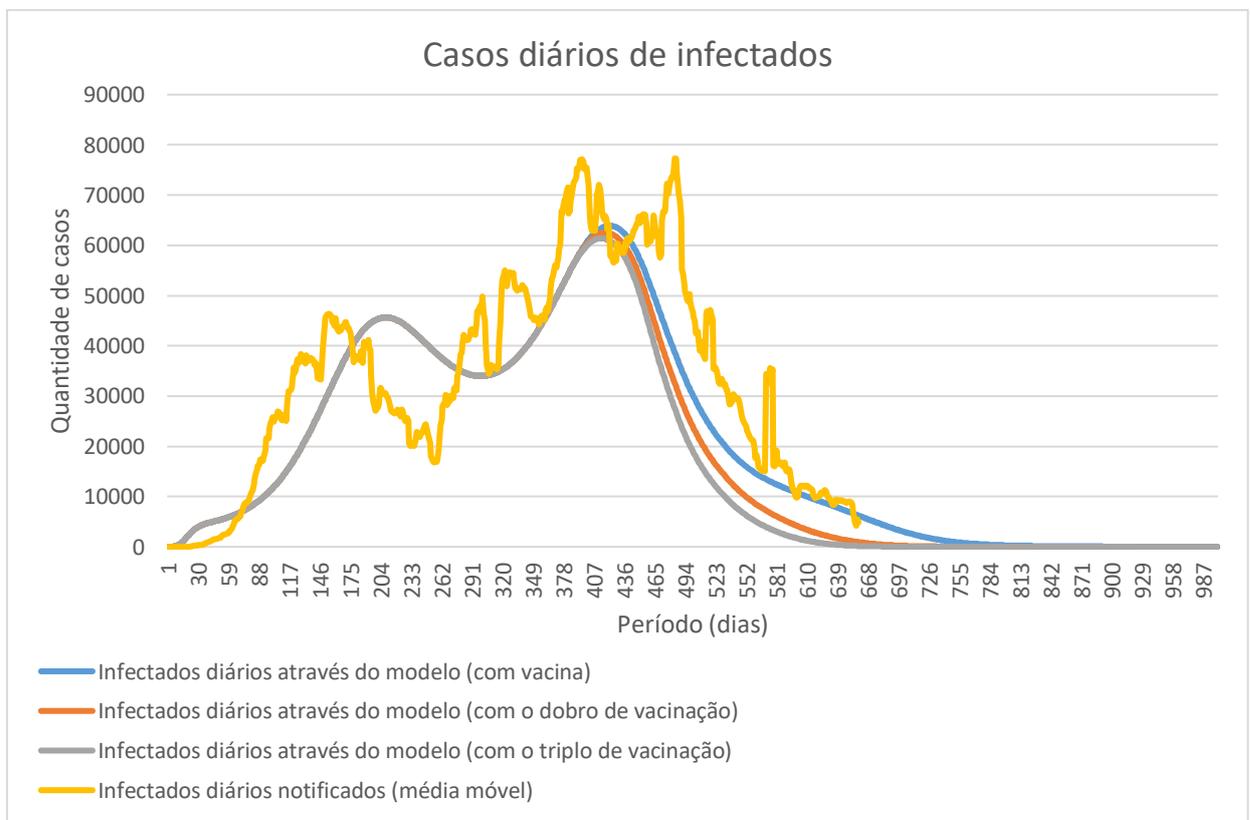


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com a finalidade de melhor observar a influência da vacinação nas curvas de casos de infecção e de óbitos obtidas pelo modelo, foram realizadas algumas simulações, considerando-se diferentes índices de pessoas vacinadas ao longo do período da pandemia, de forma a visualizar o impacto de cada uma das situações simuladas nessas curvas. Na primeira simulação feita com esta finalidade,

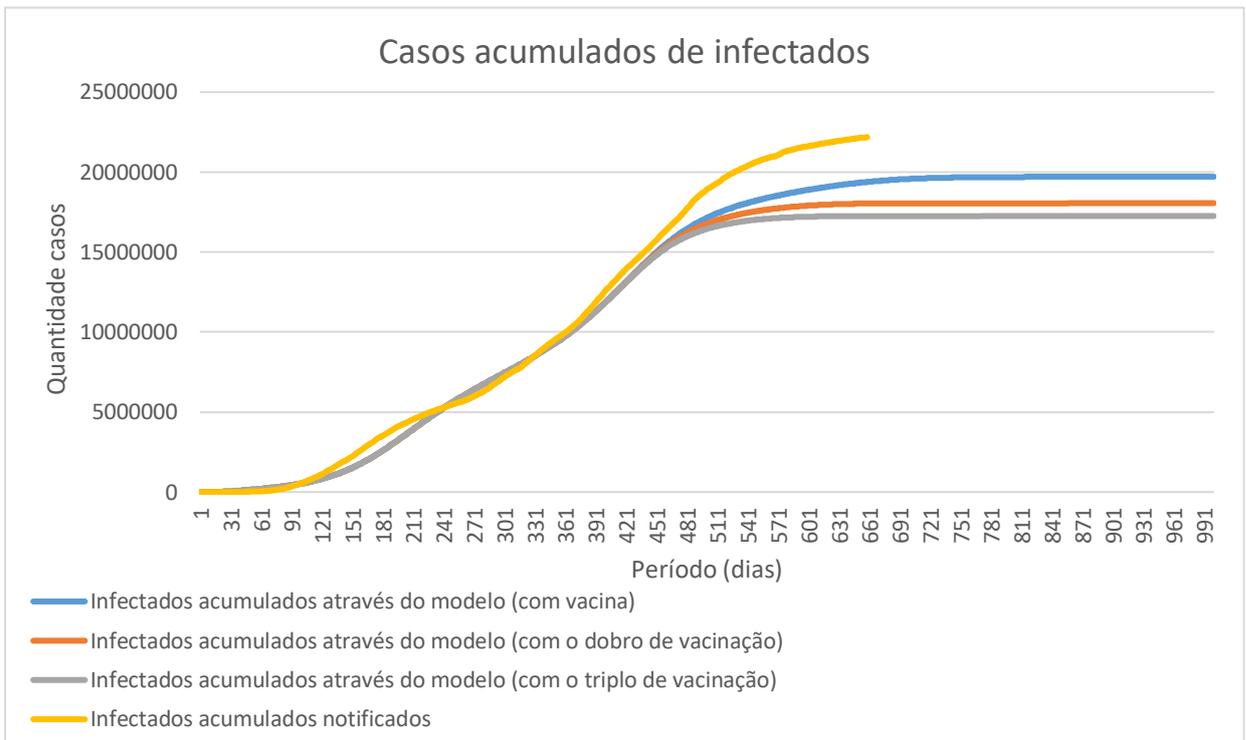
considerou-se três cenários: No primeiro cenário, consideram-se os índices oficiais de vacinação da população, no segundo, considera-se uma situação hipotética em que esses índices fossem dobrados (isto é, que a quantidade de pessoas vacinadas em cada dia fosse o dobro do que de fato ocorreu), e, no terceiro cenário considera-se a situação em que estes índices são triplicados. Em todos os cenários, a data de início da vacinação (com segunda dose) é a mesma, ou seja, o dia 355 das simulações. A curva indicada por “modelo com vacina”, representa o primeiro cenário, usando V_n , no modelo, conforme descrito no capítulo anterior. Para efeitos de comparação, considerando que os dados oficiais estavam disponíveis apenas até o dia anterior a realização das simulações, usou-se para os demais dias (a partir do momento em que não se tinha mais informações), um valor fixo diário, igual à média aritmética simples de pessoas imunizadas por dia, desde o início das vacinações. Os resultados destas simulações são mostrados nas Figuras 20 até 23.

Figura 20 – Comparação dos casos diários de infectados em função da velocidade de vacinação



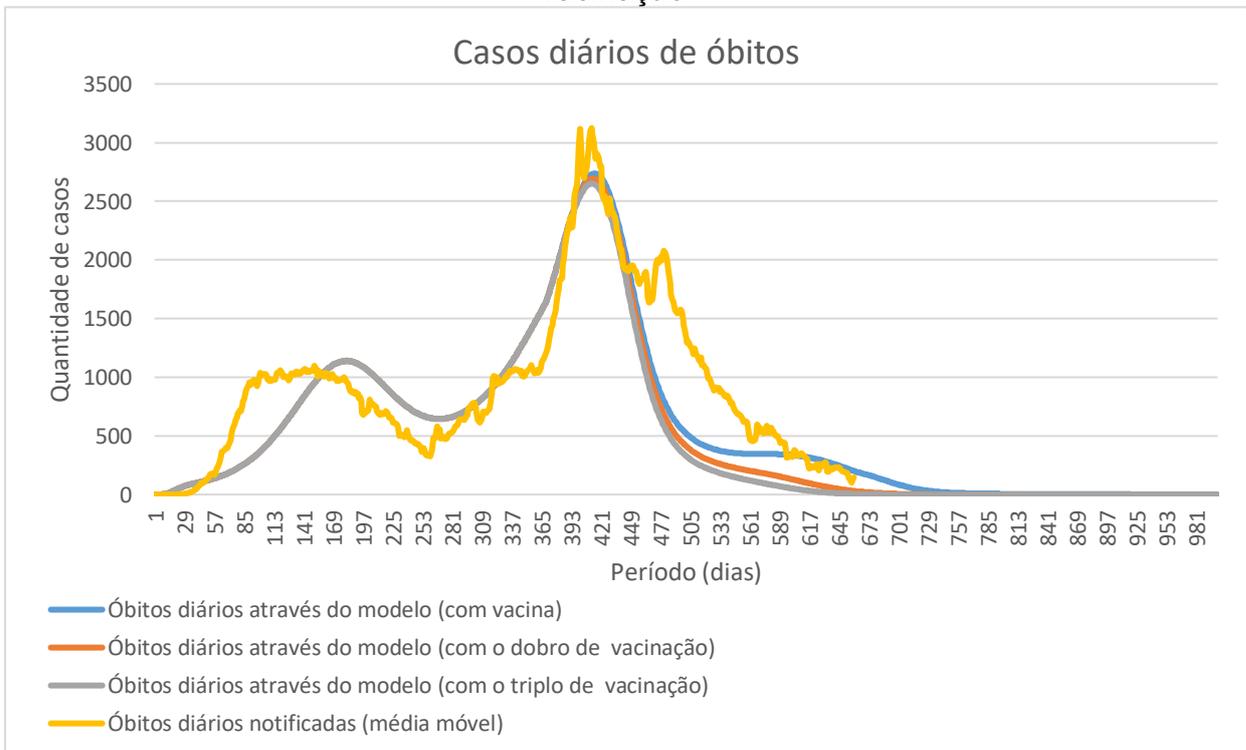
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 21 – Comparação dos casos acumulados de infectados em função da velocidade de vacinação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 22 – Comparação dos casos diários de óbitos em função da velocidade de vacinação

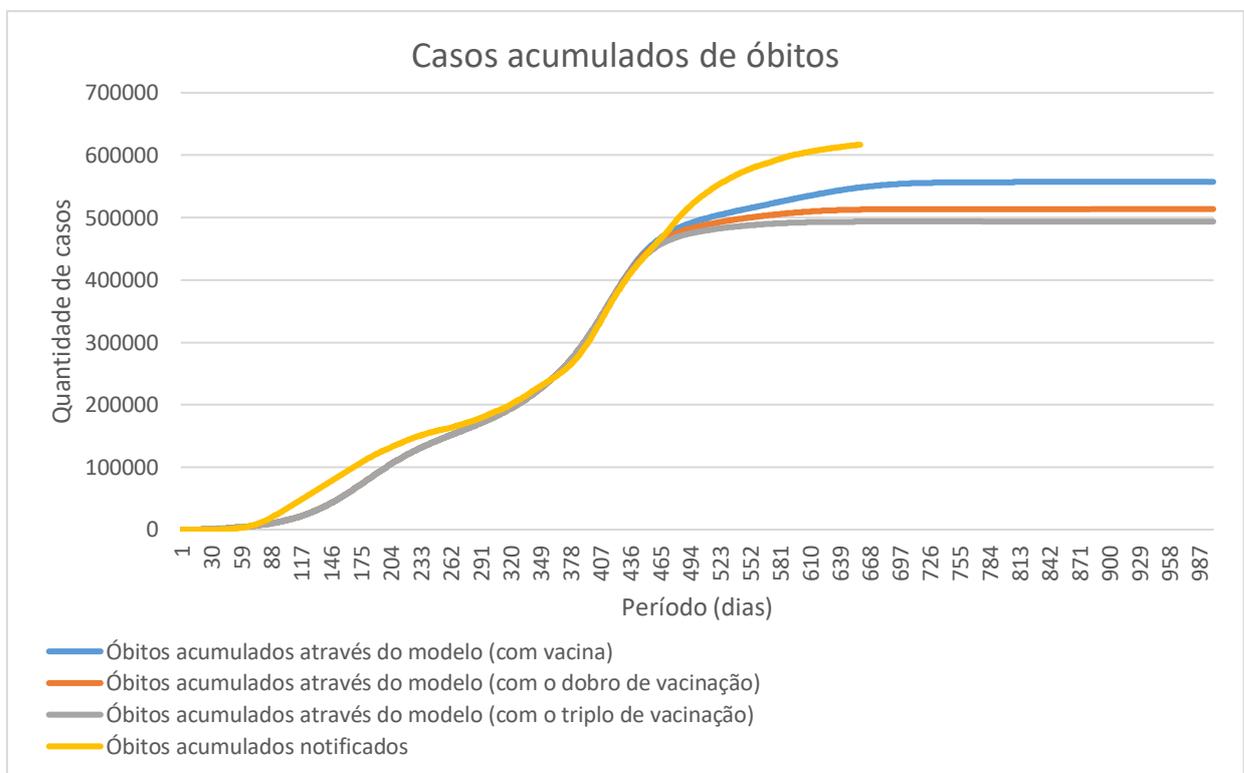


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Ao analisar o gráfico mostrado na Figura 20, pode-se observar que, após algum tempo do início da imunização (dia 375 da curva), a curva de infectados diários diminui de forma significativa nos três cenários analisados, porém com decréscimo mais acentuado nos casos em que o processo de vacinação é acelerado.

Como por hipótese, a curva de óbitos depende da curva de infectados, é razoável inferir que, o comportamento dessas curvas seja análogo ao que ocorre em relação aos casos de infecções, o que se confirma nas Figuras 22 e 23.

Figura 23 – Comparação dos casos acumulados de óbitos em função da velocidade de vacinação



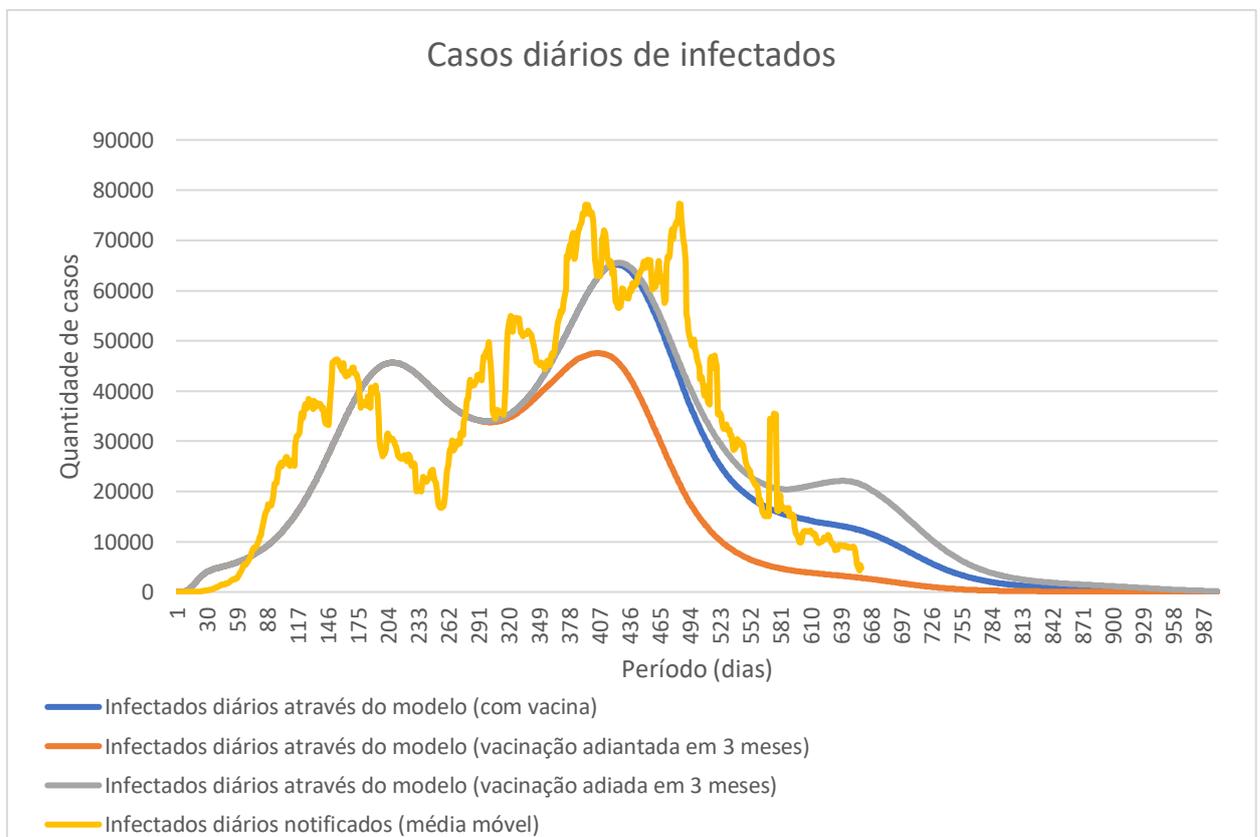
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A análise do gráfico apresentado na Figura 23 sugere uma diferença de aproximadamente cinquenta mil óbitos acumulados ao final do período de simulação, na comparação dos dois primeiros cenários, sendo esta diferença ainda maior, se comparados o primeiro e o terceiro cenários. Nota-se mais uma vez a importância de dar celeridade ao processo de vacinação.

Em uma outra simulação, buscou-se observar a influência do início da vacinação sobre as curvas de contágio e de óbitos. Considerou-se situações com alterações do primeiro dia de imunização. No primeiro cenário, indicado nas legendas

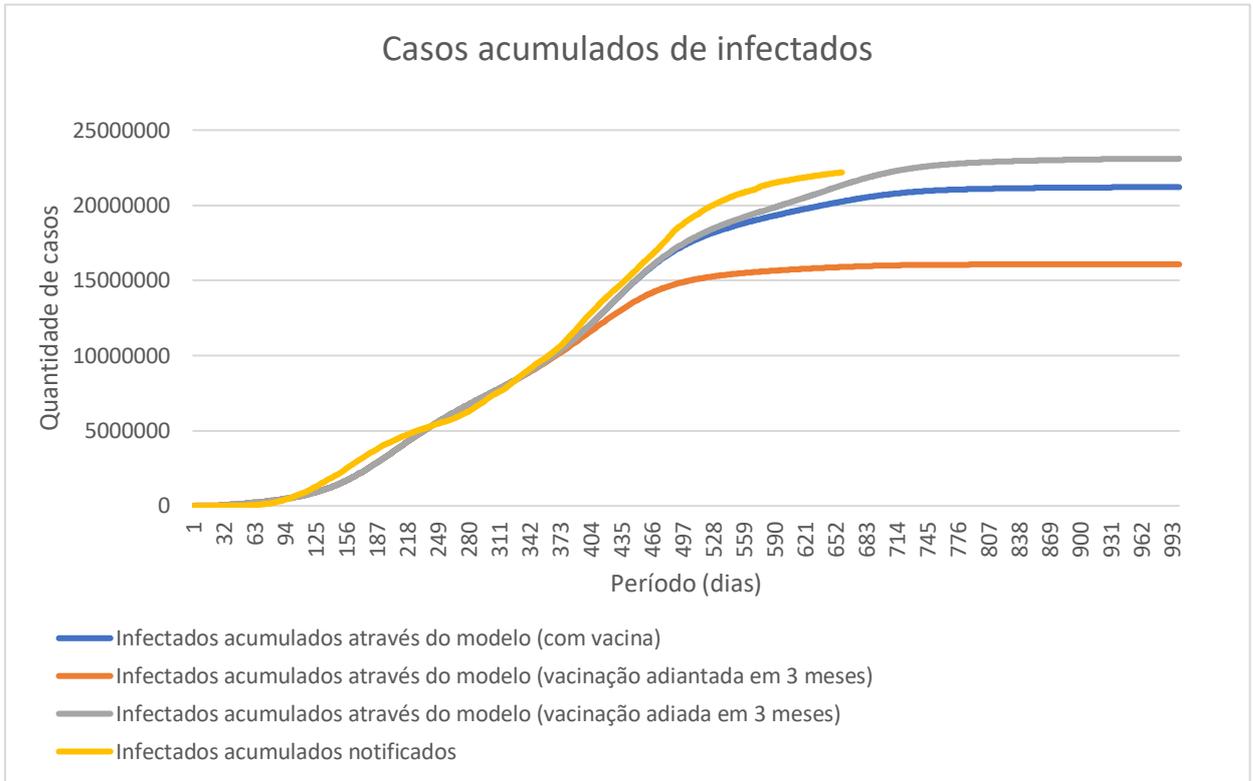
como “Modelo com vacina” considerou-se a data de início da imunização, conforme os dados oficiais disponibilizados, enquanto que nos outros dois senários, considerou-se as situações hipotéticas em que a vacinação tivesse sido adiantada ou adiada por três meses, respectivamente. Em todos os cenários, considerou-se a quantidade de indivíduos vacinados diários, de acordo com os dados oficiais (fazendo-se apenas uma translação no tempo). Os gráficos dessas simulações são apresentados nas Figuras 28 até 31.

Figura 28 – Comparação dos dados do modelo com vacinação adiantada em 3 meses e adiada em 3 meses (casos diários de infectados)



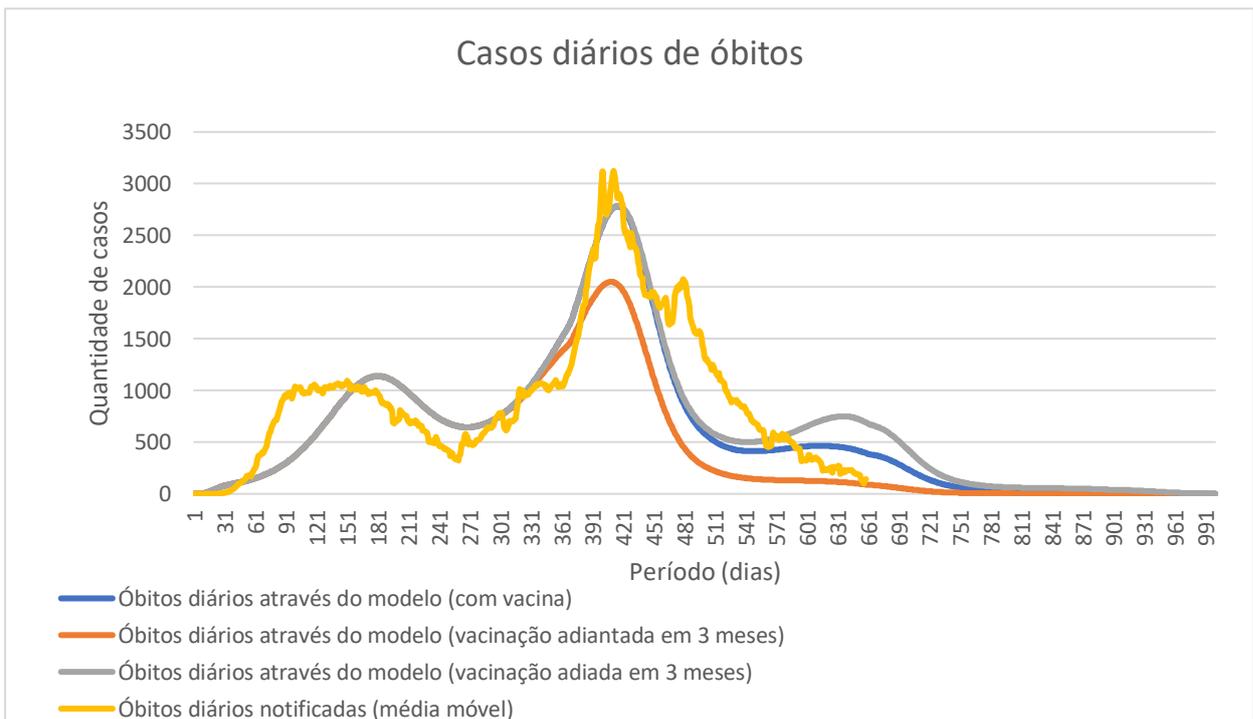
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 29 – Comparação dos dados do modelo com vacinação adiada em 3 meses e adiada em 3 meses (casos acumulados de infectados)



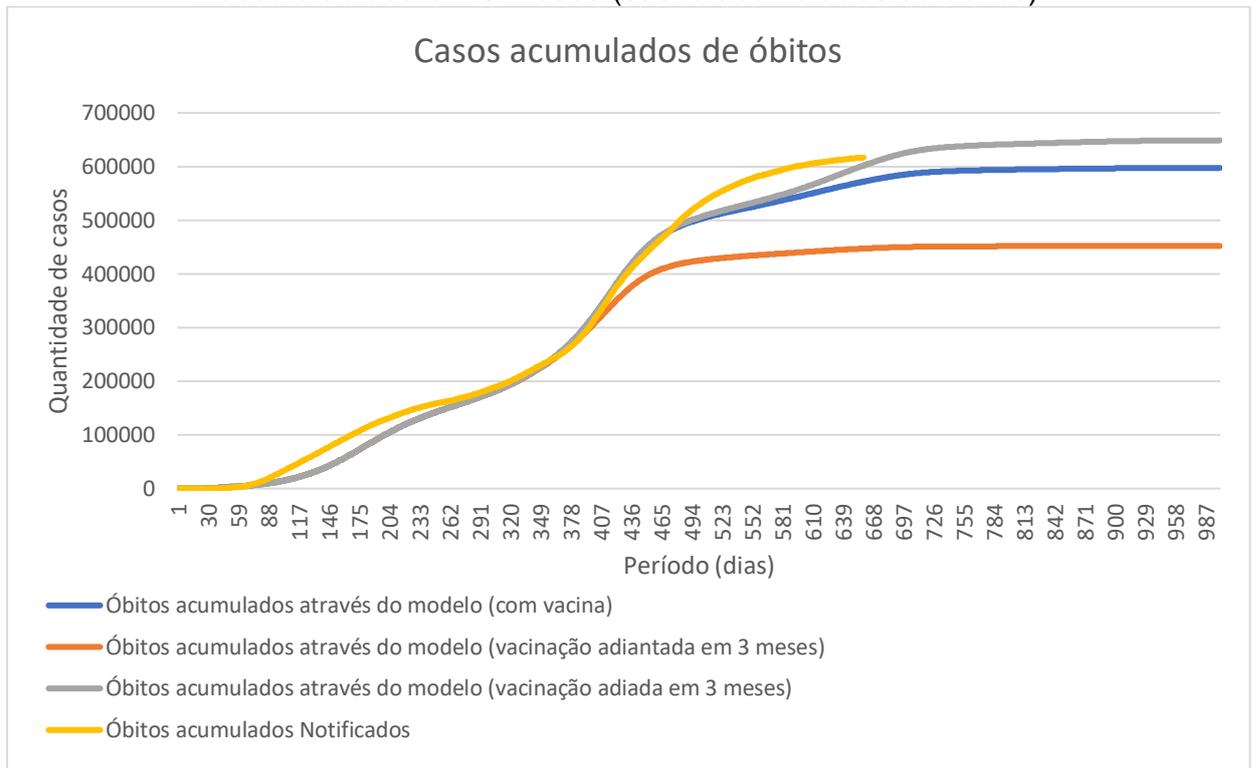
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 30 – Comparação dos dados do modelo caso com vacinação adiada em 3 meses e adiada em 3 meses (casos diários de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 31 – Comparação dos dados do modelo com vacinação adiada em 3 meses e adiada em 3 meses (casos acumulados de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando as Figuras 28 até 31, observa-se que alterações nas datas de início da imunização interfere significativamente nas curvas de modo que, ao adiantar a data “achata-se” as curvas de transmissão e de óbitos, porém, ao adiar, as curvas tendem a mostrar valores mais elevados.

Sobretudo, as curvas onde altera-se a data inicial de imunização, parecem apresentar uma implicação maior do que quando mudamos os fatores multiplicativos, apresentados nas Figuras 20 até 27. Essa influência fica bem perceptível ao compararmos as Figuras 20 e 28, pois as hipóteses usadas nestas simulações diferem apenas, no fator multiplicativo, e na alteração da data de imunização.

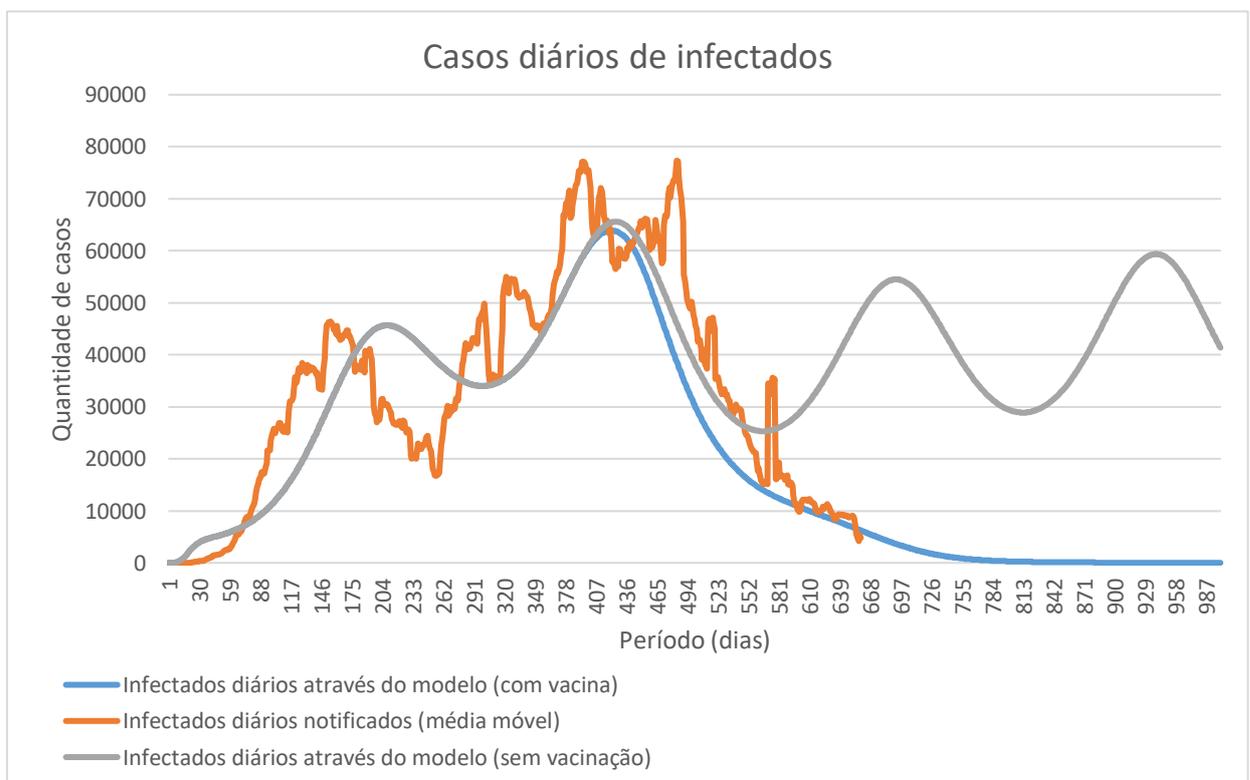
De acordo com o gráfico da Figura 31, os dados obtidos na modelagem sugerem que um adiantamento do processo vacinal em três meses, poderia ter salvo aproximadamente cento e cinquenta mil vidas, se comparado com os dados oficiais da vacinação, enquanto que um possível adiamento desse processo, representaria perda ainda maior de vidas. Isso reforça a importância dos investimentos feitos por todo mundo em pesquisas, na busca rápida pelas vacinas.

Ainda em relação à importância do processo de vacinação, foi realizada uma simulação em que são comparadas as curvas de contágio e de óbitos, em dois

cenários, sendo o primeiro, representando a situação real de vacinação de acordo com os dados oficiais e o segundo, supondo a inexistência do processo vacinal. Novamente para efeitos de comparação, para datas futuras, considerou-se o processo de vacinação, com o quantitativo médio diário de indivíduos vacinados no período anterior. Os resultados dessas simulações são mostrados nas Figuras 32 até 35, juntamente com a média móvel de casos/óbitos notificados.

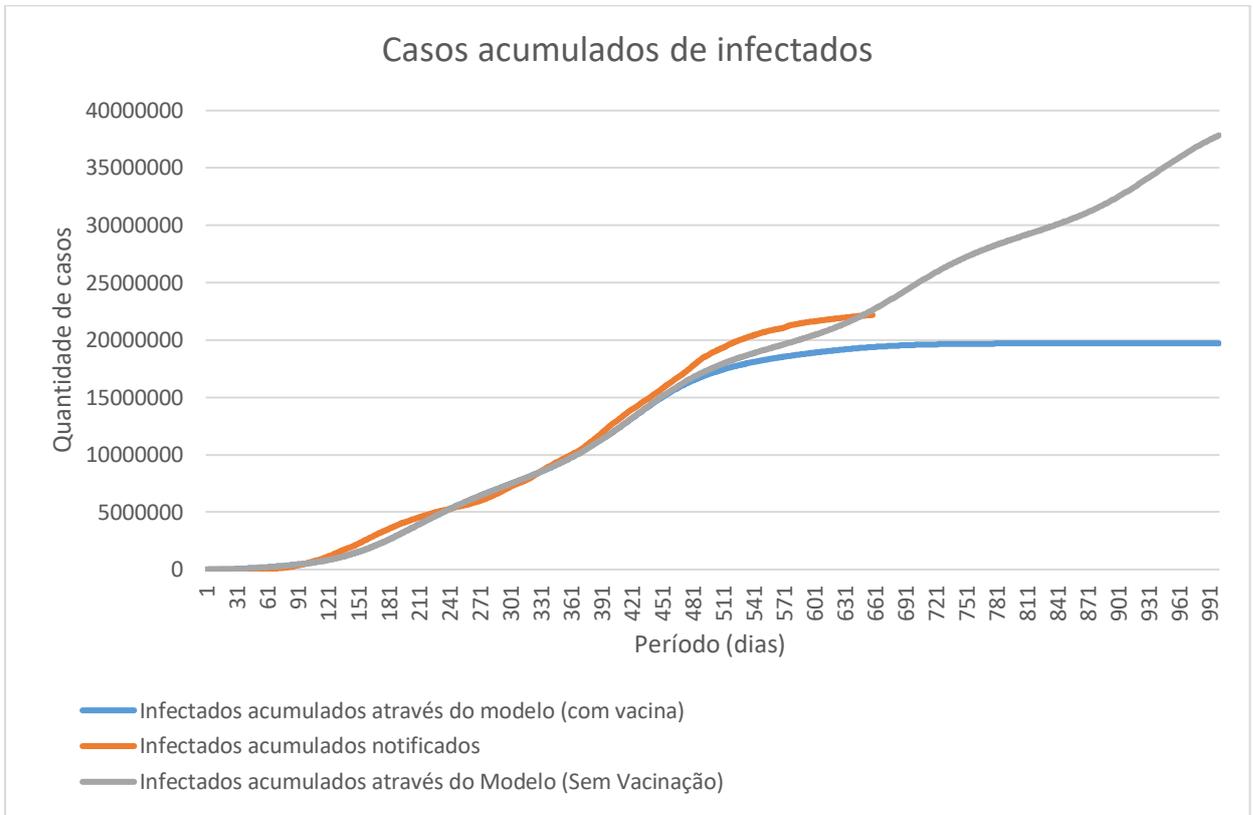
As simulações mostradas nas Figuras 32 até 35, novamente sugerem que a vacina proporciona um excelente meio de contenção da dissipação do vírus na população, pois reduz drasticamente a quantidade de infectados diários, implicando assim em uma redução na quantidade de óbitos decorrentes deste contágio, o que pode ser expresso através da diferença entre as quantidades de infectados acumulados e de óbitos acumulados descritas ao final do período proposto das Figuras 33 e 35, respectivamente.

Figura 32 – Comparação dos dados do modelo sem vacina com os dados do modelo com vacina (casos diários de infectados)



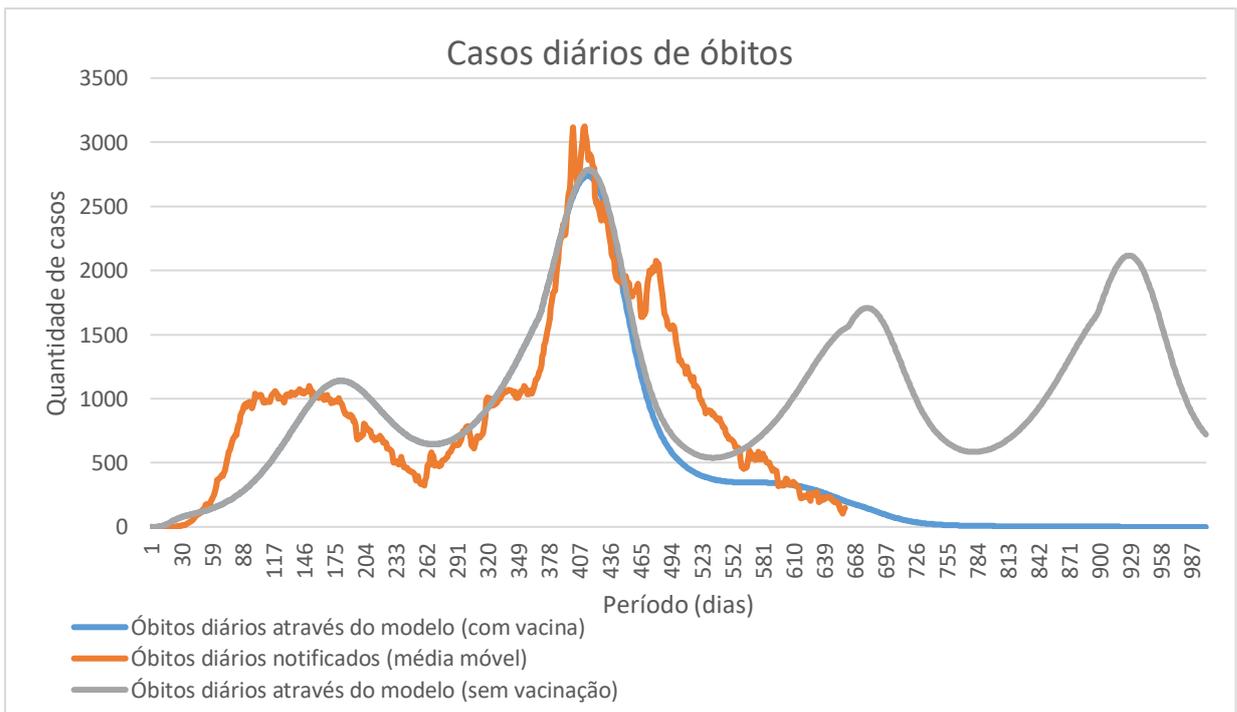
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 33 – Comparação dos dados do modelo sem vacina com os dados do modelo com vacina (casos acumulados de infectados)



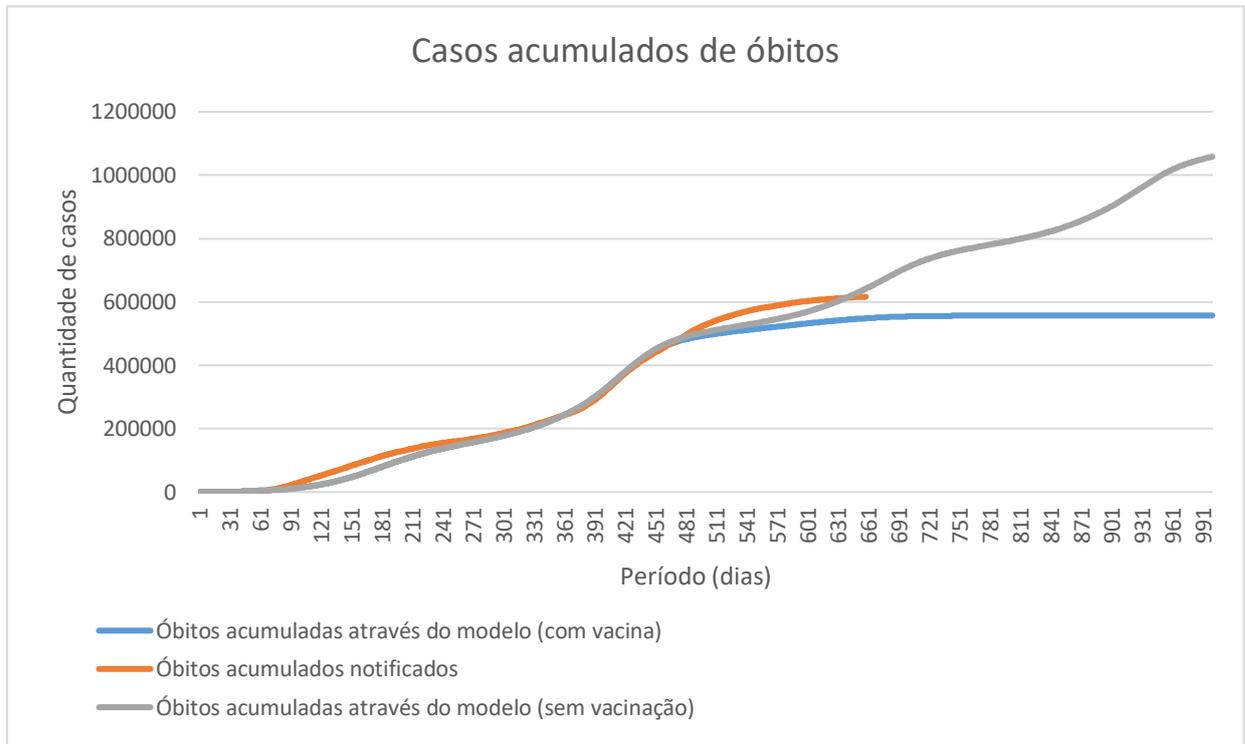
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 34 – Comparação dos dados do modelo sem vacina com os dados do modelo com vacina (casos diários de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 35 – Comparação dos dados do modelo sem vacina com os dados do modelo com vacina (casos acumulados de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

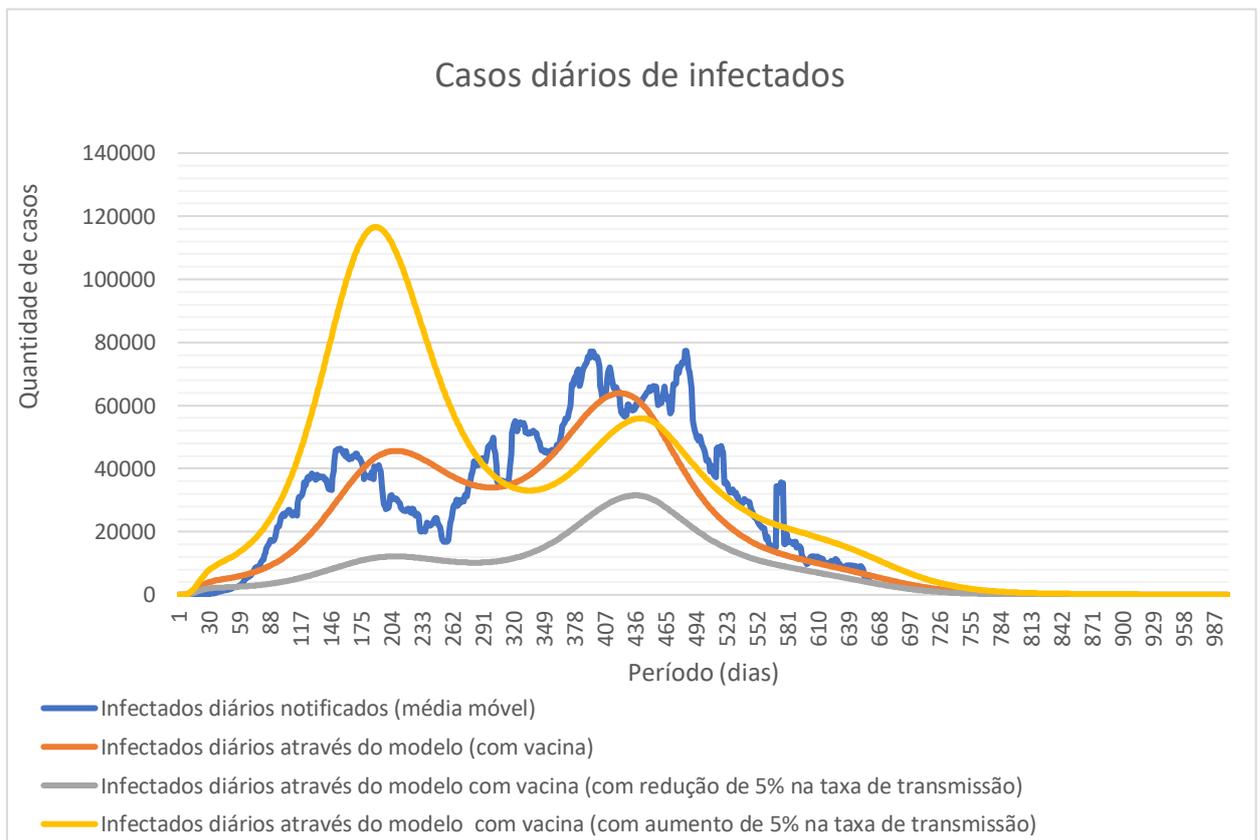
Observa-se na Figura 35, que em um período de um pouco mais de um ano, essa diferença entre os óbitos acumulados nos dois cenários modelados, ultrapassa a quatrocentos mil pessoas. Ressalta-se que as simulações consideram as condições de isolamento e distanciamento social observadas no período usado para o ajuste dos coeficientes. Assim, se for considerada a condição de isolamento e distanciamento flexibilizada, visando a retomada de atividades econômicas, sociais e de educação, há a hipótese de essa diferença de óbitos entre os dois cenários simulados ser ainda maior.

Um fator importante na contenção da propagação de um vírus em uma dada população, é o isolamento entre esses indivíduos, o que acaba influenciando diretamente na taxa de transmissão, pois, quanto menor for o contato dos indivíduos suscetíveis com indivíduos infectados, menor será a probabilidade de contágio. Com a finalidade de avaliar a influência de pequenas variações da taxa de transmissão sobre o comportamento das curvas de contágio e de óbitos, nas simulações mostradas nas Figuras 36 até 39, inseriu-se um fator multiplicativo nesta taxa. Dessa forma, considera-se na curva “Infectados diários através do modelo com vacina”, a

situação com as hipóteses gerais usadas nas simulações anteriores, em que se considera a vacinação de acordo com os dados oficiais e compara-se esta situação com situações hipotéticas em que a taxa de transmissão é alterada em 5% para mais e para menos em relação à calculada diariamente pelo modelo.

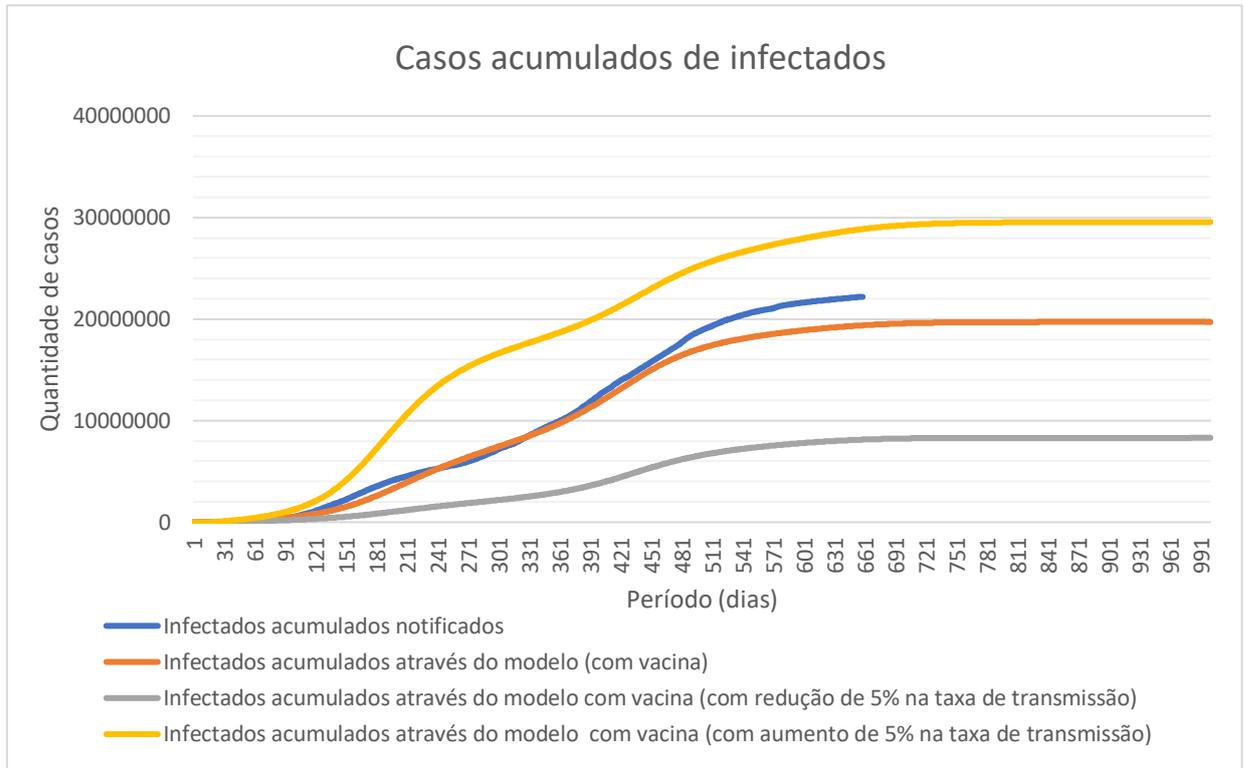
Vale lembrar que essa taxa também é influenciada por outras medidas de segurança adotadas durante a pandemia, de forma que não se pode afirmar que um aumento de 5% na taxa de transmissão seja resultado de um relaxamento de exatos 5% na taxa de isolamento entre indivíduos suscetíveis e infectados, visto que uma análise detalhada da influência de cada um dos fatores de contenção adotados de forma individualizada seria muito mais complexa do que se propõe neste trabalho.

Figura 36 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão em 5% (casos diários de infectados)



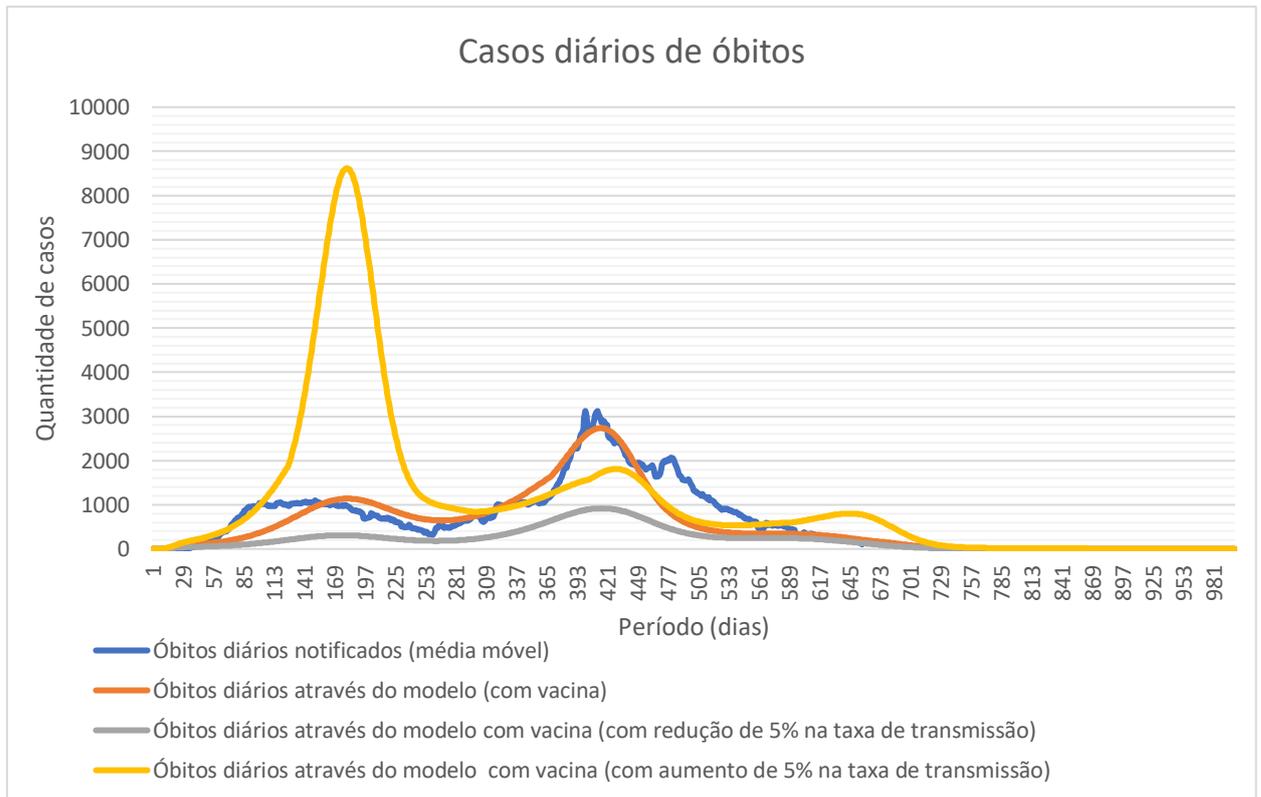
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 37 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão em 5% (casos acumulados de infectados)



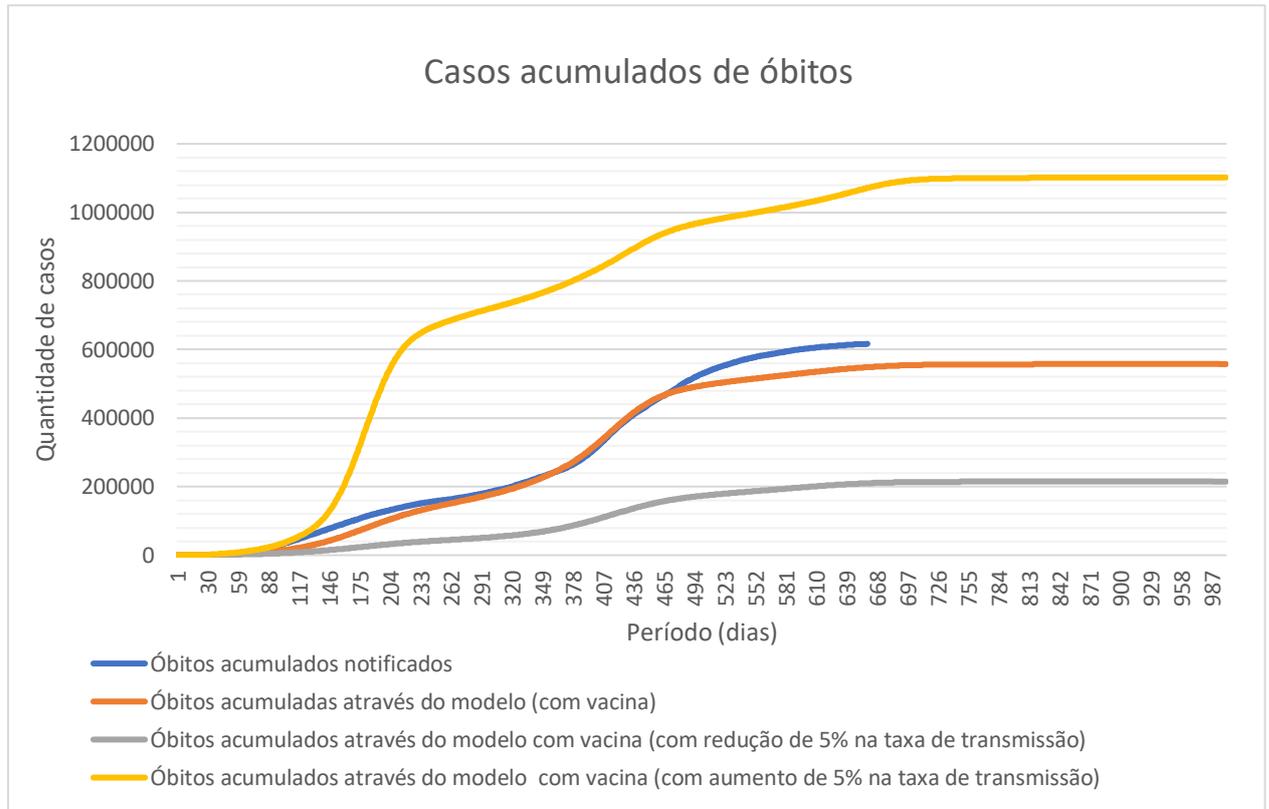
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 38 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão em 5% (casos diários de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 39 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão em 5% (casos acumulados de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

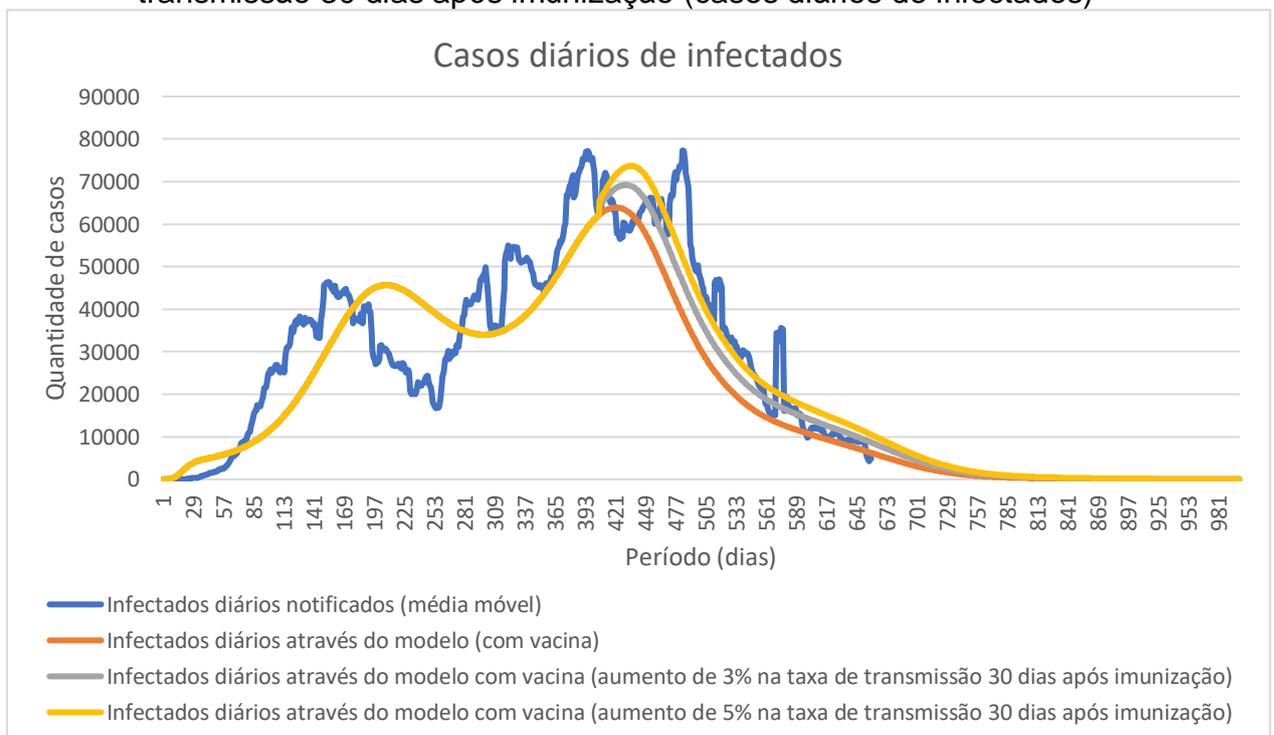
Ao analisar as Figuras 36 até 39, fica evidente que o controle da taxa de transmissão é fator fundamental para o controle da pandemia. Assim, mesmo não conhecendo a participação exata de cada uma das medidas de controle usadas durante a pandemia, o conjunto delas se mostrou fundamental para que as consequências desse momento não se tornassem ainda mais desastrosas. Dessa forma, é possível supor que o isolamento social, o uso de máscaras, os cuidados com a higienização das mãos e de objetos com os quais se tem contato, dentre outras medidas adotadas foram essenciais para a manutenção de muitas vidas, principalmente antes da vacinação em massa da população.

Uma suposição bastante razoável, é que, ao avançar na campanha de vacinação, os cuidados citados, passam a não ser mais usados de forma tão rigorosa, como nos períodos ante as imunizações. Ou seja, é cabível considerar um aumento no contato entre as pessoas, dentre outras flexibilizações, influenciando dessa forma na taxa de transmissão em relação ao que estava previsto pelo modelo com vacinação a partir desse momento.

Na tentativa de identificar a influência desta situação foram realizadas as simulações mostradas nas Figuras 40 até 43. Nelas, usa-se também um fator multiplicativo na taxa de transmissão, a exemplo da simulação anterior, porém, aplicando-o apenas após 30 dias do início do período de imunização, momento aproximado em que se verificou flexibilizações significativas em vários estados brasileiros nas restrições de controle adotadas anteriormente. Além do cenário original identificado na legenda como “modelo com vacina”, com as hipóteses gerais usadas nas simulações anteriores, em que se considera a vacinação de acordo com os dados oficiais e considera-se duas situações em que a taxa de transmissão é aumentada em 3% e 5%, respectivamente, em relação à calculada diariamente pelo modelo para o primeiro cenário.

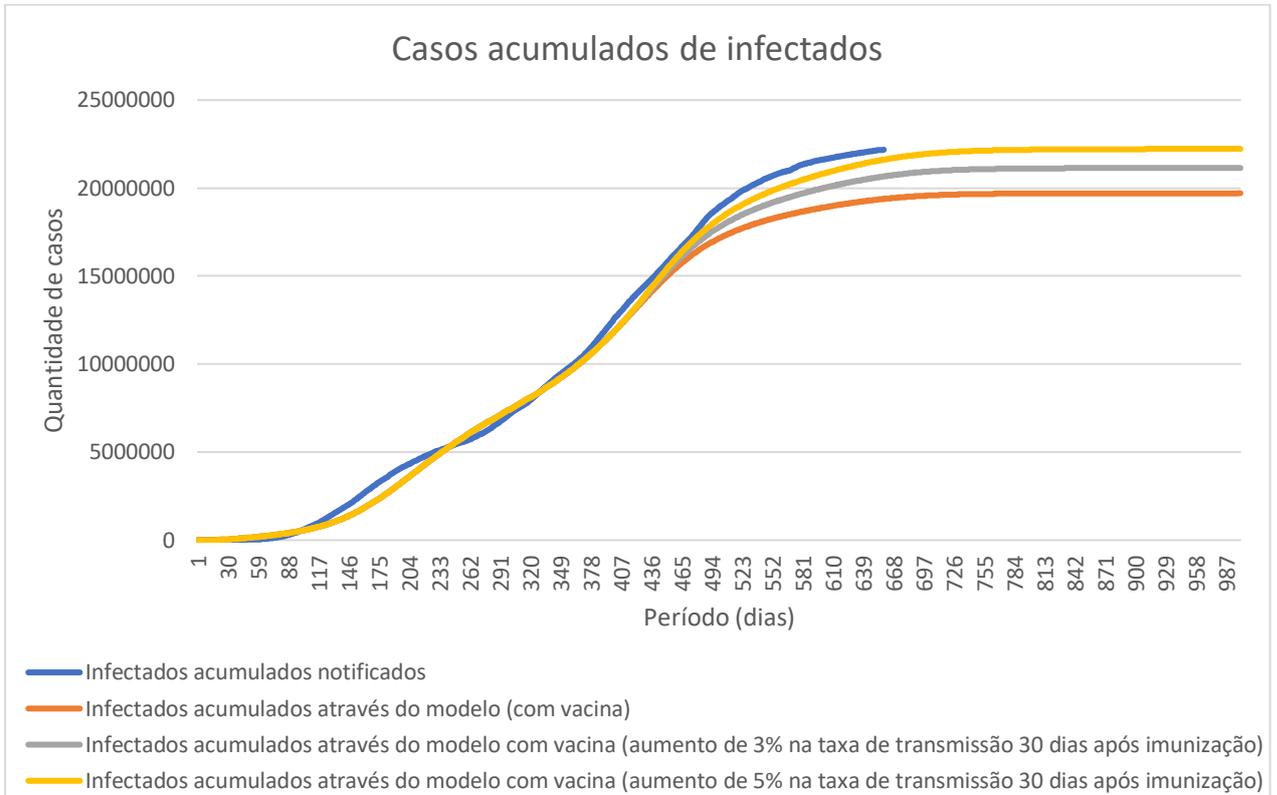
Observa-se significativo aumento na quantidade de casos e consequentemente de óbitos diários quando se compara o cenário original com o cenário em que a taxa de transmissão foi aumentada. Contudo, apesar desse aumento, com o avanço do processo de imunização, as curvas de casos e óbitos diários, em todos os cenários considerados passam a uma tendência de decrescimento.

Figura 40 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão 30 dias após imunização (casos diários de infectados)



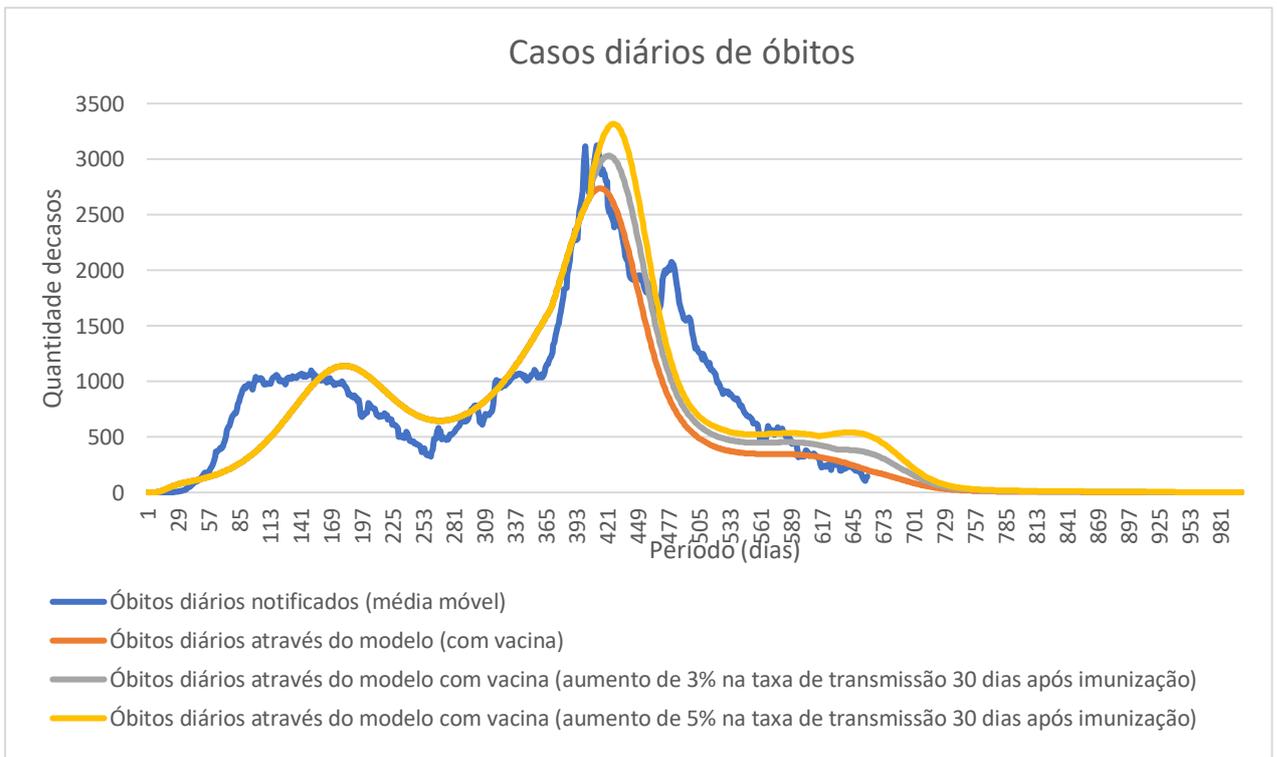
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 41 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão 30 dias após imunização (casos acumulados de infectados)



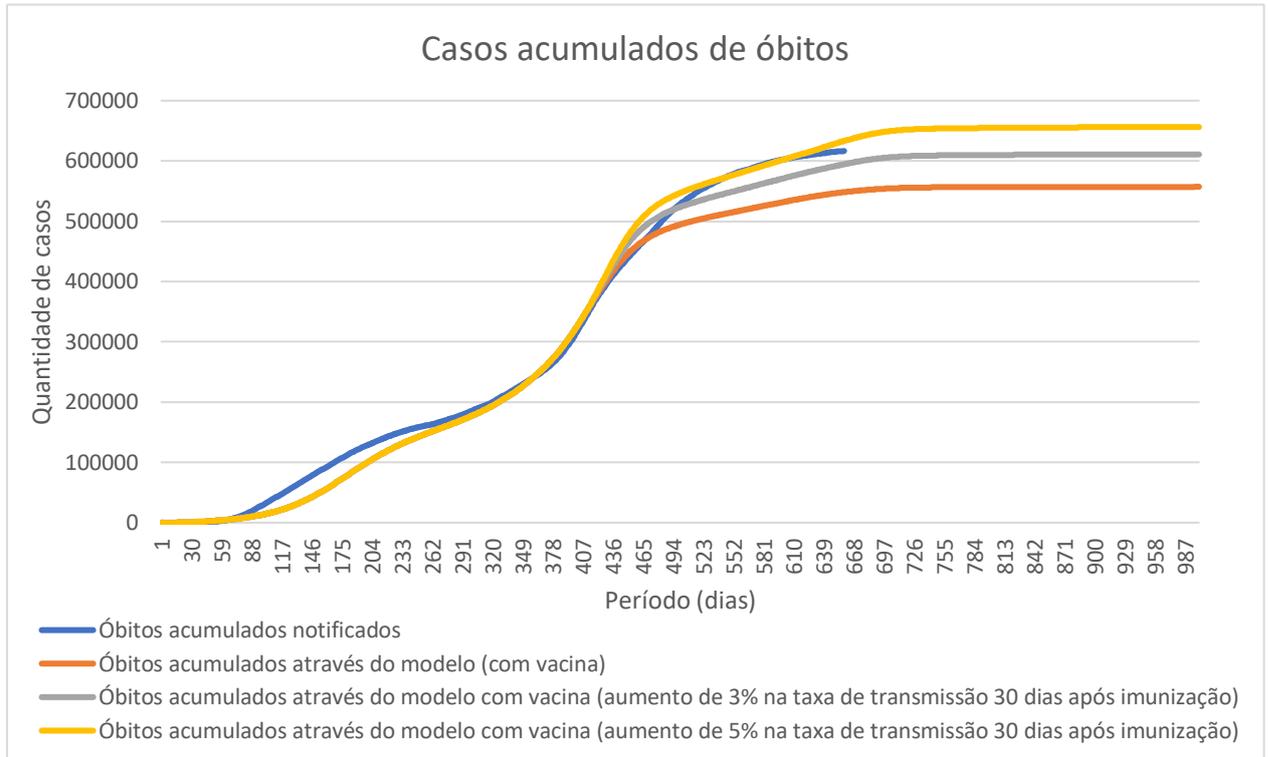
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 42 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão 30 dias após imunização (casos diários de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 43 – Comparação dos dados do modelo alterando a taxa de transmissão 30 dias após imunização (Casos acumulados de óbitos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

É importante observar que as curvas indicadas nas legendas como “modelo com vacina” foram obtidas pelo ajuste de curvas pela resolução do problema inverso com os dados coletados na sua maioria no período pré imunização, sendo que neste período as restrições de isolamento foram mais rígidas. Dessa forma é razoável supor que o recálculo da taxa de transmissão com a inclusão desse fator multiplicativo representa de forma satisfatória a situação real de flexibilização ocorrida no país. Vale ressaltar que na modelagem, são captadas as situações presentes no momento do estabelecimento dos dados, e as projeções futuras são feitas com base nestes dados, porém na situação real, estas informações se dão de forma dinâmica, onde qualquer alteração das condições, pode provocar uma intensa mudança no modelo. Neste sentido, os modelos servem justamente para se poder avaliar o grau de influência que a alteração de qualquer um dos parâmetros possa exercer sobre os resultados a serem obtidos. Assim, dentre os cenários propostos, o fator multiplicativo com aumento de 5% na taxa de transmissão (o que reflete uma alteração nas condições de contenção da pandemia) a partir do trigésimo dia após o início da imunização, mostrou as curvas que melhor se aproximam (de forma visual) da situação real da pandemia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em 2020, o mundo foi assolado por uma doença grave causada pelo Coronavírus (SARS-CoV-2), sendo que em março daquele ano, após mais de 200 países relatarem casos dessa doença, denominada por COVID-19, a Organização Mundial da Saúde, declarou surto pandêmico. Devido a sua elevada transmissibilidade, e a gravidade da infecção em alguns pacientes, que demandaram internação em unidades de tratamento intensivo, muitos deles indo à óbito, mostrou-se necessária a adoção de medidas preventivas de contenção, na tentativa de achatar a curva de transmissão. Contudo, essas medidas acabaram gerando impactos socioeconômicos, mudando significativamente a forma de prestação de serviços e de interação entre as pessoas. Dentre as principais medidas adotadas na maioria dos países afetados, as mais drásticas foram as de restringir a circulação de pessoas, com o fechamento do comércio, escolas e outros setores.

O surgimento de uma doença desconhecida, altamente contagiosa e com significativa taxa de mortalidade trouxe consigo um grau de incertezas e angústias quanto aos procedimentos, tratamentos e formas de contenção. Desde seu início, diversas medidas foram propostas e testadas, com diferentes graus de eficácia e de restrição às atividades socioeconômicas. Uma ferramenta importante para auxiliar nesta tomada de decisões sobre as medidas de proteção e contenção a serem tomadas, consiste no desenvolvimento de modelos matemáticos com a finalidade de obter curvas de tendências de contágios e de óbitos provocados em diferentes cenários que possam ser constituídos de acordo com a medidas a serem adotadas.

Assim, a modelagem matemática com modelos da epidemiologia possibilita fazer simulações nestes diferentes cenários, constituindo-se em uma das ferramentas que podem auxiliar os gestores na tomada de decisões. Dessa forma, torna possível uma análise mais equilibrada e embasada sobre os possíveis impactos de suas decisões sobre a epidemia, de modo a avaliar com antecedência a possibilidade de sucesso das medidas a serem adotadas. Modelos matemáticos também podem ser usados para avaliar impactos de medidas restritivas nos mais diversos setores da sociedade organizada.

Neste trabalho, após um estudo de diferentes modelos, fez-se uma adaptação do modelo SIR, que descreve a dinâmica entre indivíduos suscetíveis, infectados e

removidos, com a finalidade de simular o desenvolvimento da pandemia no Brasil. Foram ajustadas funções para modelar as taxas de transmissão e de mortalidade através da solução do problema inverso. Os ajustes das curvas foram feitos a partir da comparação dos dados obtidos no modelo com dados oficiais de casos e de óbitos disponibilizados pelo Ministério da Saúde.

Embora os modelos matemáticos disponíveis na literatura para descrever curvas de contágio e de óbitos em pandemias sugiram certos padrões, observa-se que cada doença apresenta características próprias. Estas características estão relacionadas a diferentes fatores, como por exemplo, às possibilidades de mutação do vírus causador, à possibilidade de parte da população ser composta por indivíduos com maior ou menor grau de suscetibilidade, dentre outros.

Observou-se também diferenças significativas nas curvas de contágio em diferentes países. Possivelmente isso se deve a questões comportamentais, questões culturais, principalmente no que se refere a observância de orientações ou restrições, questões gerenciais de diferentes órgãos governamentais, além de inúmeros outros aspectos.

Contudo, o modelo é capaz de identificar essas diferenças, uma vez que os coeficientes de transmissão e letalidade são calculados com base nos dados de cada país. Para uma aplicação prática do modelo, esses coeficientes só podem ser calculados até a última data dos dados disponíveis e a partir deles, pode-se fazer simulações que orientem medidas mitigatórias. Mesmo assim, é importante lembrar, que o modelo não “adivinha” o futuro, mas executa as hipóteses de continuidade das tendências do passado, nos dias futuros. Portanto, tende a perder a confiabilidade para longos períodos, como mais de 2 a 3 meses, no caso da pandemia analisada.¹

Vale ainda mencionar que, percebe-se que após o último ajuste dos coeficientes feito no dia 20/05/2021, o mesmo mostrou-se com resultados razoavelmente bons, ou seja, com um grau de proximidade relativamente alto até a data analisada (dezembro de 2021), porém considerando a alteração proposta na última simulação, que é um aumento de 5% na taxa de transmissão após o trigésimo dia do início da imunização.

¹O texto deste parágrafo foi uma colaboração do professor Dr. Pedro Borges, membro da banca examinadora desta dissertação.

Ainda assim, no início de 2022, com o surgimento da variante Ômicron, ficou claro que o modelo não previa a quantidade de casos ocorridos neste último período, aproximadamente a partir de janeiro de 2021, fato que se justifica, por ter sido introduzido um novo fator, não considerado na determinação dos coeficientes. Sendo assim, para a inclusão da Ômicron no modelo, um novo ajuste nos coeficientes, ou a inclusão de alguma adaptação nas funções da taxa de transmissão e de letalidade seria necessário, pois observando as curvas de infectados e de óbitos em jan/fev de 2021, é possível notar que, a campanha de vacinação teve uma influência maior na quantidade de óbitos, do que na quantidade de infectados, todavia, uma análise mais detalhada sobre as influências desta mutação na população seria necessária para novas previsões.

O fato de diferentes pandemias apresentarem alterações em alguns padrões, trouxe muitas incertezas, principalmente nos primeiros meses da pandemia. Com isso, houve muitas discussões sobre medidas de segurança e de contenção a serem usadas, com posicionamentos diversos entre diferentes gestores. A necessidade de lidar com uma doença desconhecida trouxe também muitas dúvidas para os profissionais de saúde, que passaram a experimentar protocolos de atendimento e tratamentos, na tentativa de encontrar as melhores opções para salvar as vidas das pessoas que necessitavam tratamentos mais intensivos. Considerando ainda o fato de o mundo todo estar buscando os mesmos insumos para tratar e para testar a população, associados a alguns problemas de gestão, diferentes pesquisas apontaram para a possibilidade de significativas taxas de subnotificação de casos e até de óbitos pela doença.

Essa situação de incertezas, principalmente no início da pandemia também teve reflexos no processo de modelagem, de forma que várias adaptações se mostraram necessárias ao longo do tempo, na tentativa de melhor captar as mudanças de comportamento das curvas de dados notificados ao longo do tempo. Neste sentido, identificou-se no início da pandemia, um perfil exponencial na taxa de transmissão, o que ao longo do tempo não se manteve. Como hipótese para esse comportamento, sugere-se a possibilidade de uma parcela da população apresentar maior suscetibilidade do que outra parte da população. Nesta hipótese, as pessoas mais suscetíveis que tiveram contato com o vírus, teriam se contaminado rapidamente (explicando o comportamento exponencial no início da pandemia) e após se recuperar, desenvolvido anticorpos que os retiraram do grupo de suscetíveis por um

certo período de tempo. Outro fator que pode ter contribuído para o crescimento exponencial no início, está relacionado à falta de conhecimento sobre a doença por parte dos profissionais da saúde, que passaram a trabalhar sob um grande grau de incertezas. Há também a hipótese do baixo grau de testagem da população ter contribuído para que muitas pessoas infectadas circulassem, aumentando dessa forma o contato entre indivíduos infectados (mesmo que muitas vezes assintomáticos) com indivíduos suscetíveis.

Mesmo não tendo certeza sobre os reais motivos que levaram ao comportamento exponencial da taxa de transmissão no início da pandemia, através das simulações, observou-se a necessidade de considerá-lo para a obtenção de um bom ajuste das curvas. Da mesma forma, observou-se a necessidade de diminuir o efeito exponencial e inserir um termo periódico ao longo do tempo. A partir desta percepção, e das demais situações descritas no texto, foram propostas as funções para descrever as taxas de transmissão e de letalidade, juntamente com algumas adaptações em um modelo disponível na literatura, o modelo SIR.

Como já esperado, nas simulações realizadas com o modelo adaptado, observou-se uma grande influência da taxa de transmissão (que é diretamente influenciada pelas medidas de controle adotadas) nas curvas de contágio e, conseqüentemente, óbitos provocados pela doença. Esse fenômeno é confirmado principalmente nas simulações em que essa taxa é recalculada diariamente com uma alteração de até 5% no seu valor, gerando impactos significativos nas curvas de contágio e de óbitos.

Uma observação que merece destaque na análise dos resultados das simulações feitas a partir do modelo adaptado se refere à importância da imunização da população através da aplicação das vacinas. As simulações sugerem que com o avanço da vacinação, as curvas de contágio e de óbitos diários passaram a ter uma tendência de queda, como de fato ocorreu, de acordo com as notificações oficiais disponibilizadas pelo ministério da Saúde. Dessa forma, as curvas de casos e óbitos acumulados passaram a ter uma tendência de estabilidade. Entende-se que esta queda acentuada nos novos contágios provocada pela imunização de boa parte da população, permitiu flexibilizar várias regras de isolamento social, e conseqüente, a retomada de atividades econômicas, sociais e de ensino. Mesmo com as flexibilizações permitidas, não foi observada uma retomada significativa do

crescimento das curvas de contágio e de óbitos. De acordo com as simulações, isso não seria viável, sem a imunização de boa parcela da população.

Entende-se, portanto, que os dados obtidos no modelo corroboram com a situação real vivenciada no Brasil, confirmando ser a vacinação em massa uma das formas mais eficazes de controle de uma epidemia. Isto justifica a pressa e os altos investimentos feitos por muitos governos, laboratórios e centros de pesquisa pelo mundo, na busca de vacinas seguras e eficazes para o controle da doença. Para corroborar com esta percepção, novamente, as simulações mostraram que o cronograma de vacinação (período de início e a “velocidade”) são fatores determinantes no perfil das curvas de contágio e de óbitos. Assim, o tempo necessário para o desenvolvimento da vacina e a quantidade de doses produzidas influenciam diretamente e de forma significativa na proporção das consequências dessa doença.

As demais medidas que impactam diretamente na taxa de transmissão, como o isolamento social, uso de máscaras e reforço nos hábitos de higiene em geral também se mostraram importantes, principalmente enquanto ainda não havia imunizante disponível para a maior parte da população.

Por fim, entende-se que os modelos matemáticos podem ser muito úteis para se fazer um estudo evolutivo da dinâmica em que uma doença infecciosa pode ocorrer, ou como ela se dá em determinadas populações. Ressalta-se que não é objetivo da modelagem, prever um número exato de infectados ou de óbitos, até porque as condições em que são tomadas as hipóteses são muito dinâmicas e variam com muita frequência, mas sim, traçar linhas de tendências, alertando para possíveis consequências de diferentes medidas que possam ser adotadas. É possível dessa forma, simular diferentes cenários e a partir dos resultados previstos em cada cenário, e, considerando as demais demandas da sociedade, tomar as decisões quanto ao gerenciamento das ações relativas a pandemia.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, S. P. *et al.* Epidemiology, causes, clinical manifestation and diagnosis, prevention and control of coronavirus disease (COVID-19) during the early outbreak period: a scoping review. **Infectious Diseases of Poverty**, v. 9, n. 29, p. 1-12, 2020.
- ALEXANDRE, M. E. S. de *et al.* Representações e ancoragens sociais do novo coronavírus e do tratamento da COVID-19 por brasileiros. **Estudos de Psicologia**, (Campinas), v. 37, n. e200073, p. 2-13, 2020.
- AMITRANO, C.; MAGALHÃES, L.C. G. de; SILVA, M. S. **Medidas de enfrentamento dos efeitos econômicos da pandemia COVID-19: panorama internacional e análise dos casos dos Estados Unidos, do Reino Unido e da Espanha.** Texto para discussão 2559. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília: DF, maio 2020. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9978/1/td_2559.pdf. Acesso em: 27 ago. 2021.
- AZEVEDO, C. Agência Fiocruz de Notícias. **Reinfecção por COVID-19 pode vir acompanhada de sintomas mais fortes.** 2021. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/noticia/reinfeccao-por-COVID-19-pode-vir-acompanhada-de-sintomas-mais-fortes-0>. Acesso em: 06 set. 2021.
- BERNARDO, M. H. de J.; OLIVEIRA, T. de. Monitoramento remoto com idosos: uma experiência de cuidado em tempos de pandemia da COVID-19. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia.** Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.
- BONATELLI, G. **Saúde mental nas empresas: Como enfrentar o coronavírus.** 2020. Disponível em: <https://blog.contaazul.com/saude-mental-empresas-crise>. Acesso em: 19 ago. 2021.
- BORGES, P. A. P.; CERVI, A.; VIONE, M. T. **Determinação dos parâmetros da equação de Van Genutchen usando problema inverso em um problema de evaporação.** *In*: VIII ERMAC, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil, 2008.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Programas Pesquisas e Ações em Saúde dos Institutos de Pesquisa do Ministério da Ciência e Tecnologia.** Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.
- BRASIL. – Ministério da Saúde. **Brasil Pátria Vacinada.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/vacinacao>. Acesso em: 31 ago. 2021a.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Curso Básico de Vigilância Epidemiológica - CBVE - Nível Superior.** 1. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde. 2005.

BRASIL. **Lei nº 13.982, de 2 de abril de 2020.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l13982.htm. Acesso em: 8 nov. 2020a.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria nº 454 de 20 de março de 2020.** Declara, em todo o território nacional, o estado de transmissão comunitária do coronavírus (COVID-19). Brasília DF, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/portaria/prt454-20-ms.htm. Acesso em: 08 nov. 2020b.

BRASIL. **Lei 13.979 de 6 de fevereiro de 2020.** Dispõe sobre as medidas para enfrentamento da emergência de saúde pública de importância internacional decorrente do coronavírus responsável pelo surto de 2019. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l13979.htm. Acesso em: 08 nov. 2020c.

BRASIL. Ministério da Economia. **Medicamentos.** 2020d. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes/tecnologias-para-COVID-19/Medicamentos>. Acesso em: 10 ago. 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **MEC recomenda volta às aulas presenciais.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/educacao-e-pesquisa/2021/07/mec-recomenda-volta-as-aulas-presenciais#:~:text=O%20Minist%C3%A9rio%20da%20Educa%C3%A7%C3%A3o%20recomendou,professores%20a%20retomarem%20as%20atividades>. Acesso em: 04 set. 2021b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Painel Coronavírus.** 2021. Disponível em: <https://covid.saude.gov.br/>. Acesso em: 30 ago. 2021c.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde **Boletim Epidemiológico Especial: doença pelo Coronavírus COVID-19.** 2021. Ministério da Saúde 55 Semana Epidemiológica 8 (21 a 27/2/2021). Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/media/pdf/2021/marco/04/boletim_epidemiologico_covid_52_reduzido.pdf. Acesso em 06 set. 2021d.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Sintomas.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/coronavirus/sintomas>. Acesso em 15 dez. 2020e.

CANTERAS, C. **Aumento de internações de idosos reflete necessidade de 3ª dose.** 2021. Disponível em: <https://noticias.r7.com/saude/aumento-de-internacoes-de-idosos-reflete-necessidade-de-3-dose-20082021>. Acesso em: 04 set. 2021.

CASTRO, B. L. G. de *et al.* COVID-19 e organizações: estratégias de enfrentamento para redução de impactos. **Revista Psicologia: Organizações & Trabalho (rPOT)**, v. 20, n. 3, p. 1059-1063, 2020.

CORRÊA, M. C. D. V.; VILARINHO, L.; BARROSO, W. B. G. Controvérsias em torno do uso experimental da cloroquina/ hidroxicloroquina contra a COVID-19: no magic bullet. **Physis: Revista de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, e300217, p. 1-21, 2020.

DOURADO, P.; RICCO, T.; VIEIRA, L. **Variante de preocupação Delta e a antecipação da segunda dose das vacinas contra a COVID-19.** 2021. Subsecretaria de Saúde Gerência de Informações Estratégicas em Saúde CONECTA-SUS. Disponível em: <https://www.saude.go.gov.br/files//conecta-sus/produtos-tecnicos/l%20-%202021/COVID-19%20-%20Vacinas%20-%20Antecipa%C3%A7%C3%A3o%20da%20Segunda%20Dose%20x%20Variante%20Delta.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2021.

DUARTE, A. **Entenda como funciona a produção de uma vacina em 5 passos.** 2021. Disponível em: <https://www.pucrs.br/blog/entenda-como-funciona-a-producao-de-uma-vacina-em-5-passos/>. Acesso em: 06 de out. de 2021.

DIAS, G. M. de S.; ARAÚJO, L. H. da C. A.. Modelagem Matemática para Epidemia de COVID-19 no Brasil. **RMCT - Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 37, n. 2, 2020. Disponível em: http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_2_tri_2020/Artigo2.pdf. Acesso em: 23 nov. 2021.

ESTRELA, F. M. *et al.* Pandemia da Covid 19: refletindo as vulnerabilidades a luz do gênero, raça e classe. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 25, n. 9, p. 3431-3436, 2020.

FARO, A. *et al.* COVID-19 e saúde mental: a emergência do cuidado. Contribuições da psicologia no contexto da pandemia da COVID-19. Estudos de Psicologia. Campinas, vol.37. Campinas, 2020. 01-Jun-2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-166X2020000100507&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 03 set. 2021.

FERNANDES, P. H. S.; SALAZAR, L. L.; BENEDETTI, M. S. G. Subnotificação da COVID-19 no extremo norte do Brasil. **Infectologia e Medicina Tropical**, ano 21, cap. 6, p. 44-53, 2021. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/52927>. Acesso em: 10 set. 2021.

FIOCRUZ – FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ; MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Impactos sociais, econômicos, culturais e políticos da pandemia.** Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/impactos-sociais-economicos-culturais-e-politicos-da-pandemia>. Acesso em: 30 ago. 2021a.

FIOCRUZ – FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Fiocruz lidera no Brasil ensaio clínico 'Solidarity' da OMS.** 2020. Disponível em: <https://agencia.fiocruz.br/fiocruz-lidera-no-brasil-ensaio-clinico-solidarity-da-oms>. Acesso em 09 set. 2021.

FIOCRUZ – FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. COVID-19: **estudo analisa subnotificação de óbitos e desigualdades regionais.** 2021. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/noticia/COVID-19-estudo-analisa-subnotificacao-de-obitos-e-desigualdades-regionais>. Acesso em 08 set. 2021b.

FIOCRUZ – FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ; MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Excesso de mortes por COVID-19: estudo da ENSP analisa subnotificação e desigualdades regionais no Brasil.** Disponível em: <http://informe.ensp.fiocruz.br/noticias/50809>. Acesso em: 30 ago. 2021c.

FMI - Fundo Monetário Internacional. **Economia mundial vai ter a maior retração desde a crise de 29, projeta FMI.** 2020. Disponível em:

<https://www.poder360.com.br/economia/fmi-estima-queda-de-53-no-pib-do-brasil-e-desemprego-de-147-em-2020/>. Acesso em: 10 nov. 2020.

FRANÇA, N. S.; SOUZA, T. C. **Alerta variante delta (B.1.617.2)**. 2021. Secretaria de Vigilância e Regulação em Saúde – SEVIR. Disponível em: https://coronavirus.ceara.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/nota-de-alerta-voc-delta-20.07_revarpc_revmma.pdf. Acesso em: 31 ago. 2021.

FREITAS, R. de C. S.; ALMEIDA, C. C. L. de; LOLE, A. As mulheres e a pandemia da COVID-19 na encruzilhada do cuidado. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.

FRESU, G. Entre pandemia e crise orgânica: contradições e narrações hegemônicas do capitalismo em colapso. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.

GOMES, R. L. R. Aspectos da Educação brasileira em meio aos dilemas de um momento dramático. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020a.

GOMES, V. L. C. A morte como projeto. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020b.

GRANDIN, F. **Por que o Brasil avançou na 1ª dose da vacina contra a COVID-19, mas o percentual de totalmente imunizados ainda é tão menor?** 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2021/08/18/por-que-o-brasil-avancou-na-1a-dose-da-vacina-contra-a-COVID-19-mas-o-percentual-de-totalmente-imunizados-ainda-e-tao-menor.ghtml>. Acesso em: 06 de out. de 2021.

HAQUE, M. *et al.* Availability and price changes of potential medicines and equipment for the prevention and treatment of COVID-19 among pharmacy and drug stores in Bangladesh; findings and implications. **Bangladesh Journal of Medical Science**, v. 19, Special Issue on COVID-19, 2020.

IGSAÚDE. **Brasil subnotificou 70% dos casos graves de COVID-19: Subnotificação de óbitos seria de cerca de 38%**. Disponível em: <https://saude.ig.com.br/coronavirus/2021-05-07/brasil-70--subnotificacao-COVID-19-estudo.html>. Acesso em: 07 set. 2021.

LACERDA, M. C. de. Entre a deriva e o naufrágio: notas sobre a população LGBTI em tempos de pandemia da COVID-19. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.

LEDO, M. J. V. *et al.* Modelos matemáticos para el control epidemiológico. **Educación Médica Superior**, v. 34, n. 2, 2020. Disponível em: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412020000200026. Acesso em: 24 nov. 2021.

- LOLE, A.; STAMPA, I.; GOMES, R. L. R. (orgs) **Reflexões sobre crise e pandemia**. Mórula Editorial. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://morula.com.br/wp-content/uploads/2020/06/ParaAlemDaQuarentena.pdf>. Acesso em: 7 set. 2021.
- LUCIO, C. G. **As pressões sobre o emprego**. FSINDICAL, 2020. Disponível em: <https://fsindical.org.br/artigos/as-pressoes-sobre-o-emprego>. Acesso em: 8 set. 2021.
- MACIEL, J. A. C.; CASTRO-SILVA, I. I.; FARIAS, M. R. de. Análise inicial da correlação espacial entre a incidência de COVID-19 e o desenvolvimento humano nos municípios do estado do Ceará no Brasil. **Rev Bras Epidemiol**, v. 23, n. e200057, p. 1-17, 2020.
- MAGENTA, M. **Variante Delta: as 5 mutações que tornam coronavírus mais contagioso e preocupante**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-57760985>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- MATOS, M. C. de. A pandemia da COVID-19 e o trabalho de assistentes sociais na saúde. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.
- MOURA, A. S.; ROCHA, R. L. **Endemias e epidemias: dengue, leishmaniose, febre amarela, influenza, febre maculosa e leptospirose**. 2. ed. Minas Gerais: Nescon/UFMG, 2012.
- NOGUEIRA, A. L. *et al.* **Estimativa da subnotificação de casos da COVID-19 no estado de Santa Catarina**. 2020. Disponível em: <https://noticias.paginas.ufsc.br/files/2020/05/aqui.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- NOGUEIRA, E. A.; MARTINS, L. E. B.; BREZIKOFER, R. **Modelos matemáticos nas ciências não-exatas: um volume em homenagem a Euclides Custódio de Lima Filho**. São Paulo: Blucher, 2008.
- OLIVEIRA, T. M. de; ARAÚJO, A. C. O. Consequências da subnotificação dos casos de COVID-19 para a saúde pública no Brasil. **InterAm J Med Health**, n. 3:e202003062, p. 1-4, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/150-Article%20Text-914-1-10-20210107.pdf>. Acesso em: 08 set. 2021.
- OMS, OPAS. **Folha informativa – COVID-19 (doença causada pelo novo coronavírus)**. OPAS/OMS Brasil; 2020. Disponível em: https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=6101:covid19&Itemid=875. Acesso em 20 de abril de 2020.
- OPAS - Organização Pan-Americana da Saúde. **Folha informativa COVID-19 - Escritório da OPAS e da OMS no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/covid19>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- ORELLANA, J. D. Y. *et al.* Excesso de mortes durante a pandemia de COVID-19: subnotificação e desigualdades regionais no Brasil. **Cad. Saúde Pública**, v. 36, n. 1:e00259120, 2020. Disponível em: <http://cadernos.ensp.fiocruz.br/csp/artigo/1292/excesso-de-mortes-durante-a->

pandemia-de-COVID-19-subnotificacao-e-desigualdades-regionais-no-brasil. Acesso em: 08 set. 2021.

PÉREZ ABREU, M. R.; TEJEDA, J. J. G.; DIEGUEZ GUACH, R. A. Características clínico-epidemiológicas de la COVID-19. **Revista Habanera de Ciencias Médicas**, v. 19, n. 2, p. 1-15, mar-abr. 2020.

RAMON, R. **Modelagem Matemática aplicada a Epidemiologia**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Federal de Santa Catarina, Chapecó, 2011.

ROCHA, L. **7 fatos sobre reinfecção pela COVID-19**. CNNBRASIL. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/7-fatos-sobre-reinfeccao-pela-COVID-19/>. Acesso em: 06 set. 2021.

RODRIGUES, V. A. C.; STAMPA, I. A pandemia e a ‘inteligência’ do presidente. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.

RINCÓN-TOBO, F. S.; BALLESTEROS-RICAURTE, J. A.; CASTRO-ROMERO, A. Herramientas para el modelado epidemiológico de enfermedades en animales. Caso de estudio: brucelosis bovina. **Revista Ciencia y Agricultura**, Colombia, v. 14, n. 2, pp. 77-87, Julio 2017.

SALVADOR, A. C.; GONÇALVES, R. S.; BASTOS, V. P. A crise provocada pela COVID-19: antigos problemas em um novo cenário. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020.

SANCHES, R. P. **Análise do número de reprodutibilidade basal na fase inicial de doenças causadas por vetores**. 2015. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SEBRAE. (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **O Impacto da pandemia de corona vírus nos Pequenos Negócios**. 2020. Disponível em: https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Impacto-do-coronav%C3%ADrus-nas-MPE-2%C2%AAedicao_geral-v4-1.pdf. Acesso em: 05 set. 2021.

SILVA, A. A. M. da. **Sobre a possibilidade de interrupção da epidemia pelo coronavírus (COVID-19) com base nas melhores evidências científicas disponíveis**. Revista brasileira de epidemiologia; 2020. Disponível em <https://www.scielo.org/article/rbepid/2020.v23/e200021/>. Acesso em: 01 de maio de 2020a.

SILVA, D. R. da. **Um modelo matemático para avaliação do impacto da temperatura na evolução da virulência**. 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-22122010-095146/publico/DanielRodriguesSilva.pdf>. Acesso em 28 dez. 2021.

SILVA, P. T. da. Precarização do trabalho em tempos de pandemia da COVID-19. *In*: LOLE, Ana; STAMPA, Inez; GOMES, Rodrigo Lima R. [Orgs.] **Para além da quarentena: reflexões sobre crise e pandemia**. Rio de Janeiro: Mórula Editorial, 2020b.

TESINI, B. L. **Coronavírus e Síndromes respiratórias agudas (COVID-19, MERS e SARS)**. 2020. Disponível em:

<https://www.msmanuals.com/pt/casa/infec%C3%A7%C3%B5es/v%C3%ADrus-respirat%C3%B3rios/coronav%C3%ADrus-e-s%C3%ADndromes-respirat%C3%B3rias-agudas-COVID-19-mers-e-sars#:~:text=Os%20coronav%C3%ADrus%20s%C3%A3o%20uma%20grande,causar%20doen%C3%A7a%20em%20seres%20humanos>. Acesso em: 15 ago. 2021.

THERRIE, B. **Vacinas são eficazes contra a variante delta? Tudo o que sabemos da mutação**. 2021. Disponível em:

<https://www.uol.com.br/vivabem/faq/variante-delta-saiba-tudo-da-mutacao-da-covid-19.htm>. Acesso em: 31 ago. 2021.

TOUEG, G. **Reinfecção pelo coronavírus: qual o risco real?** 2021. Disponível em:

<https://saude.abril.com.br/medicina/reinfeccao-pelo-coronavirus-qual-o-risco-real/>. Acesso em 06 set. 2021.

UGALDE, I. A. A.; DÍAZ, R. G.; LEZCA, W. M. El modelo SIR básico y políticas antiepidémicas de salud pública para la COVID-19 en Cuba. **Revista Cubana de Salud Pública**, v. 46, Supl. especial:e25972020, 2020.

UNA-SUS. Universidade Aberta do Sistema Único de Saúde. 2020a. **Organização Mundial de Saúde declara pandemia do novo Coronavírus**. Disponível em:

<https://www.unasus.gov.br/noticia/organizacao-mundial-de-saude-declara-pandemia-de-coronavirus>. Acesso em: 23 nov. 2020.

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **Impacto da COVID-19 na Educação**. Disponível em:

<https://pt.unesco.org/covid19/educationresponse>. Acesso em: 18 ago. 2021.

VELOSO, J. C. da S.; LIMA, C. V. M.; PIMENTA, A. da S. **A pandemia da COVID-19 no Brasil: investigação da subnotificação de casos**. 2021. Disponível em:

<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/conintsau/article/view/19353/1806>. Acesso em: 07 set. 2021.

VIEIRA, A. de O. **Estudos sobre modelos matemáticos aplicados à**

Epidemiologia: modelo SIR, SIR com vacinação e SIRS. 2016. 42 f. il. Monografia (Licenciatura em Matemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2016.

VIVABEM. **Não vacinados têm o dobro de risco de reinfecção com Covid, diz estudo**. 2021. – Disponível em:

<https://www.uol.com.br/vivabem/noticias/redacao/2021/08/06/nao-vacinados-tem-o-dobro-de-chance-de-reinfeccao-com-covid-diz-estudo.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em: 08 set. 2021.

WERNECK, G. L.; CARVALHO, M. S. A pandemia de COVID-19 no Brasil: crônica de uma crise sanitária anunciada. **Cad. Saúde Pública**, v. 36, n. 5:e00068820, 2020.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2021. **Como são as vacinas desenvolvidas?** Disponível em: <https://www.who.int/pt/news-room/feature-stories/detail/how-are-vaccines-developed>. Acesso em: 31 ago. 2021.