

Otimização dos Parâmetros de Distanciamento Social em Cenário de Pandemia

Social Distancing Parameters Optimization in Pandemic Scenario

André de Sousa Freitas

Anhanguera Educacional. SP, Brasil.
E-mail: andred.freitas@kroton.com.br

Resumo

Em tempos de Pandemia, medidas de distanciamento social são necessárias para o controle da infecção. Tais medidas prejudicam o desenvolvimento da atividade econômica, de modo que decisões sobre o início, a duração e a abrangência do distanciamento carecem de um critério objetivo. Neste trabalho, um método para a otimização do isolamento é desenvolvido relacionando o modelo de Solow-Swan de crescimento macroeconômico ao modelo epidemiológico SEIRS. O distanciamento social foi modelado, matematicamente, como uma função do tipo pulso, caracterizado por três variáveis a serem otimizadas: o início, a duração e a abrangência do isolamento. A avaliação do impacto da epidemia no IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) se constituiu para o balanço de equiparação entre os danos epidêmicos e os danos econômicos. O cálculo do isolamento ideal foi realizado por meio de um algoritmo computacional, no qual o balanço entre os danos sanitários e econômicos foram comparados no sentido de se otimizar o isolamento. Os resultados obtidos se referem aos parâmetros, que modelam um cenário epidêmico hipotético em uma população de economia estável e mostram que, nesse cenário, o isolamento deve ser adotado 5 dias após a epidemia atingir 1 a cada 100 mil habitantes e durar 31 dias, abrangendo 62% da população. Uma sistemática relacionando as variáveis do isolamento aos parâmetros epidemiológicos e macroeconômicos foi desenvolvida, na qual é observada a existência de uma relação linear entre as variáveis do isolamento para diferentes cenários e uma relação direta entre o volume de isolamento e o dano econômico.

Palavras-chave: SEIRS. Solow-Swan. Pandemia. Distanciamento Social.

Abstract

In times of pandemic, social distancing measures are necessary for infection control. Such measures, however, hinder the development of economic activity, so that decisions about the beginning, duration and breadth of distancing lack an objective criterion. In this work, a method for the optimization of isolation is developed relating the Solow-Swan model of macroeconomic growth to the SEIRS epidemiological model. Social distancing was mathematically modeled as a pulse function, characterized by three variables to be optimized: the beginning, duration and scope of isolation. The evaluation of the epidemic impact on the HDI (Human Development Index) was for the balance of equivalence between epidemic damage and economic damage. The ideal isolation was performed by means of a computational algorithm in which the balance between sanitary and economic damage was compared in order to optimize the isolation. The results obtained refer to parameters that model a hypothetical epidemic scenario in a population with stable economy and show that, in this scenario, isolation should be adopted 5 days after the epidemic reaches 1 per 100,000 inhabitants and last 31 days, covering 62% of the population. A systematic relating the isolation variables to epidemiological and macroeconomic parameters was developed, in which the existence of a linear relationship between the isolation variables for different scenarios and a direct relationship between the volume of isolation and economic damage is observed.

Keywords: SEIRS. Solow-Swan. Pandemic. Social Distancing.

1 Introdução

Entre 1918 e 1920, a gripe espanhola contaminou ao menos um quarto da população mundial, e em 2009, a gripe A se espalhou pelo Mundo deixando quase 9 mil mortos (GOMES; FERRAZ, 2012). Em mais uma grave Pandemia, o ano de 2020 ficará marcado pela COVID-19, que entre fevereiro e agosto causou mais de 800 mil mortes no Mundo (WHO, 2020). Entre as mais importantes recomendações das autoridades sanitárias, em tempos de Pandemia, estão os hábitos de higiene e uso de equipamentos de proteção individual, e não menos importante, o distanciamento ou isolamento social, que se traduz na interrupção das atividades não essenciais da sociedade, nas quais seja comum a ocorrência de aglomeração

de pessoas, como em centros comerciais, escolas, shows ou espaços de atendimento ao público (AQUINO *et al.*, 2020).

Medidas de distanciamento social demandam decisões governamentais que podem se tornar difíceis, uma vez que o isolamento onera diretamente a atividade econômica em vários setores (KHATIB, 2020). Assim, é de fundamental importância o gestor possuir um parâmetro sobre o qual possa basear sua decisão de quando iniciar ou encerrar um período de quarentena. Parâmetros comumente usados para isso vêm dos modelos matemáticos epidemiológicos que podem, a partir de dados como a taxa de infecção de determinada doença, estimar em quanto tempo o número máximo de infectados será alcançado, e se, ao alcançar esse pico na curva de infecção, o

sistema de saúde desse país ou cidade colapsará (AQUINO *et al.*, 2020). O distanciamento social é então adotado quando há previsão do colapso do sistema de saúde e, incluindo o efeito desse isolamento, no modelo epidemiológico, é possível avaliar qual o melhor momento para revogá-lo.

Em casos extremos, como tem se mostrado o presente cenário com a COVID-19, o tempo necessário de distanciamento se alonga o suficiente para comprometer de forma grave a economia do país, e nesses casos, a decisão de encerrar ou estender o estado de distanciamento social se torna uma decisão desprovida de um embasamento técnico mais sólido. Assim, uma pesquisa baseada em modelos epidemiológicos e em modelos de crescimento econômico pode ajudar na determinação do tempo e dos níveis de isolamento necessários para se evitar o colapso do sistema de saúde e minimizar o impacto econômico.

A busca por uma curva ideal de isolamento controlado, que parte de princípios gerais da teoria do crescimento econômico e de modelos epidemiológicos básicos é objeto deste trabalho.

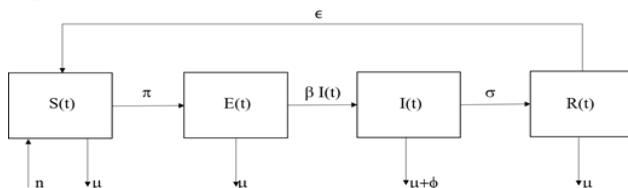
2 Material e Métodos

A otimização do distanciamento social, modelado matematicamente como uma função de isolamento do tipo pulso nas variáveis t_0 , Δt e f (que representam, o início do isolamento, sua duração e sua abrangência, respectivamente), foi obtida cruzando resultados dos modelos epidêmicos SEIRS e econômico Solow-Swan. Para isso, algumas adaptações e ajustes foram necessários.

2.1 O modelo epidemiológico SEIRS

O modelo SEIRS se baseia no fluxo cíclico de pessoas, que partem da situação de suscetíveis, sendo expostos à infecção e que populam o conjunto dos infectados, sendo assim removidos da população para o tratamento, se recuperam e, finalmente, retornam a classe dos suscetíveis (OKHUESE, 2020a; OKHUESE, 2020b). O diagrama da Figura 1 representa a dinâmica do modelo SEIRS.

Figura 1 - Representação esquemática do modelo SEIRS.



Fonte: o autor.

As variáveis do modelo envolvem o total de suscetíveis $S(t)$, de expostos $E(t)$, de infectados $I(t)$ e de recuperados $R(t)$ todos como função do tempo, e os parâmetros envolvidos no modelo (Quadro 1) incluem a taxa de mortalidade natural do país ou da região considerada, além das taxas de transmissão, de mortalidade, de recuperação e de reinfeção da doença. O modelo matemático é formado por um sistema de equações diferenciais homogêneas, que estão descritas a seguir:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \epsilon R(t) - (\mu + \pi + n) S(t) \\ \dot{E}(t) &= \pi S(t) - \mu E(t) - \beta E(t)I(t) \\ \dot{I}(t) &= \beta E(t)I(t) - (\mu + \phi + \sigma) I(t) \\ \dot{R}(t) &= \sigma I(t) - (\mu + \epsilon) R(t) \end{aligned} \quad (1)$$

O número total da população é $N(t)=S(t)+E(t)+I(t)+R(t)$. O ponto sobre as variáveis representa sua derivada temporal total.

Quadro 1 - Parâmetros utilizados no modelo SEIRS

Variável	Descrição
π	Taxa da população exposta.
β	Taxa de transmissão.
σ	Taxa de recuperação dos infectados.
μ	Taxa de mortalidade da população.
n	Taxa de crescimento populacional.
ϕ	Taxa de mortalidade da doença.
ϵ	Taxa de recuperados que perdem a imunidade, retornando ao grupo dos suscetíveis.

Fonte: dados da pesquisa.

A dinâmica do modelo pressupõe que a população N seja dividida em 5 grupos: o primeiro, os suscetíveis $S(t)$, relaciona todas as pessoas que não estão infectadas, mas não estão, a priori, expostas à infecção. Esse grupo é alimentado pelo crescimento natural populacional (n), em que está implícita a condição de restrição às migrações em tempos de Pandemia, e pelas pessoas que se infectaram, se recuperaram e perderam a imunidade $\epsilon.R(t)$. Por outro lado, este grupo $S(t)$ alimenta o grupo dos expostos $E(t)$. A relação entre esses grupos envolve o isolamento controlado – o percentual da população, que está isolada socialmente, portanto, não exposta à infecção, então o parâmetro π , que representa o percentual dos suscetíveis que estão expostos, toma a forma de uma função temporal e é calculado por $\pi(t) = 1 - q(t)$.

O grupo dos expostos, por sua vez, alimenta o terceiro grupo, o dos infectados $I(t)$, em que a taxa de transmissão β relaciona a quantidade de infectados a cada cruzamento entre um indivíduo já infectado com um exposto $\beta.I(t).E(t)$. O grupo dos infectados possui um fluxo de mortos em função da doença $\phi.I(t)$. O quinto grupo, dos recuperados, é alimentado pelo volume de recuperados dos infectados $\sigma.I(t)$ e realimenta os suscetíveis. Todos os grupos são afetados pela taxa de mortalidade natural da população μ , de forma independente ao fator pandêmico.

2.2 O modelo de Solow-Swan

Se por um lado se usa um modelo matemático epidemiológico, por outro, se adota um modelo macroeconômico para avaliar o impacto do distanciamento social na economia. O modelo em questão é o de Solow-Swan (SOLOW, 1956; SWAN, 1956), desenvolvido em 1956, que modela o crescimento econômico, a partir de uma função de produção $Y(K(t),L(t),t)$, na qual as funções $K(t)$ representam

o capital e $L(t)$ o trabalho, todas essas em função do tempo. O volume de trabalho realizado é proporcional à quantidade de pessoas economicamente ativas, que estão em pleno exercício de suas funções. O capital per capita evolui, nesse modelo, de forma relativa à propensão a poupar por parte da população e da depreciação e custos de vida. A variação temporal do capital per capita é dado por:

$$\dot{k}(t) = s y(t) - (\delta + n)k(t) \quad (2)$$

Em que $y(t) = Y(t)/L(t)$ é a produção per capita do país, s é a taxa de poupança média, δ a depreciação do capital e n a taxa de crescimento natural da população.

Em aplicações para o modelo de Solow-Swan, usa-se normalmente uma relação entre o produto e o capital do tipo função de Cobb-Douglas (COBB; DOUGLAS, 1928), que possui a forma:

$$Y(t) = K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (3)$$

de modo que $y(t) = k(t)^\alpha$. Dessa forma, a Equação 2 se reduz à equação diferencial $\dot{k}(t) = s k(t)^\alpha - (\delta + n)k(t)$.

Um modelo que meça as perdas econômicas decorrentes de um distanciamento social controlado precisa determinar, em função da taxa de isolamento $q(t)$, o produto interno bruto per capita $y(t)$. A inclusão do fator de distanciamento social afeta a quantidade de trabalho $L(t)$ por um fator $q(t)$, de modo que o produto per capita da Equação 3 será calculado como $Y(t) = K(t)^\alpha [q(t)L(t)]^{1-\alpha}$ e, portanto, se terá: $y(t) = k(t)^\alpha q(t)^{1-\alpha}$. Assim, o capital per capita será calculado por:

$$\dot{k}(t) = s k(t)^\alpha q(t)^{1-\alpha} - (\delta + n) k(t) \quad (4)$$

Os parâmetros envolvidos no modelo estão catalogados na tabela do Quadro 2. Em versões posteriores do modelo de Solow-Swan, o aprimoramento tecnológico é incorporado e seu efeito de alavancagem de capital é representado por um fator adicional g , que é assimilado na Equação 4 adicionando g ao último termo multiplicado por $k(t)$. Neste trabalho, o fator g associado ao desenvolvimento tecnológico não foi explicitado.

Quadro 2 - Parâmetros utilizados no modelo de Solow-Swan

Variável	Descrição
s	Taxa de poupança.
n	Taxa de crescimento populacional.
δ	Taxa de depreciação.
α	Expoente de Cobb.

Fonte: dados da pesquisa.

2.3 A otimização da função $q(t)$

A função de isolamento $q(t)$ ideal deve minimizar o número de infectados no modelo epidemiológico, ao passo que deve maximizar o produto per capita $y(t)$ acumulado no período da Pandemia. Um isolamento extenso e de elevada adesão será bem sucedida em minimizar os números da infecção, mas acarretará um desgaste excessivo na produção, causando um grande dano no cenário econômico. Por outro lado,

quanto menor o tempo e a adesão do distanciamento social, menor será o dano na economia, mas o volume de infectados aumentará podendo colapsar o sistema de saúde, de modo que um problema de natureza variacional se estabelece no sentido de se obter a otimização de $q(t)$. Adotando $q(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $0 \leq q(t) \leq 1$, a otimização da função de isolamento produzirá, em geral, resultados complexos e impraticáveis. Assim, delimita-se a função isolamento ao formato tipo pulso, em que $q(t) = f$ (sendo $0 \leq f \leq 1$) se $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$ e $q(t) = 0$ para qualquer outro valor de t .

Para determinar a função ideal de isolamento, um método numérico foi implementado no qual os valores da função $I(t)$ e $y(t)$ são calculados, a partir de parâmetros prefixados e ajustados, conforme as análises que serão apresentadas na sequência. A integração dessas variáveis foi implementada por meio do método Runge-Kutta de quarta ordem, adotando-se o passo de 0.1 dia e realizando a integração entre 0 e 90 dias (perfazendo um trimestre). Os valores iniciais aplicados às variáveis em integração (funções $S(t)$, $R(t)$ e $I(t)$ do modelo epidemiológico) estão apresentados na tabela do Quadro 3, e o valor inicial aplicado para a variável $k(t)$, que corresponde ao ponto de equilíbrio calculado como

$$k^* = \left(\frac{\delta}{s}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (5)$$

ficando assim estabelecido que o modelo de Solow-Swan foi ajustado ao contexto de uma economia estabilizada, sem perfil de crescimento ou de recessão prévio a ação da epidemia.

2.4 Equiparação entre os danos epidêmico e econômico

Para se estabelecer a análise variacional interposta pelo presente problema, uma função a ser minimizada do tipo $\kappa \delta I - \delta Y$ (em que ΔI é a variação do total de infectados e ΔY é a variação em função do distanciamento social do produto bruto acumulado durante a Pandemia) deve ser definida, sendo κ um fator de balanço equiparativo entre o dano econômico e o dano epidêmico à sociedade. O fator κ é subjetivo e exprime a importância dada a cada tipo de dano à sociedade. Um valor pequeno em κ expõe a superestimação do dano à economia decorrente do isolamento (e a correspondente subestimação do dano epidêmico), ao passo que um valor alto em κ infere uma subestimação do dano econômico à sociedade (e a correspondente superestimação do dano epidêmico). O ajuste do valor de κ carece, portanto, de um respaldo objetivo politicamente justificado.

Crítérios distintos podem ser considerados para a determinação do fator κ . É possível adotar como critério o total de mortos, seja em decorrência da epidemia ou em decorrência da recessão econômica procedente de um extenso distanciamento social. Em relação às mortes em função da recessão econômica, há um estudo que relaciona o aumento da mortalidade da população em decorrência do aumento da taxa de desemprego em um ponto percentual (HONE *et al.*, 2019), que no Brasil é de 0.5 morte por cem mil habitantes

ao trimestre. A relação entre o aumento do desemprego e a variação do produto interno bruto seria estabelecida pela lei de Okun (OKUN, 2015).

Esse critério, porém, tende a subestimar o dano econômico, já que o impacto social da recessão econômica vai além do aumento da mortalidade. Se por outro lado, usa-se o prejuízo financeiro como critério para determinação de κ , o impacto da Pandemia será subestimado, uma vez que despesas extras originadas pelo controle da epidemia, ainda que significativas para municípios, Estados e para a União, será incomparavelmente menor que qualquer redução perceptiva no produto interno bruto do país. Dessa forma, um critério justo, que dose de forma equitativa o sofrimento social devido tanto para a propagação da doença quanto a uma possível recessão econômica, se faz necessário. Um critério que se mostrou uma boa alternativa e que se adota neste trabalho é a avaliação do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

Este índice se vale de três pilares, que são: o produto interno bruto, a expectativa de vida e o nível de alfabetização do país. O distanciamento social causaria, por um lado, um efeito de melhora no IDH por reduzir o número de mortes – contribuindo, positivamente, com a expectativa de vida, e por outro, um efeito negativo – caso o isolamento se estenda o bastante – no agravamento dos níveis de produção.

O impacto da epidemia na expectativa de vida de uma população é avaliado somando a curva de mortalidade por faixa etária do país às mortes decorrentes da doença, ou seja, a expectativa de vida (em meio a uma epidemia) T' é calculada por:

$$T' = \sum t_i \frac{D_i + D'_i}{N_i} \quad (6)$$

sendo a quantidade de mortes sem a epidemia no i -ésimo extrato etário e a mesma quantidade apenas decorrente da epidemia. t_i é a quantidade de pessoas em cada extrato etário da população e a_i a idade média de cada extrato. O número de mortes relacionadas à epidemia em cada extrato será D'_i , em que a_i é a letalidade por faixa etária. Assumindo que a taxa de infecção não se diferencia por idade, ou seja, em que I é a quantidade total de infectados e N é o total da população, a variação dessa quantidade, considerando dois cenários, com e sem distanciamento social, em relação à alteração em função da epidemia será dada por:

$$\delta T = \frac{T' - T''}{T' - T_0} = \frac{I' - I''}{I' - I_0} = \delta I \quad (7)$$

Em que T'' e I'' correspondem ao cenário sem isolamento e T' e I' ao cenário com isolamento, ao passo que T_0 e I_0 são a expectativa de vida e o número de infectados desconsiderados os efeitos da epidemia (sendo, portanto, $T_0 = T''$ e $I_0 = I''$).

A otimização do isolamento será, portanto, obtida por meio da minimização de δT , em que δT ($=\delta I$ pela Equação 7) é a variação percentual no valor da expectativa de vida sem e com o isolamento relativo ao incremento decorrente da epidemia,

e δy é a variação percentual entre a produção acumulada durante a Pandemia (utiliza-se um período padrão de 90 dias, ou seja, um trimestre) sem e com o isolamento. A ausência de um fator de equiparação entre δT e δy se deve ao fato de que o cálculo do IDH pressupõe a igualdade de pesos entre cada fundamento (expectativa de vida, crescimento da produção e taxa de alfabetização) o que mostra que, para esse critério, o fator κ vale 1.

O procedimento numérico na busca da otimização de $q(t)$ consistiu em avaliar o valor de $q(t)$ para todas as combinações dos parâmetros de $q(t)$, sendo avaliado entre 1 e 90 dias (passo de 1 dia), a partir do início da Pandemia – quando o percentual de infecção é $I(0)$; Δt avaliado entre 1 e 40 dias (passo de 1 dia) e f avaliado entre 0 e 90% (passo de 2%).

2.5 Ajuste dos parâmetros à escala temporal

Os parâmetros do modelo epidemiológico são, em geral, calibrados em função da escala de tempo diária ou semanal. Por outro lado, no modelo macroeconômico, a escala comumente adotada é anual. Assim, fez-se necessário escolher uma escala e ajustar todos os parâmetros em sua função, e como este trabalho está focado no processo epidêmico, a escala de tempo em dias é bastante apropriada, de modo que os parâmetros do modelo de Solow-Swan tiveram de ser adaptados a essa escala. A evolução temporal de $k(t)$ requer o uso da Equação 4, na qual se tem o parâmetro δ que depende da escala de tempo. A conversão desse parâmetro de anos para dias é feita pela transformação (ano contábil de 360 dias. Subscritos d e y se referem a base diária e anual respectivamente). Já a conversão do termo relacionado ao investimento não é linear, de modo que o ajuste é efetuado por meio da adaptação do expoente α a reproduzir com maior verossimilhança os valores de $k(t)$ para cada dado conjunto na base anual de $k(t)$ e adotados, além de os valores de s terem sido convertidos em s_d para garantir a completa adaptação do termo relacionado ao investimento no período.

Os ajustes dos valores de α foram verificados por meio de uma planilha eletrônica de modo a garantir a constância de $k(t)$, uma vez que $k(0)$ foi ajustado ao ponto de equilíbrio de cada conjunto (s, α) , e, como mostrado na Equação 5, variando o tempo entre 0 e 1800 dias (5 anos). A despeito das adaptações feitas na escala de tempo, os valores utilizados, neste trabalho, dos parâmetros do modelo econômico estão apresentados nas tabelas na base anual, dada a possibilidade de comparação e correspondência aos valores típicos na literatura.

2.6 Valores aplicados aos parâmetros

Com o intuito não só de avaliar o perfil ideal da função de isolamento, mas também sua sensibilidade à variação dos demais parâmetros envolvidos, foram calculadas as curvas de infecção e de crescimento econômico derivados do isolamento $q(t)$ para uma variedade de valores de cada parâmetro. Entretanto, um conjunto de valores fixos dos parâmetros foi usado como referência, para basear a comparação nas análises

posteriores.

A tabela do Quadro 3 mostra os valores de referência aplicados a cada parâmetro. Portanto, nas análises posteriores em que parâmetros têm seus valores mudados, os demais se mantiveram fixados neste conjunto de referência. Neste trabalho, as variáveis foram tomadas per capita, ou seja, sempre em valores relativos ao número total de pessoas na população N (valor presumido fixo), isto é, $s(t)=S(t)/N$, $i(t)=I(t)/N$, $r(t)=R(t)/N$.

Quadro 3 - Valores iniciais das funções integradas e valores de referência dos parâmetros dos modelos epidemiológico e econômico

Variável / Parâmetro	Valor de Referência
$s(0)$	1
$i(0)$	0.00001
$r(0)$	0
ε	0.00
σ	0.40
φ	0.005
β	2.00
s	0.20
δ	0.10
α	0.35

Fonte: dados da pesquisa.

O cálculo da letalidade da Pandemia incluiu os efeitos do colapso do sistema de saúde. Para isso, foram fixados outros três fatores: a quantidade de Unidades de Terapia Intensiva (UTI) per capita, o percentual de infectados que precisam de hospitalização em UTI e o acréscimo na letalidade dos desassistidos do sistema de saúde. Diante desses dados, ao longo da evolução da epidemia, a quantidade de infectados pode ser dividida em três grupos: a) o grupo dos que não carecem de internação; b) o grupo dos que carecem de internação e são alocados em uma UTI; e c) o grupo dos que carecem de internação e não dispõem de unidades de atendimento, que configura o colapso do sistema de saúde.

Esses três grupos são distinguidos no modelo epidemiológico por meio do cálculo da taxa efetiva de letalidade da doença: para o primeiro grupo não há letalidade, para o segundo grupo a letalidade é φ , e, por fim, para os desassistidos do terceiro grupo, a letalidade aumenta para 1.3φ . Esse aumento na letalidade em relação aos hospitalizados é um parâmetro baseado em um levantamento para a COVID-19, no qual se mostrou que entre a população americana, os desassistidos do sistema de saúde (latinos e hispânicos) têm 30% mais mortes que os demais (SANCHES, 2020). No presente estudo se considera um hipotético sistema de saúde com disponibilidade de 20 UTIs por 100 mil habitantes (valor razoável para a realidade de alguns países) e que 5% dos infectados precisam de internação em UTIs. Em futuras aplicações deste método para casos reais, estes parâmetros deverão ser reajustados.

A letalidade da epidemia é um fator a ser descontado da taxa de crescimento da população no modelo econômico,

e essa inclusão é feita a partir da variação temporal do percentual da população que se mantém viva durante a epidemia, de modo que o fator de crescimento populacional n envolvido na Equação 2 deve ser calculado como a soma entre o crescimento populacional exógeno, a epidemia e a variação em função das mortes pela epidemia.

Em consonância com o objetivo principal deste trabalho, que é o de avaliar o impacto do distanciamento social nas curvas de infecção e crescimento econômico em intervalos de tempo delimitados pelo período de uma epidemia – nestas análises se usa o intervalo de 90 dias – as taxas de crescimento e de mortalidade da população (não relacionados à epidemia) foram consideradas nulas ($n=0$ e $\mu=0$).

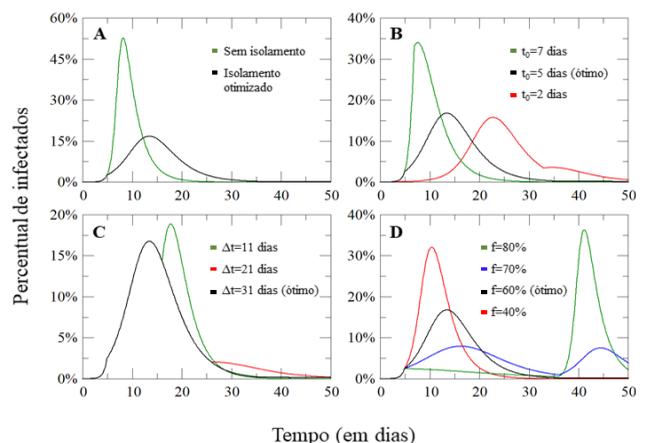
3 Resultados e Discussão

Além de otimizar a função de isolamento para o conjunto padrão, ou de referência, dos parâmetros epidemiológicos e econômicos, algumas análises também foram efetuadas variando alguns desses parâmetros e mantendo os demais fixos, para se avaliar possíveis sistemáticas das variáveis do isolamento. Assim, os resultados se dividirão em duas partes: a otimização do isolamento, a partir do conjunto referência de parâmetros, e as análises relativas às variações de parâmetros.

3.1 Otimização para o conjunto padrão de parâmetros

Para o conjunto padrão de parâmetros (Quadro 3), o distanciamento social ideal consiste de um nível de isolamento entre os dias 5 e 36 (e dias), iniciando a contagem dos dias quando a epidemia atinge a fração $i(0)$ da população, no caso, 1 pessoa por 100 mil. Para esse isolamento, a variação do produto acumulado no trimestre é de -15.98%, e a alteração no PIB anual, considerando que nos demais trimestres não há qualquer interferência da epidemia sobre a economia, é de -3.99%. A curva de infecção para esse isolamento está nos gráficos da Figura 2.

Figura 2 - Curva de infecção para a epidemia a partir dos parâmetros padrão com isolamento otimizado (em preto nos quatro gráficos)



Fonte: dados da pesquisa.

Nestes gráficos, observa-se também, para efeito de

comparação, a curva sem distanciamento social e variações nos parâmetros do isolamento (ϕ e σ). É possível notar que tanto o aumento quanto a redução de ϕ em relação ao valor ótimo ($\phi = 1.0$) produzem curvas de infecção, cujo total de infectados tende a aumentar. Uma observação similar pode ser feita em relação à variação do nível de isolamento. Para estes parâmetros, a mudança no impacto econômico não tem grande efeito e, portanto, a otimização se reduz a minimizar a quantidade total de infectados. Já com relação à variação do parâmetro σ (o tempo de isolamento), as curvas mostram a tendência de diminuir a quantidade total de infectados, na medida em que o isolamento se estende, mas o agravamento do impacto econômico se torna preponderante na delimitação do isolamento ideal.

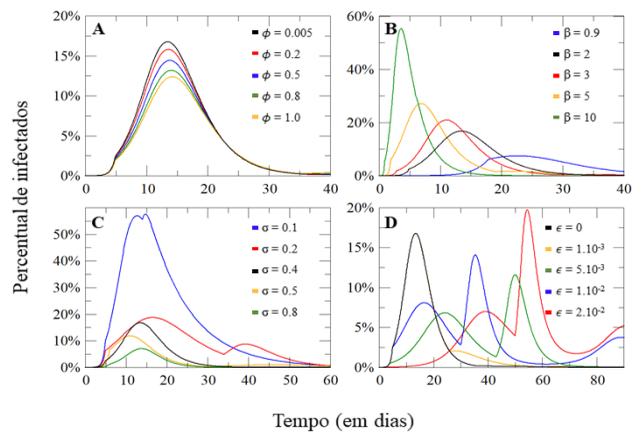
As curvas de infecção obtidas com o isolamento do tipo função pulso possuem um formato tipicamente gaussiano assimétrico com duas descontinuidades no tempo, no início e no final do isolamento. Quando o isolamento é demasiado precoce (curva em vermelho no gráfico do quadrante b da Figura 2), o pico de infecção é adiado, já quando o isolamento se inicia de forma tardia (curva em verde no mesmo gráfico), o pico é antecipado e com um número, consideravelmente, maior de infectados. Já em relação ao tempo de duração do isolamento (gráfico no quadrante c da Figura 2), se muito curto, um novo pico de infecção pode se formar mesmo que a redução de casos diários já estivesse em curso. Essa é uma análise importante, no contexto de políticas públicas, uma vez que a diminuição no número diário de infectados pode levar gestores a acreditarem ser o momento para liberação do distanciamento social, o que se mostra uma decisão equivocada.

Se por outro lado o isolamento for prolongado excessivamente, impactará no cenário econômico, embora o tempo excedente não faça qualquer diferença na contenção da epidemia. Com respeito ao percentual de isolamento (gráfico do quadrante d da Figura 2), quando menor que o nível ideal, não reduz o pico de infecção o bastante para se evitar o colapso do sistema de saúde, e quando maior que o nível ideal, vai restringir muito o crescimento da curva de infecção, mas após o término do isolamento, o pico volta a crescer. Consiste assim de uma forma de apenas prorrogar o problema epidêmico sob um relevante sacrifício na economia.

3.2 Variações nos parâmetros epidemiológicos

Adotando como base o conjunto padrão de parâmetros, foi variado, um a um, os parâmetros epidemiológicos e econômicos, a fim de se avaliar a sensibilidade do modelo e da otimização em relação a cada parâmetro de forma independente. Os gráficos da Figura 3 mostram os resultados para variações na taxa de mortalidade ϕ (quadrante a da figura), taxa de transmissão β (quadrante b), taxa de recuperação σ (quadrante c) e taxa de retorno ϵ dos recuperados ao grupo dos suscetíveis (quadrante d).

Figura 3 - Curvas de infecção com isolamento otimizado para variações nos principais parâmetros epidemiológicos: ϕ , β , σ e ϵ .



Fonte: dados da pesquisa.

O efeito da variação da taxa de mortalidade sobre a otimização do distanciamento social é praticamente nula, uma vez que a curva de infecção também é pouco impactada por esse fator (gráfico do quadrante a da Figura 3), especialmente, para o caso em que a taxa de retorno dos recuperados aos suscetíveis é zero (o que está sendo considerado como padrão). Mesmo no caso extremo, em que todos os infectados morrem), a curva de infecção apresenta um perfil similar ao caso de taxas de mortalidade menores.

Do ponto de vista matemático, curvas de perfis similares – embora distintas no volume de infectados, produzirão o mesmo resultado em termos de otimização. Com respeito à variação da taxa de transmissão (gráfico do quadrante b da Figura 3), observa-se que quanto maior essa taxa, mais rápida a subida e mais alto o nível máximo de infecção. O isolamento ideal começa mais tarde em frações menores para as menores taxas de transmissão da doença.

Ainda, sobre os gráficos da Figura 3, no quadrante c se tem um comparativo entre as curvas de infecção para diferentes valores da taxa de recuperação σ . No modelo adotado, esta taxa equivale a τ , em que τ corresponde ao total de dias para a recuperação do infectado. Fica claro, assim, que quanto menor for o valor de σ maior será a quantidade de infectados, o que concorda com as curvas obtidas. Por fim, no quadrante d da mesma figura se tem a variação do parâmetro ϵ , a taxa de recuperados que retornam ao grupo dos suscetíveis, ou seja, aqueles que mesmo após a infecção perdem a imunidade à doença. Essa taxa é, em geral, pequena, sobretudo, quando a população está sendo considerada dentro de um único cenário epidêmico, mais especificamente, em um intervalo de três meses. O gráfico mostra que, quanto maior essa taxa, mais intenso é o impacto da epidemia, e os cenários mesmo otimizados levam a picos altos de infecção, sobretudo, após o isolamento.

Em casos como a curva em vermelho, por exemplo, em que o isolamento ideal se inicia no segundo dia e se encerra no quinquagésimo dia, a partir do qual se percebe uma nova, rápida e intensa subida no número de infecções, que voltará a

diminuir até o 72º dia. Depois disso, uma nova onda epidêmica pode ser percebida atingindo seu pico passando do 90º dia. A presença da segunda onda epidêmica é vista também no gráfico para .

Variações nos parâmetros econômicos s , δ e α também foram realizadas. O parâmetro s (propensão média a poupar, no padrão adotado 0.2), foi variado entre 0.05 e 0.25; o parâmetro δ (taxa média de depreciação) foi variada entre 0.03 e 0.15 (sendo 0.1 o padrão adotado) e o parâmetro α (expoente de Cobb – valor padrão de 0.35) foi variado entre 0.1 e 0.5. Em todas essas análises, os resultados mostraram que o isolamento ideal obtido para os parâmetros padrões continua válido. As variações do produto per capita ficaram entre -13.64% e -17.56% para o trimestre.

3.3 Sistemática das variáveis de distanciamento social

A partir dos dados utilizados neste estudo, é possível desenvolver, ainda que de forma limitada, uma sistemática entre as variáveis do isolamento (abrangência, tempo de início e duração). Para isso, foram comparados os valores das variáveis de isolamento otimizadas relativas às mudanças nos parâmetros dos modelos epidemiológicos e econômicos. O gráfico da Figura 4 mostra o comportamento das variáveis, e do isolamento otimizado em função do parâmetro β (taxa de infecção) e ϵ (taxa de retorno dos recuperados aos suscetíveis). Na variação de β , observa-se que tanto quanto formam um pico em torno de , e a variável refletiu essa tendência de forma inversa. Em termos gerais, os dados indicam um vínculo linear entre e as variáveis e , o que se mostra válido também para as outras variações estudadas (em σ e ϕ). O ajuste que maximiza a correlação entre e as variáveis temporais do isolamento produz a relação

$$3.7 t_0 + \Delta t + 1405.6 f = 1387.9 \quad (8)$$

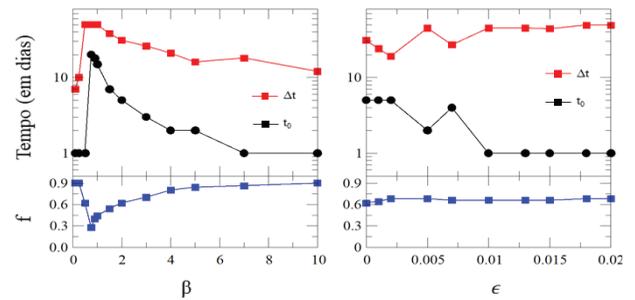
ficando, para os dados utilizados, a correlação entre e a quantidade determinada com .

Outra relação importante acontece entre o volume de isolamento praticado, definido como o produto e a variação percentual na atividade econômica no trimestre. Uma forte correlação entre os resultados se verifica () podendo assim a variação trimestral da atividade econômica ser estimada a partir da relação:

$$\Delta y = -0.0774 (f \cdot \Delta t) - 1.3391 \quad (9)$$

Se por um lado, as variações em β e ϵ produziram os perfis de isolamento mostrados nos gráficos da Figura 4, as variações em σ (recuperação dos infectados) e ϕ (letalidade) não produziram variações significativas nos valores de , e , de modo que os gráficos apresentados sintetizam, junto aos resultados apresentados para o conjunto padrão de parâmetros, os resultados obtidos.

Figura 4 - Variáveis do isolamento otimizado como função da taxa de transmissão β (à esquerda) e da taxa de retorno dos recuperados ao grupo dos infectados (perda de imunidade) ϵ (à direita)



Fonte: dados da pesquisa.

4 Conclusão

Para os parâmetros utilizados, o isolamento em posto em curso do 5º ao 36º dia de epidemia mostra ser o ideal, ou seja, aquele que menos onera a economia, produzindo o menor número de mortes possível. Variações nos principais parâmetros epidemiológicos e econômicos aplicados também foram realizadas no sentido de nortear, para casos diversos, a tendência correspondente de alteração nos parâmetros do isolamento a ser adotado.

Em linhas gerais, a taxa de mortalidade e os parâmetros econômicos impactam pouco o percentual e a extensão do isolamento. A taxa de infecção β tem uma importante relação com o tempo do início do isolamento. Isso vale para a taxa de recuperação σ , que também guarda alguma relação com o nível de isolamento: quanto maior a taxa, menor o nível de isolamento. Finalmente, quanto à taxa de recuperados ϵ , o principal vínculo se dá com o tempo necessário de isolamento: aumenta com o aumento da taxa. As sistemáticas esboçadas a partir dos dados mostram uma relação linear envolvendo a abrangência, a duração e o dia do início do distanciamento social, além de que o volume de isolamento () possui forte correlação com o dano econômico Δy .

No que diz respeito ao modelo econômico adotado, algumas observações são importantes: a análise aqui adotada considera que um contingente correspondente a uma fração da população economicamente ativa deixou de produzir durante o distanciamento social, e diante desse cenário, reparte o produto realizado no período pelo total da população. Não estão incluídos efeitos de cascata – nos quais a interrupção, ainda que parcial, de uma determinada atividade, implica na redução de outras atividades. Efeitos dessa natureza são imprescindíveis em uma análise real, de modo que os resultados aqui apresentados apontam para uma metodologia razoável que carece da inclusão de desdobramentos mais detalhados se utilizados na análise de um caso real. Outro cuidado a ser tomado na aplicação dessa análise, em um caso real, é a ponderação a respeito do fator efetivo de distanciamento social.

O percentual da população em isolamento pode mesmo ser diferente para o modelo epidêmico e para o modelo

econômico: pessoas estão isoladas socialmente, quando exercem suas atividades em suas casas, e nesse caso, devem ser incluídas como isoladas do ponto de vista epidemiológico, mas não do ponto de vista econômico. Essa distinção pode ser considerada no modelo proposto a partir de um novo fator , ou fator de isolamento econômico, que computa o percentual da população em isolamento que de fato deixou de produzir, de modo que nas equações do modelo de Solow-Swan em que se aplica $q(t)$ passa-se a usar , ao passo que nenhuma mudança seria feita no modelo SEIRS.

Referências

AQUINO, E.M.L. *et al.* Medidas de distanciamento social no controle da pandemia de COVID-19: potenciais impactos e desafios no Brasil. *Ciênc. Saúde Coletiva*, v.25, p.2423-2446, 2020. doi: 10.1590/1413-81232020256.1.10502020

COBB, C.W.; DOUGLAS, P.H. A Theory of Production. *Am. Econ. Rev.*, v.18, p.139-165, 1928.

GOMES, I. M.A.M.; FERRAZ, L.M.R. Ameaça e controle da gripe A(H1N1): uma análise discursiva de Veja, IstoÉ e Época. *Saúde Soc.*, v.21 n.2, p.302-313, 2012. doi: 10.1590/S0104-12902012000200005

HONE, T. *et al.* Effect of economic recession and impact of health and social protection expenditures on adult mortality: a longitudinal analysis of 5565 Brazilian municipalities.

Lancet Global Health, v.7, n.11, 2019. doi: 10.1016/S2214-109X(19)30409-7.

KHATIB, A.S.E. Economia *versus* Epidemiologia: Uma análise do trade-off entre mercados e vidas em tempos de Covid-19. *SciELO Preprints*, 2020. doi: 10.1590/SciELOPreprints.786

OKHUESE, A.V. Estimation of the probability of reinfection with COVID-19 by the susceptible-exposed-infectious-removed-undetected-susceptible model. *JMIR Public Health Surv.*, v.6, n.2, 2020. doi: 10.2196/2F19097

OKHUESE, A.V. Mathematical predictions for covid-19 as a Global Pandemic. *SSRN Electronic J.*, 2020. doi: 10.1101/2020.03.19.20038794

OKUN, A.; SUMMERS, L. *Equality and efficiency: the big tradeoff*. Brookings Institution Press, 2015.

SANCHES, M. Coronavírus: nos EUA, cidades com migrantes brasileiros e hispânicos têm 30% mais mortes por covid-19. *BBC Brasil*, 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-52333349>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SOLOW, R.M.A Contribution to the theory of economic growth. *Quartely J. Econ.*, v.70, n.1, p.65-94, 1956. doi: 10.2307/1884513

SWAN, T.W. Economic growth and capital acumulation. *Econ. Record*, v.32, p.334-361, 1956. doi: 10.1111/j.1475-4932.1956.tb00434.x

WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Geneva: World Health Organization, 2020.