

12^o Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

MODELOS EPIDÊMICOS COMPARTIMENTAIS PARA A COVID-19: EFEITOS DO ATRASO NA VACINAÇÃO

GABRIEL LUIZ DE O. PEREIRA¹, VINÍCIUS R. DA SILVA², OLAVO H. MENIN³

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Sertãozinho, gabriel.lui@aluno.ifsp.edu.br

² Graduando em Engenharia Elétrica, bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Sertãozinho, vinicius.rodrigues@ifsp.edu.br

³ Docente do IFSP, Câmpus Sertãozinho, olavohmenin@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.02.02-6 Modelos analíticos e de simulação.

RESUMO: No atual contexto da pandemia de COVID-19, modelos epidêmicos têm se mostrado de grande auxílio para as autoridades de saúde na tomada de decisões. Considerando que a vacinação é uma das alternativas mais eficazes para o controle da doença, apresentamos, nesse trabalho, um modelo epidêmico compartimental para avaliar seus efeitos sobre a evolução da pandemia. Simulações numéricas mostram que quanto maior for o atraso para o início da vacinação, maior será o pico de demanda por UTI e, conseqüentemente, de mortes devido à doença.

PALAVRAS-CHAVE: epidemiologia; imunização; modelagem matemática; equações diferenciais; simulações computacionais.

EPIDEMIOLOGICAL COMPARTMENTAL MODEL TO COVID-19: EFFECTS OF VACCINATION DELAY

ABSTRACT: In the current context of the COVID-19 pandemic, epidemic models have been of great assistance to health authorities in decision-making. Considering that vaccination is one of the most effective alternatives for controlling the disease, we present here a compartmental epidemic model to assess its effects on the evolution of the pandemic. Numerical simulations show that the longer the delay in starting vaccination, the greater the peak of the ICU demand and, consequently, of deaths due to the disease.

KEYWORDS: epidemiology; immunization; mathematical modeling; differential equations; computational simulations.

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade tem sido marcada por diferentes doenças infecciosas. A peste bubônica, por exemplo, matou entre 30% a 60% da população da Europa no século XIV, enquanto que a AIDS ceifou quase 40 milhões de vida desde seu surgimento, no início dos anos de 1980. Já a febre

amarela, cuja vacina está disponível desde o final da década de 1930, mata, ainda hoje, mais de 60 mil pessoas por ano (OLDSTONE, 2020).

Com o primeiro caso reportado em Dezembro de 2019, na China, a pandemia de COVID-19, doença respiratória causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), já infectou, até meados de 2021, mais de 180 milhões de pessoas, deixando quase 4 milhões de mortos (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). Com a ausência de vacinas, o combate à pandemia foi feita, inicialmente, a partir de medidas não farmacológicas, como uso de máscaras e distanciamento social. Já no final de 2020, começaram os primeiros registros de vacinas para a COVID-19, de forma escassa, já que a demanda era muito maior que a oferta.

Existem diferentes estratégias de vacinação, dentre elas, por idade, grupo social, grupo de risco etc. (DOHERTY et al., 2016). Nesse contexto, o uso de modelos matemáticos e simulações computacionais têm se mostrado ferramentas úteis para auxiliar epidemiologistas na tomada de decisões. Pode-se, por exemplo, simular cenários de forma a avaliar os impactos das diferentes estratégias de vacinação e, com isso, escolher a que traz melhores resultados (KEELING; ROHANI, 2011).

Neste trabalho, apresentamos um modelo compartimental para avaliar os efeitos da vacinação na evolução de uma epidemia com características similares à da pandemia de COVID-19. Mais especificamente, focamos em avaliar como o atraso no início da vacinação afeta a demanda de leitos de UTI e a mortalidade devido à doença. Simulações numéricas foram extensivamente realizadas e os resultados mostram que o atraso na vacinação aumentam substancialmente a demanda de leitos e a mortalidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo epidêmico proposto baseia-se no clássico modelo SIR (susceptível-infeccioso-recuperado), proposto originalmente por Kermack e McKendrick (BRAUER, 2005), onde a população é dividida em três compartimentos, suscetíveis (S), infecciosos (I) e recuperados (R). Porém incorporamos dois compartimentos extras, os hospitalizados (H) e os mortos devido a doença (D) (DA SILVA; MENIN, 2021). Por questão de simplicidade, no entanto, o modelo proposto não incorpora os períodos de incubação (compartimento de expostos) e de latência da vacina, bem como, com exceção das mortes causadas pela doença, não considera dinâmica vital (nascimento e morte natural). Além disso, apesar de poderem ser incorporadas, medidas de combate não-farmacêuticas não foram consideradas. Os compartimentos as transições entre eles são mostrados na Figura 1

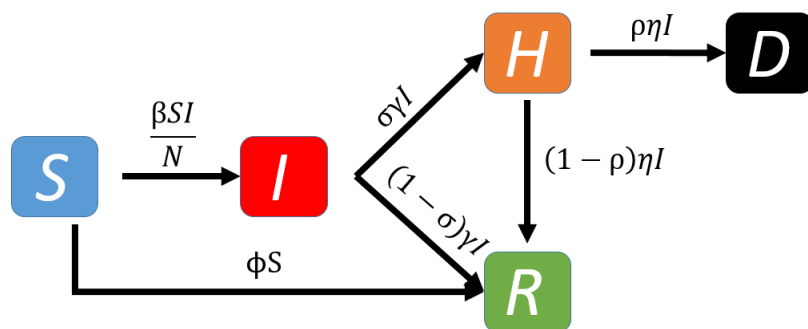


Figura 1: Modelo compartimental SIR (susceptível-infeccioso-recuperado) com dois compartimentos extras, hospitalizados (H) e mortos (D). As variáveis e parâmetros estão descritas no texto e na Tabela 1.

A transição $S \rightarrow I$ ocorre com uma taxa $\beta SI/N$, onde β é proporcional ao número de contatos diários que um indivíduo possui e à probabilidade de que a infecção ocorra caso haja o contato entre um indivíduo suscetível e um infeccioso. Já as transições $I \rightarrow H$ e $I \rightarrow R$ ocorrem com taxas, respectivamente, $\sigma\gamma I$ e $(1-\sigma)\gamma I$, sendo σ a fração de infecciosos que necessitam de hospitalização (UTI) e γ é o inverso do período infeccioso. Considerando que uma fração ρ dos indivíduos hospitalizados morrem devido à doença, as transições $H \rightarrow D$ e $H \rightarrow R$ ocorrem com taxas, respectivamente, $\rho\eta H$ e $(1-\rho)\eta H$, onde η é o inverso do período de hospitalização. Por fim, considera-se que a vacinação de um indivíduo suscetível o leva diretamente para o compartimento dos recuperados. Portanto, se ϕ é a fração de suscetíveis vacinada por dia, a transição $S \rightarrow R$ ocorre com taxa ϕS . Com isso, o modelo é governado pelo sistema de equações diferenciais

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta SI}{N} - \phi I, \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I, \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = (1-\sigma)\gamma I + \phi I, \quad (3)$$

$$\frac{dH}{dt} = (1-\rho)\eta H + \sigma\gamma I, \quad (4)$$

$$\frac{dD}{dt} = \rho\eta H. \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto foi implementado computacionalmente de forma a ser resolvido numericamente (CHAPRA; CANALE, 2011) e simulações foram realizadas considerando os parâmetros mostrados na Tabela 1. Além disso, em cada simulação, a vacinação ocorre com taxa ϕ constante durante 60 dias, mas considerando um atraso δ em relação ao início da epidemia.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nas simulações numéricas.

Parâmetros	Descrição	Valor
N	População total	10^5
β	Taxa média de contatos efetivos	$0,5 \text{ dia}^{-1}$
η	Inverso do tempo de hospitalização na UTI	$0,2 \text{ dia}^{-1}$
γ	Inverso do tempo de infecção	$0,2 \text{ dia}^{-1}$
τ	Duração da vacinação	60 dias
σ	Fração de infecciosos que precisam de UTI	0,005
ρ	Fração de mortes causadas por falta de leitos de UTI	0,1
Ω	Leitos disponíveis	30

Em um primeiro momento, considerou-se $\phi = 0,1$ e quatro valores diferentes de atrasos, $\delta = 0$, $\delta = 10$ dias, $\delta = 20$ dias e $\delta = 30$ dias. Os resultados são apresentados na Figura 2 e mostram que quanto maior o atraso para o início da vacinação, maiores são a demanda de leitos no pico da epidemia e a mortalidade. Mais especificamente, deve-se notar que, com exceção do cenário sem atraso ($\delta = 0$), todos os outros levam a uma saturação do sistema, ou seja, a demanda é maior do que o número de leitos de UTI disponível.

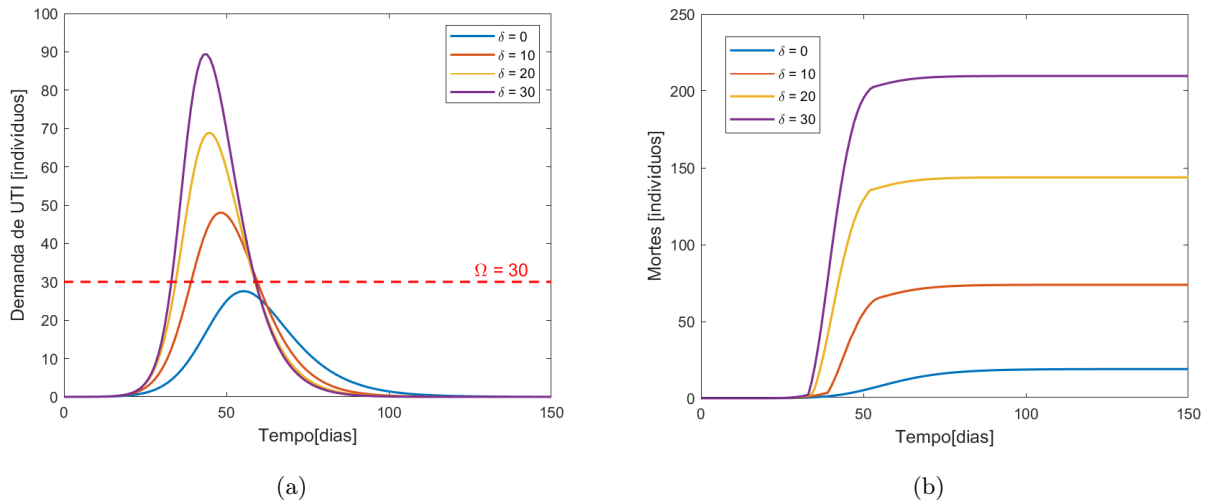


Figura 2: Evolução temporal da (a) demanda de leitos de UTI e (b) número acumulado de mortos considerando os parâmetros mostrados na Tabela 1, $\phi = 0,1$ e diferentes valores de δ (atraso para o início da vacinação em relação ao início da epidemia).

Considerando que em cenários mais realistas é virtualmente impossível iniciar a vacinação no mesmo dia em que a epidemia começa ($\delta = 0$), deve-se aumentar o valor da taxa de vacinação ϕ de forma a evitar a saturação de leitos de UTI e o aumento na mortalidade. Com isso, foram realizadas simulações extensivas para avaliar a demanda de leitos e a mortalidade considerando diferentes pares de valores ϕ e δ e os resultados são apresentados na Figura 3. Como esperado, observa-se que quanto maior for o atraso para o início da vacinação, maior deve ser a taxa com que ela acontece a fim de que não falte leitos de UTI, ou seja, garantir que $H < \Omega = 30$. Verifica-se, no entanto, que para $\delta > 30$ dias, é impossível evitar a saturação do sistema, acarretando um aumento desproporcional na mortalidade.

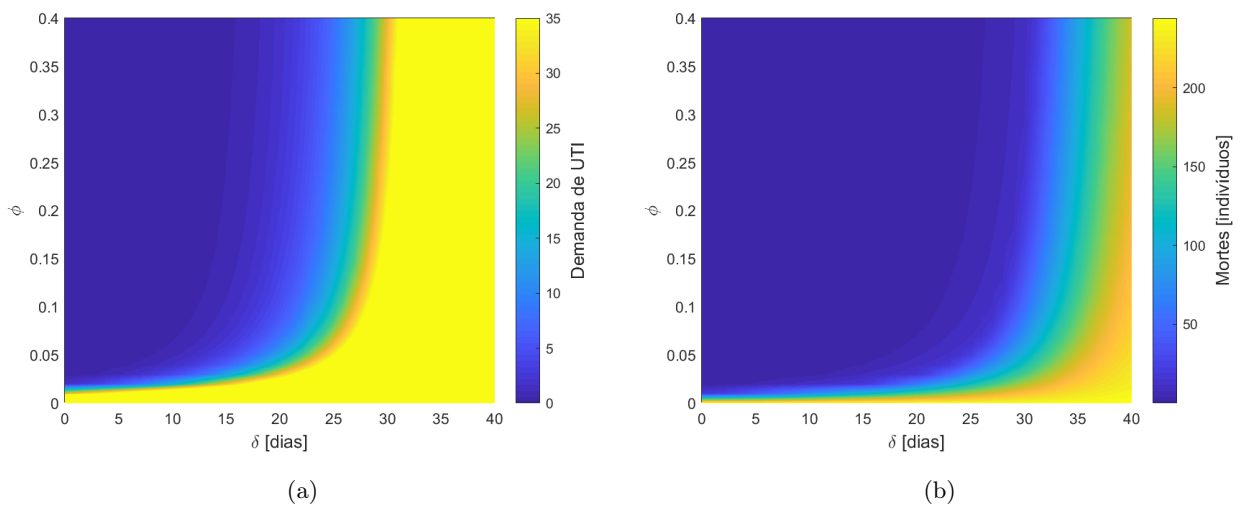


Figura 3: (a) Demanda de leitos de UTI e (b) mortes acumuladas considerando os valores mostrados na Tabela 1 e diferentes valores de ϕ e δ .

CONCLUSÕES

Apresentamos um modelo epidêmico compartimental para avaliar os efeitos da vacinação na evolução de uma epidemia. Simulações computacionais foram realizadas e os resultados mostram que quanto

maior for o atraso para o início da vacinação, maior deve ser a taxa com que ela ocorre para evitar a saturação de leitos de UTI e, conseqüentemente, um aumento da mortalidade. Verifica-se, também, que a partir de um certo valor de atraso, torna-se impossível evitar a falta de leitos e, então, verifica-se um aumento significativo na mortalidade. Destaca-se que, como todos os modelos compartimentais, o que apresentamos aqui tem limitações, principalmente por não levar em conta a estrutura espacial da população. Além disso, não foi considerado o período de incubação da doença, bem como adotou-se que a vacina tem 100% de eficácia em evitar contaminação. Apesar dessas limitações, espera-se que este trabalho colabore com a comunidade científica instigando a criação de outros modelos que possam auxiliar as autoridades a combater futuras pandemias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica (PIBIFSP) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

REFERÊNCIAS

- BRAUER, F. The Kermack–McKendrick epidemic model revisited. *Mathematical biosciences*, Elsevier, v. 198, n. 2, p. 119–131, 2005.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. *Numerical methods for engineers*. [S.l.]: Mcgraw-hill New York, 2011. v. 1221.
- DA SILVA, V; MENIN, O. H. Modified SIR compartmental epidemic model with social distancing and hospital saturation applied to the COVID-19 pandemic. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, v. 17, p. 275–287, 2021.
- DOHERTY, M. et al. Vaccine impact: Benefits for human health. *Vaccine*, v. 34, p. 6707–6714, 2016.
- KEELING, M. J.; ROHANI, P. *Modeling infectious diseases in humans and animals*. [S.l.]: Princeton university press, 2011.
- OLDSTONE, M. B. *Viruses, plagues, and history: past, present, and future*. [S.l.]: Oxford University Press, 2020.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *COVID-19 Weekly Epidemiological Update (29 June 2021)*. 2021.