

Avaliação de Estratégias de Quarentena e Vacinação em Epidemias em Redes

Thiago Henrique Neves Coelho¹, Daniel Ratton Figueiredo¹

¹Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Caixa Postal 68501 – 21941-972 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil

{tcoelho, daniel}@cos.ufrj.br

Resumo. *Uma epidemia é caracterizada por uma doença transitória que infecta grande parte de uma população local, tratando-se de uma pandemia quando a disseminação é global. Diversos fatores influenciam o impacto de uma epidemia, incluindo a quarentena (isolamento) e vacinação (imunização) de parte da população. O objetivo deste trabalho é avaliar diferentes cenários de quarentena e vacinação em epidemias que se desenrolam em redes, observando ainda o papel da estrutura da rede. Através da simulação de um modelo epidêmico clássico em redes diferentes, quantificamos o avanço da epidemia ao longo do tempo em diferentes cenários de contenção, apresentando uma discussão qualitativa dos resultados. Um dos mais interessantes mostra que quarentenas mais curtas com maior adesão da população são mais eficazes na redução do pico de infectados do que quarentenas mais longas com menor adesão.*

Abstract. *An epidemic is characterized by a transient disease that infects a large part of a population, and becomes a pandemic when the spread is global. Several factors influence the impact of an epidemic, including quarantine (isolation) and vaccination (immunization) of part of the population. The objective of this work is to evaluate different quarantine and vaccination scenarios in network epidemics, also observing the role of the network structure. Through simulation of a classic epidemic model on different networks, we quantify the evolution of the epidemic over time in different containment scenarios, presenting a qualitative discussion of the results. One of the most interesting results indicate that shorter quarantines with higher population adherence are more effective in reducing the infection peak than longer quarantines with lower adherence.*

1. Introdução

Ao longo da história, a humanidade sofreu com diversas epidemias e pandemias, que trouxeram grandes prejuízos sociais e financeiros, como a peste bubônica, gripe suína e, mais recentemente, a pandemia da COVID-19. O entendimento das melhores formas de conter uma epidemia é crucial para diminuir tais prejuízos, sendo ainda um importante tema de estudo por conta da complexidade e especificidade das epidemias e sociedade [Estrada 2020, Klimek 2021]. De fato, apesar dos estudos prévios sobre quarentena e vacinação, a pandemia da COVID-19 mostrou a dificuldade em se determinar estratégias ótimas para conter o avanço da doença no globo, gerando uma grande quantidade de novos estudos e pesquisas [Jentsch et al. 2021, Liu and Lou 2022, Gandon and Lion 2022].

Um aspecto fundamental de uma epidemia é o contágio, ou seja, o processo de transmissão da doença de uma pessoa infectada para uma pessoa saudável (suscetível). A pessoa infectada, em geral, pode transmitir a doença por um período limitado, sendo necessário a proximidade com a pessoa saudável por algum período de tempo. Dessa forma, o isolamento das pessoas infectadas (ou potencialmente infectadas), chamado de quarentena, se torna uma forma simples e eficaz de contenção da epidemia. Por outro lado, uma pessoa saudável não necessariamente se torna infectada ao ter contato com uma pessoa infectada, por exemplo quando a pessoa está com alta imunidade ou vacinada. Portanto, aumentar a imunidade das pessoas através da vacinação é outra forma de controlar uma epidemia.

O processo de contato entre as pessoas também possui um papel central na epidemia, pois sem a proximidade, o contágio, em geral, não ocorre. Os contatos entre as pessoas podem ser representados por redes sociais, onde os vértices representam pessoas e as arestas o contato prolongado entre cada par. De forma intuitiva, a estrutura desta rede influencia de forma determinante a epidemia. Por exemplo, vértices com graus muito maiores do que a média (*hubs*) tendem a impulsionar a epidemia, pois, uma vez infectados, podem infectar um grande número de pessoas.

Avaliar a eficácia de diferentes metodologias de contenção de epidemias (ex. quarentena e vacinação), além de determinar estratégias ótimas e dinâmicas de contenção (ex. vacinar primeiro os mais idosos) são temas amplamente estudados na literatura. O recente trabalho de [Sartori et al. 2022] é o mais próximo deste trabalho, entretanto, apenas a metodologia de vacinação é avaliada. O recente trabalho de [Ito et al. 2022] apresenta um mecanismo de controle dinâmico de contenção considerando ambos quarentena e vacinação, mas não considera epidemia em redes, assim como o trabalho mais antigo de [Sun and Yang 2010]. Outro trabalho relacionado é [Alam et al. 2020] que utiliza um modelo baseado em teoria dos jogos evolucionária para caracterizar os efeitos de quarentena e vacinação. Nesta mesma direção, o recente trabalho de [Meng et al. 2021] considera jogos evolucionários para estudar os efeitos da vacinação em redes heterogêneas.

O objetivo deste trabalho é avaliar estratégias de quarentena e vacinação em epidemias em redes considerando diferentes estruturas de rede, visando quantificar e caracterizar o efeito dessas estratégias. Por exemplo, é mais eficiente reduzir 30% dos contatos desde o início da doença ou 60% quando a epidemia já estiver um pouco mais avançada? Para realizar esta caracterização, um modelo compartimental simples de epidemia com três estados será considerado (ver seção 2), além de três modelos de redes (ver seção 3). Cada estratégia de contenção (quarentena e vacinação) será representada ajustando o modelo de epidemia em redes e seus parâmetros (ver seção 4). Por fim, diferentes cenários serão avaliados utilizando um simulador desenvolvido especificamente para este trabalho e disponível publicamente. Os resultados são apresentados na seção 5 e uma discussão qualitativa dos estudos será apresentada na seção 6.

2. Modelo de Epidemia em Redes

O modelo de epidemia em redes utilizado neste trabalho é o SIR, que funciona categorizando cada nó da rede como suscetível (S), infectado (I) ou removido (R) [Newman 2018]. Nós suscetíveis não possuem a doença e nem infectam outros nós, mas podem ser infectados. Nós infectados possuem a doença e infectam nós vizinhos sus-

cetíveis a uma taxa β . Ao ser infectado, um nó suscetível muda de estado (para infectado) e passa a infectar seus vizinhos. A uma taxa γ , cada nó infectado passa ao estado de removido (recuperado), não podendo mais infectar nem ser infectado.

2.1. Taxa de Infecção

O modelo considerado é de tempo discreto, com cada unidade de tempo representando um dia. A cada dia, para cada aresta entre um nó suscetível e um infectado, foi gerado um número aleatório entre 0 e 1 para que houvesse uma infecção com probabilidade β (taxa de infecção). Se um nó suscetível possuir k vizinhos infectados, esse evento de infecção será considerado k vezes de forma independente e, se em ao menos uma, o número aleatório gerado for menor que β , o nó suscetível passará a ser infectado. Ou seja, um nó suscetível que tenha k vizinhos infectados em um determinado dia se torna infectado com probabilidade $1 - (1 - \beta)^k$ no dia seguinte.

2.2. Taxa de Recuperação

De forma semelhante, a cada dia foi gerado um número aleatório entre 0 e 1 para cada nó infectado, para mudar o estado epidêmico para removido naquele dia com probabilidade γ (se o número for menor que γ , o nó passa para removido). Dessa forma, o tempo de recuperação de um nó infectado é uma variável aleatória geométrica com média igual a $\frac{1}{\gamma}$.

2.3. Condição Inicial

A alternativa escolhida foi utilizar 5 nós infectados inicialmente. Percebe-se que a troca dessa condição inicial não afeta significativamente a análise da disseminação da epidemia a longo prazo. Os nós infectados inicialmente foram escolhidos aleatoriamente de forma uniforme.

3. Modelos de Redes

Três modelos de redes aleatórias serão considerados: Modelo de Erdős–Rényi (ER), ou modelo $G(n, p)$; modelo de Barabási-Albert (BA); e modelo de Watts e Strogatz (WS). Estes modelos capturam diferentes características de redes reais, induzindo estruturas de redes muito diferentes, sendo modelos clássicos da literatura [Newman 2018]. O modelo ER gera redes totalmente aleatórias (sem estrutura) e possui dois parâmetros: a quantidade de vértices n e a probabilidade p de ocorrência de uma aresta entre cada par de vértices. Os parâmetros utilizados para gerar as redes para as simulações foram $n = 100.000$ e $p = 0,001$. Dessa forma, o grau médio será $\bar{g} \approx np = 100$.

O modelo BA foi escolhido para entender os efeitos da epidemia e dos métodos de contenção em redes com distribuição de grau em lei de potência, que consequentemente possuem *hubs*. O modelo BA inicia com uma clique e cresce até possuir n vértices. Cada vértice adicionado possui m vizinhos no grafo, escolhidos aleatoriamente com probabilidade proporcional ao grau do vizinho (anexação preferencial). Os parâmetros utilizados foram $n = 100.000$, $m = 50$ e clique inicial de tamanho 51 (configuração padrão da biblioteca *networkx*, cuja rede inicial é uma clique de $m + 1$ vértices). Dessa forma, $\bar{g} \approx \frac{2nm}{n} \approx 100$.

O modelo WS gera redes com características de *small world*, ou seja, distâncias curtas, alta clusterização, e baixa densidade de arestas, características presentes em redes

sociais reais. O modelo WS foi escolhido para estudar o impacto do controle de epidemias em redes com essas características. Uma rede gerada por este modelo inicia com um ciclo de tamanho n . Após isso, para cada vértice, são adicionadas arestas entre todos os k vértices mais próximos, que, por se tratar de um ciclo, são todos os vértices com distância menor ou igual a $\frac{k}{2}$ do vértice em questão. Por fim, para cada vértice, cada uma de suas arestas incidentes é reposicionada aleatoriamente com probabilidade p . Os parâmetros utilizados para a geração das redes foi $n = 100.000$, $k = 100$ e $p = 0,1$. Dessa forma, $\bar{g} = \frac{nk}{n} = 100$.

4. Métodos de Controle de Epidemias

Foram considerados três métodos de controle distintos, sendo eles a quarentena e duas estratégias distintas de vacinação, além da disseminação da epidemia sem controle algum. Esses métodos buscam representar, de forma mais abstrata, métodos já adotados ou que poderiam ser adotados na prática.

4.1. Quarentena

A proposta de uma quarentena é reduzir o contato social entre indivíduos através de alguma forma de isolamento social. Uma possibilidade para simular esse cenário é considerar uma redução na probabilidade de contato social entre duas pessoas durante um período de tempo. Dessa forma, esse método influenciou diretamente no parâmetro de taxa de infecção do modelo SIR. Como premissa, foi definido que os contatos sociais a serem evitados seriam escolhidos aleatoriamente e de modo equiprovável, logo uma redução de 20% dos contatos, por exemplo, foi modelada através de uma redução de 20% da taxa de infecção β . Os parâmetros para esse método de controle e as premissas são:

1. **Adesão α** : Representa a fração de contatos sociais que serão evitados durante a quarentena. Esse parâmetro visa modelar os diferentes cenários que podem acontecer em uma sociedade. Por exemplo, o fato de que nem todas as pessoas respeitarão a quarentena, e mesmo as que respeitarem, não estarão em total isolamento. Além disso, o próprio rigor do isolamento definido pelo governo pode variar de simples recomendações para evitação de aglomerações, até medidas estritas de *lockdown*. Uma adesão de 0 representa um cenário onde os contatos sociais ocorrem da mesma maneira que ocorreriam fora da quarentena, enquanto que uma adesão de 100% simula um isolamento total dos indivíduos. Desse modo, $\alpha \in R$ e $0 \leq \alpha \leq 1$. Em termos de modelagem, temos que, enquanto a quarentena estiver ativa, a taxa de infecção será $(1 - \alpha)\beta$, em vez de β , o que é semelhante a desconsiderar uma fração α dos contatos entre indivíduos durante esse período.
2. **Estado de Alerta ω** : É a fração mínima de indivíduos infectados necessária para iniciar a quarentena. Com esse parâmetro, é possível ter mais flexibilidade e poder modelar desde cenários em que a quarentena começa a partir de um número baixo de infectados até outros em que ela só entra em vigor quando uma parcela maior da população estiver infectada. O estado de alerta definido em 2%, por exemplo, implica que as medidas de contenção da quarentena serão colocadas em vigor imediatamente após 2% da população total de indivíduos estar no estado infectado. Nos casos extremos, temos que o estado de alerta definido em 0% implicaria na

quarentena sempre ativa, e praticamente sempre inativa¹ no caso de 100%. Desse modo, $\omega \in R$ e $0 \leq \omega \leq 1$.

3. **Tempo Mínimo de Duração τ** : É o tempo, em dias, que a quarentena ficará em vigor após a fração de infectados voltar a ser inferior ao estado de alerta. Por consequência, este também é o tempo mínimo de duração da quarentena, pois não é possível que ela seja finalizada antes disso. O ajuste do tempo mínimo de duração permite a análise das consequências de períodos de quarentena mais prolongados, que se mantêm ativos em períodos não críticos de contágio. Se esse parâmetro receber o valor 0, então a quarentena se encerrará no exato instante que a fração de infectados for menor do que o estado de alerta. Caso seja, por exemplo, 20, a quarentena continuará em vigor durante mais 20 dias após a fração de infectados ser menor do que o estado de alerta. Desse modo, $\tau \in Z_+$.

A cada dia, é verificado se a fração de infectados ultrapassou o estado de alerta ω . Se sim, a quarentena iniciará e um contador será iniciado com o tempo mínimo de duração τ e decrementado em uma unidade por dia, até que chegue a 0, fazendo com que a quarentena seja finalizada. Sempre que a fração de infectados for maior que ω , o contador é reiniciado para o valor τ .

4.2. Vacinação Aleatória

A vacinação consiste na aplicação de imunizantes nos indivíduos da população, que, em caso de sucesso, não podem mais ser infectados. Foram feitas algumas simplificações da realidade: serão vacinados um número fixo e parametrizável de indivíduos por dia, e cada um deles pode se tornar imune à doença (caso seja suscetível) com certa probabilidade ou não receber nenhum benefício, representando um caso em que a vacina não surtiu efeito, com probabilidade complementar. Indivíduos infectados ou removidos que forem vacinados não receberão nenhum efeito, mesmo em caso de sucesso, ou seja, o infectado continuará infectando e ambos continuarão em seus respectivos estados². Além disso, quando o indivíduo suscetível é vacinado e fica imunizado, ele não muda de estado, apenas perde a capacidade de se infectar. Dessa forma, os parâmetros para esse modelo são:

1. **Taxa de Vacinação V** : Representa a fração dos indivíduos que serão vacinados diariamente. Esse parâmetro é sustentado pelo fato de que a capacidade de vacinação diária de um sistema de saúde pode variar dependendo do país ou cidade que está sendo considerada. Quanto maior for a taxa de vacinação, mais rápido os indivíduos serão imunizados. No simulador, essa taxa é aplicada de forma constante e determinística, então uma taxa de vacinação de 1% indica que 1% da população receberá a vacina a cada dia, portanto, todos os indivíduos terão sido vacinados até o dia 100 (apenas indivíduos não vacinados podem receber a vacina). Dessa forma, temos que $V \in R$ e $0 \leq V \leq 1$.
2. **Eficácia de Imunização I** : É a porcentagem de indivíduos suscetíveis que ficarão imunes à doença após serem vacinados. Em casos reais, diferentes imunizantes possuem eficácias diferentes. No simulador, essa eficácia foi considerada como

¹A quarentena só iniciaria caso todos os indivíduos estivessem infectados, o que não acontece devido aos removidos e, mesmo que acontecesse, não teria efeito prático algum, pois não haveria novas infecções.

²Essa seleção é apenas uma simplificação da realidade e foi modelada considerando que não há certeza, individualmente, do estado epidêmico de cada pessoa. Uma abordagem mais realista e complexa deveria manter em conta taxa de assintomáticos, mortos e falsos positivos, por exemplo.

a probabilidade de sucesso na imunização de um indivíduo suscetível, sendo sucesso o caso em que ele fica totalmente imune, não podendo mais adquirir ou transmitir a doença, e fracasso o caso em que ele não se torna imune, podendo ser infectado como qualquer outro indivíduo suscetível. Indivíduos infectados e removidos que forem vacinados não terão benefício algum. Nenhum indivíduo será vacinado duas vezes. Dessa forma, $I \in R$ e $0 \leq I \leq 1$.

Na estratégia aleatória, a cada dia, são selecionados NV indivíduos não vacinados para a vacinação, sendo N a quantidade de nós da rede, com probabilidade I de imunização para cada um. Os indivíduos são selecionados com igual probabilidade, independente do estado epidêmico, e nenhum é selecionado mais de uma vez.

4.3. Vacinação por Grau

Esse método se baseia na ideia de que selecionar indivíduos com maior necessidade de contato social para se vacinar primeiro pode ser mais efetivo do que selecionar aleatoriamente, pois eles possuem maior chance de serem infectados, caso ainda não tenham sido, e de infectar mais indivíduos quando são infectados. O critério escolhido para definir a ordem de vacinação foi o seu grau, ou seja, a quantidade de contatos que ele possui com outras pessoas, pois é um valor proporcional à probabilidade de que esse indivíduo infecte ou seja infectado (maior grau primeiro).

Uma aplicação dessa estratégia em um cenário real poderia ser feita, por exemplo, através da priorização de indivíduos que tenham grande contato diário com muitas pessoas diferentes diariamente, como funcionários que trabalham com atendimento ao cliente, profissionais de saúde e usuários de transportes públicos.

Os parâmetros desse método são os mesmos da Vacinação Aleatória. A única diferença entre os dois métodos é a estratégia empregada para selecionar a ordem de vacinação dos indivíduos, pois, enquanto a Vacinação Aleatória seleciona NV indivíduos não vacinados aleatórios, a Vacinação por Grau seleciona os NV indivíduos ainda não vacinados de maior grau.

5. Resultados Numéricos

Foram geradas 10 redes aleatórias de cada modelo de rede para as simulações. Cada cenário de contenção foi simulado em todas as 10 redes de cada modelo, obtendo a quantidade de indivíduos suscetíveis, infectados e removidos a cada dia³.

O eixo vertical dos gráficos indica a porcentagem média de indivíduos em cada estado epidêmico (S, I, e R) nas 10 redes de um mesmo modelo, já o eixo horizontal indica o dia desde o início da simulação. A linha tracejada verde é a porcentagem de indivíduos suscetíveis (S), a contínua vermelha é a dos infectados (I), e a pontilhada laranja, dos removidos (R).

Os modelos estão indicados no título de cada gráfico (ER, BA e WS). Além disso, em cada título e legenda das figuras, estão indicados o método de controle testado e os parâmetros utilizados. Para todas as simulações, os parâmetros do modelo SIR são

³O simulador de epidemia em redes foi desenvolvido para este trabalho na linguagem C++, já a geração das redes e avaliação dos resultados, foram realizados por programas na linguagem Python. Os códigos fontes estão disponíveis em <https://github.com/Thiagohnc/Controle-de-Epidemias>

$\beta = 0,002$ e $\gamma = 0,07$. Dessa forma, em média, a cada 500 contatos diários, há uma infecção. Além disso, o tempo médio de recuperação é de, aproximadamente, 14 dias, visto que $\frac{1}{0,07} \approx 14,29$. Esses valores foram escolhidos para ilustrar, de forma mais clara, os efeitos da epidemia nas diferentes redes e a eficácia das estratégias de contenção, visto que parâmetros muito grandes ou pequenos dificultam essa análise.

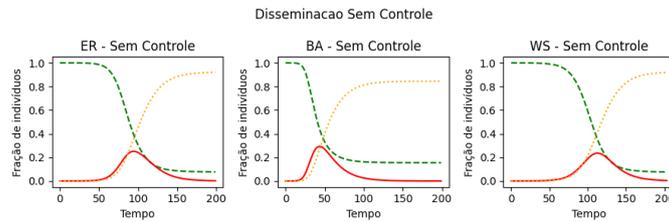


Figura 1. Disseminação sem medidas de contenção.

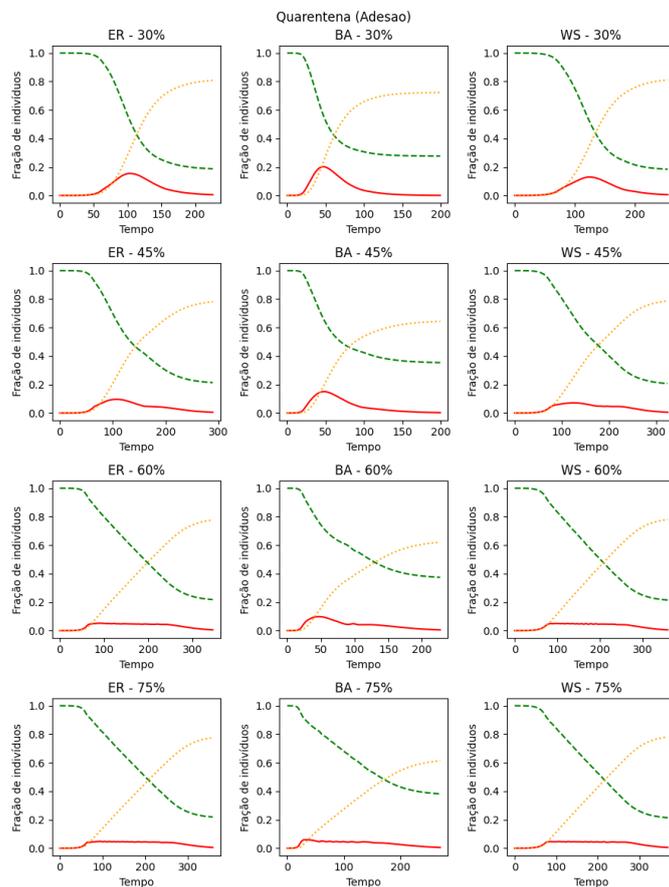


Figura 2. Impacto do crescimento da adesão à quarentena, com estado de alerta de 5% e tempo de quarentena mínimo de 7 dias.

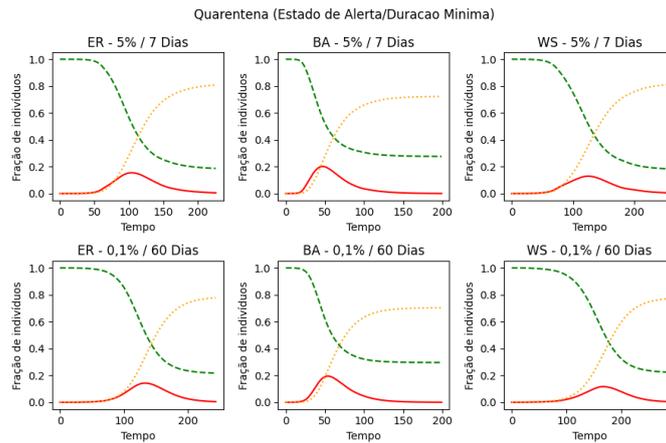


Figura 3. Impacto do crescimento da duração da quarentena, com adesão de 30%.

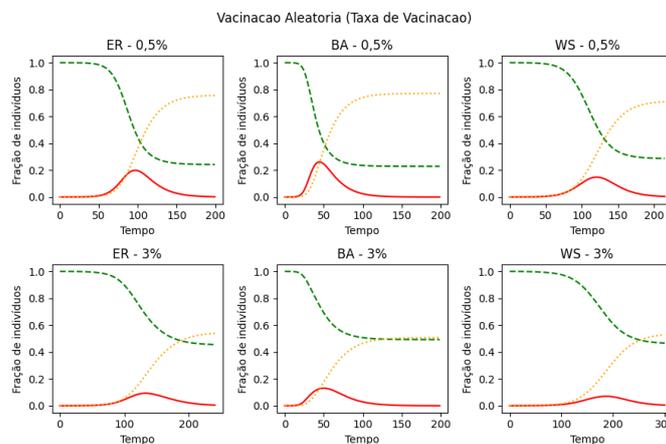


Figura 4. Impacto do crescimento da taxa diária de vacinação com estratégia aleatória e eficácia de imunização de 30%.

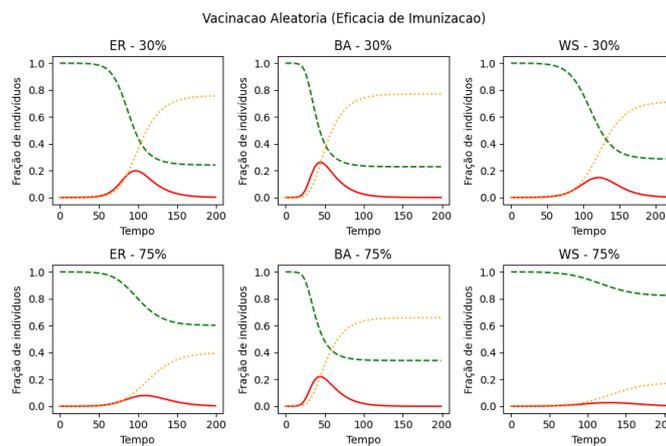


Figura 5. Impacto do crescimento da eficácia de imunização da vacinação com estratégia aleatória e taxa de 0,5% da população sendo vacinada diariamente.

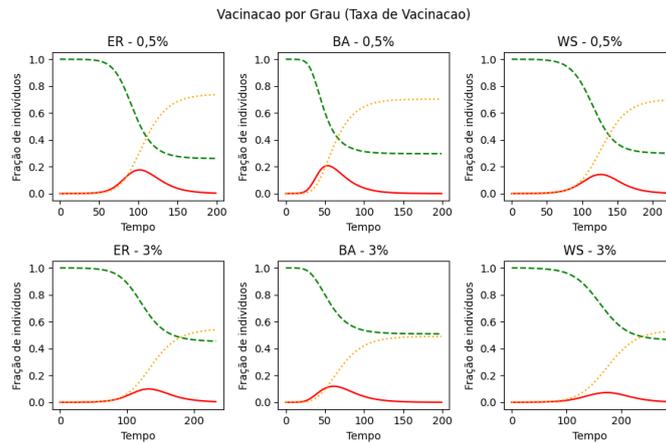


Figura 6. Impacto do crescimento da taxa diária de vacinação com estratégia de aplicação em nós de maior grau e eficácia de imunização de 30%.

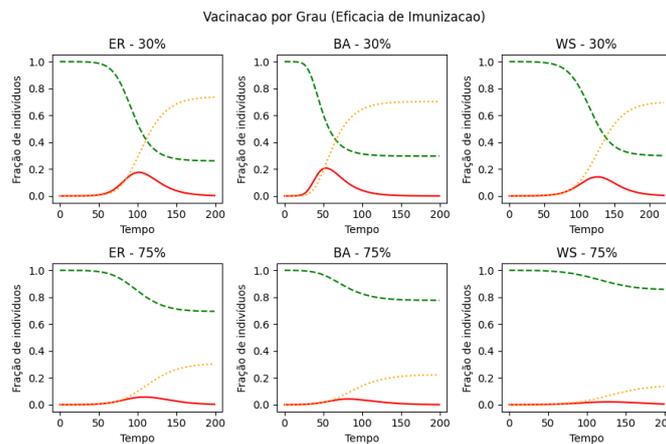


Figura 7. Impacto do crescimento da eficácia de imunização da vacinação com estratégia de aplicação em nós de maior grau e taxa de 0,5% da população sendo vacinada diariamente.

6. Discussão

A Figura 1 apresenta resultados de uma epidemia sem medidas de contenção. Claramente, a epidemia se espalha mais rapidamente nas redes geradas pelo modelo BA, atingindo seu pico em poucos dias. Isso pode ser explicado pela distribuição de grau em lei de potência desta rede, o que significa que existem nós com graus muito maiores que a média, amplificando a disseminação da epidemia. Além disso, a epidemia se espalha mais rapidamente nas redes geradas pelo modelo ER do que redes do modelo WS. Isso pode ser explicado pelo fato de que, por ser uma rede totalmente aleatória, não há nenhum tipo de estrutura regular na rede e as distâncias entre pares de vértices são menores do que no modelo WS, que possui a estrutura de uma rede *small world*.

A Figura 1 também indica que a quantidade de removidos (pessoas infectadas em algum momento) na rede gerada pelo modelo BA é menor do que nas dos outros dois. Uma possível explicação para esse fenômeno é o fato de haver poucos vértices com uma quantidade de contatos muito alta. Conforme estes são removidos, os demais

nós infectados podem não ter a mesma capacidade de transmissão, fazendo com que a epidemia termine antes.

6.1. Quarentena

Os resultados das Figuras 2 e 3 indicam que a estratégia de utilizar quarentenas que começam mais cedo e continuam por mais tempo após a saída de um período crítico de infecção atrasam o pico do número de infectados, o que pode ser interessante para aguardar o desenvolvimento e aplicação de vacinas. Em contrapartida, as quarentenas com maior adesão, mesmo começando com um número maior de infectados, foram mais efetivas para a diminuição do pico de infectados. Esse resultado é interessante, pois a distribuição mais homogênea da curva de infecção pode significar uma ocupação menor de leitos de hospitais e possibilidade de tratamento para aqueles que ficaram doentes, diminuindo a mortalidade da doença. Dessa forma, se considerarmos a possibilidade de indivíduos aderirem mais a quarentenas mais curtas, pode haver a necessidade de encontrar um ponto ótimo entre adesão e duração da quarentena. Esse resultado também explica se seria mais eficiente reduzir 30% dos contatos desde o início ou 60% quando a epidemia já estiver um pouco mais avançada. No geral, para diminuição do pico da curva de infectados, a abordagem de realizar uma redução maior dos contatos em um período mais avançado mostrou-se mais eficaz.

Além disso, conforme a adesão à quarentena aumenta (ver Figura 2), a quantidade de removidos diminui pouco em comparação à diminuição do pico de infectados. A maior redução na quantidade de removidos pode ser observada nos resultados das redes do modelo BA, possivelmente pela existência de poucos nós que concentram a maior parte das conexões, fazendo a epidemia ser controlada mais facilmente conforme esses nós passam para o estado de removidos.

6.2. Vacinação Aleatória

As Figuras 4 e 5 mostram que tanto o aumento da taxa de vacinação (Figura 4) quanto o aumento da eficácia de imunização (Figura 5) produzem uma redução significativa no número de removidos (indivíduos que foram infectados), sobretudo no modelo WS. Vale ressaltar que, embora os parâmetros da taxa de vacinação pareçam baixos, a taxa de vacinação de 3% implica que toda a população terá sido vacinada em até 34 dias, já a taxa de 0,5% indica que a vacinação só estará completamente realizada em 200 dias.

Em comparação com a quarentena, observa-se que a vacinação causou maior redução na quantidade de removidos. Isso está relacionado ao fato de que indivíduos imunizados não são infectados. Além disso, os indivíduos imunizados também são responsáveis por causar um atraso na transmissão e diminuição do pico de infectados, pois diminuem a quantidade de possíveis contágios e caminhos entre indivíduos, visto que a doença não pode ser disseminada por um caminho que passa por um indivíduo imunizado. Na curva da taxa de vacinação de 3% do modelo WS, por exemplo, a fração total de indivíduos removidos ao final da simulação foi de cerca de 55% (Figura 4), contra os quase 80% atingidos pelo mesmo modelo com uma quarentena de 75% de adesão (Figura 2).

Os resultados da vacinação aleatória, no geral, foram mais significativos nas redes geradas pelos modelos ER e WS. Isso ocorre por conta da estrutura mais uniforme (regular) das redes e dos graus dos vértices, em comparação às redes do modelo BA. Como

as vacinações aleatórias trazem benefícios aos indivíduos de forma mais distribuída, as redes do modelo BA serão menos beneficiadas, pois a maioria dos indivíduos terá uma relevância pequena (grau mínimo), enquanto a minoria, composta por poucos *hubs*, será muito relevante. Em especial, a vacinação aleatória com alta taxa de vacinação (Figura 4) teve um ganho um pouco mais semelhante nas três redes, pois todos os indivíduos foram vacinados em 34 dias.

6.3. Vacinação por Grau

Em comparação aos resultados da Vacinação Aleatória, a estratégia de vacinar seguindo a ordenação decrescente de grau (maior grau primeiro) apresenta uma melhoria considerável na redução do pico da curva de infectados e quantidade de removidos com a eficácia de imunização de 75% (Figuras 5 e 7). Entretanto, a maior diferença em comparação à vacinação aleatória foi, notavelmente, para as redes do modelo BA, devido à imunização efetiva dos poucos indivíduos que são *hubs* e que causam a maior parte das transmissões.

7. Conclusão

A principal contribuição deste trabalho foi uma avaliação das estratégias de quarentena e vacinação na contenção de epidemias SIR em redes com diferentes estruturas. Os resultados ilustram os diferentes comportamentos da epidemia e das estratégias de controle em diferentes cenários, evidenciando a importância das distintas características. Em particular, a estrutura da rede possui um papel central no comportamento da contenção da epidemia. Resultados como os encontrados neste trabalho podem ser utilizados para guiar políticas públicas de quarentena e vacinação que sejam mais eficazes na contenção de epidemias em andamento.

Uma limitação deste estudo foi o uso de redes geradas por modelos e redes estáticas, visto que redes reais são dinâmicas e possuem características diferentes das presentes nos modelos. Outra limitação é o uso de estratégias estáticas de contenção, que não se adaptam ao longo da epidemia. Dessa forma, trabalhos futuros devem considerar redes reais e dinâmicas, ou modelos de redes dinâmicas que sejam mais complexos, representando melhor redes reais, além da possibilidade de estratégias dinâmicas de contenção.

Referências

- Alam, M., Kabir, K. A., and Tanimoto, J. (2020). Based on mathematical epidemiology and evolutionary game theory, which is more effective: quarantine or isolation policy? *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2020(3):033502.
- Estrada, E. (2020). Covid-19 and sars-cov-2. modeling the present, looking at the future. *Physics Reports*, 869:1–51.
- Gandon, S. and Lion, S. (2022). Targeted vaccination and the speed of sars-cov-2 adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(3):e2110666119.
- Ito, H., Malisoff, M., and Mazenc, F. (2022). Strict lyapunov functions and feedback controls for sir models with quarantine and vaccination. *Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series B*, 27(12):6969–6988.

- Jentsch, P. C., Anand, M., and Bauch, C. T. (2021). Prioritising covid-19 vaccination in changing social and epidemiological landscapes: a mathematical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*, 21(8):1097–1106.
- Klimek, P. (2021). Why we may need to rethink future sars-cov-2 vaccination strategies. *The Lancet Regional Health–Europe*, 10.
- Liu, K. and Lou, Y. (2022). Optimizing covid-19 vaccination programs during vaccine shortages: A review of mathematical models. *Infectious Disease Modelling*.
- Meng, X., Cai, Z., Si, S., and Duan, D. (2021). Analysis of epidemic vaccination strategies on heterogeneous networks: Based on seirv model and evolutionary game. *Applied Mathematics and Computation*, 403:126172.
- Newman, M. (2018). *Networks*. Oxford university press.
- Sartori, F., Turchetto, M., Bellingeri, M., Scotognella, F., Alfieri, R., Nguyen, N.-K.-K., Le, T.-T., Nguyen, Q., and Cassi, D. (2022). A comparison of node vaccination strategies to halt sir epidemic spreading in real-world complex networks. *Scientific Reports*, 12(1):21355.
- Sun, C. and Yang, W. (2010). Global results for an sirs model with vaccination and isolation. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11(5):4223–4237.