

O Efeito Messiânico causado pelo Altruísmo Patológico

Thiago Sousa
thiago.sousa@tecnico.ulisboa.pt

Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

Maio 2019

Resumo

Darwin definiu a evolução como um processo dinâmico baseado na competição e na luta pela sobrevivência. Nesta busca, ele deparou-se com um grande paradoxo ao perceber que a cooperação era abundante na Natureza. Desde então, entender como a cooperação pode evoluir permanece um desafio aberto para uma ampla gama de disciplinas, em situações em que indivíduos egoístas são encorajados pela evolução. Nesta dissertação, apresentamos um novo estudo sobre o impacto de comportamentos patológicos na evolução da cooperação. Estes indivíduos seguem a sua própria agenda, seja desertando ou cooperando, incondicionalmente. Para analisar o seu impacto, recorremos a diferentes dilemas sociais e às ferramentas da teoria dos jogos evolutivos e da ciência em rede. Incorporamos diversidade social ao utilizarmos interações em redes livre de escala. Neste tipo de rede, a maioria dos indivíduos tem poucas conexões e poucos indivíduos têm muitas conexões (Hubs). Mostramos que quando se converte estes indivíduos em altruístas patológicos, são necessários apenas alguns para ter um impacto positivo e significativo em toda a rede. levando a população como um todo à cooperação. Altruístas e egoístas patológicos podem ser vistos como seres humanos com preferências pró-sociais, mas também como entidades artificiais projetadas para um fim específico. De facto, em breve viveremos numa sociedade híbrida, composta por seres humanos e agentes artificiais. Neste contexto, sugere-se que algumas entidades cuidadosamente projetadas, colocadas em posições centrais na rede, seriam suficientes para levar populações inteiras a comportamentos pró-sociais. No entanto, o inverso ocorrerá se essas entidades forem desertores patológicos.

Keywords: Redes complexas, Cooperação, Teoria evolutiva dos jogos, Altruísmo, Dilemas Sociais

1. Introdução

Derivada do latim *alter* (outros), a palavra altruísmo foi introduzida pelo filósofo August Comte no século XIX. Comte acreditava que o indivíduo devia subordinar-se a uma existência fora de si para encontrar nela a fonte da sua estabilidade. Com este pensamento definiu altruísmo no contexto sociológico como: "viver para os outros" *vivre pour autrui* [4].

Embora as pessoas tendam a olhar primeiramente para si próprias, a cooperação acontece e desempenha um papel fundamental na evolução até os dias de hoje. Os nossos antepassados, dotados da capacidade de trabalhar em conjunto e para um bem comum foram capazes de assegurar mais alimentos, melhor proteção e cuidados infantis, melhorando assim o sucesso reprodutivo das suas populações [11].

O emergir de comportamentos cooperadores e altruístas tem intrigado filósofos e cientistas nos últimos séculos. Quando Darwin definiu seu conceito evolutivo como um mecanismo baseado na competição e na luta pela existência, deparou-

se com um grande paradoxo ao perceber que a cooperação existia em abundância.

Para tentar explicar este paradoxo, Darwin recorreu a argumentos de alto nível que hoje em dia podem ser olhados como formulações incipientes dos princípios de seleção de parentesco ou seleção a vários níveis. No primeiro caso, a cooperação é mais provável em indivíduos geneticamente relacionados, enquanto que, no segundo caso, a cooperação é favorecida pela competição entre grupos.

Nas últimas décadas, os cientistas têm recorrido a Teoria dos Jogos Evolutivos (TJE) para melhor compreender os fenómenos relacionados com as dinâmicas de evolução. Esta teoria foi formalizada em 1973 por John Maynard Smith e George R. Price [15]. A principal ideia presente nesta teoria é a de que grande parte dos comportamentos envolvem a interação entre muitos indivíduos de uma certa população, e o sucesso de cada indivíduo depende de uma ou mais estratégias adotadas, como por exemplo, cooperar ou não cooperar em uma determinada situação [5]. Dados

um conjunto de estratégias e alguns critérios matemáticos, esta teoria pode ser usada para tentar prever qual a estratégia que prevalecerá ao fim de algumas interações.

Em TJE, o estudo da cooperação envolve tensões entre os interesses individuais e os relacionados ao bem comum de uma sociedade ou de um grupo. As tensões são descritas através de dilemas. Num dilema, a cooperação é definida como o ato de um indivíduo pagar um custo ao outro, e em troca receber ou não algum benefício. A TJE quando combinada com o Dilema do Prisioneiro (DP) permite investigar como o comportamento cooperativo coletivo pode desenvolver-se em sociedades onde as ações egoístas, não cooperadoras, produzem um maior sucesso a curto prazo para um indivíduo.

Esta questão foi abordada inicialmente em [13], onde foi desenvolvido um modelo experimental capaz de estudar a dinâmica evolutiva da cooperação nos dilemas sociais em populações estruturadas homogêneas e heterogêneas, recorrendo à TJE e dilemas sociais. Neste contexto, indivíduos são definidos por vértices de uma rede social (ou um grafo) e as arestas definem quem interage com quem. Quando a população é homogênea, de tal forma que todos os indivíduos têm o mesmo número de conexões, a estratégia de desertar prevalece e os cooperadores têm um fim trágico, sendo completamente extintos no DP. Entretanto foram acumuladas evidências convincentes de que uma infinidade de Rede de Contatos (RdC) do mundo real, são na sua maioria heterogêneas, nas quais alguns indivíduos têm muito mais conexões do que outros. Ao introduzir uma forte heterogeneidade no modelo em discussão, os resultados mostraram que a cooperação foi favorecida de forma significativa.

A heterogeneidade aparenta ser um poderoso mecanismo para o desenvolvimento da cooperação. Contudo, este sucesso pode estar relacionado com outros fatores da estrutura de uma população.

Existem indivíduos que, por várias razões, são reticentes em mudar as suas escolhas, seja por convicções religiosas, políticas, ou outras. Sabendo que Altruístas Patológicos (APs) são indivíduos predestinados a cooperarem sempre não se deixando induzir pelas tentações da ganância ou pelo medo, principais fatores que podem levar à não-cooperação, estará o sucesso da evolução humana relacionado de alguma forma com este conceito.

Qual será o impacto de introduzir indivíduos APs no modelo acima referido? Em particular, qual será o impacto se os APs tiverem uma alta influência na população, ou seja, um elevado

número de conexões? Por outro lado, estes comportamentos patológicos podem também aparecer na sua forma maliciosa, onde Egoístas Patológicos (EPs) podem ser utilizados para destruir a cooperação.

Esta Dissertação abordará esta questão analisando o emergir da cooperação com base nos três dilemas mais populares e extensamente estudados em dinâmicas evolutivas, os detalhes estão na secção 3.

Será mostrado que ao introduzir-se APs com uma alta influência na população, o emergir dos cooperadores é favorecido de forma muito significativa, representando um impulso importante para o seu desenvolvimento.

Os resultados aqui apresentados podem ajudar no estudo de um novo campo da Computação Pró-social, visando compreender, prever e promover a pró-socialidade entre os seres humanos, através de agentes artificiais e sistemas multiagentes.

Se pensarmos que num futuro próximo viveremos em uma sociedade híbrida onde seres humanos e agentes artificiais irão conviver uns com os outros, podemos pensar na seguinte pergunta: Quais são as condições e mecanismos que levam as sociedades de agentes e humanos a serem mais pró-sociais? Além de promover o altruísmo nos seres humanos, se tivermos a capacidade de desenvolver agentes artificiais que sejam APs, podemos estar no caminho certo, onde os comportamentos pró-sociais possam surgir em maiores escalas.

2. Trabalho Relacionado

Se a teoria da seleção natural propõe uma grande e exaustiva competição entre os replicadores envolvidos, como é que a cooperação consegue sobreviver neste meio hostil? Como exemplo, pode pensar-se no caso das ações coletivas humanas, como proteger ou caçar. Sem a cooperação mútua entre os indivíduos envolvidos, estas tarefas do dia a dia poderiam tornar-se facilmente num fardo pesado, colocando em causa a sobrevivência da própria humanidade.

Começa-se por se definirem alguns mecanismos básicos conhecidos como propulsores para a cooperação.

2.1. Seleção de parentesco

Kin Selection baseia-se na parentalidade genética entre diferentes organismos, ou seja, se partilham o mesmo gene. Segundo a regra de Hamilton [6], a cooperação existirá se o coeficiente de parentesco genético r for maior que o custo-benefício do ato ($r > c/b$), onde c define o custo do indivíduo que realizou o ato e b o benefício adquirido pelo beneficiário do ato altruísta.

2.2. Reciprocidade na rede

As populações conhecidas como “bem-misturadas” onde todos os indivíduos interagem igualmente entre si, serviram durante muitos anos como padrão para o estudo das dinâmicas evolutivas [7]. Entretanto, em populações reais, como a que se vive hoje em dia, encontra-se uma estrutura diferente, no sentido de que alguns indivíduos têm muito mais contatos que outros, o que resulta num número diferente de interações. Este tipo de população é considerada heterogênea.

Para estudar melhor este tipo de estrutura, recorre-se à teoria evolutiva dos grafos. As pessoas de uma certa população são os vértices do grafo e as arestas determinam quem interage com quem. Analogamente, pode dizer-se que as arestas associadas a um vértice define a sua vizinhança.

Pode pensar-se na seguinte configuração: um grafo onde um vértice adota uma de duas estratégias, cooperar ou não-cooperar. Cooperadores pagam um custo c para obter um benefício b . Não cooperadores não têm custos e os seus vizinhos não recebem nenhum benefício [9]. Nesta configuração os cooperadores podem prevalecer formando grupos onde ajudam um ao outro acumulando elevados benefícios.

Através de simulações computacionais, os jogos em grafos têm contribuído significativamente para o estudo das dinâmicas evolutivas em populações heterogêneas. Para haver favorecimento da cooperação, o benefício custo, b/c , precisa de ser maior que k (número médio de vizinhos na rede).

No artigo [12], “*Evolutionary dynamics of social dilemmas in structured heterogeneous populations*” foi desenvolvido um modelo baseado na Teoria dos Jogos Evolutivos (TJE) e em Dilemas Sociais onde é estudado a evolução da cooperação em populações heterogêneas. As simulações demonstraram que uma forte heterogeneidade na rede representa um poderoso mecanismo para o desenvolvimento da cooperação.

3. Dilemas Sociais

Os dilemas podem ser descritos através de tensões que levam o indivíduo a pensar em si próprio ou para o bem comum. Esta tensão está diretamente relacionada com dois fatores, o medo e a ganância. Entre os principais dilemas temos:

3.1. Monte de Neve

Uma pessoa vai a conduzir tranquilamente pela estrada no inverno e de repente um grande bloco de neve cai e bloqueia a estrada. Uma vez que as pessoas desta aldeia são muito ocupadas e, sozinhas, demorariam imenso tempo a limpar a estrada, a tentação para não sair do carro é muito grande. Entretanto, mais cedo ou mais tarde a es-

trada terá de ser limpa. Ainda assim, se sair do carro dificilmente terá ajuda porque os indivíduos desta aldeia são considerados egoístas.

Cooperação mútua não seria a estratégia mais racional aqui, mas sim esperar e ver o que o outro escolhe. No pior caso, todos esperam e não há progresso.

3.2. Caça ao Veado

Jean-Jacques Rousseau em *Discurso sobre a Origem e os Fundamentos da Desigualdade entre os Homens* descreveu a seguinte situação: duas pessoas saem para caçar, cada um pode caçar um veado ou uma lebre. Cada caçador tem de escolher uma ação sem saber a escolha do outro. A tensão acontece porque se um escolher caçar o veado, irá precisar da ajuda do outro para obter sucesso. Para caçar a lebre não é preciso ajuda, mas não tem tanta quantidade de carne como o veado [14].

A não cooperação mútua emerge como sendo a estratégia mais favorável. O medo por não saber se o outro irá cooperar ou não, exerce nos caçadores o desejo de arriscar pelo seguro, caçando a lebre e não se ajudando mutuamente, pois “Mais vale um pássaro na mão do que dois a voar”

3.3. Dilema do Prisioneiro

Primeiramente enquadrado por Merrill Flood e Melvin Dresher em 1950, o dilema do prisioneiro foi apenas formalizado em 1992 por Albert W. Tucker e descreve a seguinte situação [8]:

dois membros de um grupo de malfeitores são presos. Cada preso está confinado sozinho e não há maneira de comunicarem um com o outro. O promotor não tem evidência suficiente para condenar o par à acusação principal, portanto os prisioneiros esperam apanhar um ano de prisão por uma acusação inferior. No entanto, o promotor oferece a cada prisioneiro um acordo: a oportunidade de traição, confessando que o outro cometeu o crime ou permanecer em silêncio. Se ambos os prisioneiros A e B cometerem traição, apanharão 2 anos de prisão cada. Se A trair e B permanecer em silêncio, A sairá em liberdade e B apanhará 3 anos de prisão (e vice-versa). Em último caso, se A e B permanecerem em silêncio, ambos ficarão presos por 1 ano.

Neste dilema, ambas as tensões mencionadas no jogo Monte de Neve (MN) e Caça ao Veado (CV) estão presentes e a decisão mais racional passa por ambos se traírem mutuamente, mesmo que a melhor opção seja permanecer em silêncio.

Esta decisão racional pode ser explicada pelo seguinte argumento: Se A cooperar (permanecer em silêncio), B deveria não cooperar porque é sempre melhor ir em liberdade do que permanecer um ano na prisão. Por outro lado, se A não co-

operar, B deveria não cooperar porque servir dois anos é melhor do que três.

Este dilema e os dois mencionados anteriormente serão discutidos formalmente na secção 4.3.

3.4. Pró-Sociabilidade com Agentes Autónomos

Um novo tipo de sociedade está a emergir, onde humanos e agentes autónomos irão coexistir. Nesta sociedade híbrida, podem os agentes autónomos serem utilizados para promover comportamentos pró-sociais? Tais comportamentos podem ser vistos como voluntários e destinados a beneficiar o próximo. O ato, considerado altruísta, deve ocorrer sem expectativas de recompensas materiais ou sociais para o benfeitor [1]. Uma vez que a cooperação desempenha um papel fundamental na sociedade e está diretamente ligada aos comportamentos pró-sociais, surge uma nova área chamada *Computação pró-social*, que visa compreender, prever e promover a sociabilidade entre os seres humanos, através de agentes artificiais e sistemas multi-agentes [10].

4. Modelo

Nesta secção é apresentado o modelo da solução proposta. O modelo é baseado em dinâmicas evolutivas de dilemas sociais em populações heterogéneas estruturadas. O estudo do impacto de agentes Altruístas Patológicos (APs) na evolução da cooperação consiste em aplicar a TJE aos dilemas sociais mais populares e estudados: (i) Dilema do Prisioneiro (DP), (ii) CV e (iii) MN, como descrito detalhadamente na secção 3. Seguidamente é descrito em maior detalhe o modelo, que tem como base o modelo desenvolvido em [12].

4.1. Populações

Uma população é definida por um conjunto de agentes diretamente conectados ou não, e é representada por um grafo. Cada indivíduo é composto pelos seguintes atributos: grau; pagamento acumulado; estratégia; postura.

O grau representa o número de conexões que um indivíduo tem com os outros indivíduos da população. Após a interação entre dois agentes, cada um recebe um pagamento e o seu valor varia, consoante exista cooperação ou não entre os dois agentes. Estes valores serão descritos em mais detalhes na secção 4.3. A estratégia pode tomar dois valores, cooperar ou desertar. Desertar é definido como o ato de não cooperar. A cada indivíduo também é atribuída uma postura, caso seja altruísta patológico, egoísta patológico ou não apresente tais comportamentos. Após uma indivíduo interagir com todas as suas conexões, pode mudar de estratégia. Um altruísta, sendo cooperador nunca mudará a sua estratégia. O mesmo aconte-

ce com o egoísta, que é desertor. A Rede de Contatos (RdC) social em que se vive, é claramente heterogénea [2]. Neste estudo são utilizadas redes com um forte grau de heterogeneidade para torná-lo o mais real possível.

4.2. População Heterogénea

Os grafos heterogéneos correspondem a populações nas quais diferentes agentes exibem padrões distintos de conectividade, apresentando a coexistência de conexões locais (bairros) e não-locais. A rede de contatos existente na sociedade tem um grau de heterogeneidade elevado. Quando uma rede heterogénea exibe uma distribuição de grau que segue uma lei de potências do tipo $d(k) \approx k^{-\gamma}$ em que $\gamma \approx 2$, está-se perante redes do tipo redes livre de escala (*scale-free networks*) [3]. Neste tipo de rede emergem os conhecidos *Hubs*, agentes com um número elevado de conexões que interagem com uma grande fração da população.

4.2.1 Implementação da População

Para implementar este tipo de rede recorreu-se à teoria dos grafos e ao algoritmo Barabási-Albert. Este algoritmo é baseado em duas características: crescimento e ligação preferencial.

A cada passo de tempo t , o algoritmo produz um grafo com $n = t + m_0$ vértices e mt arestas. Os novos vértices ligam-se aos vértices já existentes com uma probabilidade proporcional ao seu grau. Analogamente a uma RdC social, os vértices de um grafo representam os agentes, e as ligações, as suas conexões diretas.

4.3. Jogos e Dilemas Sociais

A interação entre os agentes é modelada em termos de jogos com duas pessoas, onde os jogadores podem adotar a estratégia de cooperar ou desertar ao interagir uns com os outros.

Se ambos os jogadores cooperarem (cooperação mútua) recebem uma recompensa R (sem perda de generalidade, $R = 1$). Deserção mútua leva à punição P ($P = 0$, normalizando a vantagem da cooperação mútua sobre a deserção mútua para 1 em todos os jogos). Outras duas possibilidades podem ocorrer quando um jogador coopera e o outro deserta. Se o jogador A cooperar e o jogador B desertar, então A receberá S (*Suckers'Payoff* (SP)) e B receberá T (*Temptation* (T)), ver a tabela 1.

Os três dilemas surgem naturalmente de acordo com a ordem relativa destes quatro tipos de pagamentos: O jogo MN, para $T > 1 > S > 0$; O jogo CV, para $1 > T > 0 > S$; e o jogo DP, para $T > 1 > 0 > S$.

A tensão torna-se aparente quando as escolhas

		jogador 1	
		C	D
jogador 2	C	R	S
	D	T	P

Tabela 1: Matriz de Pagamentos associada aos dilemas estudados: Se ambos os jogadores cooperarem (C-C), recebem uma recompensa R ; Se ambos os jogadores desertarem (D-D), recebem uma punição P ; Se um jogador cooperar e o outro desertar (C-D), recebem o pagamento do tolo S e o pagamento da tentação T respetivamente, e vice-versa.

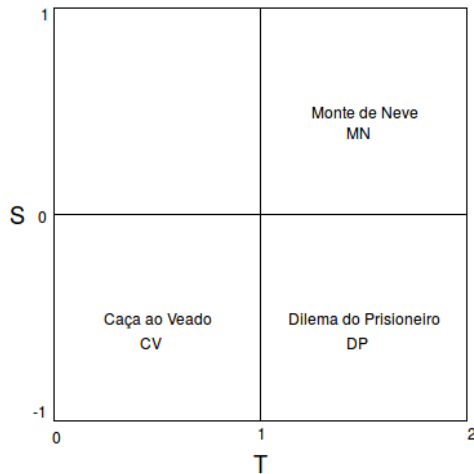


Figura 1: Espaço Quadridimensional abrangido pelos dilemas: MN, CV e DP. Os três dilemas surgem de acordo com a ordem relativa destes quatro tipos de pagamentos: O jogo MN, para $T > 1 > S > 0$; O jogo CV, para $1 > T > 0 > S$; e o jogo DP, para $T > 1 > 0 > S$.

preferidas de cada jogador levam a ações individuais egoístas resultando em deserção mútua ou unilateral, apesar do facto de a cooperação mútua ser mais benéfica. Concretizando, a tensão surgirá quando os jogadores preferirem a deserção unilateral à cooperação mútua ($T > 1$). Quando os jogadores preferirem a deserção mútua à cooperação unilateral ($S < 0$), ou quando ambas as situações surgirem, que é precisamente o que acontece no dilema MN, CV e no DP, respetivamente. Formalmente, estes dilemas abrangem um espaço quadridimensional, ver Figura 1. Após normalizar a cooperação mútua ($R = 1$) e a deserção mútua ($P = 0$), fica-se com dois parâmetros, T e S . É estudado o comportamento em todos os dilemas tendo em consideração os seguintes intervalos $0 \leq T \leq 2$ e $-1 \leq S \leq 1$, suficientes para caracterizar o jogo em estudo.

4.4. Teoria dos Jogos Evolutivos em Grafos

Para todos os valores de ($R = 1, P = 0, 0 \leq T \leq 2$ e $-1 \leq S \leq 1$), a evolução é obtida através de

dinâmicas replicadoras em populações finitas. S e T são definidos em intervalos de 0.1 dentro dos seus limites, assim sendo $S \in [1, 0.9, 0.8, \dots, -1]$ e $T \in [0, 0.1, 0.2, \dots, 2]$.

A dinâmica é obtida pela seguinte transição de probabilidade: em cada ciclo de vida (uma geração), todos os pares de agentes diretamente conetados a e b jogam entre si numa única volta guardando os seus pagamentos acumulados Pa e Pb . No final de cada geração, as estratégias (cooperar ou desertar) são atualizadas simultaneamente. Quando a está a ser atualizado, escolhe de forma aleatória um dos seus vizinhos x . Se $Px > Pa$, então a passa a escolher a estratégia de x com a probabilidade dada por: $(Px - Pa) / [X * Y]$, onde $X = \max(K_a, K_x)$ e $Y = ((\max(T, 1) - \min(S, 0)))$. K_a e K_x representam o número de conexões (grau) de a e x respetivamente. Este denominador assegura uma normalização apropriada da probabilidade de transição.

4.5. Simulações

As simulações foram realizadas em grafos com $N = 10^4$ vértices e um grau médio de conectividade $Z = 4$ para grafos heterogéneos e $Z = (N - 1)$ para grafos homogéneos. Para cada combinação de valores S e T foram realizadas 100 simulações, que correspondem a 10 corridas para cada um dos 10 grafos diferentes. Numa corrida são obtidas as frequências do número de cooperadores e desertores realizando uma média correspondente a 1.000 gerações, depois de um tempo transitório de 10.000 gerações.

As simulações começam com uma percentagem igual de estratégias (cooperadores e desertores) distribuídos aleatoriamente pelos elementos da população. Assim, todos os vértices são inicialmente configurados com uma estratégia, e não é dada nenhuma vantagem inicial aos cooperadores ou desertores.

A topologia do gráfico permanece congelada ao longo da evolução, ou seja, não são adicionados ou removidos vértices, e as suas conexões permanecem inalteradas.

5. Resultados e Discussão

O principal objetivo desta secção é apresentar o impacto causado na dinâmica da evolução dos cooperadores após serem distribuídos pela população agentes APs e Egoístas Patológicos (EPs). A distribuição é realizada de forma aleatória ou a partir dos nós com um alto número de conexões (*Hubs*). A população é representada pelos dilemas: Monte de Neve, Caça ao Veado e Dilema do prisioneiro.

5.1. Distribuição dos APs no Dilema do Prisioneiro

Para poder analisar o impacto na população ao introduzir APs, decidiu primeiramente estudar-se uma pequena amostra do DP, antes de aplicar a dinâmica para toda a população, que inclui também o MN e o CV. O objetivo inicial era perceber o impacto na evolução dos cooperadores, ao distribuir gradualmente APs em pontos específicos da população.

A distribuição dos APs foi realizada de duas formas, aleatoriamente ou a partir de *Hubs*. Será possível reverter o cenário trágico para os cooperadores em algumas zonas da população, onde chegaram a ser extintos na simulação realizada no modelo original ?

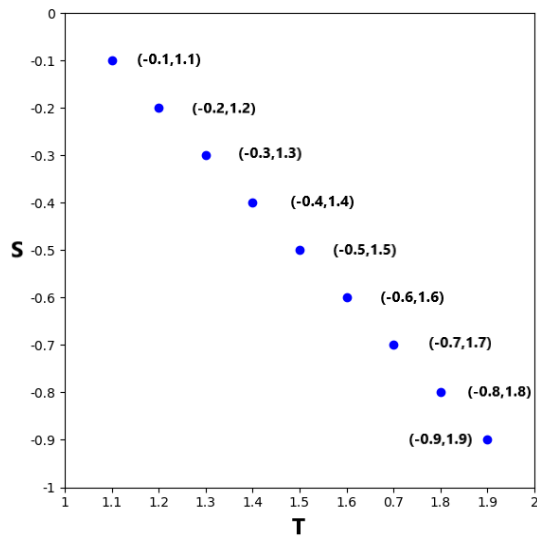


Figura 2: Dilema do Prisioneiro. Cada ponto representa uma combinação de valores que categorizam uma zona dentro do dilema. Estes valores representam os tipos de pagamentos *Sucker's Payoff* e *Temptation*.

Os valores dos parâmetros que caracterizam o dilema do prisioneiro variam entre $1 < T < 2$ e $0 < S < -1$. Antes de aplicar a dinâmica para todas as combinações de valores (ver 5.2), estudou-se uma combinação de valores S e T pré-definidos, ao qual se deu o nome de *lambda*. Para facilitar a apresentação dos resultados, os valores de S e T foram parametrizados para um respetivo *lambda*, como consta na tabela 2

Os valores escolhidos percorrem a diagonal do dilema, (ver a imagem 2). Quanto menor for o valor de S e maior o valor de T , menor é a probabilidade de sobrevivência para os cooperadores. Neste caso, está-se perante zonas da população onde o “medo” e a “ganância” representados pelos parâmetros S e T são elevados.

Uma vez definidos os *lambdas*, tentou perceber-se que percentagem de APs seria preciso dis-

S	T	$lambda$
-0.1	1.1	1
-0.2	1.2	2
-0.3	1.3	3
-0.4	1.4	4
-0.5	1.5	5
-0.6	1.6	6
-0.7	1.7	7
-0.8	1.8	8
-0.9	1.9	9

Tabela 2: Parametrização dos valores S e T para o valor *lambda*.

tribuir pela população para alcançar no final da dinâmica 60% de cooperadores. No modelo original a fração de cooperadores foi 0% para os valores de $S \in [-0.7, -0.8, \dots -1]$ e $T \in [1.3, 1.4, \dots, 2]$. É importante lembrar que para os valores de $S \in [0, -0.1, -0.2]$ e $T \in [1, 1.1, 1.2]$ não foi preciso distribuir APs, uma vez que já satisfaz a condição estudada. Para estes valores o número de cooperadores já é de 100%. Assim sendo, nos resultados seguintes estes valores não serão referenciados.

Foi possível alcançar 60% de cooperadores para todas as combinações de *lambda*, tanto na distribuição realizada de forma aleatória como por *Hubs*. Para a distribuição aleatória, o número necessário de APs foi sempre muito alto, representando uma taxa de esforço elevada.

Na distribuição realizada pelos *Hubs*, o número de APs necessários baixou de forma muito significativa, ver a figura 3. Para o *lambda* igual a 5, foram precisos apenas 5% de APs, o que representa uma diferença de 55% se comparar com a distribuição aleatória.

O número de APs precisos é sempre mais baixo quando a distribuição é realizada pelos *Hubs*, o que revela o alto poder de influência que os *Hubs* exercem numa população do tipo Livre de Escala (LE).

5.2. Distribuição dos APs pelos dilemas CV, MN e DP

Nesta secção será mostrado o impacto causado pelos APs na evolução da cooperação em toda a população, caracterizada pelos três dilemas em estudo: Monte de Neve; Caça ao Veado; e Dilema do Prisioneiro. Os APs serão distribuídos de forma aleatória e pelos *Hubs*.

5.2.1 Distribuição realizada pelos *Hubs*

A influência que os nós, com um número elevado de conexões, têm na população é sem dúvida relevante e, ao distribuirmos os APs pelos *Hubs*, foi possível notar, claramente, o aumento na fração de cooperadores (ver a figura 4). O maior impacto foi visível no Dilema do Prisioneiro, que representava o maior desafio para a sobrevivência

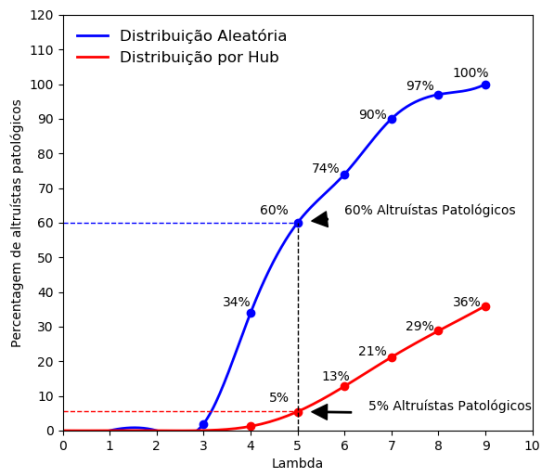


Figura 3: Evolução da cooperação. Para cada valor de $\lambda \in [0, 9]$ é mostrado a porcentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 60% de cooperadores. Os altruístas patológicos foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos Hubs

dos cooperadores. Ao distribuírem-se os agentes patológicos, gradualmente, de 10 em 10%, foi possível estudar a taxa de crescimento da fração de cooperadores ao longo do tempo. No Dilema do Prisioneiro foram necessários apenas 10% de APs para se obter uma taxa de crescimento de 36%. Para converter 96% da população em agentes cooperadores, foi necessário distribuir 40% de agentes patológicos. Por outras palavras, foi possível reverter o fim trágico dos cooperadores no modelo original.

5.2.2 Distribuição realizada aleatoriamente

Após serem distribuídos APs de forma aleatória, obteve-se um impacto quase marginal, quando comparado com a distribuição por Hubs. Foram precisos 40% de APs para que houvesse algum impacto, embora pequeno na fração de cooperadores. Para o dilema DP, os agentes não-cooperadores ainda representam uma ameaça na evolução da cooperação. A figura 5 mostra o crescimento da fração de cooperadores por cada dilema, e pode notar-se um crescimento não linear ao número de APs distribuídos, o que neste caso representa um baixo impacto na população.

O impacto causado na fração dos cooperadores ao efetuar uma distribuição aleatória de APs é pouco relevante quando comparada com a distribuição realizada por Hubs. Após distribuir 10% de APs por Hubs, observa-se um aumento de 22.4% na fração de cooperadores ao fazer uma média por todos os dilemas. Para a mesma per-

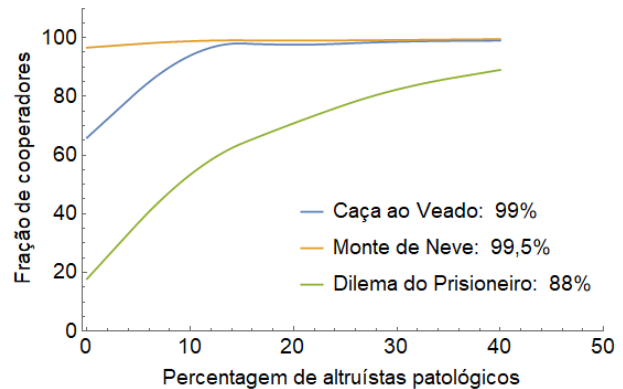


Figura 4: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de APs distribuídos pelos Hubs. O dilema DP obteve o maior impacto, foram precisos apenas 10% de APs para que houvesse uma taxa de crescimento de 35%, e a fração de cooperadores passasse a 50% no final da dinâmica. A seguir está o dilema CV, com um taxa de crescimento de 31%, com apenas 10%. Como era de se esperar, a taxa de crescimento no dilema MN é baixa, uma vez que no modelo original, os cooperadores representavam mais de 97% da população.

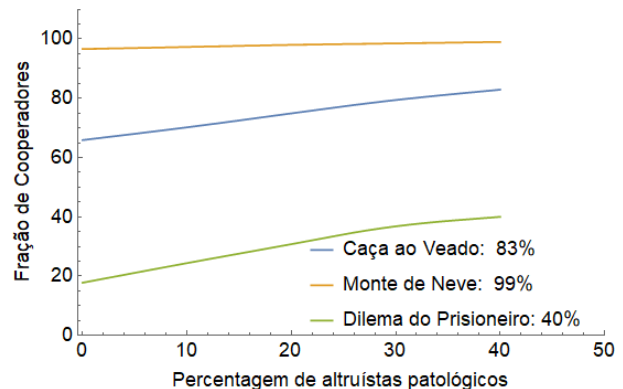


Figura 5: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de APs distribuídos aleatoriamente. Para o dilema do prisioneiro, a taxa de crescimento não ultrapassou os 23%, o que representa 40% da população final de cooperadores. Para o dilema CV, a taxa de crescimento do número de cooperadores chegou aos 17%, o que representa 82.9% dos cooperadores. Uma vez que o dilema MN representa um sucesso para os cooperadores e a distribuição é aleatória, o impacto na evolução dos cooperadores foi extremamente baixo, não ultrapassando os 3%.

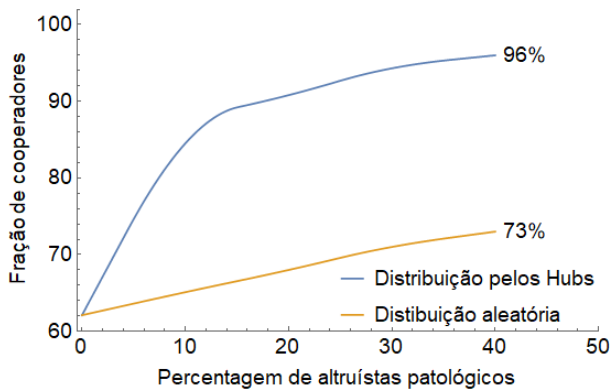


Figura 6: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar o impacto causado na fração de cooperadores ao introduzir altruístas patológicos pela população, caracterizada pelos dilemas DP, MN e CV. A distribuição foi realizada por *Hubs* e de forma aleatória. Os resultados mostram que o impacto causado na evolução da cooperação quando a distribuição é realizada por *Hubs* é muito maior e reflete a influência que estes agentes, com um número elevado de conexões, podem causar numa população com forte heterogeneidade.

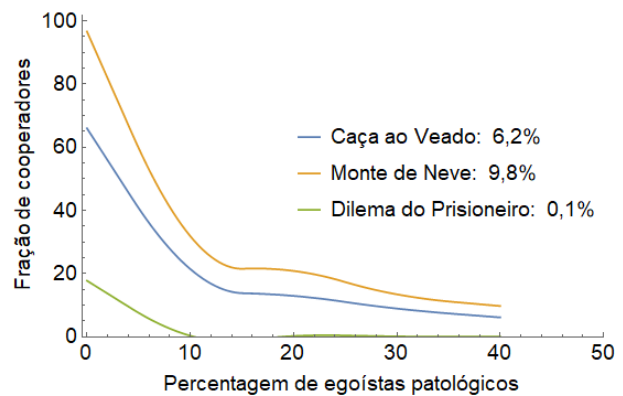


Figura 7: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de EPs distribuídos pelos *Hubs*. Houve uma redução substancial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs na população. No dilema MN e CV, esta redução aproxima-se de uma função exponencial. Para o dilema DP, foi preciso apenas 10% de EPs para os cooperadores serem quase extintos da população. O maior impacto foi no dilema MN, uma vez que na ausência de EPs, era dominado por 96.4% de cooperadores.

centagem de APs distribuídos de forma aleatória, foi obtido um aumento de apenas 3% (ver a figura 6). Esta diferença representa 19.4% de cooperadores a mais, refletindo o efeito messiânico que os *Hubs* causam em todos os dilemas. Para alcançar uma fração acima dos 94%, foram necessários 30% de APs por *Hubs*. Após a distribuição de forma aleatória do mesmo número de APs, a fração não ultrapassou os 70%.

Ao analisar o dilema do prisioneiro especificamente, que representa o maior desafio para a evolução da cooperação, pode verificar-se que bastaram apenas 10% de APs distribuídos por *Hubs* para os cooperadores reverterem o jogo, passando a ser a maioria com 53%.

5.3. Distribuição dos EPs em toda a população

Neste caso, o cenário reverte-se, e será mostrado o impacto causado pelos EPs na evolução da cooperação em toda a população, caracterizada pelos três dilemas em estudo: Monte de Neve; Caça ao Veado; Dilema do Prisioneiro. Os EPs são distribuídos de forma aleatória e por *Hubs*, como no módulo anterior.

5.3.1 Distribuição realizada pelos *Hubs*

Ao distribuírem-se EPs pelos *Hubs* notou-se uma redução drástica no número de agentes cooperadores em todos os dilemas. No dilema MN, onde a cooperação existia em abundância, bastaram apenas 10% de EPs para reduzir a fração de cooperadores para metade (ver a figura 7). Ao passar a percentagem de EPs para 40%, a fração de cooperadores foi reduzida a 9.8%. Para o dilema DP o fim foi trágico, e também foram precisos apenas

10% de EPs para reduzir a fração de cooperadores a 0.1%. A conclusão não foi muito diferente para o dilema CV e a fração foi reduzida a 21.5% e 6.8% com 10% e 40% de EPs, respetivamente.

5.3.2 Distribuição realizada aleatoriamente

O impacto causado em todos os dilemas foi pouco significativo e a manutenção da fração dos cooperadores na população foi mantida com sucesso. No dilema DP houve uma redução de 14.4% na fração dos cooperadores com 40% de EPs. Com isso, foi possível garantir a sobrevivência dos cooperadores no dilema mais desafiante (ver a figura 8). No dilema CV, a redução é de 7.8% com 10% EPs, passando a 27.8% com 40%. A maior impacto foi verificado no dilema MN, uma vez que os cooperadores representam quase toda a população quando não há agentes patológicos. Este impacto representou uma redução de 16.9% com 10% de EPs e 47,7% com 40%.

Ao analisar a fração de cooperadores após obter uma média sobre todos os dilemas, é possível obter uma visão geral da diferença entre a distribuição realizada por *Hubs* e a distribuição realizada de forma aleatória. Com apenas 10% de EPs por *Hubs*, a fração de cooperadores foi reduzida a 19%, o que representa uma queda de 43.1% (ver a figura 9). Com o mesmo número de EPs, mas agora distribuídos aleatoriamente, a fração de cooperadores passou a 51%, representando uma queda de apenas 11%. Com o valor máximo de EPs, isto é, 40% por *Hubs*, a fração de cooperadores é quase extinta da população passando a apenas 6.8%, enquanto que em modo aleatório ainda representaria um

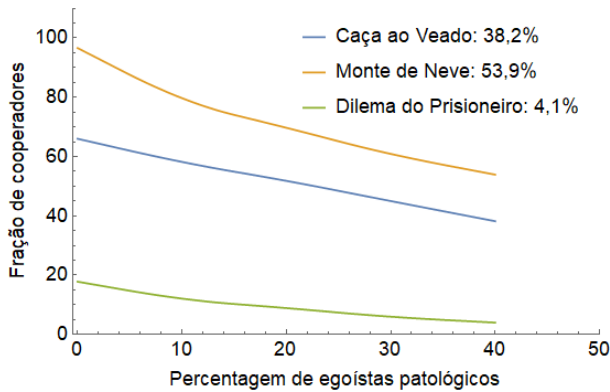


Figura 8: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de EPs distribuídos aleatoriamente. Houve uma redução parcial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs em todos os dilemas. Esta redução não se traduziu num fim trágico para a sobrevivência dos cooperadores em nenhum dos dilemas estudados. No dilema mais desafiador para os cooperadores (DP), ainda foi possível garantir que 4.1% sobrevivessem. No dilema CV, o impacto representou uma redução de 27.8% com 40% de EPs. O maior impacto foi causado no dilema MN, o que representou uma redução de 42,7% na fração dos cooperadores.

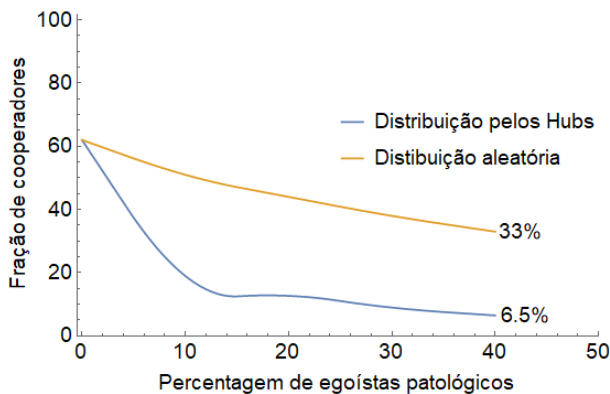


Figura 9: Evolução da cooperação. Para cada valor de λ é apresentada a porcentagem de APs necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. Os APs necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente e pelos *Hubs*. Ao compararem-se as duas distribuições, constata-se que o número de APs necessário é sempre mais baixo quando a distribuição é realizada pelos *Hubs*, o que revela a grande influência exercida pelos *Hubs* numa população do tipo LE.

terço da população.

6. Conclusão

Filósofos e cientistas acreditam que os comportamentos cooperadores e altruístas desempenharam um papel fundamental para o sucesso da evolução humana desde os tempos da pré-história até os dias de hoje. Para abordar este problema, tem-se recorrido à Teoria dos Jogos Evolucionários em grafos aplicada aos dilemas sociais, utilizados para caracterizar as situações de tensão quando um indivíduo pode cooperar ou desertar.

Esta Dissertação teve como principal objetivo, aprofundar o impacto na evolução da cooperação ao distribuir por uma população com forte heterogeneidade agentes altruístas e egoístas patológicos que, por várias razões, são reticentes em mudar as suas escolhas, seja por convicções religiosas, políticas, ou outras. Foram considerados dois tipos de distribuição: aleatória ou direcionada aos agentes com o maior número de contatos. Após analisar os resultados, chegamos às seguintes conclusões:

- Quando são distribuídos altruístas patológicos direcionados aos *Hubs* em populações com um forte grau de heterogeneidade, a sustentabilidade da cooperação é mais acessível, independentemente do dilema utilizado como metáfora para a estudar a evolução da cooperação.
- A distribuição dos agentes APs pelos *Hubs* representa um mecanismo potente para o aparecimento da cooperação. O efeito messiânico dos APs espalha-se por toda a população, mesmo em zonas mais críticas para os cooperadores, onde o grau de egoísmo e ganância são elevados.
- Este mecanismo, contudo, poderá ser usado para a redução da cooperação, caso o comportamento patológico seja de egoísmo. De facto, ao distribuírem-se agentes egoístas pelos *Hubs*, nota-se uma redução drástica na fração de agentes cooperadores em todos os dilemas. No dilema MN, onde a cooperação era abundante, foram precisos poucos EPs para reduzir para a metade a fração de cooperadores. Os cooperadores foram praticamente extintos no DP e também foram necessários poucos EPs para reduzir a fração de cooperadores a 0.1%.
- Após distribuírem-se os EPs de forma aleatória, o impacto causado em todos os dilemas foi pouco significativo, e a manutenção da fração dos cooperadores foi mantida com sucesso.

- A evolução da cooperação depende também das características intrínsecas a cada indivíduo. Neste sentido, é importante lembrar que a estrutura da população desenvolvida nesta Dissertação se mantém inalterada ao longo da evolução. Uma modelo mais realista, deveria ter em conta o facto dos agentes terem a capacidade de estabelecer novos contatos ou dissolver outros ao longo da evolução.

7. Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, propõem-se:

- O desenvolvimento de um modelo mais real, tendo em conta que a mutação ao longo da evolução na estrutura da população.
- Estudar comportamentos patológicos com maior complexidade, nomeadamente no contexto de jogos repetidos. Neste caso, os agentes patológicos poderão adotar estratégias condicionais e decidir cooperar ou não dependendo das ações passadas dos restantes agentes. Estas situações são particularmente relevantes em ambientes híbridos, onde os agentes patológicos são entidades artificiais desenhadas para um determinado fim.

References

- [1] Eisenberg. Technical report, San Diego, 1982.
- [2] R. Albert and A. L. Barabasi. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1):47–97, 2002. APS.
- [3] A.-L. Barabási and R. Albert. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439):509 LP – 512, 10 1999. American Association for the Advancement of Science.
- [4] R. L. Campbell. Altruism in Auguste Comte and Ayn Rand. *Journal of Ayn Rand Studies*, 7:357–369, 2006.
- [5] D. Easley and J. Kleinberg. *Networks, crowds, and markets: Reasoning about a highly connected world*. Cambridge University Press, 2010.
- [6] W. Hamilton. The genetical Evolution of Social Behavior II. *Journal of Theoretical Biology*, 7(1):1–52, 1964. Elsevier.
- [7] J. Hofbauer and K. Sigmund. *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge university press, 1998.
- [8] P. Kolllock. Social dilemmas: The anatomy of cooperation, 1998.
- [9] M. a. Nowak. Five Rules for the Evolution of Cooperation. *Science*, 314(5805):1560–1563, 2006. American Association for the Advancement of Science.
- [10] A. Paiva, F. P. Santos, and F. C. Santos. Engineering pro-sociality with autonomous agents. In *Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018.
- [11] Pennisi E. How Did Cooperative Behavior Evolve. *AAAS*, 309, 2005. American Association for the Advancement of Science.
- [12] F. C. Santos, J. M. Pacheco, and T. Lenaerts. Cooperation prevails when individuals adjust their social ties. *PLoS Computational Biology*, 2(10):1284–1291, 2006. Public Library of Science.
- [13] F. C. Santos, J. M. Pacheco, and T. Lenaerts. Evolutionary dynamics of social dilemmas in structured heterogeneous populations. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(9):3490–3494, 2006. National Acad Sciences.
- [14] B. Skyrms. *The stag hunt and the evolution of social structure*. Cambridge University Press, 2004.
- [15] J. M. Smith and G. R. Price. The Logic of Animal Conflict. *Nature*, 246(5427):15–18, 11 1973.