



Título Original: Optimal quarantine strategies for the COVID-19 pandemic in a population with a discrete age structure

Título Traduzido: Estratégias de quarentena ideais para a pandemia de COVID-19 em uma população com uma estrutura de idade discreta

Autores: João A. M. Gondim ¹, Larissa Machado ²

¹ Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, PE, Brasil

² Departamento de Matemática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Projeto Covid-19 e a Matemática das Epidemias - Fazendo a Ponte entre Ciência e Sociedade

Tradução: Danillo Barros de Souza e Jonatas Teodomiro

Síntese: Camila Sousa e Júlia Lyra

Coordenação: Felipe Wergete Cruz

Introdução

Já é bem sabido que a infecção por coronavírus causa impactos bastante significativos nas pessoas que fazem parte do chamado grupo de risco. Dentro dele, indivíduos com comorbidades, tal qual a diabetes mellitus e problemas cardíacos, além de idosos - que, com o avançar da idade, adquirem chances aumentadas de desenvolver problemas do tipo - estão mais vulneráveis à forma grave da doença.

A fim de proteger essa parcela da população, evitando, assim, o número de agravamentos e óbitos causados pelo vírus, é essencial entender como as medidas de controle devem ser aplicadas e segmentadas levando-se em conta também a faixa etária. Foi com este intuito que pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) desenvolveram um estudo, publicado pela editora Elsevier no jornal *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 140.

Destrinchando

O artigo considerou um modelo SEIRQ (modelagem de doenças infecciosas transmitidas por contato direto) com uma estrutura de idade, considerando grupos de quarentena, em que os controles são os parâmetros de entrada no período de distanciamento social. A partir dele, os controles ideais para diferentes tempos de quarentena e distribuição do custo total de controle foram comparados, avaliando a redução no número de mortes de cada controle em comparação ao mesmo período sem quarentena.

Além disso, foi assumido que a população possui uma estrutura etária para modelos de estrutura etária contínua e para modelos com estrutura etária discreta. Há três faixas etárias, descritas na Tabela 1, onde $Si(t)$, $Ei(t)$, $Ii(t)$, $Ri(t)$ e $Qi(t)$ correspondem aos números de indivíduos suscetíveis, expostos, infectados, recuperados e em quarentena em cada faixa etária no tempo $t \geq 0$, respectivamente. O total da população foi assumido como constante, já que o espaço de tempo envolvido é curto em comparação com a escala temporal demográfica.

Table 1
Description of the age groups.

Age group	Description
1	Young people, aged 0 to 19
2	Adults, aged 20 to 59
3	Elderly, aged 60 onwards.

Para visualizar como o número de infecções e recuperações está distribuído nas três faixas etárias, o estudo utilizou os dados disponibilizados pelo Centro de Coordenação de Alertas e Emergências Sanitárias da Espanha, mostrados na Tabela 3. Para simplificação, supõe-se que a diferença entre o número de casos e o número de mortes representa o número de recuperados. Essas distribuições são apresentadas na Tabela 4.

Table 3
Number of cases, deaths and recoveries by age group [21].

Age group	Cases	Deaths	Recoveries
1	2448	7	2441
2	113,059	891	112,168
3	121,928	17,948	103,980
Total	237,435	18,846	218,589

Table 4
Distribution of infections and recoveries by age group.

Age group	% of cases	% of recoveries
1	1.03%	1.12%
2	47.62%	51.31%
3	51.35%	47.57%
Total	100%	100%

A modelagem considerou o número total de indivíduos infectados no Brasil com dados do dia 13 de maio de 2020, quando um total de 97.575 casos ativos de Covid-19 haviam sido notificados. Para estimar o número de casos expostos, os pesquisadores levaram em conta os dados de 8 de maio de 2020, já que o período médio de incubação para a doença se estima ser na faixa de 5 dias. Nesse período, adotado como tempo inicial do estudo, o Brasil teria 76.603 casos ativos, o que dá uma estimativa de 20.972 casos de exposição ao vírus, e 65.124 casos de recuperação no Brasil.

Assumiu-se que o total da população brasileira era de 200 milhões de habitantes, divididos entre 40% jovens, 50% adultos e 10% idosos, e também que não existiam indivíduos em quarentena no começo da simulação. Como o número de expostos, infectados e recuperados são bem pequenos em comparação com a população, foi assumido que o número inicial de indivíduos suscetíveis é igual ao total da população da sua respectiva faixa etária. As condições iniciais de todas as variáveis, arredondadas para o inteiro mais próximo, são listadas na Tabela 5.

Table 5
Initial conditions.

Class	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Susceptible	80 million	100 million	20 million
Exposed	216	9987	10,769
Infected	789	36,478	39,335
Recovered	729	33,415	30,979
Quarantined	0	0	0

Notas explicativas + gráficos

Após escrever o sistema de otimalidade, a pesquisa calculou os controles ideais numericamente e analisou como alguns dos parâmetros de entrada na quarentena influenciaram os resultados. Esses parâmetros representam escolhas difíceis que as autoridades devem fazer, tais como decidir quantos trabalhadores essenciais poderão se manter em circulação, estimar o impacto econômico da quarentena e quando começá-la. À medida que essas escolhas são feitas, os controles ideais fornecem diretrizes de como proceder.

Na seção de “Comparação de controles ideais para diferentes custos de controle”, foi considerado um custo total de controle constante e distribuído entre faixas etárias de 441 formas. A distribuição com o melhor resultado, no que diz respeito às mortes durante a quarentena, forneceu um calendário de quando aliviar as medidas de isolamento nas três faixas etárias (para um período de distanciamento de 30, 45 e 60 dias, respectivamente):

- Para os jovens, a data de relaxamento seria o 16º, 18º e 14º dia
- Para os adultos, o relaxamento começaria no 12º, 13º e 11º dia
- Para os idosos, começaria no 25º, 39º e 52º dia

Os controles ideais que induziram esse calendário produziram uma redução no número de mortes de 286, 439 e 462 vezes, respectivamente, em comparação com o mesmo período de tempo sem quarentena. Entretanto, nos três casos, o número de

infectados atingiu um mínimo logo antes do fim da simulação. Então, no momento em que a quarentena acaba, os casos aumentariam novamente, podendo se tornar ainda maiores que os valores originais para os períodos de tamanho menor considerados. Isso mostra que as quarentenas não são efetivas se não forem longas o suficiente.

Outro achado encontrado no estudo foi que um início tardio da quarentena faz com que o período antes do relaxamento seja maior. Tomada sob essas condições, a medida restritiva também sofre uma perda na eficácia, já que a redução de mortes devido à quarentena (em comparação com o cenário sem ela) diminui assim que o número de casos iniciais aumenta.

No modelo aplicado, os pesquisadores consideraram os dados do Brasil como condições iniciais. Porém, como o Brasil é um país muito grande, com muitas cidades em diferentes estágios da pandemia, estudos semelhantes devem ser feitos localmente para se adequarem melhor às características de cada cidade. Como os gráficos da Fig. 5 e 6 sugerem, quanto mais cedo a quarentena é implementada, menor é o tempo que os controles precisam estar no máximo.

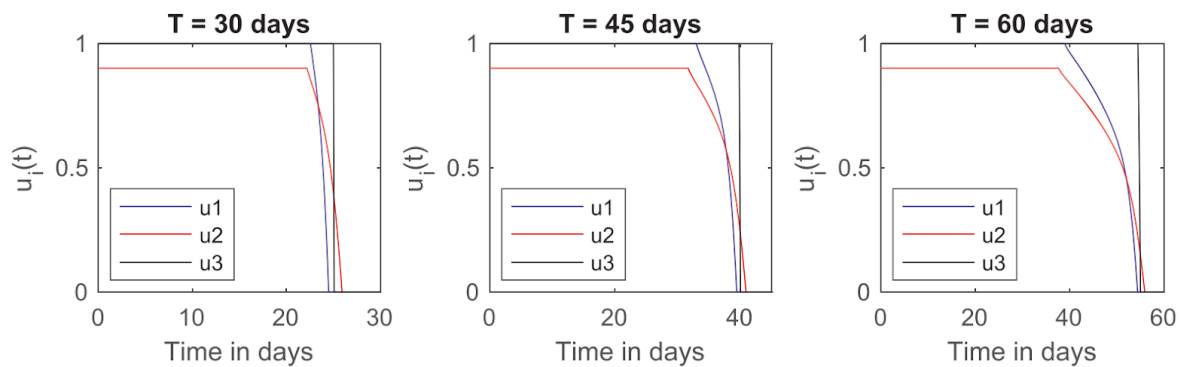


Figura 5. Gráficos dos controles ideais para diferentes períodos de quarentena. Condições iniciais de expostos, infectados e recuperados estão dobradas.

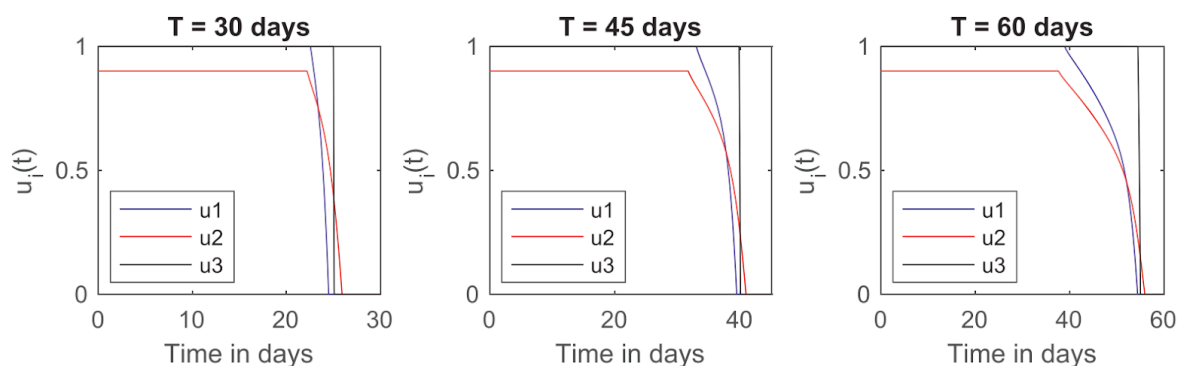


Figura 6. Gráficos dos controles ideais para diferentes períodos de quarentena. Condições iniciais de expostos, infectados e recuperados estão multiplicadas por quatro.

Referências

- [1] Worldometers. <https://www.worldometers.info/coronavirus/>; Accessed: 2020- 05-15.
- [2] Wu JT, Leung K, Leung GM. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in wuhan, china: a modelling study. *Lancet* 2020;395(10225):689–97.
- [3] Ferguson N., Laydon D., Nedjati Gilani G., Imai N., Ainslie K., Baguelin M., et al. Report 9: impact of non-pharmaceutical interventions (NPIS) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand 2020.
- [4] Behncke H. Optimal control of deterministic epidemics. *Optim Control Appl Methods* 2000;21(6):269–85.
- [5] Mateus JP, Rebelo P, Rosa S, Silva CM, Torres DF. Optimal control of non-autonomous SEIRS models with vaccination and treatment. *Discrete Cont Dyn S* 2018;11(6):1179–99.
- [6] Joshi HR. Optimal control of an HIV immunology model. *Optim Control Appl Methods* 2002;23(4):199–213.
- [7] Fister KR, Lenhart S, McNally JS. Optimizing chemotherapy in an HIV model. *Electron J Differ Equ* 1998;1998(32):1–12.
- [8] Kirschner D, Lenhart S, Serbin S. Optimal control of the chemotherapy of HIV. *J Math Biol* 1997;35(7):775–92.
- [9] Silva CJ, Torres DF. Optimal control for a tuberculosis model with reinfection and post-exposure interventions. *Math Biosci* 2013;244(2):154–64.
- [10] Jung E, Lenhart S, Feng Z. Optimal control of treatments in a two-strain tuberculosis model. *Discrete Contin Dyn Syst B* 2002;2(4):473.
- [11] Lee S, Chowell G, Castillo-Chávez C. Optimal control for pandemic influenza: the role of limited antiviral treatment and isolation. *J Theor Biol* 2010;265(2):136–50.
- [12] Grigorieva E., Khailov E., Korobeinikov A.. Optimal quarantine strategies for COVID-19 control models. arXiv preprint arXiv:200410614 2020.
- [13] Djidjou-Demasse R., Michalakisa Y., Choisy M., Sofonea M., Alizon S.. Optimal COVID-19 epidemic control until vaccine deployment. medrxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.04.02.20049189>.
- [14] Jia J, Ding J, Liu S, Liao G, Li J, Duan B, et al. Modeling the control of COVID-19: impact of policy interventions and meteorological factors. *Electron J Differ Equ* 2020;2020(23):1–24.
- [15] Castilho C, Gondim JAM, Marchesin M, Sabeti M. Assessing the efficiency of different control strategies for the COVID-19 epidemic. *Electron J Differ Equ* 2020;2020(64):1–17.
- [16] Thieme H. Disease extinction and disease persistence in age structured epidemic models. *Nonlinear Anal Theory Methods Appl* 2001;47(9):6181–94.

- [17] Inaba H. Mathematical analysis of an age-structured sir epidemic model with vertical transmission. *Discrete Contin Dyn Syst B* 2006;6(1):69.
- [18] Zhou Y, Fergola P. Dynamics of a discrete age-structured sis models. *Discrete Contin Dyn Syst B* 2004;4(3):841.
- [19] Zhou L, Wang Y, Xiao Y, Li MY. Global dynamics of a discrete age-structured sir epidemic model with applications to measles vaccination strategies. *Math Biosci* 2019;308:27–37.
- [20] Martcheva M. *An introduction to mathematical epidemiology*, 61. Springer; 2015.
- [21] Centro de coordinación de alertas y emergencias sanitarias gobierno es- paña - enfermedad por el coronavirus (COVID-19). https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov-China/documentos/Actualizacion_104_COVID-19.pdf. Accessed: 2020-05-15; 2020.
- [22] Russel T.. Using a delay adjusted case fatality ratio to estimate under reporting; 2020. https://cmmid.github.io/topics/covid19/global_cfr_estimates.html.
- [23] Lauer SA, Grantz KH, Bi Q, Jones FK, Zheng Q, Meredith HR, et al. The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: estimation and application. *Ann Intern Med* 2020;172(9):577–82.
- [24] Joshi HR, Lenhart S, Li MY, Wang L. Optimal control methods applied to disease models. *Contemp Math* 2006;410:187–208 .
- [25] Pontryagin LS. *Mathematical theory of optimal processes*. Routledge; 2018.
- [26] Lenhart S, Workman JT. *Optimal control applied to biological models*. CRC Press; 2007.
- [27] Lockdowns are fine for the rich, but millions are too poor to shelter from coronavirus. <https://tinyurl.com/nbcnews-lockdowns>; Accessed: 2020-07-20.
- [28] Coronavirus bailouts: Which country has the most generous deal? <https://www.bbc.com/news/business-52450958>; Accessed: 2020-07-18.