

Tradução vídeo: Epidemic Models in Vensim

[00:00 - 00:50] Olá eu sou Tom Fiddaman da Ventana Systems, vamos fazer uma breve introdução dos modelos epidemiológicos no Vensim. Não é somente para coronavírus mas também para conhecimento geral, porque algumas funcionalidades servem para diversos outros modelos e, na verdade, a estrutura de um modelo de infecção é muito parecida com a estrutura do melhor modelo de fusão em marketing. Vou começar com um modelo de infecção extremamente fácil e vou aumentando a dificuldade gradativamente. Para modelos como SIR e SEIR e em determinado momento irei mudar para Ventity (software) para observar outras formas de estruturar modelos com agentes e conexões.

[00:51 - 2:20] Essa é a janela inicial do Vensim, eu não vou explicar todas as ferramentas, porque há um vídeo tutorial no Vensim especialmente para isso. Você vai perceber algumas diferenças aqui (em relação ao Vensim convencional), porque estou usando o novo “Vensim beta graphics engine” por diversão. Então vamos começar! Eu tenho um quadro em branco para o modelo de epidemia, primeiro precisamos de pessoas infectadas, vou colocar uma caixa aqui para os infectados. Vamos dar um zoom para que as pessoas que estão com a tela pequena possam ver melhor. Okay, temos os infectados e agora eu vou adicionar um fluxo de infecção, nomearei este modelo como “nosso primeiro modelo”. Vamos afastá-los um pouco mais, e escrever algumas equações. Esse modelo só vai focar no crescimento exponencial das pessoas infectadas, iremos nos preocupar com a física do processo depois, quando chegarmos aos modelos mais sofisticados.

[02:21 - 08:47] A taxa de infecção depende do número de pessoas infectadas e da taxa de crescimento que descreve a doença. Assumimos que temos uma pessoa infectada, inicialmente (vou colocar como unidade “pessoas”) e nossa infecção é o número de infectados vezes a taxa de crescimento, que será medido por pessoas por dia (pessoas/dia). E finalmente a taxa de crescimento caracteriza o aumento de casos e tem como unidade fração por dia (fração/dia), você pode também pensar nisso como pessoas por pessoa por dia (pessoas/pessoa/dia), isso é a simplificação da fração. Digamos que isso (taxa de crescimento) é 14.4% e vamos rodar o modelo, mas antes disso checamos nossas unidades e eu cometi um erro. Vocês podem perceber que eu tenho “infecção -> pessoas/dia” mas a integração está me dando “pessoas*mêses/dia”. Isso ocorre porque eu esqueci de mudar as configurações de tempo quando eu criei o modelo. Vamos consertar isso rapidinho, tempo inicial igual a 0 e tempo final igual a 100, mas eu quero isso em dias e não meses. Posso rodar isso com um espaço de tempo de 1 dia, mas vou diminuir para o caso de querer testar altas taxas de crescimento. Agora deve funcionar. Algumas

outras coisas que deveríamos fazer é alinhar nossas expectativas para o funcionamento do modelo, eu acho que os infectados contribuem para o fluxo de infecção que consequentemente aumenta os infectados, esse é um ciclo de resposta positivo ou um ciclo de reforço com resposta positiva, que espero que cresça exponencialmente. Só para deixar mais legal vou colocar um gráfico aqui, que vai facilitar a visualização. Ele vai ser do tipo “output workbench tool” [função do sistema] com o nível de infectados e vou usar a ferramenta de gráfico para ver isso. Agora estamos prontos para rodar, vamos dar a ele um nome simples, só para sabermos o que estamos fazendo. Vou rodar com “synthesim” [função do sistema] para que possamos mexer com ele. Aqui está nossa trajetória, você pode observar que o número de infectados inicia com 1 pessoa e cresce até pouco menos que 1 milhão. Eu posso brincar com a taxa de crescimento, se eu aumentar o pico da infecção ocorre antecipadamente e se eu diminuir a taxa para zero, obviamente nada vai acontecer, você pode observar a trajetória aqui. Vou retornar o modelo para as funções definidas inicialmente, observe a população infectada, clica em “table” para que possamos olhar os números. Inicialmente nós tínhamos 1 pessoa infectada, quando chegamos a 2? Aqui está 2 pessoas por volta do 5º dia e por volta do 10º dia nós temos 4 e assim por diante. Então por que terminamos com 1 milhão? Bem, se pensarmos a respeito estava dobrando a cada 5 dias, em média, o que significa que em 100 dias nós temos 20 multiplicações e 2^{20} é 1 milhão. Existe uma regra geral para isso que diz que se você pegar 70% e dividir pela taxa de crescimento em %/tempo você encontra o tempo de multiplicação. **Exemplo:**
 $70/14=5$

Então podemos esperar que isso dobre a cada 5 dias. Então se colocarmos isso para 0.1 ou 10% por dia, esperamos que o número de infectados dobre a cada 7 dias. Podemos checar isso com a tabela, temos 1 infectado no dia 0 e esperamos ter 2 pessoas no dia 7 e aqui está. Temos um tempo de multiplicação de 7 dias, $100/7$ significa que nosso número irá dobrar cerca de 14 vezes, esperamos 2^{14} pessoas infectadas ao final dos 100 dias, cerca de 16 mil pessoas. Vamos ver como foi nossa estimativa: 19 mil, então nossa estimativa chegou bem perto.

[08:48 - 15:24] Bem, até agora isso não é muito um modelo, um motivo simples é que as pessoas não melhoram outro é que ele vai chegar ao infinito se deixarmos rodar tempo suficiente, porque não existe nada restringindo. Queremos desafiar essa nuvem, substituí-la por uma caixa de pessoas suscetíveis e criar uma caixa de pessoas em recuperação e uma para pessoas recuperadas como saída do ciclo. Então vamos fazer isso, uma de cada vez, para podermos olhar mais objetivamente e observar como uma simples mudança influencia o resultado final. A primeira coisa que farei aqui é, na verdade, salvar meu modelo com um novo nome, para que eu possa ter documentado o avanço do sistema. Agora eu quero adicionar uma caixa de pessoas suscetíveis ao modelo, o que irá restringir o fluxo de infecções. Vou chamar de “suscetível” e no DSS eu posso usar a ferramenta de mescla para

arrastar a caixa para a nuvem e reconectar à barra de conexão, não é possível fazer isso no PLE, então eu vou apagar o fluxo de infecção e a nuvem e reconstruir, conectando “suscetível” à “infectado”. Novamente esse vai ser o fluxo de infecção, continuando a reconexão do ciclo, vou ligar a “taxa de crescimento” à “infectando” e “infectado” à “infectando”, pois para se ter uma infecção é necessário uma pessoa infectada para transmitir a doença, e eu também vou ter uma ligação do “suscetível” para “infectando”, porque precisa de uma pessoa suscetível para se infectar. Eu também vou criar alguns parâmetros aqui para o número inicial de infectados e vou usar isso para iniciar essa caixa. Perceba que eu fiz uma ligação de uma variável para uma caixa, essa não é uma conexão dinâmica como os fluxos, é só um parâmetro e essa seta vai se tornar cinza ou desaparecer dependendo de que versão do Vensim você estiver usando. Vou fazer a mesma coisa aqui, que vai ser a população. O número de pessoas suscetíveis vai ser a população menos o número inicial de infectados. Agora nós temos diversas equações para atualizar, o número de pessoas infectadas ajusta-se apenas clicando na caixa, só preciso mudar a condição inicial para ser infectados iniciais para que a variável dinâmica mostre que o número de “infectado” aumenta pelo “infectando”, essa é a condição inicial. Observe que a seta ficou cinza, vamos ajustar novamente, agora para o número de infectados inicial que vai ser 1 pessoa e colocaremos a população como 1 milhão, 1e6 em sua forma exponencial para facilitar e em unidade colocamos pessoas. Os suscetíveis são afetados pelos infectantes, então no quadro dinâmico colocamos “-” e “infectando”, o valor inicial vai ser (população - número de infectados inicial), a unidade é novamente “pessoas”. Só temos que escrever a equação para “infectando”, colocaremos a unidade de “pessoas por dia” (pessoas/dia), então todas as caixas têm a mesma unidade e os fluxos terão a mesma unidade das caixas dividido por tempo, que será “pessoas/dia”. Então isso vai ser, como antes, infectados vezes a taxa de crescimento, porém restringido pela viabilidade dos suscetíveis. Anteriormente quando tínhamos um infectado, ele transmitia para outras pessoas por um período de tempo descrito pela taxa de crescimento, mas agora a infecção também depende da existência dos suscetíveis. Na verdade, eu esqueci de fazer uma conexão aqui, deixa eu modificar o diagrama. O predomínio dos suscetíveis é o número de suscetíveis por unidade de população, então vou adicionar um termo na minha equação de infecção, vou colocar em parênteses para esclarecer, “suscetível por população” (suscetível/população). Agora dizemos que pessoas infectadas estão em contato com outras pessoas e transmitindo a infecção a uma certa taxa, mas o número de infecções resultantes é incerto sobre a fração de pessoas que tiveram contato, que são realmente suscetíveis e não infectadas.

[15:25 - 23:44] Então ainda temos nosso ciclo de resposta positiva (mais infectados -> mais infectando) e assim se repetindo, agora temos nosso ciclo de resposta negativa, mais suscetíveis que contribuem para mais infectando, porém os que estão transmitindo diminuem o número de suscetíveis, então a mudança se opõe a qualquer alteração inicial criando assim uma resposta negativa. O que esperamos

que aconteça? Essa é uma pergunta interessante, você pode responder isso sozinha e então damos uma olhada nos resultados. Só um lembrete para eu mesmo, eu decorei esse diagrama com marcas polares, então eu vou ciclar aqui com o botão direito e vou marcar aqui como positivo na cabeça da flecha, essa ligação também é positiva e essa conexão é positiva, porque “infectando” aumenta o número de “infectado” e essa ligação é negativa, vou alterar a posição para o corpo da flecha para diferenciar. Agora eu consigo observar minhas respostas principais, vamos rodar e ver o que acontece, na verdade, antes disso vou salvar meu trabalho e dá um novo nome. A nova simulação é azul e observamos que a trajetória de crescimento começa da mesma maneira mas termina, aproximadamente, na metade do trajeto anterior e podemos pegar o gráfico e dar zoom na parte inicial para ver o que está acontecendo. Pode-se observar que no início da trajetória os comportamentos são quase idênticos aos do modelo original, vamos ampliar ainda mais até 60° dia e vamos observar os suscetíveis nesse período. Durante esses 60 dias a população suscetível é quase a mesma do seu início, ou seja, quase um milhão. Se olharmos para essa equação novamente, você pode ver o porquê do comportamento ser praticamente o mesmo durante esse intervalo. Vamos pegar a ferramenta de equação. E isso é porque esse termo não importa, “suscetível” e “população” tem valores quase iguais, então isso é basicamente 1, é como se estivéssemos usando a equação antiga. Logo, até o valor de “suscetível” ser consideravelmente menor que “população” esse termo não importa e é por isso que se comporta da mesma maneira até esse ponto. Vamos brincar um pouco mais com o modelo no modo “symtesim”, eu vou restabelecer os antigos valores. Nossa taxa de crescimento é de 14% e nós só chegamos a 500 mil infectados, então se quisermos todos infectados temos que aumentar a taxa, não precisamos de um grande aumento. Com o dobro da taxa de crescimento nós atingimos o ponto médio e até o final, todos foram infectados, acabaram os suscetíveis. Observando “infectando”, o fluxo da taxa de infecção, você vê o ápice de infecções, mais ou menos no meio do tempo e então o número de infecções começa a diminuir quando o número de pessoas suscetíveis também diminui. Suponhamos fazer uma nova simulação com variação de parâmetros, chamaremos de “mais infectados”, mudarei o número de infectados inicial para... 10 é demais, vou clicar no parâmetro aqui para refazer a escala, ter negativo ou 0 infectados iniciais não faz sentido então vou alterar para variar de 0 a 20, invés de -10. Agora eu posso variar isso e você pode notar que quando eu movo a seta para a direita, a curva azul aqui se move para a esquerda. Deixa eu retornar, aqui está nosso número de infectados inicial igual a 1 e essa é nossa curva de base, vou mover a seta para direita e, enquanto eu movo, a curva se desloca para esquerda, mas não muda de formato, simplesmente altera seu tempo. Então se você pensar a respeito, isso está dizendo que o fator comportamental não é sensível a esse parâmetro e você pode ver isso através da estrutura do modelo, o número inicial de pessoas infectadas afeta a iniciação ou estado inicial das caixas, mas não tem nenhuma ligação dinâmica com o modelo para alterar o comportamento fundamental da estrutura. Então aumentando o número de infectados inicial de 1 para 2, para 4, para 8, para 16, cada vez estamos

apenas adicionando mais uma multiplicação no processo de infecção. Logo, é como se tivéssemos iniciado o processo de crescimento exponencial algumas multiplicações antes. Se você clicar em “infectando” você pode observar que a curva é essencialmente a mesma, apenas deslocada para a esquerda.

[23:45 - 34:34] Isso é adicionar mais pessoas infectadas inicialmente e se no lugar disso, nós tivermos uma taxa de crescimento maior? Vou reiniciar os parâmetros, na verdade, eu não quero isso, eu quero aproximadamente 28% aqui. Agora vamos analisar a curva azul novamente, observe o que acontece quando eu aumento a taxa de crescimento. A curva se movimenta e também muda de forma, você consegue ver melhor se abrimos “infectando” novamente. Então vou pegar o gráfico, quando eu aumento a taxa, o ápice fica mais alto e a curva mais fina, porque fizemos o processo de infecção ocorrer mais rapidamente, dessa vez alteramos a estrutura de resposta do modelo, porque agora fortalecemos a resposta positiva do ciclo de infecção. Eu vou parar isso e nós vamos observar outro lado dos infectados, com a ideia de que as pessoas realmente se recuperam e para fazer isso eu vou implementar primeiro a minha versão anterior do modelo, então eu vou fechar esse e abrir o original que construímos. Vou mover essa estrutura um pouco para ter espaço e vou adicionar uma caixa para as pessoas recuperadas e um fluxo de recuperação. Vamos assumir que as pessoas se recuperam depois de um certo tempo, esse vai ser só um processo inicial que diz que:

“recuperados” = “infectados” / “duração”*

*Tempo de recuperação.

A duração vamos imaginar que seja, inicialmente, 14 dias, a unidade será dias e o “em recuperação” é o número de infectados dividido pela duração, isso vai nos dar as unidades que queremos que é “infectados”(pessoas) por “duração”(dias), ou seja, pessoas/dia. Preciso checar a equação de “infectado” que agora tem uma saída, “infectando” menos(-) “em recuperação”. E “recuperado” vamos supor que inicialmente seja 0, com unidade de pessoas e tem crescimento pelo fluxo de “em recuperação”. Então vamos chamar isso de “simulação de recuperação” e que ciclo de resposta nós adicionamos? Bem, mais pessoas infectadas, significa mais pessoas em recuperação e consequentemente menos pessoas infectadas, sendo esse um ciclo balanceado de resposta negativa e vamos ver o que ele faz. Se você pensar no original, movimentar o sistema para o outro lado é o mesmo ciclo de resposta positiva da taxa de crescimento. Vamos ligar e ver o que acontece, você pode observar que o número de pessoas recuperadas cresce até aproximadamente 1000 pessoas. A nossa antiga simulação de infecção está impossibilitando a visualização, então vou abrir o painel de controle e retirar aqueles dados. Agora você pode ver que temos pessoas infectadas crescendo até quase 1000, por isso não conseguimos ver, porque anteriormente nós tínhamos 1 milhão, então isso fica

muito pequeno na escala. A população infectada, essa é a população infectada. A população recuperada está resultando a mesma coisa, então o que está acontecendo aqui? Bem, para descobrirmos isso, temos que brincar um pouco com os parâmetros, suponhamos que temos um longo processo de duração, por exemplo 1000 dias, o que isso gera? Isso irá encerrar efetivamente o processo de recuperação, o modelo deverá agora se comportar, mais ou menos, como a versão original. Voltamos agora a quase 1 milhão de infectados, esse é um extremo. Outro extremo é a duração ser de 1 dia e agora temos um comportamento diferente, note que o número de infectados colapsa. Vou parar e resetar para que possamos ter uma escala razoável. Vamos programar aqui para 1 dia, ainda não conseguimos ver, precisamos pegar o gráfico e poderemos ver que o processo de recuperação irá pegar esse infectado e reduzir essencialmente a zero, rapidamente. Por que isso ocorre? Nesse caso, o processo de recuperação está sobrepondo o processo de infecção, a taxa de crescimento diz que temos 14% mais infectados por cada período, mas a duração diz que estamos perdendo 100% dos infectados por dia e isso é simplesmente mais forte. Se mudarmos a duração para... não queremos deixar negativa, não faz sentido, então vamos alterar o intervalo para de 0 a 30 dias. Quando aumentamos a duração para 3 dias, 4 dias, 5 dias, nota-se que o número de infectados decai lentamente e se continuarmos aumentando, em 7 dias os infectados estão quase em equilíbrio. Não sei se consigo chegar mais perto do equilíbrio, sem alterar o parâmetro, esse é o mais perto que vamos conseguir chegar. Então o que está acontecendo? “infectado” está quase constante e isso ocorre porque o processo de crescimento e o processo de recuperação estão quase em equilíbrio, então a taxa de crescimento é 14% que é aproximadamente $1/7$ por dia e a duração é aproximadamente 7 dias, estamos quase em equilíbrio e aumentando a duração retornamos ao crescimento exponencial. Quanto mais alongamos a duração, mais enfraquecemos o processo de recuperação e consequentemente o processo de crescimento e seu ciclo irá dominar. Enquanto a duração for maior que a taxa de crescimento, o processo de recuperação será muito lento e o crescimento vai dominar e vice-versa. Nós podemos deixar isso preciso se alterarmos para 14,2856 que é $1/7$ e colocamos a duração para 7 dias, agora deve estar muito próximo do equilíbrio e, qualquer aumento disso, leva ao crescimento e a diminuição leva ao declínio. Esse é o lado da recuperação do sistema, é linear então ou o crescimento ou o declínio domina.

[34:35 - 40:24] Avancei um pouco e mesclei os dois últimos modelos que fizemos, então agora temos o modelo SIR para epidemiologia. Suscetível, Infectado e Recuperado. Você pode reconstruir essas partes ou pegar o modelo no nosso site. O que temos agora? Temos 3 ciclos: o ciclo vermelho aqui (ficando sem pessoas suscetíveis); o ciclo azul (crescimento de infecções pelo contato de pessoas infectadas com pessoas suscetíveis e transmitindo a doença); e temos o ciclo verde (processo de recuperação). Nosso gráfico mostra atualmente a versão do modelo

que tinha apenas pessoas infectadas e pessoas suscetíveis. O que a adição da recuperação faz com isso? Vamos ver, vou rodar o sistema. Para começar, você nota que a infecção, seu ápice ocorre muito depois, mas eu vou simplificar as coisas tornando a duração extremamente longa, vou colocar 1 milhão de dias e isso desativa o ciclo azul. Agora estamos de volta à versão antiga do modelo, como se a caixa da recuperação e seu fluxo não existisse, então temos basicamente o mesmo comportamento de quando tínhamos apenas suscetíveis e infectados. Agora podemos brincar com a duração e ver o que isso faz com a simulação. Coloquei a duração de 30 dias e observa-se que ainda possui o ápice de infecção, porém menor e mais tarde e claro agora as pessoas estão se recuperando, a caixa de infecção que costumava crescer até atingir toda a população, agora cresce, atinge seu ápice e decai. Ou seja, as pessoas melhoram e eventualmente toda a população vai estar na caixa “recuperado”. Não estamos esperando o suficiente aqui, mas se tornarmos a duração mais curta, digamos 10 dias. Vou pausar, porque perdi minha escala, e recomeçar. Observe enquanto eu movo o parâmetro, quanto menor o tempo de duração menos infectados, o que atrasa o pico de infecção no gráfico. Isso é o que gostaríamos de fazer com os casos. Vamos nos livrar das outras simulações para podermos ver mais claramente o que está acontecendo. Vou retirar as antigas edições das simulações, para focarmos somente no efeito da duração. Quais são as possibilidades de controle existentes? Podemos fazer a duração ser tão curta que as pessoas se recuperam quase imediatamente. Nota-se aqui que agora a infecção foi extinguida imediatamente. Isso é novamente um caso de ciclo dominante, tornando a duração curta, o processo de recuperação ocorre rapidamente o que faz com que os infectados saiam rapidamente do sistema, antes de ter a chance de infectar novas pessoas. Se eu reiniciar, ainda terei algum crescimento, se eu for pelo outro lado, tornando a duração cada vez mais longa, as pessoas têm, cada vez mais, oportunidades de contaminar outros e teremos ápices maiores. Outro parâmetro que podemos brincar é a taxa de crescimento, mas neste momento seria apropriado renomear e fazer esse processo mais físico para que você possa ver como ele afeta a dinâmica. Vamos pausar e modificar a taxa de crescimento e então analisar esse modelo um pouco mais.

[40:25 - 49:45] Nós não gostamos mais da taxa de crescimento como um parâmetro, porque não é exatamente a taxa de crescimento, e sim a taxa de crescimento inicial, mas é muito abstrato aqui e, na verdade, não é necessariamente a taxa de crescimento, porque a taxa de crescimento da população infectada agora também é afetada pelo processo de recuperação. Nós herdamos alguns problemas do nosso modelo extremamente simples, então vamos nos livrar disso e implementar de um modo diferente. Eu vou deletar essas ligações de “infectando” também e construir conceitualmente, então quando alguém é infectado, uma coisa que deve acontecer é o contato com uma pessoa infectada, podemos criar aqui uma variável chamada “contato com infectados” que é o número de contatos com pessoas infectadas que ocorrem em uma unidade de tempo. Isso é “infectado

vezes taxa de contato”, que irá descrever o quanto social os infectados são e o quão exposta é a população geral. Esse é um componente, outra coisa é: quando acontece um contato existe a probabilidade de transmissão, não são todos os expostos que são contaminados pelos infectados. Então existe a “taxa de sucesso do contato”, que também está envolvida e então finalmente um contato só é efetivo em infectar uma pessoa se esse contato ocorrer entre um infectado e um suscetível. Precisamos entender que uma fração dos contatos envolve pessoas suscetíveis e, se assumirmos que as pessoas são bem misturadas, isso é proporcional a parcela da população que é suscetível, então fazemos “suscetível dividido pela população”. E esse é o terceiro termo aqui. Agora podemos começar a defini-los, a fração suscetível é fácil, é “suscetível dividido pela população” e é uma variável dimensionável, ou seja uma fração. “contato com infectados” tem como unidade pessoa/dia, e é a “taxa de contato” vezes “infectado”. “Taxa de contato” é o número de pessoas que tiveram contato com infectados por dia. Vamos supor que número de contato seja 10. E a “taxa de sucesso do contato” é a fração dos contatos ou interações que resultaram em transmissão, então aqui a unidade também é fração e vamos supor que isso seja 10%. Agora podemos escrever nossa equação para a infecção, vou deletar a antiga e construir uma nova. O primeiro termo aqui é quantos contatos existem, o número de contatos de infecção e qual fração disso ocorre com pessoas suscetíveis e finalmente qual fração disso realmente transmite a doença, e isso é pessoas/dia. Nós ainda temos nossa mesma estrutura de ciclos de resposta, mas as coisas estão expostas mais fisicamente. Vou colorir esses novamente. Antes de simularmos, vamos salvar esse modelo. Ele tá bem complexo, então vamos checar também. Temos alguns erros, um deles é que temos pessoas e pessoa mas isso é só um problema de semântica, então vamos em configurações e isso normalmente está no parâmetro padrão, mas nessa versão não está, então eu vou dizer ao sistema que “pessoas” e “pessoa” é a mesma coisa. Veremos o que mais tem aqui, outro erro semântico, só precisamos dizer que “dia” e “dias” é a mesma coisa e agora podemos iniciar. As unidades estão funcionando, então podemos simular. Observe que colocamos 10 contatos por pessoa infectada e cada contato desse tem 10% de chance de efetividade, se todo mundo é suscetível ou quase todo mundo, então teremos um novo infectado por dia, por pessoa infectada. A taxa de crescimento vai ser bem alta aqui, vamos ver o que acontece. Eu não quero salvar em cima de nada, então vou dar outro nome. É a curva azul aqui, observe que a taxa de crescimento está bem alta, vou pausar aqui porque minha taxa de contato está fora da tela, vou abrir um pouco mais de espaço... Isso deve ser suficiente. Agora podemos observar a sensibilidade do parâmetro aqui enquanto eu vario a taxa de contato. Perceba que se diminuir, o ápice também diminui e ocorre mais tarde e é isso que queremos. Se eu ajustar a taxa de sucesso, eu não quero deixá-la negativa, então deixa eu ajustar a escala para de 0 a 1, já que isso é essencialmente uma probabilidade, tem que ser então entre 0 e 1. Novamente diminuindo a taxa de sucesso também ajuda. A coisa mais legal dessa estrutura é que agora começamos a ter ganchos nos parâmetros que são suscetíveis às políticas. Então se por exemplo estivermos cancelando reuniões públicas e isolando

peessoas infectadas, isso vai diminuir a taxa de contato. E se estivermos usando luvas e máscaras, esterilizando as superfícies e não tocando no rosto em público, isso reduz a taxa de sucesso. Você consegue destrinchar isso ainda mais em diferentes tipos de contatos e nas outras dimensões do processo de transmissão, para torná-lo o mais assertivo possível. Existe um problema com essa representação mais física que é não corresponder à descrição que você geralmente encontra em artigos de epidemiologia, eles tendem a ser mais abstratos e com várias letras gregas.

[49:46 - 57:52] Vamos observar agora de um novo modo, eu vou deletar a nova estrutura que criamos e começar de novo na equação de infecção. A infecção ainda depende da existência de pessoas infectadas, vou reconstruir parecido com nossa antiga equação de taxa de crescimento com uma taxa de transmissão que irá depender da duração e de um novo parâmetro chamado número básico de reprodução, no início da epidemia é geralmente chamado de R_0 , é geralmente usado para descrever a dinâmica da força de uma doença particular. Ele encapsula tanto a duração da infecção quanto a taxa de crescimento, a força com que a doença se espalha. O número básico de reprodução é o número de novas infecções, criadas por uma pessoa infectada durante todo o ciclo de infecção. Então a taxa de transmissão, que é o número de infecções por pessoa infectada por unidade de tempo, é calculada pelo R_0 dividido pela duração. E a taxa de transmissão também é modificada pela suscetibilidade ou pelo predomínio de vítimas da próxima infecção. “Infectando” é, como anteriormente, “infectado vezes taxa de transmissão”. Taxa de transmissão é a combinação do R_0 (pessoas/pessoa) dividido pela duração e multiplicado pela probabilidade de contato de sucesso na fração de população suscetível restante, a unidade é fração/dia. Então novamente o R_0 é um número não dimensionável que representa o número de novas infecções por pessoa infectada, existem alguns desentendimentos sobre qual seria para o coronavírus, mas analisando os dados fora da China, onde grandes mudanças eram parte do problema, e fora dos EUA, onde houveram poucos testes até recentemente, chegamos a uma aproximação de pouco mais de 3. Existe um artigo recente da China que diz que era de 3.7 no início e caiu para 0.32 depois de medidas severas de contenção. Esse é um número sem dimensão ou, na verdade, você pode expressá-lo como pessoas por pessoa (pessoas/pessoa) para deixar mais claro. Agora nós temos uma nova versão do modelo e em algumas formas ele é mais conveniente, porque o R_0 abrange como progressivamente e profundamente a doença se espalha pela população e a duração agora define a escala do tempo. Vamos salvar isso como “versão 3” e tentar rodar. E se vamos analisar o coronavírus a duração é de aproximadamente 12 dias, 5 dias de incubação e 7 dias de infecção, e mais duradouro para os casos mais graves. Vamos iniciar, isso é menos agressivo que os parâmetros que deixamos na versão original, mas se aumentarmos o R_0 , conseguimos dinâmicas semelhantes. Acredito que temos que

combinar a duração também, que estava definida arbitrariamente em 7 dias, se eu defini-la para aproximadamente 7 e o R_0 para algo que eu possa encaixar. Você consegue imaginar que, se a curva vermelha fosse dada, nós teríamos passado pelo processo de estimar os parâmetros para esse modelo que se encaixam na trajetória observada da infecção e é assim que essa parametrização alternativa do modelo funciona, de várias maneiras é conveniente e útil, mesmo que não seja tão palpável. Também destaca outra característica importante do que está acontecendo, você pode observar se você usar a taxa de transmissão contra a fração de suscetíveis. Deixa eu criar um novo gráfico customizado para isso. “suscetíveis contra transmissão”, então nosso eixo x vai ser fração suscetível e nosso eixo y vai ser a taxa de transmissão. A escala de suscetíveis vai ser de 0 a 1. Aqui está nosso gráfico Suscetíveis x Transmissão, o que você pode observar é que a taxa de transmissão está diminuindo com o tempo e está essencialmente ocorrendo de forma linear, enquanto o número de suscetíveis se aproxima de 0. Nós pegamos o gráfico não linear de suscetíveis decaindo e mapeamos em um espaço diferente para que possamos ver o que está realmente acontecendo com a taxa de transmissão. A taxa de transmissão está diminuindo sigmoidalmente (no formato da letra grega sigma) mas como função da fração suscetível está diminuindo linearmente. O modelo começa aqui em cima, onde existe alta transmissão e muitos indivíduos suscetíveis e, na verdade, permanece assim por um longo período e então começa a diminuir rapidamente quando ultrapassa o ponto médio e eventualmente se encerra, nesse caso ele termina sem nenhuma pessoa suscetível.

[57:53 -] Nós podemos observar isso também em uma esfera temporal, se fizermos outro gráfico, dessa vez vamos colocar pessoas no sistema. Então esse vai ser os suscetíveis, os infectados e os recuperados, vamos colocar todos no mesmo eixo. E aqui está, você vai notar que a população infectada tem seu ápice aqui, em aproximadamente “tempo=20”, e nesse momento os suscetíveis estão em aproximadamente 10% do seu valor original. Se você voltar para esse gráfico, suscetíveis em 10% corresponde a uma taxa de transmissão de aproximadamente 12.5% e isso não coincidentemente é o inverso da duração, então esse é o ponto em que “infectando” e “em recuperação” estão em equilíbrio. Se você observar novamente o gráfico das pessoas... nós precisamos de um novo gráfico que mostre o fluxo das pessoas, vou chamá-lo de “fluxo de pessoas”. Temos “infectando” e “em recuperação” e queremos os dois na mesma escala, e se analisarmos isso você verá que aqui no tempo=20 é o ápice dos infectados, pois o número de novas infecções é menor que número de pessoas em recuperação. Isso é útil para entender a dinâmica do que está acontecendo aqui. Isso é uma instância do que chamamos de ciclo de mudança de dominância, onde o modelo inicia crescendo exponencialmente, o número de infectados é inicialmente baixo e o número de suscetíveis é quase ilimitado, então a doença cresce rapidamente em uma taxa natural, descoberta pela frequência de contato social e a transmissibilidade. Mas

então atingimos o ponto de inflexão, inicialmente esse ciclo azul é o dominante, logo atingimos o ponto de inflexão, onde ciclo vermelho ou o ciclo de saturação que está ficando sem suscetíveis se torna dominante. Isso diminui a velocidade da infecção, então essa curva começa a aumentar e “infectando” chega no seu ápice, nesse momento a taxa de infecções diminui ao ponto de ser menor que a taxa de recuperação, e então o ciclo verde começa a dominar. Esse é o ápice no número de infectados e com esse ciclo dominante de resposta negativa o que ocorre é o declínio exponencial até chegar a 0. É claro que o que queremos não é que a doença siga seu próprio fluxo, mas que siga o fluxo ditado por nós. Então podemos modificar um pouco mais para adicionar uma política. Vamos chamar de número básico de reprodução, vou criar o R_0 que vai ser 3.5 e outra variável chamada fração de política de redução, que é a quantidade de redução que podemos obter na taxa de transmissão e infecção através de políticas de distanciamento social. Adicionarei também o parâmetro de duração de política, pois não podemos manter para sempre. Eu deveria provavelmente arrumar mais espaço aqui, então movemos esses gráficos para baixo. O R_0 vai ser o R_0 inicial modificado por tudo o que conseguimos fazer das políticas, vamos colocar então 3.5 (e novamente esse é um número não dimensionável ou pessoas/pessoa), a fração de políticas de redução está na escala de 0 a 1, com unidade fração. E sobre a duração da política: vamos assumir que conseguimos manter por 90 dias. Vou implementar isso com a função de pulso, digamos que o número básico de reprodução seja R_0 vezes 1 menos a função STEP multiplicado pela “fração de política de redução vezes 10”, eu deveria criar um parâmetro para isso mas não vou, e então vamos reverter a política em um período mais a adiante que vai ser 10 mais a duração da política. Então isso diz que o R_0 iniciou como um valor constante que vai diminuir e eventualmente aumentar novamente. Para complementar vamos fazer o parâmetro “tempo inicial da política”, isso é no 10º dia, o que é bem rápido, vamos experimentar. Vou adicionar o parâmetro aqui e agora temos um painel de controle que essencialmente nos permite bloquear o contato social e liberá-lo novamente quando estivermos prontos para isso. Vamos nomear de Políticas SIR, vou salvar o modelo... ou não. Então vamos nos livrar da 2ª simulação. Estamos comparando um caso base com um potencial política de redução, mas a política não está ativa ainda, porque a fração de política de redução é 0, então vamos aumentar e fazer como o artigo que eu li recentemente sugeriu: tentar reduzir a transmissão da infecção em 90%. Então aqui está acontecendo bem cedo na epidemia, a epidemia está agora mais ou menos extinguida, mas isso depende de quando as políticas iniciam. Vejamos, o ápice de infecções ocorre no 40º dia, se iniciarmos as políticas no dia 40 não temos muita alteração, então precisamos estar, pelo menos, um pouco na frente da curva se queremos melhorar a situação. Vamos tentar no dia 30, isso tem um impacto drástico no sistema, na natureza do crescimento exponencial, pequenas diferenças iniciais podem se tornar diferenças enormes mais a frente. Então o tempo é realmente crítico aqui, quando alteramos a escala para 0 a 40, ou a 50, podemos ver o quanto o tempo é importante aqui. E se diminuíssemos a duração das políticas? 90 dias é muito tempo e se não conseguíssemos fechar a economia por

tanto tempo e se só tivéssemos 30 dias? Agora nós temos a infecção inicial mais a repercussão de quando retirarmos as políticas. Se formos espertos e o vírus não gostar do clima quente, podemos planejar para que isso ocorra no verão. Mas isso se torna um trade off bem complicado. Existe, na verdade, um artigo muito bom de Harvard que explora a dinâmica dos dois ápices da infecção, que você pode obter por políticas de limitação de interação pública. Eu acredito que é isso que podemos explorar agora com o modelo. Isso começa a ser bastante interessante e existem muitas outras possibilidades do que podemos fazer com isso agora. Nós temos esse framework básico, podemos expandir o modelo para considerar fatalidades, para distinguir expostos de assintomáticos, ou período de incubação do período ativo de infecção, esse é o modelo SIR. Nós podemos observar viajantes, podemos criar uma rede desses modelos e parametrizar o fluxo de viagem que existe entre regiões ou ao redor do mundo. Esse é um framework muito produtivo para tratar desse problema e espero explorar mais em vídeos futuros. Obrigado por assistir!