

Borelli, Luan; Góes, Geraldo Sandoval

Working Paper

## A macroeconomia das epidemias: Heterogeneidade interestadual no Brasil

Texto para Discussão, No. 2581

**Provided in Cooperation with:**

Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília

*Suggested Citation:* Borelli, Luan; Góes, Geraldo Sandoval (2020) : A macroeconomia das epidemias: Heterogeneidade interestadual no Brasil, Texto para Discussão, No. 2581, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, <https://doi.org/10.38116/td2581>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/240776>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# 2581

**A MACROECONOMIA DAS  
EPIDEMIAS: HETEROGENEIDADE  
INTERESTADUAL NO BRASIL**

**Luan Borelli  
Geraldo Sandoval Góes**

**TEXTO PARA DISCUSSÃO**





### **A MACROECONOMIA DAS EPIDEMIAS: HETEROGENEIDADE INTERESTADUAL NO BRASIL**

Luan Borelli<sup>1</sup>

Geraldo Sandoval Góes<sup>2</sup>

---

1. Assistente de pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Macroeconômicas (Dimac) do Ipea.

2. Especialista em políticas públicas e gestão governamental na Dimac do Ipea.

**Governo Federal**

**Ministério da Economia**

**Ministro** Paulo Guedes

**ipea** Instituto de Pesquisa  
Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério da Economia, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

**Presidente**

Carlos von Doellinger

**Diretor de Desenvolvimento Institucional**

Manoel Rodrigues Junior

**Diretora de Estudos e Políticas do Estado,  
das Instituições e da Democracia**

Flávia de Holanda Schmidt

**Diretor de Estudos e Políticas  
Macroeconômicas**

José Ronaldo de Castro Souza Júnior

**Diretor de Estudos e Políticas Regionais,  
Urbanas e Ambientais**

Nilo Luiz Saccaro Júnior

**Diretor de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação  
e Infraestrutura**

André Tortato Rauhen

**Diretora de Estudos e Políticas Sociais**

Lenita Maria Turchi

**Diretor de Estudos e Relações Econômicas  
e Políticas Internacionais**

Ivan Tiago Machado Oliveira

**Assessora-chefe de Imprensa  
e Comunicação**

Mylena Fiori

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

## Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2020

Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília : Rio de Janeiro : Ipea , 1990-

ISSN 1415-4765

1. Brasil. 2. Aspectos Econômicos. 3. Aspectos Sociais.  
I. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CDD 330.908

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos).  
Acesse: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério da Economia.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

JEL: E1, I1, H0.

DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2581>

# SUMÁRIO

---

RESUMO

1 INTRODUÇÃO .....	7
2 O MODELO SIR-MACRO .....	10
3 CALIBRAGEM .....	17
4 EQUILÍBRIO COMPETITIVO .....	21
5 POLÍTICA DE CONTENÇÃO .....	25
6 AS CONSEQUÊNCIAS DA POLÍTICA ÓTIMA DE CONTENÇÃO .....	29
7 CONCLUSÃO .....	38
REFERÊNCIAS .....	40
APÊNDICE A .....	42
ANEXO A .....	46



## RESUMO

Neste trabalho utilizamos o modelo SIR-macro de Eichenbaum *et al.* (2020), em sua versão completa, para efetuar um estudo comparativo das interações entre as decisões econômicas e a pandemia da Covid-19 nos estados de São Paulo, Amazonas, Ceará, Rio de Janeiro e Pernambuco, que, no momento da pesquisa, apresentavam as situações mais críticas entre os 26 estados brasileiros. Com o objetivo de analisar qualitativamente como as principais diferenças intrínsecas a cada estado podem afetar as suas dinâmicas epidêmicas e seus resultados, computamos, para os cinco estados, os resultados do modelo no equilíbrio competitivo e na presença da adoção de políticas ótimas de contenção e avaliamos as consequências destas políticas. Concluímos que as características intrínsecas dos cinco diferentes estados implicam diferenças relevantes na dinâmica epidêmica, nas políticas ótimas de contenção, no efeito da adoção destas políticas e na severidade das recessões econômicas.

**Palavras-chave:** epidemia, Covid-19, estados, recessões, políticas de contenção, modelo SIR-macro.



## 1 INTRODUÇÃO

Conforme o vírus da Covid-19 se espalha pelo território brasileiro, governadores de todo o país enfrentam o desafio de entender e gerenciar a epidemia que assola os estados que comandam. Quando comparado a outros países, este desafio se demonstra ainda maior no Brasil, dada a dimensão continental deste país e a heterogeneidade das características de seus diversos estados. Um recente estudo de Hallal *et al.* (2020) ilustra como essa heterogeneidade pode afetar as dinâmicas epidêmicas em todo o país. O estudo reporta a primeira onda de pesquisas de seroprevalência com amostras probabilísticas domésticas de 133 grandes cidades sentinelas do Brasil, incluindo 25.025 participantes de todos os 26 estados e do Distrito Federal, e encontra que a seroprevalência de anticorpos para Sars-COV-2, avaliada usando um teste rápido de fluxo lateral, variou acentuadamente nas cidades e regiões, de menos de 1% na maioria das cidades das regiões Sul e Centro-Oeste a até 25% na cidade de Breves, na região amazônica (Norte).

Neste trabalho, nosso objetivo é investigar como e o quanto as diferenças interestaduais afetam as dinâmicas epidêmicas dos estados brasileiros. A resposta a essa questão pode prover intuições a respeito das consequências da condução de políticas de contenção no âmbito agregado (federal) ou desagregado (estadual).

Para efetuar esta análise utilizamos o simples arcabouço do modelo SIR-macro, proposto por Eichenbaum *et al.* (2020). Diferente dos modelos epidemiológicos que têm sido amplamente utilizados em tentativas de prever o curso das epidemias – Ferguson *et al.* (2020), por exemplo –, o modelo SIR-macro estende o modelo clássico SIR (acrônimo para suscetíveis, infectados e recuperados) proposto originalmente por Kermack e McKendrick (1927), incorporando um importante fator com o potencial de afetar significativamente a dinâmica das epidemias: a interação entre as decisões econômicas e as taxas de infecção. Neste novo modelo estendido, as decisões dos agentes em abrir mão de consumo e de horas de trabalho reduzem, por um lado, a severidade da epidemia (medida em número total de mortes), mas agravam, por outro lado, o tamanho da recessão econômica dela resultante.

Essa extensão não apenas contribui para resultados mais precisos da evolução da epidemia, como também permite a análise dos seus efeitos sobre agregados macroeconômicos. No modelo SIR-macro, a ocorrência de uma epidemia tem efeito tanto sobre

a demanda quanto sobre a oferta agregada da economia. O efeito sobre a oferta dá-se pois, como a epidemia expõe os trabalhadores ao vírus em seus ambientes de trabalho, estes reagem ao risco de serem contaminados reduzindo horas de trabalho ofertadas. Analogamente, o efeito sobre a demanda ocorre pois, como a epidemia expõe os consumidores ao vírus nos ambientes de consumo, estes reagem ao risco de serem contaminados reduzindo suas atividades de consumo. Os efeitos sobre a oferta e a demanda agregada atuam conjuntamente, gerando uma grande e persistente recessão.

Uma importante característica deste modelo é que o seu equilíbrio competitivo não é socialmente ótimo. A população infectada pelo vírus não internaliza por completo o efeito de suas decisões de consumo e trabalho na disseminação do vírus. Para lidar com estas externalidades infecciosas, os governadores podem adotar políticas de contenção que reduzam o consumo e as horas trabalhadas pelos agentes. Reduzindo as interações econômicas dos agentes, essas políticas de contenção, por um lado, exacerbam as recessões, mas, por outro lado, reduzem a quantidade de mortes resultante da epidemia.

Neste trabalho computamos o modelo SIR-macro para cinco estados brasileiros. Consideramos, para cada estado, dois cenários: um sob o equilíbrio competitivo e outro sob a adoção de políticas ótimas de contenção. O critério de seleção dos cinco estados foi a criticidade de suas situações epidêmicas no momento da pesquisa. Assim, selecionamos os cinco estados que apresentavam a situação epidêmica mais crítica, até o momento da pesquisa, em termos de número de casos notificados acumulados. Os estados selecionados foram São Paulo, Amazonas, Ceará, Rio de Janeiro e Pernambuco.

As diferentes características particulares destes estados foram incorporadas por meio de nossa estratégia de calibragem para os valores dos parâmetros e variáveis do modelo. Nossa calibragem permite que os resultados incorporem diferenças interestaduais relativas às seguintes características: *i*) tamanho da população; *ii*) renda *per capita*; *iii*) tempo médio dedicado ao trabalho; *iv*) tempo médio no transporte; *v*) tempo médio dedicado a afazeres domésticos; *vi*) quantidade média de pessoas por residência; *vii*) quantidade de pessoas ocupadas na força de trabalho, *viii*) quantidade de estudantes; e *ix*) taxas de fatalidade estimadas com a evolução da epidemia até o momento da pesquisa.

Ao computar as dinâmicas epidêmicas para diferentes estados, torna-se possível efetuar análises comparativas das epidemias não apenas dentro dos próprios estados, comparando o cenário de equilíbrio competitivo com o cenário de adoção de políticas ótimas de contenção, como também entre os cinco diferentes estados. Essas comparações interestaduais permitem verificar como as diferentes características destes estados influenciam os diversos resultados do modelo.

Comparamos as diferenças das dinâmicas epidêmicas e de suas consequências entre estes diferentes estados tanto para o cenário de equilíbrio competitivo (sem adoção de políticas de contenção) quanto para o cenário em que são adotadas políticas ótimas de contenção. Também comparamos as diferenças das políticas ótimas de contenção requeridas para cada estado e avaliamos os efeitos da adoção destas políticas sobre cada um destes estados, tanto isoladamente quanto em comparação aos demais.

Como resultado destas análises, concluímos que as características particulares dos cinco diferentes estados implicam diferenças relevantes em suas dinâmicas epidêmicas, nas políticas ótimas de contenção a serem adotadas, no efeito da adoção destas políticas e na severidade das recessões econômicas resultantes da pandemia. Esta conclusão corrobora com ênfase que vem sido dada na literatura nacional à importância da análise desagregada do país para a formulação de políticas de combate à pandemia, podendo a adoção de uma política única para um país das dimensões do Brasil provocar reações desproporcionais nas esferas estaduais. Com efeito, se a política do país for acima da requerida para determinados estados em particular, estes podem sofrer agravos desnecessários de suas recessões econômicas. Num pior cenário, por outro lado, se a política adotada por todo o país for abaixo da requerida por determinados estados, a consequência pode ser a elevação do número de mortos em decorrência da pandemia nesses estados. Portanto, em última análise, concluímos que o enfrentamento desagregado da pandemia pode colaborar tanto para a menor severidade da recessão econômica sofrida pelo país como um todo, quanto para a preservação de um maior número de vidas.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma. Na seção 2 é apresentado o modelo SIR-macro em sua versão completa. A exposição do modelo é adaptada de Eichenbaum *et al.* (2020). Na seção 3 apresentamos nossa estratégia de calibragem para o modelo e os valores utilizados para os seus parâmetros e variáveis para cada estado. Na seção 4 apresentamos e descrevemos os resultados do modelo para os cinco estados no equilíbrio

competitivo. Na seção 5 incluímos políticas de contenção, computamos as políticas ótimas de contenção para cada um dos cinco estados, as descrevemos e apresentamos os resultados do modelo para o cenário em que os cinco estados adotam estas políticas ótimas de contenção. Na seção 6 comparamos os resultados em que as políticas ótimas de contenção são adotadas com os resultados de equilíbrio competitivo e apuramos as consequências destas políticas de contenção. Na seção 7 conclui-se o trabalho.

## 2 O MODELO SIR-MACRO

Nas seções subsequentes descrevemos, com algumas adaptações, a versão completa do modelo SIR-macro conforme exposta em Eichenbaum *et al.* (2020). As adaptações foram necessárias pois em Eichenbaum *et al.* (2020) a versão completa do modelo é construída, ao longo das seções do artigo, com a inclusão gradativa de extensões ao modelo SIR-macro básico. Como, neste texto para discussão, ora apresentá-lo em uma única seção. A versão completa do modelo contempla três principais características: a taxa de mortalidade endógena como função da população infectada, a possibilidade de descobrimento de tratamentos efetivos que curem a população infectada e a possibilidade de descobrimento de vacinas.

### 2.1 O arcabouço econômico e a economia pré-infecção

A população da economia é representada por um *continuum* de agentes de medida igual a um que, *ex-ante*, são idênticos. Estes agentes maximizam a função objetivo

$$U = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t, n_t) \quad (1)$$

onde  $\beta \in (0,1)$  denota o fator de desconto intertemporal e  $c_t$  e  $n_t$  denotam o consumo e as horas trabalhadas, respectivamente. Por simplicidade, assume-se a forma funcional da utilidade como

$$u(c_t, n_t) = \ln c_t - \frac{\theta}{2} n_t^2. \quad (2)$$

A restrição orçamentária do agente representativo é

$$(1 + \mu_t)c_t = w_t n_t + \Gamma_t \quad (3)$$

onde  $w_t$  denota o salário real,  $\mu_t$  a taxação sobre o consumo e  $\Gamma_t$  as transferências *lump sum* recebidas do governo. Assim como em Eichenbaum *et al.* (2020),  $\mu_t$  é entendido como uma *proxy* para as medidas de contenção conduzidas com o objetivo de reduzir interações sociais. Por esta razão, doravante referir-se-á a este parâmetro como taxa de contenção.

A condição de primeira ordem para o problema do agente representativo é

$$(1 + \mu_t)\theta n_t = c_t^{-1} w_t. \quad (4)$$

No modelo, há ainda um *continuum* de firmas representativas de medida unitária que atuam competitivamente produzindo bens de consumo ( $C_t$ ) e usando horas de trabalho ( $N_t$ ) impulsionadas por tecnologia:

$$C_t = AN_t. \quad (5)$$

As firmas representativas escolhem o quanto de horas de trabalho utilizar de modo a maximizar os seus lucros no tempo  $t$ ,  $\Pi_t$ :

$$\Pi_t = AN_t - w_t N_t. \quad (6)$$

A restrição orçamentária do governo é:

$$\mu_t c_t = \Gamma_t. \quad (7)$$

No equilíbrio,  $n_t = N_t$  e  $c_t = C_t$ .

## 2.2 O arcabouço epidemiológico e o início da epidemia

A população é dividida em quatro grupos: suscetíveis, infectados, recuperados e falecidos. As pessoas que ainda não foram expostas à doença são classificadas como suscetíveis. As pessoas que já contraíram a doença são classificadas como infectadas.

Finalmente, as pessoas que sucumbem à doença são classificadas como falecidas. As frações da população em cada um destes quatro grupos, no tempo  $t$ , são denotadas por  $S_t$ ,  $I_t$ ,  $R_t$  e  $D_t$ , respectivamente. O número de novos infectados em  $t$  é denotado por  $T_t$ .

Indivíduos suscetíveis podem ser infectados de três maneiras: *i*) enquanto consomem; *ii*) enquanto trabalham; ou *iii*) de outras formas não relacionadas diretamente ao consumo e ao trabalho, como em transporte, em encontros sociais, em casa ou simplesmente pelo contato com superfícies contaminadas.

O número de novos infectados que resulta das atividades de consumo é dado por  $\pi_1(S_t C_t^S)(I_t C_t^i)$ . Os termos  $S_t C_t^S$  e  $I_t C_t^i$  representam os gastos totais de consumo dos indivíduos suscetíveis e infectados, respectivamente. O parâmetro  $\pi_1$  reflete tanto a quantidade de tempo utilizada fazendo compras quanto a probabilidade de infecção resultante da atividade de consumo.

O número de novos infectados que resulta das atividades de trabalho é dado por  $\pi_2(S_t N_t^S)(I_t N_t^i)$ . Os termos  $S_t N_t^S$  e  $I_t N_t^i$  representam o total de horas trabalhadas pelos indivíduos suscetíveis e infectados, respectivamente. O parâmetro  $\pi_2$  reflete a probabilidade de infecção resultante das atividades de trabalho.

O número de outros tipos de encontros, não relacionados a consumo e trabalho, entre suscetíveis e infectados é  $S_t I_t$ . O número de novos infectados resultante destes encontros é dado por  $\pi_3 S_t I_t$ . O parâmetro  $\pi_3$  reflete a probabilidade de infecção resultante das atividades não relacionadas ao consumo ou ao trabalho.

O número total de novos infectados é então dado por:

$$T_t = \pi_1(S_t C_t^S)(I_t C_t^i) + \pi_2(S_t N_t^S)(I_t N_t^i) + \pi_3 S_t I_t. \quad (8)$$

É interessante notar que o modelo SIR canônico de Kermack e McKendrick (1927) é um caso especial do modelo SIR-macro, no qual a propagação da doença não é relacionada com a atividade econômica. Este caso é caracterizado pelos valores paramétricos  $\pi_1 = \pi_2 = 0$ .

O número de infectados em  $t + 1$  é igual ao número de indivíduos infectados em  $t$  ( $I_t$ ) mais o número de novos infectados ( $T_t$ ) menos o número de infectados que se recuperaram ( $\pi_r I_t$ ), e o número de infectados que morreram  $\pi_d I_t$ :

$$I_{t+1} = I_t + T_t - (\pi_r + \pi_d)I_t, \quad (9)$$

onde  $\pi_r$  é a taxa de indivíduos recuperados da infecção e  $\pi_d$  é a taxa de mortalidade, ou seja, a probabilidade de um infectado morrer. Para incorporar o efeito da redução gradual da capacidade do sistema de saúde sobre a taxa de mortalidade, essa probabilidade é modelada como uma função convexa de uma fração  $\kappa$  da população infectada:

$$\pi_{dt} = \pi_d + \kappa I_t^2. \quad (10)$$

A convenção temporal da equação (9) é a seguinte: interações sociais acontecem no início do período, momento em que indivíduos suscetíveis e infectados se encontram. Então, mudanças no estado de saúde não relacionados com as interações sociais (recuperações e mortes) ocorrem. No fim do período, finalmente, as consequências das interações sociais se materializam e  $T_t$  indivíduos suscetíveis passam a ser classificados como infectados.

O número de recuperados em  $t + 1$  é o número de recuperados em  $t$  ( $R_t$ ) mais o número de infectados que acabaram de se recuperar  $\pi_r I_t$ :

$$R_{t+1} = R_t + \pi_r I_t. \quad (11)$$

Finalmente, o número de falecidos em  $t + 1$  é o número de falecidos em  $t$  ( $D_t$ ) mais o número de novas mortes  $\pi_d I_t$ :

$$D_{t+1} = D_t + \pi_d I_t \quad (12)$$

A população total evolui de acordo com a lei de movimento

$$POP_{t+1} = POP_t - \pi_d I_t, \quad (13)$$

com  $POP_0 = 1$ .

Assume-se que, no tempo zero, uma fração  $\varepsilon$  de pessoas suscetíveis é infectada pelo vírus por meio de exposições zoonóticas, isto é, o vírus é inicialmente transmitido diretamente de animais para humanos:

$$I_0 = \varepsilon, \quad (14)$$

$$S_0 = 1 - \varepsilon. \quad (15)$$

Assume-se também que toda a população está ciente do número inicial de infectados e entende as leis de movimento que governam as dinâmicas da saúde. Isso significa que a população toma como dados agregados como  $I_t C_t^i$  e  $I_t N_t^i$ .

Descreveremos agora o problema de otimização dos diferentes tipos de indivíduos da economia. A variável  $U_t^j$  denota a utilidade no tempo  $t$  de um agente do tipo  $j$  ( $j = s, i, r$ ). A restrição orçamentária de um indivíduo do tipo  $j$  é

$$(1 + \mu_t)c_t^j = w_t \phi^j n_t^j + \Gamma_t, \quad (16)$$

onde  $c_j$  e  $n_t^j$  denotam o consumo e as horas trabalhadas do agente de tipo  $j$ , respectivamente. O parâmetro que governa a produtividade do trabalho,  $\phi^j$ , é igual a um para indivíduos suscetíveis e recuperados ( $\phi^s = \phi^r = 1$ ) e menor que um para indivíduos infectados ( $\phi^i < 1$ ).

### 2.2.1 Suscetíveis

A utilidade dos indivíduos suscetíveis,  $U_t^s$ , é

$$U_t^s = u(c_t^s, n_t^s) + (1 - \delta_v)[(1 - \tau_t)\beta U_{t+1}^s + \tau_t \beta U_{t+1}^i] + \delta_v \beta U_{t+1}^r. \quad (17)$$

Os indivíduos suscetíveis têm consciência de que consumindo e trabalhando menos podem reduzir a probabilidade de serem infectados. A variável  $\tau_t$  representa a probabilidade de um indivíduo suscetível ser infectado:

$$\tau_t = \pi_1 c_t^s (I_t C_t^i) + \pi_2 n_t^s (I_t N_t^i) + \pi_3 I_t. \quad (18)$$

O parâmetro  $\delta_v$  representa a probabilidade, por período, de uma vacina ser descoberta. Com probabilidade  $1 - \delta_v$  um indivíduo suscetível em  $t$  continua suscetível em  $t + 1$ . Com probabilidade  $\delta_v$  esse indivíduo é vacinado e se torna imune à doença. Assim, no período  $t + 1$ , a situação de saúde desse indivíduo torna-se idêntica à de um indivíduo recuperado. A vacina não tem impacto sobre indivíduos que estavam infectados ou foram recuperados.

As condições de primeira ordem para o consumo e as horas trabalhadas são:

$$u_1(c_t^s, n_t^s) - (1 + \mu_t)\lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t}\pi_1(I_t C_t^I) = 0 \quad (19)$$

$$u_2(c_t^s, n_t^s) + w_t\lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t}\pi_2(I_t N_t^I) = 0 \quad (20)$$

$\lambda_{bt}^s$  e  $\lambda_{\tau t}$  são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições (16) e (18), respectivamente. A condição de primeira ordem de  $\tau_t$  é:

$$\beta(U_{t+1}^i - U_{t+1}^s) - \lambda_{\tau t} = 0 \quad (21)$$

### 2.2.2 Infectados

A utilidade dos indivíduos infectados,  $U_t^i$ , é

$$U_t^i = u(c_t^i, n_t^i) + (1 - \delta_c)[(1 - \pi_r - \pi_d)\beta U_{t+1}^i + \pi_r\beta U_{t+1}^r] + \beta\delta_c U_{t+1}^r. \quad (22)$$

A expressão acima para  $U_t^i$  incorpora a hipótese comum em modelos macroeconômicos relacionados à saúde de que o custo da morte é a renúncia da utilidade da vida.

O parâmetro  $\delta_c$  representa a probabilidade, por período, de um tratamento efetivo que cura indivíduos infectados ser descoberto. Quando um tratamento como este é descoberto, ele é aplicado à toda a população infectada no período da descoberta e nos períodos subsequentes, transformando todos os indivíduos infectados em recuperados. Como resultado, o número de novas mortes passa a ser zero.

As condições de primeira ordem para o consumo e as horas trabalhadas são:

$$u_1(c_t^i, n_t^i) = \lambda_{bt}^i(1 + \mu_t), \quad (23)$$

$$u_2(c_t^i, n_t^i) = -\phi^i w_t \lambda_{bt}^i \quad (24)$$

onde  $\lambda_{bt}^i$  é o multiplicador de Lagrange associado à restrição (16).

### 2.2.3 Recuperados

A utilidade dos indivíduos recuperados,  $U_t^r$ , é

$$U_t^r = u(c_t^r, n_t^r) + \beta U_{t+1}^r. \quad (25)$$

As condições de primeira ordem para o consumo e as horas trabalhadas são:

$$u_1(c_t^r, n_t^r) = \lambda_{bt}^r(1 + \mu_t), \quad (26)$$

$$u_2(c_t^r, n_t^r) = -w_t \lambda_{bt}^r \quad (27)$$

onde  $\lambda_{bt}^r$  é o multiplicador de Lagrange associado à restrição (16).

### 2.2.4 Restrição orçamentária do governo

A restrição orçamentária do governo é

$$\mu_t(S_t c_t^s + I_t c_t^i + R_t c_t^r) = \Gamma_t(S_t + I_t + R_t). \quad (28)$$

### 2.2.5 Equilíbrio

Em equilíbrio, cada indivíduo resolve seu problema de maximização e a restrição orçamentária do governo é satisfeita. Ademais, os mercados de bens e de trabalho se equilibram:

$$S_t C_t^s + I_t C_t^i + R_t C_t^r = AN_t, \quad (29)$$

$$S_t N_t^S + I_t N_t^i \phi^i + R_t N_t^R = N_t. \quad (30)$$

No anexo A é descrito o algoritmo proposto por Eichenbaum *et al.* (2020) para computar o equilíbrio.

### 3 CALIBRAGEM

Nesta seção apresentamos nossa estratégia de calibragem utilizada para a determinação dos parâmetros do modelo para os cinco estados escolhidos, a saber, São Paulo, Amazonas, Ceará, Rio de Janeiro e Pernambuco, os quais no momento da pesquisa apresentavam as situações mais críticas entre os 26 estados brasileiros.

Uma primeira observação que deve ser feita trata da convenção de tempo utilizada para os exercícios. Como o principal objetivo do modelo não é computar previsões quantitativas pontuais a respeito de questões como a data do pico de infectados, decidimos por abrir mão da definição de uma periodicidade específica para o tempo do modelo. Em vez disso, optamos por normalizar a duração total do intervalo de tempo para o qual os exercícios foram computados para 1. Assim, a interpretação do tempo do modelo passa a ser em relação ao progresso (%) da duração total da epidemia, a qual só se terá conhecimento *ex-post*. Assim, eximimos este trabalho de quaisquer responsabilidades preditivas que a ele pudessem ser atribuídas e enfatizamos a natureza qualitativa e comparativa de seus resultados.

Para calibrar o valor de  $\kappa$  para cada estado utilizamos as estimativas de taxas de fatalidade entre infectados (IFR – *infection fatality rate*, em inglês) estimadas por Mellan *et al.* (2020), no *Report 21* da Imperial College, para uma série de estados brasileiros. Calibramos o valor de  $\kappa$  para cada um dos cinco estados de modo que os picos das taxas de mortalidade no equilíbrio competitivo adequem-se às taxas de fatalidade entre infectados estimadas pelo Imperial College. Apesar da taxa de mortalidade ser endógena ao modelo, ela ainda necessita de um valor inicial. Seguindo Rabelo e Soares (2020), determinamos este valor como sendo 0,3% para todos os estados, valor obtido ponderando a taxa de mortalidade verificada na Coreia do Sul – país que efetuou o maior volume de testagens *per capita* até então – pela pirâmide etária brasileira pré-epidêmica.

Procedendo para a nossa estratégia de calibragem para os valores de  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$  para cada estado, iniciamos, assim como é comum em estudos epidemiológicos, por adotar a premissa utilizada em Eichenbaum *et al.* (2020) de que a importância relativa de diferentes modos de transmissão é semelhante entre diferentes doenças respiratórias. Ferguson *et al.* (2006) argumentam que, no caso da influenza, 30% das transmissões ocorreram em casa, 33% ocorreram em atividades comunitárias gerais e 37% ocorreram em escolas e locais de trabalho. Com base na premissa adotada, utilizamos essas porcentagens como base para a nossa calibragem.

Assim como em Eichenbaum *et al.* (2020) calibramos os valores de  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$  de modo a satisfazerem o sistema

$$\begin{aligned}\frac{\pi_1 C^2}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} &= \alpha_1 \\ \frac{\pi_2 N^2}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} &= \alpha_2 \\ \frac{\pi_3}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} &= \alpha_3\end{aligned}\tag{31}$$

onde  $C$  e  $N$  são o consumo e as horas trabalhadas no estado estacionário pré-infecção. Note que  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são as parcelas das transmissões que ocorrem no consumo, no trabalho e em outras atividades, respectivamente. Assim, o problema de calibragem de  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$  é equivalente ao problema de calibragem de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  pois, uma vez calibradas estas parcelas, bastará resolver o sistema para que sejam obtidos os valores de  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$ . Ainda, note que como  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ , basta que duas das parcelas sejam calibradas para que a última seja obtida residualmente.

Por questões de disponibilidade de dados, optamos por calibrar  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  e obter  $\alpha_1$  residualmente. Calibramos a parcela das transmissões que ocorrem no trabalho,  $\alpha_2$ , utilizando a mesma abordagem de Eichenbaum *et al.* (2020). Ponderamos as quantidades de estudantes e trabalhadores de cada estado em 10 e 4, respectivamente. Estes pesos dizem respeito à quantidade média de contatos físicos por dia na escola e no trabalho, obtidas no trabalho de Lee *et al.* (2010). Para a quantidade total de trabalhadores utilizou-se o número de pessoas de 14 anos ou mais de idade, na força de trabalho, ocupadas, por unidade da federação, obtidos no Sistema

IBGE de Recuperação Automática (SIDRA),<sup>1</sup> do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e para a quantidade total de estudantes utilizou-se o número de estudantes de 4 anos ou mais de idade, por unidade de federação, obtidos também no SIDRA,<sup>2</sup> do IBGE.

Calibramos a parcela das infecções que ocorre em outras atividades,  $\alpha_3$ , utilizando dados sobre: *i*) a proporção de horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos das pessoas de 14 anos ou mais de idade; *ii*) o número médio de pessoas por domicílio; e *iii*) o tempo habitual de deslocamento para o trabalho dos indivíduos, conjuntamente a algumas hipóteses de calibragem. Tendo os valores de  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  calibrados, obtemos residualmente o valor de  $\alpha_1$  e, com estas três parcelas calibradas, finalmente resolvemos o sistema (31) para obter  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$ . Mais detalhes técnicos relativos à calibragem destes valores podem ser encontrados no apêndice A.

A população inicial do modelo é normalizada para 1. Para cada estado, calibramos a população inicial de infectados  $\varepsilon$  para representar um número inicial de 100 infectados em  $t = 0$ . Esta é, então, calculada como sendo:

$$\varepsilon = \frac{100}{POP} \quad (32)$$

onde  $POP$  é a população residente estimada para o ano de 2019 para o estado em questão, obtida pelo SIDRA<sup>3</sup> do IBGE. Calibrando desta forma para cada estado foi possível captar e comparar o efeito dos diferentes tamanhos populacionais de cada estado sobre as dinâmicas locais da epidemia.

Assim como em Eichenbaum *et al.* (2020), calibramos os valores de  $A$  e  $\theta$  de modo que, no estado estacionário pré-epidêmico, o agente representativo de cada estado trabalhe a média de horas trabalhadas da população de seu estado, e que receba a renda *per capita* da população de seu estado. Para isso, utilizamos a média de horas habitualmente trabalhadas por semana em todos trabalhos das pessoas de 14 anos ou mais de idade e o

1. Tabela 4093.

2. Tabela 983.

3. Tabela 6579.

rendimento médio mensal real domiciliar *per capita*, a preços médios do ano, para cada um dos estados. O primeiro conjunto de dados foi obtido pelo SIDRA,<sup>4</sup> do IBGE e o último da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) Contínua de 2019.

Para a taxa de desconto intertemporal da utilidade,  $\beta$ , para todos os estados utilizamos o mesmo valor calculado por Rabelo e Soares (2020), equivalente a um valor estatístico da vida de R\$ 2,9 milhões. Como indicado pelos autores, este valor é baseado em estimativas recentes para o Brasil, de Ferrari *et al.* (2019) e Rocha *et al.* (2019).

Novamente, assim como em Eichenbaum *et al.* (2020), calibramos o valor do parâmetro que controla a produtividade relativa da população infectada,  $\phi^i$ , em 0,8. Este valor é consistente com a ideia de que indivíduos sintomáticos não trabalham e com a hipótese de que 80% da população infectada é assintomática, conforme aponta o China Center for Disease Control and Prevention.

Em relação às probabilidades de descobrimento de tratamentos efetivos e vacinas,  $\delta_c$  e  $\delta_v$ , respectivamente, seguindo Eichenbaum *et al.* (2020), as calibramos para refletir um tempo médio de descoberta de um ano.

TABELA 1  
Principais valores utilizados para a calibragem dos parâmetros e variáveis de cada estado

Valor	São Paulo	Amazonas	Ceará	Rio de Janeiro	Pernambuco
Imperial College IFR (%)	0,70	0,80	1,10	0,80	1,10
Número de pessoas na força de trabalho, ocupadas	22.782.714	1.657.700	3.764.280	7.651.617	3.602.820
Número de estudantes	10.306.000	1.284.000	2.376.000	3.853.000	2.475.000
Horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos	2,06	1,44	1,87	2,04	2,02
Número médio de pessoas por domicílio	2,80	3,60	3,10	2,70	2,90
Tempo habitual de deslocamento para o trabalho dos indivíduos (minutos)	37,15	33,95	26,60	43,07	30,52
População do estado	45.919.049	4.144.597	9.132.078	17.264.943	9.557.071
Média de horas habitualmente trabalhadas por dia em todos os trabalhos	8,24	7,30	7,58	8,10	7,74
Rendimento médio mensal real domiciliar <i>per capita</i> , a preços médios do ano	1.889	838	939	1.809	954

Elaboração dos autores.

4. Tabela 6373.

TABELA 2  
Valores calibrados para as principais variáveis e parâmetros de cada estado

Parâmetro/variável	São Paulo	Amazonas	Ceará	Rio de Janeiro	Pernambuco
$\kappa$	0,63	1,10	2,35	1,33	1,90
$\alpha_1$	0,16	0,28	0,30	0,12	0,25
$\alpha_2$	0,17	0,13	0,14	0,16	0,14
$\alpha_3$	0,66	0,60	0,56	0,71	0,61
$\pi_1$	$4,28 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^{-6}$	$8,53 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$
$\pi_2$	$5,99 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$
$\pi_3$	0,39	0,35	0,33	0,33	0,36
$\varepsilon$	$\frac{100}{45.919.049}$	$\frac{100}{4.144.597}$	$\frac{100}{9.132.078}$	$\frac{100}{17.264.943}$	$\frac{100}{9.557.071}$
$A$	11,46	5,74	6,19	11,17	6,16
$\theta$	$5,89 \cdot 10^{-4}$	$7,51 \cdot 10^{-4}$	$6,96 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-4}$	$6,68 \cdot 10^{-4}$
$\beta$	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966
$\phi^i$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Elaboração dos autores.

## 4 EQUILÍBRIO COMPETITIVO

Neste primeiro exercício, apresentamos resultados para o equilíbrio competitivo de cada estado. No equilíbrio competitivo não ocorrem quaisquer tentativas, por parte das autoridades, de se conter a dinâmica de evolução da epidemia. A dinâmica da epidemia é afetada apenas pelas próprias decisões dos agentes econômicos, que têm a liberdade de reduzir as suas probabilidades de serem infectados, reduzindo consumo e horas trabalhadas.

A figura 1 apresenta, em nível, a dinâmica da evolução da epidemia para cada um dos cinco estados, assim como seu efeito sobre os agregados de consumo e horas de trabalho ofertadas em cada um deles no equilíbrio competitivo. A figura 2 apresenta os mesmos resultados, porém em proporção da população inicial de cada estado.

Tratemos primeiro de observações gerais sobre os resultados. A dinâmica geral do modelo ocorre da seguinte forma: a partir de uma população inicial de 100 infectados a dinâmica da epidemia tem seu início para os cinco estados. A população de infectados cresce, até eventualmente atingir um pico. Conforme a população de infectados cresce, a população de suscetíveis diminui. Para os infectados, só há dois destinos possíveis, a saber, a recuperação ou a morte. Assim, conforme a população de infectados cresce, a população de recuperados e a quantidade de mortos também, em alguma medida, inevitavelmente aumenta. Na ausência da descoberta de vacinas, a única forma da epidemia chegar ao fim é infectando parcela suficiente da população para que seja alcançada a chamada imunidade de rebanho. O tamanho desta parcela depende de características particulares do vírus causador da epidemia. Para a Covid-19, não há ainda consenso quanto a essa parcela. Para este trabalho assumimos, assim como Eichenbaum *et al.* (2020), que a imunidade de rebanho é alcançada quando 60% da população é infectada. Não obstante, como o modelo incorpora a probabilidade de descoberta de vacina, conforme será visto, os estados, em média, chegarão ao fim da epidemia com menos de 60% de suas populações infectadas pelo vírus. Do ponto de vista econômico, a dinâmica das epidemias induz recessões. O consumo agregado de todos os estados cai, refletindo, em primeiro lugar, numa menor produtividade da população infectada, gerando um efeito renda negativo que reduz o consumo desta parcela da população e, em segundo lugar, a redução permanente da força de trabalho decorrente das mortes.

Agora, descrevemos os resultados de cada estado em particular. A parcela da população inicial do estado de São Paulo infectada atinge seu pico em 4,95% (2.271.910 infectados), sendo este o maior pico entre os cinco estados. O segundo maior pico ocorre no Amazonas, com 4,21% da população inicial infectada (174.441 infectados). A seguir, Pernambuco, com 4,06% (387.726 infectados); Rio de Janeiro, com 3,83% (660.400 infectados); e, por último, apresentando o menor dos cinco picos, o Ceará, com 3,83% da população inicial infectada (331.309). O pico de infectados ocorre primeiro no Amazonas, com 39,33% do progresso do tempo total da epidemia ocorrido, depois em Pernambuco, com 42%, prossegue então para ocorrer no Ceará, com 42,67%, Rio de Janeiro, com 46% e, apenas por último, em São Paulo, com 47,33% do progresso de tempo da epidemia ocorrido. Os picos das taxas de mortalidade ocorrem nestes mesmos momentos e, portanto, seguem esta mesma ordem de ocorrência no tempo.

Entre os cinco estados analisados, os choques macroeconômicos são mais severos nos estados de Ceará e Pernambuco. No Ceará, os agregados de consumo e horas de trabalho ofertadas sofrem uma queda de aproximadamente 18,11% em relação ao estado estacionário pré-epidêmico, enquanto que em Pernambuco, a queda é de aproximadamente 17,66%. A severidade destes choques pode ser explicada, em parte, pela baixa capacidade de seus sistemas de saúde, refletida na dinâmica de crescimento de suas taxas de mortalidade. Tendo conhecimento desta situação, os indivíduos internalizam o crescimento destas taxas e respondem abrindo mão de consumo e trabalho para reduzir suas probabilidades de serem infectados, o que por sua vez aprofunda a recessão econômica.

No Rio de Janeiro são observadas quedas de 15,80% do consumo agregado e do agregado de horas de trabalho ofertadas em relação ao estado estacionário pré-epidêmico, enquanto no estado de Amazonas queda é de 13,67%. O menos severo dos choques macroeconômicos ocorre em São Paulo. Neste estado, as quedas do consumo agregado e do agregado de horas de trabalho tem início mais tarde, atingindo um vale de 13,55%. São Paulo não apenas apresenta quedas menos severas como também menos duradouras. A recuperação ocorre rapidamente, acompanhando de perto a recuperação dos demais estados que sofreram quedas mais profundas.

Em relação ao tempo, o vale da recessão ocorre primeiro no Amazonas, quando o progresso do tempo total da epidemia atinge 38,67%, depois em Pernambuco, em 41,33% do progresso, para então alcançar o Ceará, em 42,00%, o Rio de Janeiro, em 45,33%, e, finalmente, São Paulo, em 46,00% do progresso do tempo total da epidemia. Assim, no equilíbrio competitivo o estado de São Paulo apresenta o início de retomada da economia mais tardio, enquanto o estado de Amazonas o mais precoce.

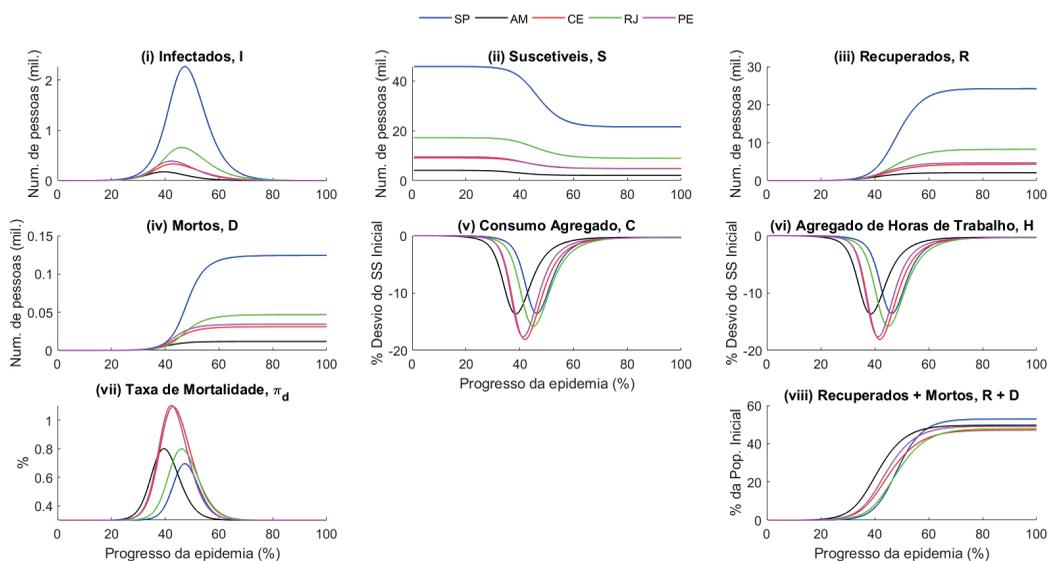
A epidemia tem seu fim com 52,93% da população de São Paulo infectada, sendo este o estado que atinge a maior parcela da população infectada entre os cinco estados analisados no equilíbrio competitivo (24.304.105 infectados). O estado com a segunda maior parcela da população infectada é o Amazonas, com 49,66% (2.058.181 infectados); seguido por Pernambuco, com 49,16% (4.698.514 infectados) e Rio de Janeiro, com 47,87% (8.264.678 infectados). O Ceará apresenta a menor parcela entre os cinco estados, com 47,12% da população infectada ao fim da epidemia (4.302.928 infectados).

Como resultado, a parcela da população inicial de Pernambuco acometida pela morte é de 0,36%, sendo este o estado com a maior parcela da população morta (124.101 mortos). O segundo estado que mais sofre mortes em proporção da população inicial é o Ceará, com 0,34% de sua população acometida pela morte (11.660). Em seguida vêm Amazonas, com 0,28% (31.144 mortos); Rio de Janeiro, com 0,27% (46.800 mortos); e São Paulo, também com 0,27% (34.221 mortos).

Os resultados apresentam, portanto, evidências de diferenças relevantes na dinâmica epidêmica de cada estado no equilíbrio competitivo em decorrência de suas diferenças intrínsecas. Não apenas o tamanho do pico de infectados e o tempo necessário para alcançá-lo são diferentes em cada estado, como a profundidade e a duração das recessões, a parcela da população total infectada e a parcela da população inicial acometida pela morte ao fim da epidemia em cada estado também diferem entre eles.

Na próxima seção trataremos de analisar políticas ótimas de contenção que podem ser adotadas pelos estados para melhorar os resultados obtidos no equilíbrio competitivo. Na seção 6 analisamos os resultados sob o cenário de adoção destas políticas e comparamos com os resultados apresentados nesta seção para avaliar os efeitos da adoção destas medidas.

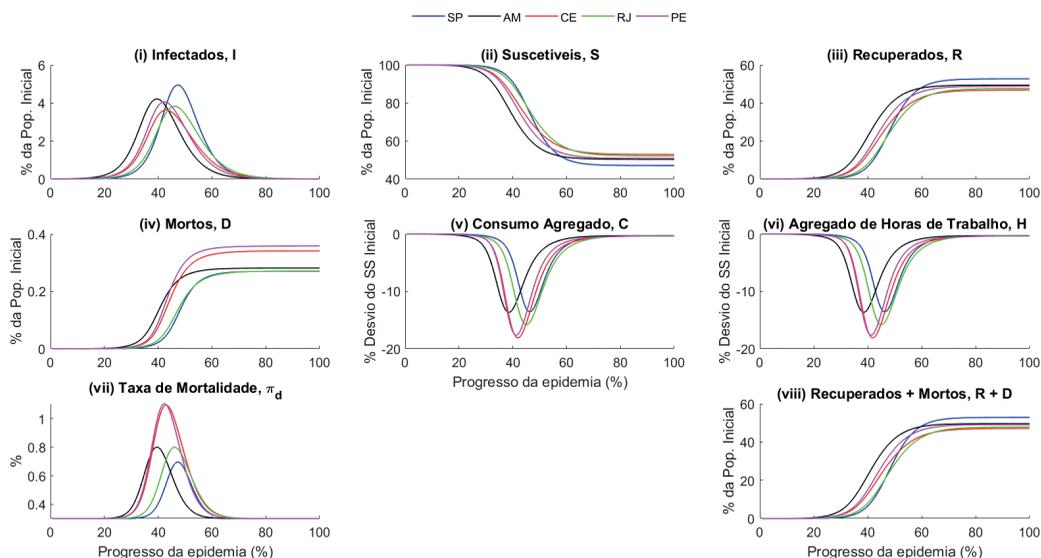
FIGURA 1  
**Modelo SIR-macro: resultados para o equilíbrio competitivo**  
 (Em nível)



Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

FIGURA 2  
**Modelo SIR-macro: resultados para o equilíbrio competitivo**  
(Em % da população inicial)



Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

## 5 POLÍTICA DE CONTENÇÃO

Nesta seção, inspirados pelo trabalho de Eichenbaum *et al.* (2020), consideramos um simples problema de Ramsey para lidar com uma clássica externalidade associada ao comportamento dos agentes infectados no equilíbrio competitivo: como os agentes são atomísticos, eles não levam em conta o impacto de suas ações sobre as taxas de infecção e mortalidade dos demais agentes. Por esta razão, o equilíbrio competitivo do modelo não é socialmente ótimo.

Conforme apontado por Eichenbaum *et al.* (2020), assim como em qualquer outro problema de Ramsey, é preciso avaliar quais são os instrumentos de política disponíveis para mitigá-lo. Na prática, existem muitas maneiras pelas quais os governantes podem reduzir interações sociais. Podem ser citados como exemplos de medidas de contenção ordens de abrigo no local (*shelter-in-place*) e interrupções obrigatórias do funcionamento de restaurantes, bares e serviços não-essenciais em geral. Eichenbaum *et al.* (2020) modelam, inspirados no trabalho de Farhi e Werning

(2012), as medidas de contenção como taxações sobre o consumo que são reembolsadas aos indivíduos por meio de transferências *lump sum*. Procedemos, assim como Eichenbaum *et al.* (2020) modelando desta forma. Referimo-nos a estas taxas como taxas de contenção.

Para mitigar o problema de Ramsey, o objetivo desta seção é computar, para cada estado, a sequência ótima de 250 taxas de contenção  $\{\mu_t\}_{t=0}^{249}$  que maximiza o bem-estar social,  $U_0$ , definido como sendo a média ponderada das utilidades dos diferentes indivíduos. Como no período inicial  $t = 0$ ,  $R_0 = D_0 = 0$ , o valor de  $U_0$  é

$$U_0 = S_0 U_0^s + I_0 U_0^i. \quad (33)$$

Dada a sequência de taxas de contenção, resolvemos o modelo para o equilíbrio competitivo e avaliamos a função de bem-estar social, iterando essa sequência até obter a solução ótima.

Na figura 3 estão apresentados os resultados, em nível, para o cenário em que todos os estados adotam políticas ótimas de contenção. Na figura 4 estão apresentados os mesmos resultados, porém em porcentagem da população inicial.

Assim como na seção anterior, iniciaremos aqui com uma observação geral dos resultados. As trajetórias ótimas de contenção sempre escalam gradualmente, elevando-se ao longo do tempo e seguindo quase que paralelamente a dinâmica das taxas de infecções. Este fenômeno foi notado por Eichenbaum *et al.* (2020) e, conforme explicam estes autores, a sua intuição é a seguinte: as medidas de contenção internalizam as margens externas causadas pelo comportamento da população infectada. Por exemplo, no período inicial  $t = 0$  a população de infectados é muito pequena, de modo que a externalidade é pouco importante. Uma taxa de contenção muito alta em  $t = 0$  resultaria em um elevado custo social em troca de poucos benefícios. Conforme a população de infectados aumenta, a importância da externalidade eleva-se, tornando-se cada vez mais preocupante. Como resposta, a taxa ótima de contenção aumenta. Outra razão que justifica a inadequação de taxas de contenção demasiadamente altas em  $t = 0$  e persistentes é que, na ausência do descobrimento de vacinas, a única maneira de prevenir a recorrência da epidemia

é fazendo com que uma parcela suficiente da população adquira imunidade, infectando-se e recuperando-se. A maneira ótima de alcançar este nível crítico de imunidade de rebanho é elevando gradualmente as medidas de contenção conforme as infecções crescem e relaxando e reduzindo-as lentamente conforme novos casos de infecção declinam.

Isto posto, prossigamos agora para a descrição particular dos resultados. Primeiro, já no período  $t = 0$ , onde a população de infectados de cada estado alcança o nível de 100 indivíduos, as taxas de contenção de Ceará, Amazonas, Pernambuco, Rio de Janeiro e São Paulo já se apresentam nos níveis de, respectivamente, 16,12%, 16,10%, 15,96%, 15,77% e 14,05%. Esses números mostram que o estado que requer medidas de contenção mais drásticas já no início da epidemia (quando o centésimo infectado é alcançado), relativamente aos demais estados analisados, é o Ceará, enquanto o que requer medidas menos severas é o estado de São Paulo. Estes resultados oferecem evidências de que as diferenças intrínsecas de cada estado fazem com que as decisões iniciais relativas à severidade das medidas de contenção a serem adotadas difiram para cada estado. Não obstante, os resultados mostram que a decisão ótima por parte das autoridades de todos os estados é a adoção de medidas de contenção significativas desde o início da epidemia.

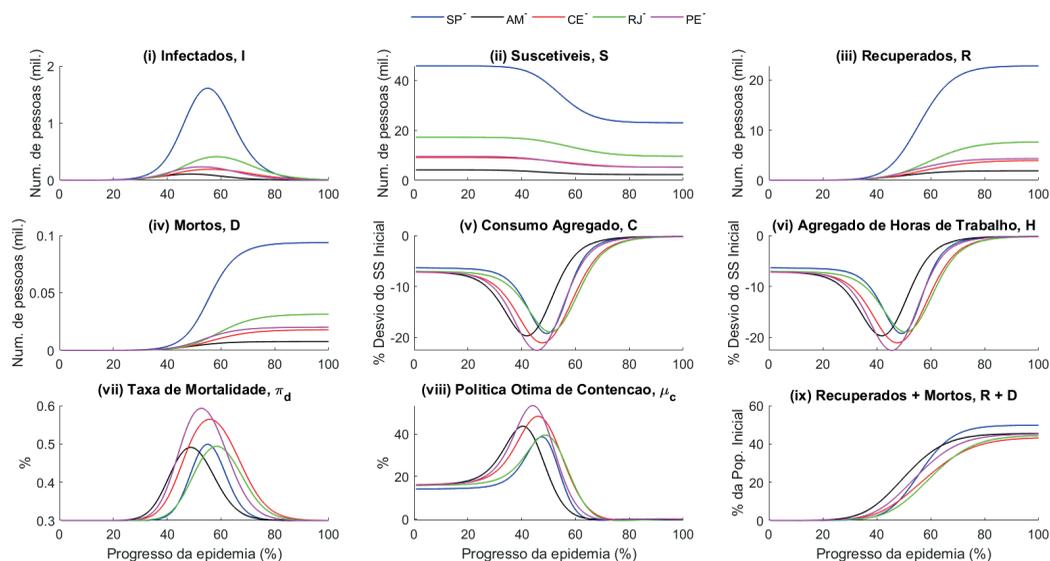
Entre os cinco estados, o que atinge o pico mais alto da taxa de contenção é Pernambuco, com uma taxa de contenção de 53,40%. O segundo mais alto pico ocorre no Ceará, onde a taxa de contenção atinge 48,35%. Em terceiro, o Amazonas atinge um pico da taxa de contenção de 43,68% e, em quarto, o Rio de Janeiro com 39,54%. São Paulo é o estado que tem a menor taxa de contenção no pico, em 38,76%.

O pico da taxa de contenção ocorre primeiro no Amazonas, em 40,67% do progresso do tempo total da epidemia. Este é, portanto, o primeiro estado a começar a relaxar as medidas de contenção. Em seguida, o pico ocorre em Pernambuco, com 44% do progresso de tempo total de epidemia, depois no Ceará, com 46% do progresso da epidemia ocorrido, então em São Paulo com 47,33% e, finalmente, no Rio de Janeiro, com 48,67% do progresso da epidemia ocorrido. O Rio de Janeiro é, portanto, o último estado a atingir o pico da taxa de contenção e, conseqüentemente, também o último a iniciar o processo de retomada da economia.

Estes resultados mostram que as diferenças intrínsecas de cada estado não apenas afetam a severidade inicial das medidas de contenção adotadas por cada um deles como também a dinâmica da evolução destas taxas de contenção no tempo, implicando diferenças no momento ideal em que as medidas de contenção precisarão ser elevadas, até onde elas precisarão ser elevadas e quando poderão ser finalmente relaxadas. Novamente, não obstante a estas diferenças interestaduais de condução ótima das políticas de contenção, todos os resultados apontam como decisões ótimas para cada um dos cinco estados a adoção de medidas de contenção relativamente severas.

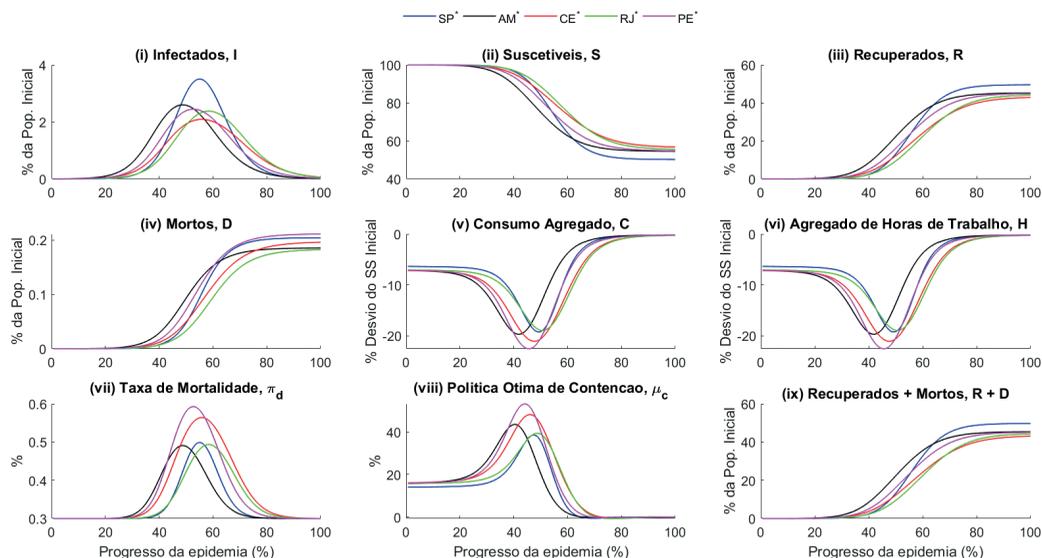
Nesta seção estudamos as políticas ótimas de contenção a serem adotadas por cada um dos cinco estados analisados. Não obstante, não foram analisadas as consequências da adoção destas políticas ótimas. Na próxima seção serão analisadas essas consequências, sob várias dimensões, em relação ao equilíbrio competitivo exposto na seção anterior.

FIGURA 3  
**Modelo SIR-macro: resultados sob a adoção de políticas ótimas de contenção**  
 (Em nível)



Elaboração dos autores.  
 Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

FIGURA 4  
Modelo SIR-macro: resultados sob a adoção de políticas ótimas de contenção  
(Em % da população inicial)



Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

## 6 AS CONSEQUÊNCIAS DA POLÍTICA ÓTIMA DE CONTENÇÃO

Todos os resultados que descreveremos aqui estão resumidos na tabela 3. A tabela 4 resume os efeitos da adoção de políticas ótimas de contenção pelos estados em relação ao cenário de equilíbrio competitivo. A tabela 5 apresenta, para cada cenário, os momentos do progresso da epidemia em que ocorrem os principais picos e vales nos resultados de cada estado.

No cenário em que os cinco estados adotam políticas ótimas de contenção, São Paulo é o estado que atinge o maior pico de infectados, com 3,50% da população inicial infectada (1.608.921 infectados). O Amazonas registra 2,60% (107.708 infectados); Pernambuco registra 2,45% (234.004 infectados); e o Rio de Janeiro atinge um pico de 2,38% de sua população infectada (410.857 infectados). Por fim o Ceará que é o estado que atinge o menor pico de infectados, atinge um pico de 2,09% de sua população infectada (190.939 infectados).

Esses novos valores implicam, em relação ao equilíbrio competitivo, uma redução do pico de infectados de 1,61 ponto percentual (p.p.) da população inicial para o Amazonas e Pernambuco, sendo estes dois os que sofrem os maiores efeitos de achatamento da curva em decorrência da adoção de políticas ótimas de contenção. A terceira maior redução do pico de infectados ocorre no Ceará, com uma redução de 1,54 p.p.; seguido pelo Rio de Janeiro, com uma redução de 1,45 p.p.; e, finalmente, por São Paulo, com uma redução de 1,44 p.p. – a menor entre os cinco. Estes números significam 66.732 infectados a menos no pico para o Amazonas, 386.552 a menos para Pernambuco, 140.369 a menos para o Ceará, 249.541 a menos para o Rio de Janeiro, e 662.988 infectados a menos no pico para São Paulo.

Em relação ao momento da ocorrência dos picos de infectados, estes passam a ocorrer em 48,67% do progresso do tempo total da epidemia no Amazonas; em 52,67% do progresso em Pernambuco; 55,33% em São Paulo; 56,00% no Ceará; e 58,67% do progresso do tempo total no Rio de Janeiro. Isto implica que as políticas ótimas de contenção, no momento de progresso total da epidemia, atrasam em 9,33 p.p. o pico de infectados no Amazonas; enquanto em Pernambuco o atraso é de 10,67 p.p.. Em São Paulo, o atraso é de 8 p.p.; enquanto no Ceará é de 13,33 p.p.; seguido pelo Rio de Janeiro, com um atraso de 12,67 p.p.. Isto significa que o estado que sofre o maior prolongamento do tempo até o pico de infectados, em decorrência da adoção de políticas ótimas de contenção, é o Ceará, enquanto que o que sofre o menor prolongamento é o estado de São Paulo. Como consequência, São Paulo, que no equilíbrio competitivo era o último entre os cinco a atingir o pico, passa a ser o terceiro. O Ceará passa de terceiro para quarto e o Rio de Janeiro de quarto para o último estado a atingir o pico. Amazonas e Pernambuco continuam a ser, assim como no cenário de equilíbrio competitivo, respectivamente o primeiro e o segundo estado a atingir o pico.

Estes resultados apresentam evidências de que as diferenças intrínsecas entre os estados influenciam relevantemente o efeito da adoção das políticas ótimas de contenção, afetando de maneira heterogênea o pico da curva de infectados, bem como sua dinâmica temporal.

Com relação aos choques macroeconômicos sobre os agregados de consumo e horas de trabalho, com a adoção das políticas ótimas de contenção há um agravamento da recessão para todos os estados. Para Pernambuco a queda no consumo agregado e no agregado de horas de trabalho ofertadas passa a ser de 22,58%; para o Ceará, de 21,10%; para o Rio de Janeiro, de 18,98%; para o Amazonas, de 19,72%; e para São Paulo, de 19,28%. Esses valores implicam que as políticas ótimas de contenção

aprofundam as recessões, no estado estacionário pré-epidêmico, com quedas de 4,92 p.p. para Pernambuco; 3 p.p. para o Ceará; 3,18 p.p. para o Rio de Janeiro; 6,06 p.p. para o Amazonas; 5,73 p.p. para São Paulo. Como pode ser observado, entre os cinco estados analisados, o que sofre o maior impacto macroeconômico decorrente da adoção de uma política ótima de contenção é o Amazonas, enquanto o que sofre o menor impacto é o Ceará. Como consequência destes efeitos heterogêneos, Pernambuco, que no equilíbrio competitivo era o estado que sofria o segundo maior impacto macroeconômico entre os cinco estudados, passa a ser o que sofre o maior impacto. Ceará, que sofria o maior impacto, passa a ser o que sofre o segundo maior impacto. Amazonas passa de quarto para terceiro, São Paulo de último para quarto e o Rio de Janeiro passa de terceiro maior impacto no equilíbrio competitivo para o quinto e menor impacto macroeconômico no cenário de adoção de políticas ótimas.

O momento dos vales dos agregados de consumo e horas de trabalho após a adoção de políticas ótimas de contenção passam a ocorrer, respectivamente, em 42,00% do progresso do tempo total da epidemia no Amazonas; 45,33% do tempo total em Pernambuco; 47,33% no Ceará; 49,33% em São Paulo; e 50,67% do progresso do tempo total no Rio de Janeiro. Isto implica um aumento da duração da recessão de 3,33 p.p. para o Amazonas; 4, p.p. para Pernambuco; 5,33 p.p. para o Ceará; 3,33 p.p. para São Paulo; e 5,33 p.p. para o Rio de Janeiro. Como pode ser visto, os efeitos são heterogêneos. Ceará e Rio de Janeiro são os estados que sofrem o maior prolongamento da duração da recessão em decorrência da adoção de políticas ótimas de contenção; enquanto Pernambuco sofre um efeito intermediário. São Paulo e Amazonas são os que sofrem menos. Como consequência destes efeitos heterogêneos, São Paulo, que no equilíbrio competitivo era o último dos cinco estados a atingir o vale da recessão e iniciar a retomada da economia, passa a ser o quarto; enquanto o Rio de Janeiro, que era o quarto, passa a ser o quinto e último dos cinco estados a iniciar a retomada econômica.

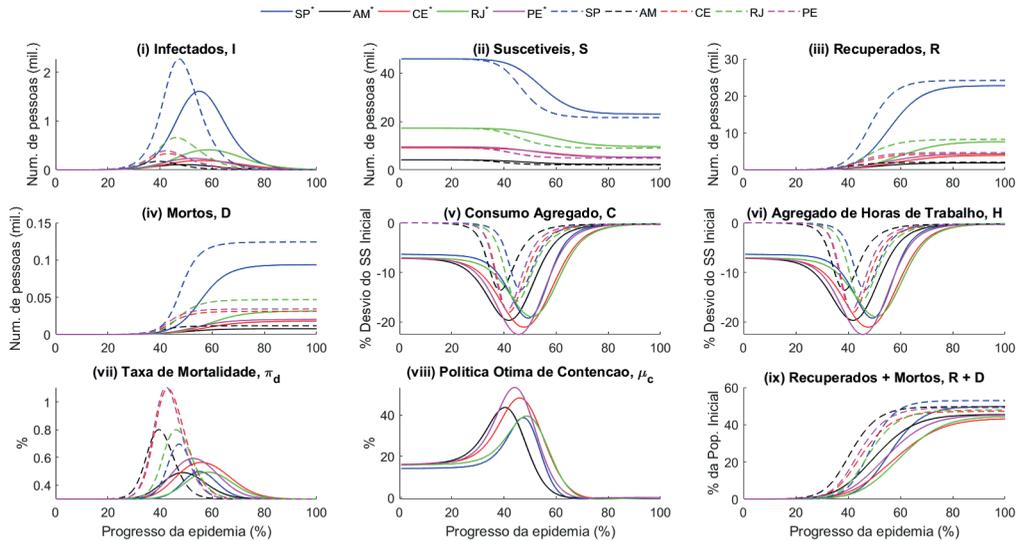
A epidemia passa a ter seu fim com 49,74%, da população inicial de São Paulo infectada, sendo este o estado com a maior parcela da população inicial infectada (22.841.118 infectados). Em segundo lugar, consta o Amazonas, com 45,42% da população inicial infectada (1.882.424 infectados). Em terceiro, consta Pernambuco com, 45,12% (4.311.96 infectados); seguido pelo Rio de Janeiro, com 44,29% (7.647.286 infectados); e Ceará, com 43,11% (3.936.502 infectados). Estes números representam, em relação ao equilíbrio competitivo, uma redução da população total infectada (baseada na população inicial) resultante da epidemia de 3,19 p.p. para São Paulo; 4,24 p.p. para o Amazonas; 4,04 p.p. para Pernambuco; 3,58 p.p. para o Rio de Janeiro; e 4,01 p.p. para o Ceará. Assim, ao fim da epidemia, há 1.462.987 infectados a menos em São

Paulo; 175.757 a menos no Amazonas; 386.552 a menos em Pernambuco; 617.392 no Rio de Janeiro; e 366.425 infectados a menos no Ceará. Como pode ser visto, os efeitos da adoção de políticas ótimas de contenção sobre a parcela total da população inicial infectada ao fim da epidemia são bastante heterogêneos entre os estados. O estado que sofre a maior redução desta parcela em decorrência da adoção de políticas ótimas de contenção é o Amazonas, que é seguido por Pernambuco, Ceará, Rio de Janeiro e, finalmente, São Paulo, que apresenta a menor redução entre os cinco estados.

A maior parcela da população inicial que passa a ser acometida pela morte ocorre em Pernambuco, onde alcança 0,21% (20.163 mortos). Em segundo lugar, encontram-se as parcelas dos estados de São Paulo e Ceará, que alcançam 0,20% da população inicial (93.693 e 17.884 mortos, respectivamente). Em terceiro, a do estado do Amazonas, de 0,19% (7.676 mortos); e, em último, a do estado do Rio de Janeiro, de 0,18% da população inicial infectada (31.433 mortos). Estes números representam, em relação ao equilíbrio competitivo, reduções no número de mortos de 0,16 p.p. em Pernambuco; 0,07 p.p. em São Paulo; 0,15 p.p. no Ceará; 0,10 p.p. no Amazonas; e 0,09 p.p. no Rio de Janeiro. Essas reduções se traduzem em 14.057 vidas salvas em Pernambuco, 30.408 vidas salvas em São Paulo, 13.260 vidas salvas no Ceará, 3.984 vidas salvas no Amazonas e 15.366 vidas salvas no Rio de Janeiro. Conforme pode ser visto, os efeitos da adoção de políticas ótimas de contenção sobre a parcela da população inicial acometida pela morte, para cada estado, são também bastante heterogêneos. O maior efeito ocorre em Pernambuco, que é seguido por Ceará, Amazonas, Rio de Janeiro e, finalmente, por São Paulo, que sofre a menor redução da parcela da população inicial que é acometida pela morte. Como consequências destes efeitos heterogêneos, São Paulo, que no equilíbrio competitivo era o estado que apresentava a menor parcela da população inicial acometida pela morte ao fim da epidemia, passa a ser o detentor da terceira maior parcela entre os cinco estados. O Amazonas passa de terceira maior parcela para quarta e o Rio de Janeiro de quarta maior parcela para a menor parcela entre os cinco estados.

A Figura 5 apresenta o comparativo de resultados entre o equilíbrio competitivo e o cenário de política ótima para todos os estados em conjunto, em nível. A figura 6 apresenta os mesmos resultados, porém em porcentagem da população inicial. As Figuras figuras 7, 8, 9, 10 e 11 apresentam os comparativos de resultados entre o equilíbrio competitivo e o cenário de política ótima para cada um dos estados em separado, todos em nível.

FIGURA 5  
Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup>  
(Em nível)



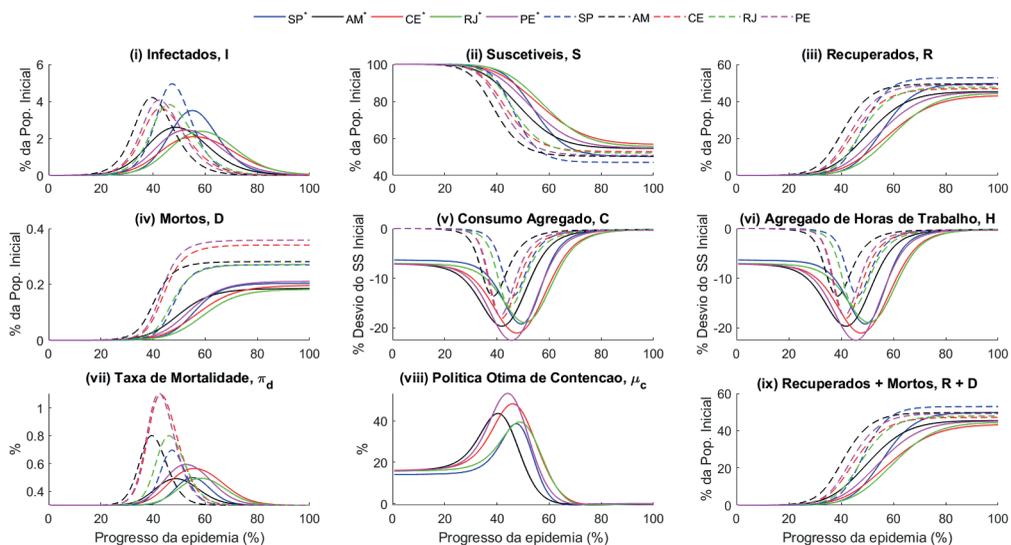
Elaboração dos autores

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

FIGURA 6  
Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup>  
(Em % da população inicial)



Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

**TABELA 3**  
**Resultados para as principais variáveis do modelo para os cenários de equilíbrio competitivo e política ótima**

Variável	Cenário	São Paulo	Amazonas	Ceará	Rio de Janeiro	Pernambuco
Total de não-infectados ao fim da epidemia, S	Eq. Competitivo	1.614.655,03 (47,07%)	2.086.398,55 (50,34%)	4.828.940,12 (52,88%)	8.999.825,11 (52,13%)	4.858.460,45 (50,84%)
(Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	Política ótima	3.073.448,23 (50,25%)	2.261.651,74 (54,57%)	5.189.707,29 (56,83%)	9.607.865,98 (55,65%)	5.242.447,63 (54,85%)
População infectada no pico, I	Eq. Competitivo	2.271.910,63 (4,95%)	174.441,47 (4,21%)	331.309,55 (3,63%)	660.399,78 (3,83%)	387.726,67 (4,06%)
(Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	Política ótima	1.608.921,78 (3,50%)	107.708,85 (2,60%)	190.939,73 (2,09%)	410.857,91 (2,38%)	234.004,12 (2,45%)
População de recuperados ao fim da epidemia, R	Eq. Competitivo	24.180.003,96 (52,66%)	2.046.520,78 (49,38%)	4.271.783,72 (46,78%)	8.217.878,32 (47,60%)	4.664.293,18 (48,80%)
(Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	Política ótima	22.747.425,46 (49,54%)	1.874.748,12 (45,23%)	3.918.618,10 (42,91%)	7.615.853,03 (44,11%)	4.291.798,23 (44,91%)
Total de mortos ao fim da epidemia, D	Eq. Competitivo	124.101,88 (0,27%)	11.660,84 (0,28%)	31.144,56 (0,34%)	46.800,59 (0,27%)	34.221,33 (0,36%)
(Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	Política ótima	93.693,42 (0,20%)	7.676,48 (0,19%)	17.884,19 (0,20%)	31.433,62 (0,18%)	20.163,66 (0,21%)
Total de infectados ao fim da epidemia, R+D	Eq. Competitivo	24.304.105,84 (52,93%)	2.058.181,61 (49,66%)	4.302.928,28 (47,12%)	8.264.678,91 (47,87%)	4.698.514,51 (49,16%)
(Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	Política ótima	22.841.118,88 (49,74%)	1.882.424,60 (45,42%)	3.936.502,30 (43,11%)	7.647.286,65 (44,29%)	4.311.961,89 (45,12%)
Taxa de mortalidade no pico	Eq. Competitivo	0,70%	0,80%	1,10%	0,80%	1,10%
(%)	Política ótima	0,50%	0,49%	0,56%	0,49%	0,59%
Consumo agregado no vale	Eq. Competitivo	-13,55%	-13,67%	-18,11%	-15,80%	-17,66%
(% de desvio do estado estacionário pré-epidêmico)	Política ótima	-19,28%	-19,72%	-21,10%	-18,98%	-22,58%
Agregado de horas de trabalho ofertadas no vale	Eq. Competitivo	-13,55%	-13,67%	-18,11%	-15,80%	-17,66%
(% de desvio do estado estacionário pré-epidêmico)	Política ótima	-19,28%	-19,72%	-21,10%	-18,98%	-22,58%

Elaboração dos autores.

TABELA 4  
Efeitos da adoção de políticas ótimas de contenção pelos estados em relação ao cenário de equilíbrio competitivo

Métrica	São Paulo	Amazonas	Ceará	Rio de Janeiro	Pernambuco
Pico da taxa de contenção (%)	38,76%	43,68%	48,35%	39,54%	53,40%
Infectados evitados no pico (Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	662.989 (1,44%)	66.733 (1,61%)	140.370 (1,54%)	249.542 (1,45%)	153.723 (1,61%)
Total de infectados evitados (Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	1.462.987 (3,19%)	175.757 (4,24%)	366.426 (4,01%)	617.392 (3,58%)	386.553 (4,04%)
Redução do pico da taxa de mortalidade (%)	-0,20%	-0,31%	-0,53%	-0,31%	-0,51%
Vidas salvas (Quantidade de pessoas. Em parênteses: % da população inicial)	30.408 (0,07%)	3.984 (0,10%)	3.260 (0,15%)	15.367 (0,09%)	14.058 (0,15%)
Efeito sobre o consumo agregado no vale (% de desvio do estado estacionário pré-epidêmico)	-5,73%	-6,06%	-2,99%	-3,18%	-4,92%
Efeito sobre o agregado de horas de trabalho no vale (% de desvio do estado estacionário pré-epidêmico)	-5,73%	-6,06%	-2,99%	-3,18%	-4,92%

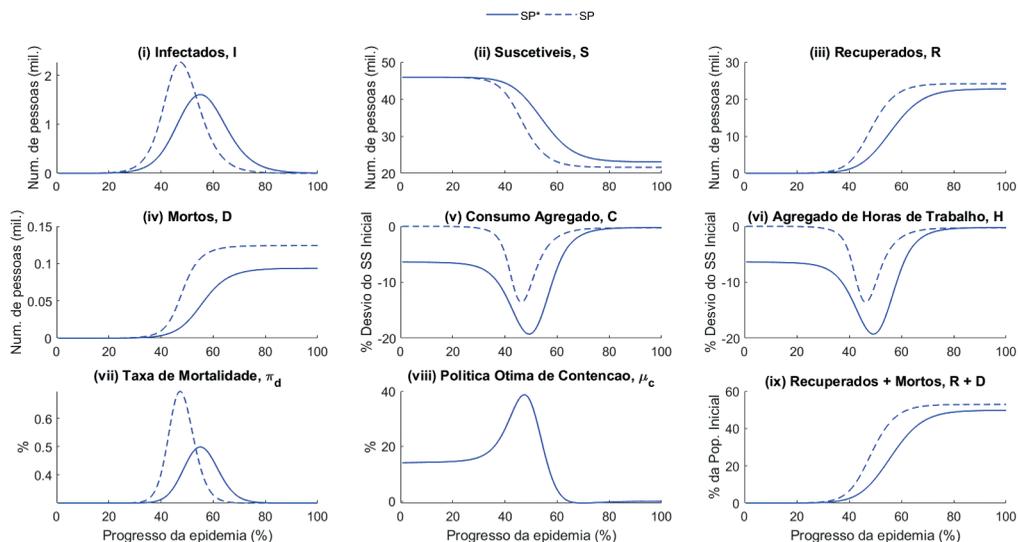
Elaboração dos autores.

TABELA 5  
Momentos do progresso da epidemia em que ocorrem os picos e vale das principais variáveis do modelo em cada cenário, para cada estado  
(Em %)

Variável	Cenário	SP	AM	CE	RJ	PE
Momento do progresso da epidemia em que ocorre o pico de Infectados, $I$ (% de progresso do tempo total da epidemia)	Eq. competitivo	47,33	39,33	42,67	46,00	42,00
	Política ótima	55,33	48,67	56,00	58,67	52,67
Momento do progresso da epidemia em que ocorre o pico da taxa de contenção, $\mu_t$ (% de progresso do tempo total da epidemia)	Política ótima	47,33	40,67	46,00	48,67	44,00
Momento do progresso da epidemia em que ocorre o pico da taxa de mortalidade, $\pi_d$ (em % do tempo total de duração da epidemia)	Eq. competitivo	47,33	39,33	42,67	46,00	42,00
	Política ótima	55,33	48,67	56,00	58,67	52,67
Momento do progresso da epidemia em que ocorrem os vales dos agregados de consumo e horas de trabalho (em % do tempo total de duração da epidemia)	Eq. competitivo	46,00	38,67	42,00	45,33	41,33
	Política ótima	49,33	42,00	47,33	50,67	45,33

Elaboração dos autores.

**FIGURA 7**  
**Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup> – São Paulo**  
 (Em nível)



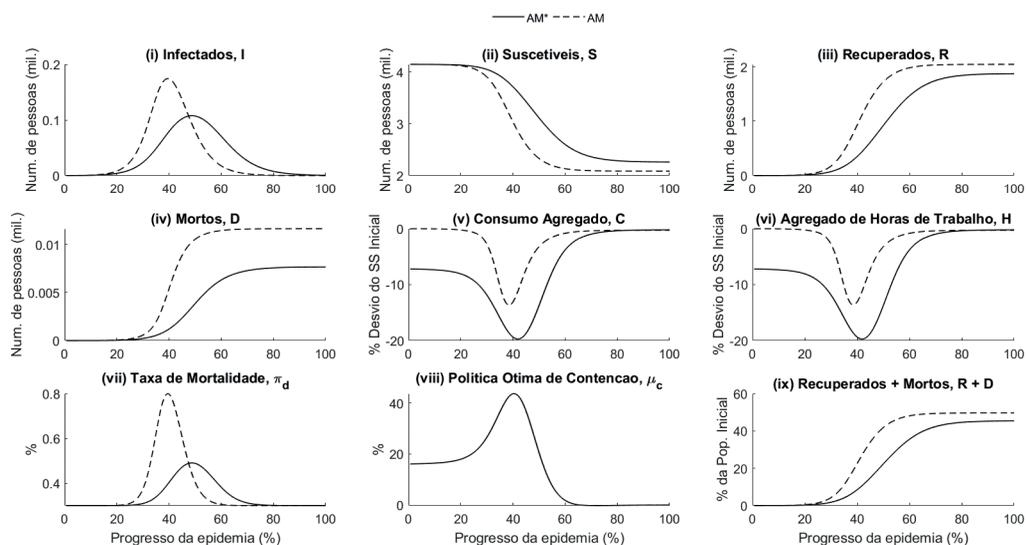
Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

**FIGURA 8**  
**Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup> – Amazonas**  
 (Em nível)



Elaboração dos autores.

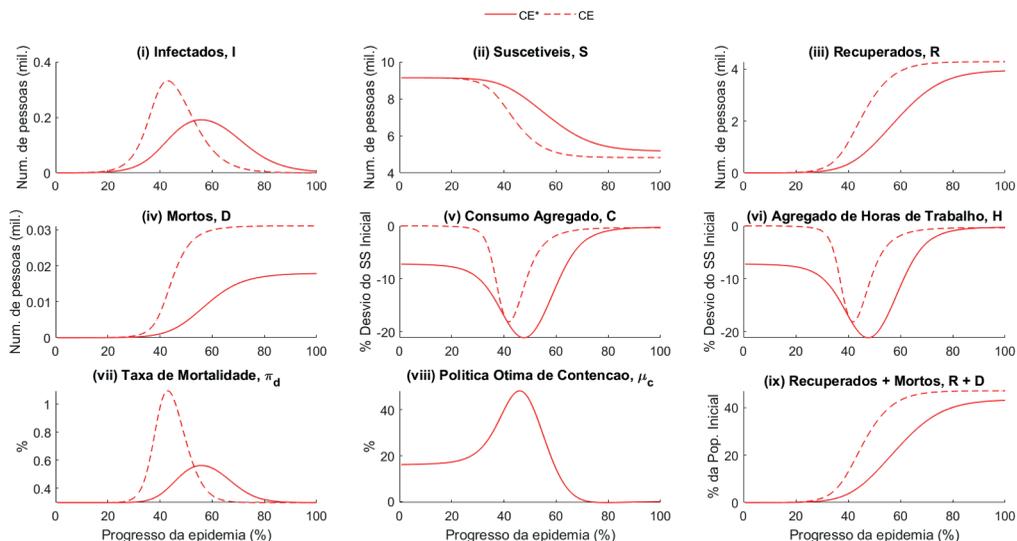
Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

FIGURA 9

**Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup> – Ceará**  
(Em nível)



Elaboração dos autores.

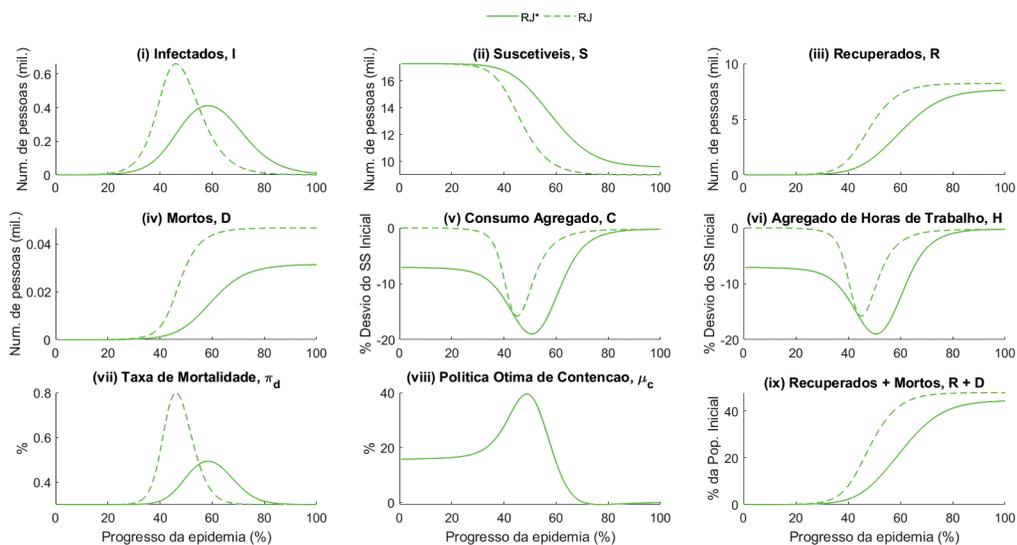
Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

FIGURA 10

**Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup> – Rio de Janeiro**  
(Em nível)



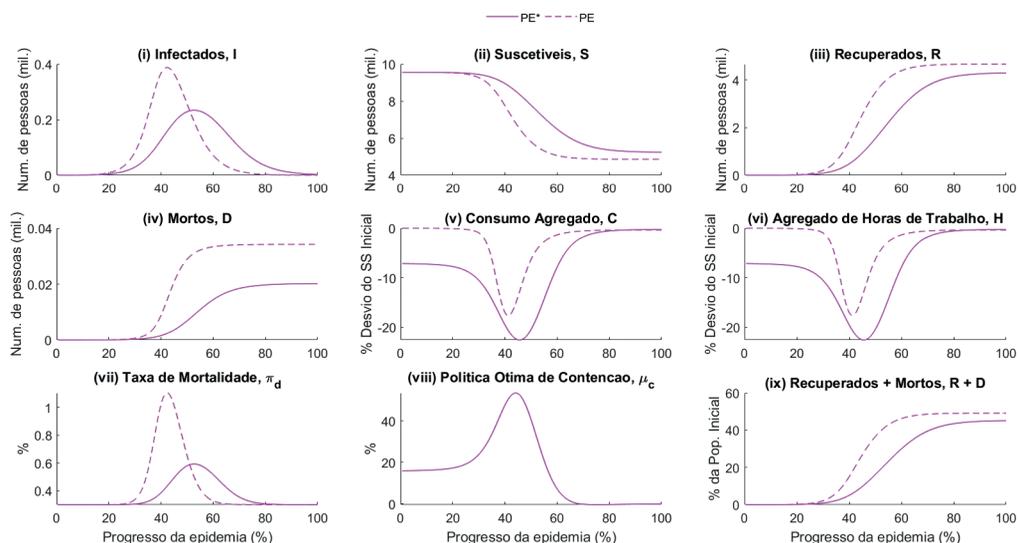
Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.

<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

FIGURA 11  
**Modelo SIR-macro: comparativo de resultados entre os cenários de política ótima de contenção<sup>1</sup> e equilíbrio competitivo<sup>2</sup> – Pernambuco**  
 (Em nível)



Elaboração dos autores  
 Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).  
 Notas: <sup>1</sup> Linha sólida.  
<sup>2</sup> Linhas pontilhadas.

## 7 CONCLUSÃO

Na seção 2 apresentamos o modelo SIR-macro completo, conforme desenvolvido por Eichenbaum (2020). Na seção 3 expomos nossa estratégia de calibragem para cada um dos estados. Essa estratégia de calibragem foi a responsável por captar diferenças de cada estado relativas: *i*) ao tamanho da população; *ii*) à renda *per capita*; *iii*) ao tempo médio dedicado ao trabalho; *iv*) ao tempo médio no transporte; *v*) ao tempo médio dedicado a afazeres domésticos; *vi*) à quantidade média de pessoas por residência; *vii*) à quantidade de pessoas ocupadas na força de trabalho; *viii*) à quantidade de estudantes; e *ix*) às diferenças nas taxas de fatalidade estimadas com a evolução da epidemia até o momento da pesquisa. Na seção 4 apresentamos resultados para os cinco estados sob o cenário de equilíbrio competitivo, isto é, na ausência da adoção de medidas de contenção por parte das autoridades de cada estado. Na seção 5 apresentamos as medidas de contenção ótimas que poderiam ser adotadas por cada um dos estados. Finalmente, na seção 6 apresentamos os resultados no cenário em que cada um dos estados adota as medidas de contenção expostas na seção 5 e comparamos as consequências destas medidas em relação ao cenário de equilíbrio competitivo apresentado na seção 4.

Nosso interesse foi analisar qualitativamente como as principais diferenças intrínsecas a cada estado podem afetar as suas dinâmicas epidêmicas e seus resultados. Em particular, nossos exercícios, efetuados para cinco estados (São Paulo, Amazonas, Ceará, Rio de Janeiro e Pernambuco) e selecionados pela severidade da epidemia que apresentavam no momento da pesquisa, apontaram para diferenças substanciais na evolução e no resultado da epidemia em cada um, tanto no cenário de equilíbrio competitivo quanto no cenário em que políticas ótimas de contenção são adotadas. Em ambos os cenários, não apenas o tamanho do pico de infectados e o tempo necessário para alcançá-lo diferiram em cada estado; também diferiram a profundidade e a duração das recessões, juntas à parcela da população total infectada e à parcela da população inicial acometida pela morte ao fim da epidemia em cada estado.

Nossos resultados apresentam evidências de que as diferenças intrínsecas de cada estado implicam também trajetórias ótimas de políticas de contenção diferentes para cada um deles. Essas diferenças intrínsecas não apenas afetam a severidade inicial das medidas de contenção adotadas por cada estado como também a dinâmica da evolução destas taxas de contenção no tempo. Isso implica diferenças no momento ideal em que as medidas de contenção precisarão ser elevadas, até onde elas precisarão ser elevadas e quando poderão ser finalmente relaxadas. Tendo em vista que em alguns estados são necessárias medidas mais severas e/ou prolongadas de contenção, enquanto em outros, medidas menos severas e/ou abreviadas, nosso estudo aponta que haverá uma consequência desta heterogeneidade nas trajetórias ótimas; pois, com a adoção destas políticas de contenção, são evidenciadas as alterações – observadas no equilíbrio competitivo – nas relações de ordem de grandeza e temporais entre os estados.

Usando o arcabouço simples do modelo SIR-macro proposto por Eichenbaum *et al.* (2020) e analisando os resultados obtidos para cada estado concluímos, em primeiro lugar, que o equilíbrio competitivo não é socialmente ótimo para nenhum dos estados, sendo, portanto, a adoção de políticas de contenção por parte dos estados as melhores respostas à eclosão da epidemia. Em segundo lugar, que as características implícitas dos cinco diferentes estados implicam diferenças relevantes aos seguintes aspectos:

- na dinâmica epidêmica e suas consequências epidemiológicas gerais;
- nas políticas ótimas de contenção a serem adotadas por cada estado;
- no efeito da adoção das políticas ótimas de contenção; e
- na severidade das recessões econômicas resultantes da epidemia.

Esta conclusão corrobora com ênfase que vem sendo dada na literatura nacional à importância da análise desagregada do país para a formulação de políticas de combate à pandemia. A adoção de uma política única para um país das dimensões do Brasil pode provocar reações desproporcionais nas esferas estaduais. Com efeito, se a política do país for acima da requerida para determinados estados, estes podem sofrer agravos desnecessários de suas recessões econômicas. Num pior cenário, por outro lado, se a política adotada por todo o país for abaixo da requerida por determinados estados, a consequência pode ser a elevação do número de mortos resultante da pandemia nestes estados. Portanto, em última análise, o enfrentamento desagregado da pandemia pode colaborar tanto para a menor severidade da recessão econômica sofrida pelo país como um todo, quanto para a preservação de um maior número de vidas.

## REFERÊNCIAS

- EICHENBAUM, M. S., REBELO, S. e TRABANDT, M. The Macroeconomics of Epidemics, Tech. rep, National Bureau of Economic Research. 2020.
- FARHI, E. e WERNING, I. “Dealing with the Trilemma: Optimal Capital Controls with Fixed Exchange Rates”, National Bureau of Economic Research Working Paper No. 18199. 2012.
- FERRARI, T. K., DUSI, L. D. A., LOPES, D. A. F. e POMPERMAYER, M. “Estimativa do valor da vida estatística e do valor da economia de tempo em viagens nas rodovias brasileiras com a utilização de pesquisa de preferência declarada”. 2019.
- HALLAL, P. *et al.* “Remarkable variability in Sars-COV-2 antibodies across Brazilian regions: nationwide serological household survey in 27 states”, medRxiv doi: 10.1101/2020.05.30.20117531. 2020.
- KERMACK, W. e MCKENDRICK, A. “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”, Proceedings of the Royal Society of London, series A 115, no. 772: 700-721, 1927. 1927.
- FERGUSON, N. M., CUMMINGS, D. A., FRASER, C., CAJKA, J. C., COOLEY, P. C. e BURKE, D. S. “Strategies for mitigating an influenza epidemic”, Nature, 442, 448-452. 2006.
- LEE, B. Y., BROWN, S. T., COOLEY, P. C., ZIMMERMAN, R. K., WHEATON, W. D., ZIMMER, S. M., GREFFENSTETTE, J. J., ASSI, T.-M., FURPHY, T. J. e WAGENER, D. K. “A computer simulation of employee vaccination to mitigate an influenza epidemic”, American Journal of preventive medicine, 38, 247-257. 2010.

MELLAN, T. A. *et al.* “Report 21: Estimating Covid-19 cases and reproduction number in Brazil”, Imperial College Covid-19 Response Team. 2020.

RABELO, M. e SOARES, J. “The Macroeconomics of Epidemics: results for Brazil”. Working paper. 2020.

ROCHA, G., DE MORAIS, R. L. e KLUG, L. “O custo econômico da poluição do ar: Estimativa de valor da vida estatística para o Brasil”, Tech. Rep., Texto para Discussão.

## APÊNDICE A

**CALIBRAGEM DE  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  E  $\alpha_3$** 

Calibramos as parcelas das transmissões que ocorrem no consumo, no trabalho e em outras atividades como proporcionais ao tempo que os indivíduos passam executando estas atividades. Para calibrar  $\alpha_1$ , Eichenbaum *et al.* (2020) utiliza dados de pesquisas de uso de tempo produzidas pelo Bureau of Labor Statistics, dos Estados Unidos. Diante da inexistência de pesquisas equivalentes para o Brasil, calibrar diretamente a parcela das transmissões que ocorrem no consumo tornou-se tarefa deveras complicada para os estados brasileiros. Então, decidimos calibrar os valores de  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  e obter os valores de  $\alpha_1$  residualmente. Calibramos a parcela das transmissões que ocorrem no trabalho,  $\alpha_2$ , utilizando a mesma abordagem de Eichenbaum *et al.* (2020). Ponderamos a quantidade de estudantes e trabalhadores de cada estado em 10 e 4, respectivamente. Estes pesos dizem respeito à quantidade média de contatos físicos por dia na escola e no trabalho, obtidas no estudo de Lee *et al.* (2010). Desagregamos a fração das transmissões que ocorre em escolas e ambientes de trabalho para obter a fração que ocorre apenas nos ambientes de trabalho considerando, para isso, uma proporcionalidade envolvendo a quantidade média de contatos, a população de trabalhadores e a população de estudantes de cada estado. Calculamos a proporção das infecções que ocorre apenas no trabalho e, finalmente, obtemos o valor de  $\alpha_2$  multiplicando-a pela parcela das infecções que ocorre em escolas e ambientes de trabalho (37%). Assim, para cada estado o valor de  $\alpha_2$  será calculado como sendo:

$$\alpha_2 = \frac{4 \cdot (\text{Trabalhadores})}{4 \cdot (\text{Trabalhadores}) + 10 \cdot (\text{Estudantes})} \cdot 37\% \quad (34)$$

onde *Trabalhadores* é a quantidade total de trabalhadores do estado em questão e *Estudantes* é a quantidade total de estudantes do estado em questão. Para a quantidade total de trabalhadores utilizou-se o número de pessoas de 14 anos ou mais de idade, na força de trabalho, ocupadas, por unidade da federação, obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA),<sup>1</sup> do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para a quantidade total de estudantes utilizou-se o número de estudantes de 4 anos ou mais de idade, por unidade de federação, obtidos também no SIDRA,<sup>2</sup> do IBGE.

---

1. Tabela 4093.

2. Tabela 983.

Agora procedemos a calibragem da parcela das infecções que ocorre em outras atividades,  $\alpha_3$ . Essa parcela é, por definição, a parcela das infecções que ocorre em todas as atividades exceto consumo e trabalho. Evidentemente, são muitas estas atividades, de modo que se torna inevitável a necessidade de hipóteses simplificadora para o seu cálculo.

Abordamos esse problema da seguinte forma: assumimos como hipótese de calibragem que a grande maioria das infecções que ocorrem fora do consumo e do trabalho ocorrem, principalmente, em casa, na escola ou no transporte. Esta hipótese é definida de acordo com a nossa intuição a respeito da natureza da transmissão do vírus inserida na realidade brasileira e com a disponibilidade de dados para os estados. Sabemos que esta hipótese deixa de lado uma série de outras circunstâncias e ambientes em que a transmissão da doença poderia ocorrer, talvez o mais significativo deles sendo os próprios hospitais. Não obstante, a ausência de dados estaduais específicos relacionados a estas condições e ambientes não nos permitem mensurar com precisão estas parcelas.

Contornamos esse problema da seguinte maneira: se calibrarmos  $\alpha_3$  em função apenas do tempo que as pessoas passam em casa, no transporte e na escola, o valor resultante apresenta-se deveras baixo e, como consequência, calculando residualmente a parcela  $\alpha_1$  relativa às infecções que ocorrem no consumo, observamos que esta parcela apresenta-se, por outro lado, irrealisticamente alta. Isto ocorre por dois principais fatores. Em primeiro lugar, pela questão já anteriormente citada (nossa hipótese de calibragem para  $\alpha_3$  deixa de fora muitos ambientes de alto grau de infecção, como hospitais, fazendo com que o valor resultante para esta parcela seja subestimado) e, em segundo lugar, pois a parcela das infecções não deve ser explicada apenas pelo tempo despendido em cada ambiente, mas sim por esse tempo propulsionado por um fator multiplicador relacionado às características do ambiente em questão. Todas essas constatações indicam que o valor de  $\alpha_3$ , se calculado desta forma, é subestimado, o que nos dá margem para acresce-lo por meios alternativos para incorporar o efeito destes fatores omitidos.

Optamos por incorporar a contribuição dos ambientes omitidos para as infecções no fator multiplicador do transporte. Mas o quão grande deve ser este fator multiplicador? Nós o calibramos de modo a obter valores para as parcelas  $\alpha_3$  dos estados que girem em torno de um a dois terços, magnitudes consistentes com o valor obtido por Eichenbaum *et al.* (2020) para os Estados Unidos, onde a disponibilidade de dados possibilitou o cálculo residual de  $\alpha_3$  contribuindo, portanto, para a maior

confiabilidade da estimativa de grandeza desta parcela. Como este fator multiplicador será comum para todos os estados, argumentamos não haver perda qualitativa para o modelo, uma vez que as diferenças relativas de calibragem entre estados não serão alteradas.

Para calibrar  $\alpha_3$  procedemos, então, da seguinte forma: calculamos a fração das infecções que ocorre em casa,  $\alpha_3^{CASA}$ , nas escolas,  $\alpha_3^{ESCOLAS}$  e no transporte,  $\alpha_3^{TRANSP}$ , e somamos, de modo que  $\alpha_3 = \alpha_3^{CASA} + \alpha_3^{ESCOLAS} + \alpha_3^{TRANSP}$ . Ora, note que com o cálculo da parcela das infecções que ocorre nos ambientes de trabalho,  $\alpha_2$ , obtém-se, conseqüentemente, também a parcela das infecções que ocorre nas escolas:

$$\alpha_3^{ESCOLAS} = 37\% \cdot \frac{10 \cdot (Estudantes)}{4 \cdot (Trabalhadores) + 10 \cdot (Estudantes)}. \quad (35)$$

O problema de calibragem de  $\alpha_3$  reduz-se, portanto, a calibrar as frações de infecções que ocorrem em casa,  $\alpha_3^{CASA}$ , e no transporte,  $\alpha_3^{TRANSP}$ .

Para calibrar a fração das infecções que ocorre em casa utilizamos dados sobre a proporção de horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos, das pessoas de 14 anos ou mais de idade (%), por unidade da federação, obtidos no SIDRA<sup>3</sup> do IBGE, para calcular a proporção média do tempo diário que os indivíduos de cada estado passam em casa em situações suscetíveis à infecção. Como o tempo de sono não pode ser considerado tempo suscetível à infecção, consideramos um tempo médio de sono de 8 horas diárias e calculamos a proporção como sendo as horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos de cada estado divididas por 16 (24-8). Recorde-se, do trabalho de Ferguson *et al.* (2006), que 30% das infecções ocorrem em casa. Então multiplicamos essa proporção por 30% e ainda, sob a hipótese de que quanto mais pessoas por domicílio, maior a parcela de infecções dentro de casa, por um fator multiplicador caracterizado pelo número médio de pessoas por domicílio, em 2019, obtidos no SIDRA<sup>4</sup> do IBGE para cada estado. O valor resultante de  $\alpha_3^{CASA}$  para cada estado é descrito, portanto, pela equação

---

3. Tabela 6730.

4. Tabela 6578.

$$\alpha_3^{CASA} = 30\% \cdot \frac{(\text{Afazeres domésticos})}{16} \cdot (\text{Pessoas por residência}) \quad (36)$$

onde *Afazeres domésticos* é o tempo médio diário que os indivíduos do estado em questão dispendem com afazeres domésticos e *Pessoas por residência* é o número médio de pessoas vivendo por residência no estado em questão.

Finalmente, para calibrar a fração que ocorre no transporte,  $\alpha_3^{TRANSP}$ , procedemos utilizando o tempo habitual de deslocamento para o trabalho dos indivíduos, obtidos no SIDRA<sup>5</sup> do IBGE para cada estado, para calcular a fração do tempo das atividades gerais destinada ao uso de transporte. Consideramos o tempo das atividades gerais como sendo as 24 horas diárias subtraídas do tempo gasto em afazeres domésticos, sono, trabalho e escola. Tendo obtida a fração do tempo devotada às atividades gerais que é destinada ao uso de transporte, nós a multiplicamos pela parcela das infecções que ocorrem em atividades gerais (33%) para obter a parcela das infecções que ocorrem no transporte. Finalmente, calibramos o fator multiplicador do transporte de modo que os valores de  $\alpha_3$  girem em torno de um a dois terços para todos os estados, intervalo de valores consistente com os valores de  $\alpha_3$  calibrados em Eichenbaum *et al.* (2020) para os Estados Unidos, onde a disponibilidade de dados para a calibragem é mais ampla. O fator multiplicador é, portanto, definido como sendo 10. O valor de  $\alpha_3^{TRANSP}$  é, então, obtido para cada estado pelo cálculo

$$\alpha_3^{TRANSP} = 33\% \cdot \frac{(\text{Tempo médio no transporte})}{16 - (\text{Afazeres domésticos}) - (\text{Trab. ou escola})} \cdot 10. \quad (37)$$

Com isso, finalmente o valor de  $\alpha_3$  é obtido como sendo

$$\alpha_3 = \alpha_3^{CASA} + \alpha_3^{ESCOLAS} + \alpha_3^{TRANSPORTE}. \quad (38)$$

Tendo obtidas as parcelas  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ , bastará resolver o sistema (31) para obter os valores de  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$ .

5. Tabela 3422.

## ANEXO A

**COMPUTANDO O EQUILÍBRIO**

Neste apêndice é transcrito o método de computação do equilíbrio do modelo conforme exposto em Eichenbaum *et al.* (2020). *In verbis*:

Para uma dada sequência de taxas de contenção  $\{\mu_t\}_{t=0}^{H-1}$  e para algum horizonte suficientemente grande  $H$ , arbitre sequências para  $\{n_t^s, n_t^i, n_t^r\}_{t=0}^{H-1}$ . Na prática, resolvemos o modelo para  $H = 250$ . Compute a sequência das variáveis desconhecidas remanescentes em cada uma das seguintes equações de equilíbrio:

$$\begin{aligned}\theta n_t^r &= A\lambda_{bt}^r, \\ (c_t^r)^{-1} &= (1 + \mu_t)\lambda_{bt}^r, \\ u_t^r &= \ln c_t^r - \frac{\theta}{2}(n_t^r)^2.\end{aligned}$$

Itere retroativamente partindo dos valores de  $U_t^r$  do estado estacionário pós-epidêmico:

$$U_t^r = u(c_t^r, n_t^r) + \beta U_{t+1}^r.$$

Calcule a sequência de incógnitas remanescentes nas seguintes equações:

$$\begin{aligned}(1 + \mu_t)c_t^r &= An_t^r + \Gamma_t & (\lambda_{bt}^r), \\ \theta n_t^i &= \phi^i A\lambda_{bt}^i, \\ (c_t^i)^{-1} &= \lambda_{bt}^i, \\ u_t^i &= \ln c_t^i - \frac{\theta}{2}(n_t^i)^2, \\ (1 + \mu_t)c_t^s &= An_t^s + \Gamma_t & (\lambda_{bt}^s), \\ u_t^s &= \ln c_t^s - \frac{\theta}{2}(n_t^s)^2.\end{aligned}$$

Dados os valores iniciais de  $Pop_0$ ,  $S_0$ ,  $I_0$ ,  $R_0$  e  $D_0$ , itere para frente usando as seguintes equações para  $t = 0, \dots, H - 1$ :

$$T_t = \pi_1(S_t c_t^s)(I_t c_t^i) + \pi_2(S_t n_t^s)(I_t n_t^i) + \pi_3 S_t I_t,$$

$$Pop_{t+1} = Pop_t - \pi_d I_t,$$

$$S_{t+1} = S_t - T_t,$$

$$I_{t+1} = I_t + T_t - (\pi_r + \pi_d)I_t,$$

$$R_{t+1} = R_t + \pi_r I_t,$$

$$D_{t+1} = D_t + \pi_d I_t.$$

Itere retroativamente partindo dos valores de  $U_t^s$  e  $U_t^i$  do estado estacionário pós-epidêmico:

$$U_t^i = u(c_t^i, n_t^i) + \beta[(1 - \pi_r - \pi_d)U_{t+1}^i + \pi_r U_{t+1}^r],$$

$$\tau_t = \frac{T_t}{S_t},$$

$$U_t^s = u(c_t^s, n_t^s) + \beta[(1 - \tau_t)U_{t+1}^s + \tau_t U_{t+1}^i].$$

Calcule a sequência das incógnitas remanescentes nas seguintes equações:

$$\beta(U_{t+1}^i - U_{t+1}^s) - \lambda_{\tau t} = 0,$$

$$(c_t^s)^{-1} - \lambda_{bt}^s(1 + \mu_t) + \lambda_{\tau t} \pi_1(I_t C_t^I) = 0.$$

Finalmente, use um método baseado em gradientes para ajustar os valores arbitrados  $\{n_t^s, n_t^i, n_t^r\}_{t=0}^{H-1}$  de modo que as seguintes três equações valham com precisão arbitrária:

$$(1 + \mu_t)c_t^i = \phi^i A n_t^i + \Gamma_t \quad (\lambda_{bt}^i),$$

$$\mu_t(S_t c_t^s + I_t c_t^i + R_t c_t^r) = \Gamma_t(S_t + I_t + R_t),$$

$$-\theta n_t^s + A \lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t} \pi_2(I_t n_t^I) = 0 \quad .$$

## **Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**

### **EDITORIAL**

#### **Coordenação**

Reginaldo da Silva Domingos

#### **Assistente de Coordenação**

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

#### **Supervisão**

Camilla de Miranda Mariath Gomes

Everson da Silva Moura

#### **Editoração**

Aeromilson Trajano de Mesquita

Cristiano Ferreira de Araújo

Danilo Leite de Macedo Tavares

Herllyson da Silva Souza

Jeovah Herculano Szervinsk Junior

Leonardo Hideki Higa

#### **Capa**

Danielle de Oliveira Ayres

Flaviane Dias de Sant'ana

#### **Projeto Gráfico**

Renato Rodrigues Bueno

*The manuscripts in languages other than Portuguese  
published herein have not been proofread.*

#### **Livraria Ipea**

SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo

70076-900 – Brasília – DF

Tel.: (61) 2026-5336

Correio eletrônico: [livraria@ipea.gov.br](mailto:livraria@ipea.gov.br)







### **Missão do Ipea**

Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.

**ipea** Instituto de Pesquisa  
Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DA  
ECONOMIA



ISSN 1415-4765

