

# Competição e cooperação na emergência de comunicação em agentes artificiais

Leonardo Oliveira dos Santos Lima  
Angelo Conrado Loula (Orientador)  
Universidade Estadual de Feira de Santana  
UEFS  
leo.os.lima@gmail.com

**Resumo:** Estudos e pesquisas com objetivo de entender o surgimento e evolução da comunicação foram impulsionados com o aumento computacional das últimas décadas. Este artigo descreve um modelo computacional que simula a emergência e desenvolvimento da comunicação entre agentes artificiais, que a princípio não apresenta estabilização da comunicação emergente. Nosso objetivo é verificar como fatores seletivos externos, semelhança genética e organização em colônia, influenciam a estabilização de um sistema de comunicação. Dessa maneira busca-se identificar o quanto cada um dos fatores externos deve estar presente no modelo, para que exista a estabilização da comunicação. Conforme simulações, os fatores externos inseridos gradualmente no sistema resultaram na estabilização da comunicação.

**Palavras-Chave:** Agentes Artificiais, Cooperação, Evolução, Comunicação.

## I. Introdução

Entender como ocorreu o surgimento da comunicação e consequentemente da linguagem é importante para esclarecer quais foram seus papéis na evolução das espécies, incluindo o próprio homem. Este conhecimento trará explicações sobre como a comunicação se relaciona com comportamentos e como a evolução dessas características influenciam na organização de diversas espécies.

Apesar dessa importância, quando comparada com outros campos do conhecimento, por exemplo, ciências exatas e a biologia, que apresentam pesquisas anteriores ao século XVI, o estudo da emergência de comunicação só passou a ganhar ênfase a partir do final do século XX. Muito devido ao fato de que, diferentemente de outros campos da ciência, dados e informações sobre a comunicação e a linguagem são mais escassos à medida que se caminha no sentido da origem deste processo [2].

O avanço dos estudos nesta área requisitou a utilização de ferramentas de diversas áreas do conhecimento [2]. Uma delas foi a computação, a partir da década de 90, que proporcionou a utilização de modelos computacionais nos estudos e pesquisas, permitindo a simulação da emergência e evolução de sistemas de comunicação.

Ao simular comportamentos individuais de organismos artificiais durante interações e também a dinâmica da emergência e evolução da comunicação, os modelos computacionais permitem a verificação de teorias e suposições e fornecem novas maneiras de observar o fenômeno [2]. Além disso, proporciona testar se

determinados comportamentos ou características podem ou não influenciar nos processos comunicativos.

Dentre os diversos modelos existentes, destacam-se o formulado por Dario Floreano et.al[3] e o desenvolvido por Marco Mirolli e Domenico Parisi [4]. O primeiro modelo avalia a influência de fatores seletivos externos, a organização dos organismos em colônias e a existência de parentesco entre membros do grupo, que influenciam na evolução de agentes artificiais. Neste caso, detectou-se o surgimento de um sistema de comunicação estável após a emergência da linguagem.

Mirolli e Parisi propõem um modelo computacional que demonstra como que pressão cognitiva aplicada a um conjunto de organismos artificiais leva ao surgimento de um sistema de comunicação, mas que não se torna estável e acaba se desfazendo.

Este artigo descreve o desenvolvimento de um modelo computacional, partindo dos dois modelos previamente citados, com o objetivo de verificar as condições para estabilizar a emergência de um sistema de comunicação em um grupo de organismos, inicialmente suscetíveis somente à pressão cognitiva, mediante inserção gradual de fatores seletivos externos ao modelo.

## II. Fundamentação Teórica

### A. Emergência da Comunicação

A linguagem é uma característica única dos seres humanos. Todas as maiores conquistas da cultura humana: arquitetura, literatura, a ciência, arte, medicina, só foram possíveis graças ao uso da linguagem [1]. Mas, a linguagem avançada existente atualmente só foi possível devido ao surgimento da comunicação entre as espécies antecessoras do homem.

Não existe um consenso sobre qual a forma que a teoria da comunicação e linguagem deve tomar, mas muitos pesquisadores adotam que o surgimento e desenvolvimento da comunicação entre os seres humanos são a soma de três tipos de evolução: social ecológica, biológica e cultural [5].

O estudo específico sobre a evolução cultural tem objetivo de estudar como características linguísticas emergem e se propagam em uma população. A evolução biológica permite entender qual foi a arquitetura neurológica necessária para o surgimento da comunicação e evolução da linguagem e como ela foi modificada com a evolução da comunicação [5].

Já a evolução social ecológica é que possui mais chances de explicar porque os seres humanos possuem a linguagem tão evoluída [5]. É através dela que tenta se entender as pressões ecológicas que encorajaram a emergência da comunicação e como as estruturas sociais absorvem uma nova habilidade para superar desafios ecológicos.

Essa divisão é um dos exemplos da multidisciplinaridade que a emergência da comunicação possui, passando a ser mais uma prova de que para se entender totalmente a evolução da linguagem é necessária uma abordagem partindo de muitas disciplinas e áreas do conhecimento [7].

## B. Modelos Computacionais

Modelos computacionais são outro exemplo do uso de conhecimento de outras áreas na pesquisa sobre o assunto. Muitos pesquisadores utilizam simulações para testar teorias e entender os mecanismos internos da evolução da linguagem. Os modelos podem ser aplicados para a simulação de adaptações biológicas relacionadas à evolução da comunicação, transmissão cultural da linguagem e outros aspectos mais complexos da comunicação, como por exemplo, as mudanças fonéticas que acontecem ao longo do tempo [7].

Simulação computacional ajuda a analisar diversos fatores influenciadores da emergência e evolução da comunicação, permitindo uma análise de maneira isolada ou com vários fatores atuando juntos. Dessa maneira, é possível transformar um estudo, de puramente descritivo, para também passar a ter um perfil explicativo [2].

Os modelos computacionais destinados ao estudo da evolução da comunicação e linguagem podem ser classificados em dois tipos, baseados em regras e em equações [2].

O primeiro tipo define regras concretas ou abstratas para descrever e manipular os comportamentos e ações, buscando entender e avaliar como um grupo de agentes artificiais pode ou não adquirir uma nova habilidade ou comportamento, resultando em uma evolução da população em que está inserido [2].

O segundo tipo procura transformar a linguagem e comportamentos dos organismos simulados em equações [2]. A análise matemática dessas equações permite a pesquisadores obterem confirmações empíricas sobre história da evolução da linguagem e realizarem predições sobre o futuro.

Além disso, os modelos computacionais desenvolvidos podem ser divididos em dois tipos. O primeiro tipo são estudos que utilizam de agentes artificiais com corpos físicos, usualmente inteligências artificiais são inseridas em pequenos robôs. No segundo grupo, as simulações são realizadas totalmente por meio de *software*.

Apesar de buscarem os mesmos tipos de resultados, os modelos computacionais que utilizam corpos físicos possuem, a princípio, um maior nível de complexidade quando comparados com os estudos que são simulados unicamente através de *software*. Isso porque o próprio corpo, normalmente robôs, torna-se um fator que aumenta o número elementos influenciadores no modelo computacional, e assim, as respostas que são obtidas oriundas dos sensores desse corpo passam a ser levadas em

consideração durante o desenvolvimento. Além disso, esses agentes artificiais estão inseridos em um ambiente que se relaciona com o corpo do agente e que, portanto, também influencia no seu comportamento.

Os modelos computacionais destinados ao estudo da emergência da comunicação possuem a proposta de um grupo de agentes artificiais, inicialmente sem nenhum tipo de sistema de comunicação pré-estabelecido, que é submetido à realização de uma ação, que poderia ou não ter maior eficiência se houvesse alguma troca de informação entre os agentes.

Através de algoritmos evolutivos, pesquisadores simularam novas gerações desse grupo de agentes artificiais e selecionaram aqueles que apresentaram os melhores desempenhos na realização da atividade escolhida. Frequentemente, os experimentos acontecem para avaliar se a existência ou não de uma característica dos agentes artificiais pode causar uma diferença nos resultados obtidos. O surgimento de um sistema de comunicação confiável, a estabilização ou não do mesmo e a quantidade de tempo necessária para isso acontecer são alguns dos pontos que são observados ao final das simulações e que qualificam os resultados.

No fim do processo, as conclusões sobre a influência de um determinado fator na emergência da comunicação são realizadas através de comparações entre grupos de agentes que possuíam essa características e outros que não.

A seguir serão descritos os experimentos realizados por Mirolli & Parisi [4] e Floreano, Mitri, Magnenat e Keller [3], em que ambos apresentam modelos computacionais com aspectos semelhantes aos que nesta seção foram abordados.

## C. Modelo de Floreano, Mitri, Magnenat e Keller

No seu trabalho intitulado, condições evolutivas para a emergência da comunicação em robôs, Floreano, Mitri, Magnenat e Keller avaliaram se as condições por eles apresentadas permitiriam que um sistema de comunicação confiável emergisse em uma colônia de robôs [3].

No modelo, os autores simularam uma população de agentes artificiais, divididos em 100 colônias com 10 integrantes cada. Cada uma das colônias foi simulada em um ambiente que possui uma fonte de alimento comestível e uma venenosa, como ilustrado na Figura 1. Além disso, os agentes artificiais possuem corpo físico, e podiam se movimentar e emitir sinais luminosos. E estes dispositivos possuíam sensores de terreno, que permitiam identificar quando estavam imediatamente próximos das fontes de alimento do ambiente.

Os indivíduos eram controlados por uma rede neural do tipo *feed-forward*, com 10 neurônios dedicados às entradas e três neurônios dedicados às saídas [3]. Um neurônio era responsável pela identificação de alimentos comestíveis, um segundo para os venenosos, e o restante era responsável pela análise dos sinais luminosos recebidos pelos robôs. Já na parte dos neurônios da saída da rede neural, dois eram dedicados para controlar duas rodas que movem os robôs, determinando velocidade e sentido da rotação. E o terceiro neurônio controlava quando o robô devia emitir sinal luminoso.



Figura 1. (Adaptada de [3]) Robô utilizado no experimento de Floreano, Mitri, Magnenat e Keller.

Os agentes artificiais são simulados em grupo com 10 robôs cada, distribuídos no espaço da simulação. As fontes de alimentos, comestível ou venenoso, também são inseridas no ambiente. Os participantes da simulação tem o objetivo de localizar e permanecer próximos à fonte de alimento comestível, como na Figura 1, em que quatro robôs estão ao redor da fonte.

As simulações acontecem por colônia, em cada uma delas, os organismos são aleatoriamente sorteados em um ambiente de 300x300 cm. As fontes de alimento emitem sinal luminoso de coloração vermelha, enquanto outros organismos de cor azul. Os indivíduos utilizam dos sinais para se aproximar das fontes de alimentos, e quanto mais tempo estes permanecerem próximos a esses alimentos, maior é a eficiência. O *fitness* dos organismos é calculado através da quantidade de espaço que este percorreu e o tempo que permaneceu próximo às fontes de alimento, considerando que alimentos comestíveis possuíam efeito positivo no cálculo e os venenosos o contrário. Já o *fitness* de uma colônia era obtido através da média aritmética dos valores individuais dos organismos que estão nela. Após todas as colônias serem simuladas, acontece a seleção dos melhores indivíduos, para que estes se reproduzam, combinem seus códigos genéticos e gerem uma nova geração da população.

Os autores avaliaram os resultados das simulações a partir de quatro combinações diferentes de dois fatores. No primeiro fator, os agentes artificiais de uma mesma colônia poderiam ou não ter um grau maior de relacionamento. Quando os indivíduos existentes em uma colônia tivessem códigos genéticos idênticos, as simulações seriam consideradas de alto grau de relacionamento ( $r = 1$ ). Quanto não havia essa semelhança, os genomas dos robôs continuavam a ser aleatoriamente construídos e depois eram distribuídos em colônias, e o grau de relacionamento era baixo ( $r=0$ ).

O segundo fator do modelo envolvia o método de seleção dos organismos que participariam da recombinação genética para formação da nova geração de organismos. Os autores utilizaram de duas maneiras, seleção individual e seleção por colônia.

Na seleção individual, 20% da população (200 organismos) com maior valor de *fitness* era selecionada

diretamente para reprodução e formação de nova geração, independentemente da colônia a que pertencem os agentes artificiais, ou seja, mesmo que a colônia do indivíduo selecionado apresente uma média de *fitness* baixa, este poderá ser selecionado.

Já na seleção por colônia, os 200 organismos foram sorteados a partir de 20% das colônias mais eficientes. Após o cálculo da *fitness* média das colônias, aquelas que apresentam as melhores performances são selecionadas, e os agentes artificiais são aleatoriamente escolhidos.

Dessa maneira, o experimento realizado por Floreano et.al[3] apresentava quatro tipos de simulações: seleção ao nível individual com  $r = 1$ ; seleção ao nível individual com  $r = 0$ ; seleção ao nível de colônia com  $r = 1$  e seleção ao nível de colônia com  $r = 0$ .

Após as simulações, todos os métodos apresentaram o surgimento de um sistema de comunicação confiável e estável. Porém, através da seleção em nível de colônia com um alto grau de semelhança entre os agentes, se conseguiu atingir o maior nível de desempenho, dentre os quatro métodos avaliados. Esse tipo de simulação mais eficiente foi seguido pelos casos em que a seleção é realizada de maneira individual, tanto com  $r=1$  e  $r=0$ . E por último, com a menor taxa de desempenho, a seleção em nível de colônia e com baixo grau de semelhança.

#### D. Modelo Mirolli & Parisi

Através do seu modelo computacional, Mirolli & Parisi [4] estudaram a emergência da comunicação em uma população de agentes artificiais e o problema filogenético da comunicação.

O problema filogenético tenta entender porque um organismo emite um sinal, sendo que a princípio este não receberia nenhum tipo de vantagem ao fazê-lo. E porque um organismo que ouve um sinal o responderia adequadamente, já que este sinal pode ter o objetivo de manipulá-lo. Assim, o estudo realizado pelos autores, busca entender como ouvintes e falantes evoluem em conjunto para que a emergência da comunicação seja possível.

O modelo proposto possui 100 organismos artificiais controlados por rede neural própria, com a tarefa de se alimentar de cogumelos. Os agentes envolvidos no diálogo

são colocados em um ambiente formado por um corredor, posicionados cada um em uma das extremidades e com o alimento posicionado junto ao agente artificial responsável por emitir uma mensagem informando ao outro organismo

se a característica do cogumelo em questão é comestível ou venenosa, como ilustrado na Figura 2.

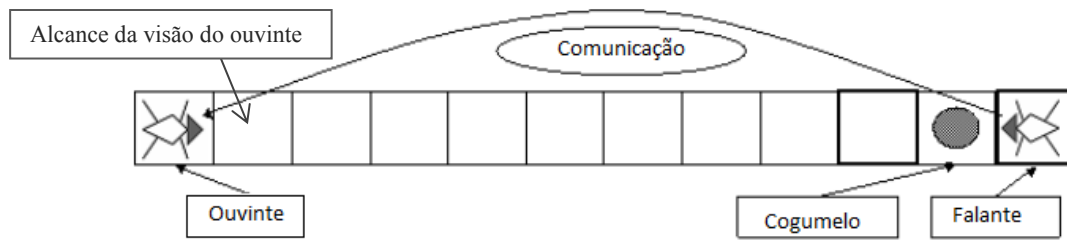


Figura 2. (Adaptada de [4]) Ambiente de simulação do experimento de Mirolli e Parisi

Os organismos são representados por uma rede neural que controla suas ações durante a simulação. Existem 420 cogumelos disponíveis para a alimentação dos indivíduos, e estes possuem características visuais diferentes, com metade deles considerado comestível e a outra metade venenosa.

A todos os organismos é dada oportunidade de se alimentar de cada um dos cogumelos. Em cada um desses testes, chamado de rodada, é iniciado com o posicionamento do agente artificial a ser testado na extremidade esquerda do corredor, do lado oposto ao cogumelo, como é mostrado na Figura 2, com o nome de ouvinte.

Um segundo organismo é aleatoriamente selecionado da população para agir no papel do falante. Este segundo agente, utilizando sua rede neural, recebe como entrada as características visuais do cogumelo, comestível ou venenoso, que se encontra em sua frente e deve emitir uma informação para o outro organismo. A partir dessa informação, o ouvinte decide se movimenta-se para frente ou não em direção ao cogumelo.

É importante destacar que os agentes artificiais só consegue visualizar os cogumelos quando se encontram em célula adjacente, portanto, inicialmente somente o falante consegue ver o cogumelo. A rede neural do ouvinte só obtém as informações visuais dos cogumelos, se o mesmo se locomover em direção ao alimento.

Após todos os organismos realizarem as 420 rodadas, cada uma referente a um cogumelo, o *fitness* de cada um deles é calculado.

Este consiste inicialmente do cálculo da função *fitness* de cada um dos organismos. É através da seguinte fórmula:

$$F(x) = \frac{an_e - bn_p - cn_m}{norm}$$

Considerando que  $n_e$  e  $n_p$  são, respectivamente, o número de cogumelos comestíveis e venenosos., e  $n_m$  é o número de movimentos feitos pelo organismo. Na fórmula também são utilizadas as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , que valem 30, 5 e 1, valores estes que são oriundos do modelo original de Mirolli e Parisi [4]. Além do fator de normalização *norm*, maior valor possível para o *fitness*, no valor de 4200.

Após o cálculo, o algoritmo utiliza o método da roleta com janelamento para determinar quais são os organismos

a se reproduzir. Neste método, o valor da *fitness* de todos os indivíduos da população é subtraído pelo *fitness* do pior. Depois acontece um sorteio, em que a chance de ser escolhido depende do valor do *fitness* de cada indivíduo.

Dessa maneira, os organismos que apresentam um maior valor de *fitness* possuem uma maior probabilidade de serem sorteados para a reprodução, e conseqüentemente, transmitir seu código genético para a próxima geração da população.

A reprodução dos organismos é realizada através do método *two point crossover*, e os organismos da nova geração são expostos a uma probabilidade de mutação em seus genes, neste caso, os pesos de sua rede neural, que é de 0,1%.

Com uma nova população de agentes artificiais, o processo de teste com os cogumelos é recomeçado, e essa nova população passa por reprodução após o cálculo do *fitness* dos organismos. Esse processo se repete por 2000 gerações e então o algoritmo evolutivo se encerra.

Ao fim das simulações, o modelo proposto apresentava o surgimento de um sistema de comunicação, porém instável. Após algumas gerações, a comunicação que emergiu acabava sendo descartada pelos agentes artificiais, o que resultava na queda no *fitness* média da população. Então, para entender melhor a instabilidade da comunicação na população, Mirolli e Parisi também analisaram os sinais emitidos pelos falantes ao longo das gerações.

Assim, determinou-se que qualquer comunicação que emergisse na população seria representada por duas nuvens de pontos [4], uma para sinais de cogumelos comestíveis e outra para os venenosos.

Para que exista um sistema de comunicação na população, duas condições são necessárias. Primeiro, as duas nuvens formadas pelos sinais devem ser pequenas, ou seja, os pontos que a formam devem estar próximos um dos outros, conseqüência de os indivíduos utilizarem sinais similares para cogumelos do mesmo tipo. A segunda exige que essas duas nuvens estejam distantes entre si, conseqüência da utilização de sinais bens distintos para a representação de cogumelos de categorias diferentes.

Com um sistema de comunicação que cumpre as duas condições citadas, os indivíduos da população passam a somente se locomover para frente quando realmente existe um cogumelo comestível, não desperdiçando energia com

os cogumelos venenosos, e assim aumentando o valor do *fitness*.

Porém, Mirolli e Parisi identificaram que com o aumento do *fitness* médio da população e devido à pressão cognitiva existente, aumenta-se a competição entre os indivíduos, já que se torna mais difícil ser sorteado no método da roleta e dessa maneira transmitir o código genético para a próxima geração. Assim, nesse contexto de alta competição, alguns dos organismos passam emitir sinais com objetivo de enganar os ouvintes, e assim prejudicá-los e conseguirem vantagem competitiva contra esses indivíduos.

Quando esse comportamento passa a se replicar na população, o sistema de comunicação que emergiu deixa de ser vantajoso para os organismos e torna-se prejudicial. Assim, aqueles que passam a desconsiderar os sinais falsos emitidos pelos falantes, acabam tendo um melhor valor de *fitness*, quando comparados com os organismos que continuaram a utilizar desses sinais. Com isso, o sistema de comunicação se desfaz e a população volta ao estado inicial.

### III. Metodologia

A metodologia proposta nesse projeto baseia-se nos dois modelos computacionais que foram descritos anteriormente. Inicialmente, propôs-se replicar o experimento desenvolvido por Mirolli & Parisi, com a criação do ambiente de simulação e da rede neural que controla individualmente cada um dos agentes artificiais. Além disso, replicou-se o algoritmo evolutivo utilizado como base da simulação, e os componentes da simulação desenvolvida por Floreano & Mitri, que foram incluídas para análise de diferentes resultados.

#### A. Simulação.

O ambiente de simulação é um corredor unidimensional, com doze células, como pode ser observado na Figura 2. Organismos são colocados em cada uma das extremidades do corredor, um falante e um ouvinte. Próximo do falante também se encontra um cogumelo. Assim, nesse ambiente, cada um dos organismos da simulação é colocado no corredor agindo como o ouvinte, e realiza 420 rodadas, ou seja, um cogumelo para cada uma.

Para cada rodada, é sorteado um organismo que atua como falante, ele recebe as características visuais do cogumelo, e envia um sinal comunicativo para o ouvinte, que a partir dessa informação, decide se mover-se para frente no corredor, ou se permanece parado.

Depois de realizar o trajeto no corredor, o ouvinte se posiciona na célula adjacente ao cogumelo, e também passa a receber as características visuais do cogumelo, algo que não acontecia enquanto estava distante do cogumelo. Nesse momento, o agente artificial também pode levar essa informação em consideração na decisão de avançar mais uma célula e, conseqüentemente se movem em direção ao cogumelo, consumindo-o; ou se para de mover-se, não consumindo nesta rodada.

Assim, ao fim dos testes com os organismos, suas respectivas *fitness* são calculadas baseadas nos seus desempenhos, dependendo de três fatores: a quantidade de

células que foram percorridas, as quantidades de cogumelos comestíveis e venenosos que foram ingeridos.

Após esse cálculo, os organismos com os melhores valores de *fitness* são selecionados para se reproduzirem, formando uma nova população. Esse processo é repetido por 2000 gerações, quando se encerra a simulação e os resultados são extraídos.

#### B. Cogumelos

Os 420 cogumelos foram divididos em dois grupos, os comestíveis e os venenosos. Ambos os grupos são representados por um conjunto de dez bits.

Os cogumelos venenosos são representados por seis bits com valor +1 e quatro com valor -1. Através de uma permutação desses bits, chega-se ao número de 210 cogumelos.

O grupo dos cogumelos comestíveis é representado de maneira inversa. São seis bits com valor -1 e quatro bits com valor +1. De maneira análoga aos venenosos, tem-se também 210 cogumelos.

#### C. Rede Neural

Cada organismo possui uma rede neural interna que controla suas ações, seja quando este está no papel de ouvinte ou como falante.

A rede neural é composta por 17 nós e 32 pesos, conforme pode ser visto na Figura 3. Além dos nós existentes na imagem, há também o *bias* na camada de entrada ligado a ambos os neurônios da camada intermediária.

As entradas da rede neural são divididas em visuais e linguísticas. O conjunto de bits que representam o cogumelo é a entrada visual do organismo e já o sinal recebido pelo falante é a entrada linguística.

A rede neural possui dois tipos de saídas, uma delas, a saída motora, responsável pela ação de caminhar para frente do organismo. A segunda, a linguística, tem o papel de mandar o sinal sobre qual tipo de cogumelo recebe as características visuais.

Apesar de possuírem a mesma rede neural, quando os agentes artificiais estão executando as funções da simulação, ouvinte e falante, acabam por receber diferentes valores como entrada em suas respectivas redes neurais. O ouvinte, enquanto se encontra distante do cogumelo, não possui a entrada visual ativada, assim recebe um conjunto de bits com valor igual a zero. Por outro lado, o ouvinte recebe o sinal do falante, representado por dois bits com variação entre [-1; +1], e ativa sua entrada linguística, não sendo utilizada sua saída motora.

Dessa maneira, quando o organismo estiver no papel de ouvinte, receberá dados na entrada linguística, com sua entrada visual zerada. Além disso, terá uma saída motora, com valor binário, que determina a locomoção ou não do organismo no ambiente.

Já com a atribuição de falante, o organismo não recebe nenhum tipo de mensagem linguística e através de sua entrada visual, neste caso, o cogumelo, ativa sua rede neural para gerar um sinal na sua saída linguística.

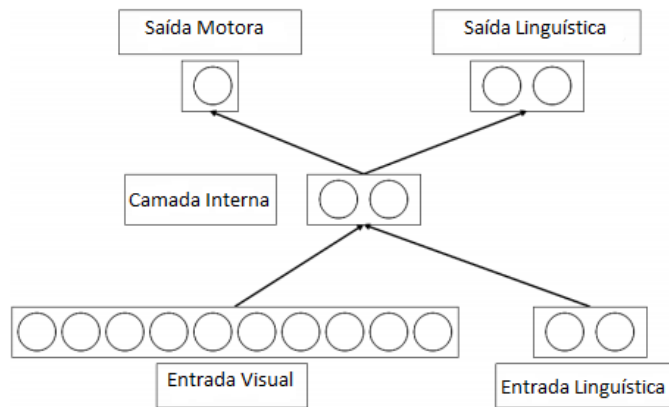


Figura 3. (Adaptada de [4]) Rede neural dos organismos artificiais

Quando nos casos que o organismo ouvinte opta por se locomover em direção ao cogumelo, ao chegar à célula adjacente, este também passa a ter a entrada visual ativada pelo conjunto de bits que representa o cogumelo, além da própria mensagem linguística que continua sendo enviada pelo falante.

#### D. Modelo Proposto

O modelo proposto possui como ponto de partida o experimento realizado por Mirolli & Parisi, replicando todo o processo. Como informado anteriormente, com este estudo os autores alcançaram a emergência da comunicação em uma população de agentes artificiais, porém não conseguiram obter a estabilização dessa comunicação entre os organismos, já que após a estabilização inicial, a competição entre os agentes passava a ser maior do que o nível de cooperação entre os mesmos.

Dessa maneira, em nosso modelo, foi incluída a opção de gradualmente adicionar fatores e características utilizados no experimento de Floreano, Mitri, Magnanet e Keller. A semelhança genética e a organização em seleção através de colônias foram inseridas no modelo desenvolvido por Mirolli & Parisi, e passaram a ser fatores seletivos externos que influenciam no momento que os organismos enviam sinais com informações a respeito dos cogumelos.

Como no modelo proposto por Floreano, Mitri, Magnanet e Keller [3], também há a característica de parentescos entre os agentes artificiais, chamado de fator  $r$ , porém, no modelo proposto é possível graduar o nível desse relacionamento. Inicialmente, no modelo origem, só há a possibilidade de todos os organismos serem parentes entre si ou não serem. Ao inserir essa informação no modelo, é possível avaliar o quanto de relacionamento entre a população é necessária para a estabilização da comunicação.

Além disso, a organização e seleção por colônias também foi adotado como um novo fator seletivo externo para determinar a influência sobre a emergência e estabilização do sistema de comunicação. Também gradualmente, esse novo fator foi inserido, proporcionando a seleção da quantidade de organismos que pertencem a uma colônia e quantos deles são selecionados através do desempenho geral da colônia que fazem parte ou devido a sua *fitness* individual.

#### E. Semelhança Genética

A possibilidade de simular a população de agentes artificiais com diferentes níveis de parentescos entre os mesmos é outro fator externo existente no modelo original de Floreano, Mitri, Magnanet e Keller [3], que mostraram que quando os agentes interagem com outros com quem possuem alto grau de parentesco, estes tendem a cooperar mais. Assim, a semelhança genética auxilia a comunicação entre os agentes artificiais, pois aumenta o nível de cooperação entre os indivíduos.

Para adaptar essa característica ao modelo de Mirolli e Parisi [4], foi incluída a possibilidade do agente falante (aquele responsável por enviar sinais para o ouvinte a respeito do cogumelo a ser testado) ser um clone do próprio ouvinte. Ou seja, o agente ouvinte receberia o sinal como se o próprio fosse o indivíduo que possui posição do outro lado do corredor e, portanto, recebe as características visuais do cogumelo. Dessa maneira, esse clone age como uma espécie de irmão gêmeo possuindo o maior grau de parentesco possível.

A inclusão gradual desse fator no modelo foi desenvolvida para tornar possível configurar a porcentagem de vezes que um agente agindo como ouvinte tem um clone como falante. Possibilitando a simulação do algoritmo genético com diferentes quantidades de agentes artificiais atuando nesse contexto de maior semelhança genética entre falante e ouvinte.

#### F. Organização em Colônias

A mudança da organização da população para colônias provocou modificações mais profundas no modelo original desenvolvido por Mirolli e Parisi [4], do que as proporcionadas pela semelhança genética.

Uma das consequências é que foi adicionado aos indivíduos da população um novo tipo de *fitness*, calculado através da média aritmética do *fitness* individual (calculada através da fórmula proposta por Mirolli e Parisi [4]) de todos os agentes de uma colônia. Dessa maneira, cada integrante da população possui dois tipos de *fitness*, a individual e a por colônia.

A utilização de cada um desses *fitness* dependerá quanto influência desse fator externo se deseja na simulação. Logo, é possível determinar previamente, a quantidade de casos em que a *fitness* por colônia é utilizada pelo

algoritmo genético para escolha dos agentes artificiais que transmitem o código genético para a próxima geração da população.

No modelo de Mirolli e Parisi, a *fitness* de cada agente artificial é utilizada para determinação dos indivíduos que farão parte da reprodução para a nova geração [4]. Assim, modificou-se o método inicial, para que este use também, quando for o caso, o *fitness* da colônia.

Com a modificação para organização em colônias, os 100 agentes artificiais passaram a ser divididos em 20 grupos com cinco integrantes cada. Considerando que no modelo de Floreano, Mitri, Magnenat e Keller [3] existem 100 colônias com 10 agentes em cada uma, foi realizada a adaptação para manter a quantidade inicial de indivíduos do modelo de Mirolli e Parisi[4], mas ao mesmo tempo modificar a organização da população.

Assim, como no modelo de Floreano, Mitri, Magnenat e Keller [3], os agentes são organizados sequencialmente em colônias no momento da formação da população, em todas as gerações da simulação. Ou seja, os cinco primeiros organismos formam a colônia número 1, e assim em diante, até a formação das 20 colônias.

A mudança de organização da população modificou a interação entre os indivíduos, pois forçou que os participantes, que inicialmente podiam se comunicar com qualquer outro indivíduo da população, passassem a interagir somente com os integrantes da mesma colônia. Dessa maneira, ao selecionar um agente como ouvinte, o falante necessariamente faz parte da mesma colônia, limitando, neste caso, para quatro, o número de possíveis falantes, ao invés dos 99 como no experimento original.

Conforme a explicação do modelo de Mirolli e Parisi [4], quando um organismo começa a ser testado, a cada cogumelo, outro integrante da população é escolhido aleatoriamente para agir como o falante do sinal para o ouvinte. Porém, com a inclusão das colônias, o sorteio do falante ficou limitado aos outros quatro integrantes da colônia da qual o ouvinte faz parte, ao invés de toda a população.

Como na semelhança genética, a influência do *fitness* por colônia no modelo foi gradualmente inserido, com objetivo de verificar o quanto desse fator externo é necessário para levar a comunicação à estabilização.

#### IV. Resultados Obtidos e Simulações

As simulações do experimento foram iniciadas com a replicação do experimento original proposto por Mirolli e Parisi [4].

Como esperado, o resultado encontrado após a replicação foi o mesmo descrito por Mirolli e Parisi [4]. Na Figura 4, existe o gráfico dos resultados de uma das simulações. Neste, a evolução da comunicação entre organismos na população simulada, inicialmente inexistente, emerge e favorece o aumento da *fitness* dos indivíduos, chegando ao ponto de existirem indivíduos que realizam a tarefa com perfeição, obtendo o maior valor possível. Ou seja, os sinais enviados pelo falante continham conteúdo fiel aos cogumelos testados, e o ouvinte sempre confiava nessas informações.

Porém após algumas gerações da população, a linguagem previamente formada começa a perder a

confiabilidade e a *fitness* média da população diminui, passando para um estado que os organismos agem por contra própria, não levando em consideração a informação recebida pelos falantes, resultando em nenhuma cooperação.

Como forma de determinar o nível da qualidade da comunicação, Mirolli e Parisi [4] utilizaram os sinais enviados pelos falantes para os ouvintes para mensurar o nível de qualidade da comunicação entre os agentes da população.

Como citado anteriormente, o sinal enviado pelo falante é caracterizado por um vetor bi-dimensional, com intervalo [-1; 1]. Dessa maneira, Mirolli e Parisi, consideraram que sempre haveriam dois centroides, formados pela aglomeração dos sinais emitidos pelos falantes para os ouvintes. O primeiro centro representa os sinais relativos aos cogumelos comestíveis e outro os venenosos.

A distância entre esses dois centros permite avaliar quão distintos são os sinais trocados entre os agentes da população durante toda uma geração. Quanto mais distantes os centróides estiverem, mais bem definidos são os tipos sinais, e conseqüentemente melhor é a qualidade de comunicação [4]. Para efeitos de cálculo da qualidade da comunicação, essa distância é chamada de  $\alpha$ .

Além disso, a distância média dos sinais para o seu respectivo centro é calculada. Com esse valor é possível avaliar o quão consistente são os sinais produzidos para um mesmo tipo de cogumelo.

Portanto, quanto menor for a distância média para o centroide, mais similar será a linguagem entre os indivíduos da população, e melhor será a qualidade da comunicação. Porém, se essa distância for muito alta, mostra cada agente artificial utiliza de sinais pouco similares para representar o mesmo tipo de cogumelo.

Por outro lado, quanto menor for a distância média dos sinais para o centro, melhor é a qualidade da comunicação. A distância média dos sinais para o centroide é atribuída a  $\beta$ .

Para calcular a qualidade da comunicação da população, ambos  $\alpha$  e  $\beta$  devem estar normalizados, e como estas são características inversamente proporcionais, utiliza-se o inverso  $\beta$  para a determinação da qualidade da comunicação. Assim, a qualidade do sistema de comunicação da população é extraída através da média aritmética desses dois valores.

$$\text{Qualidade da Comunicação} = \frac{\alpha + (1 - \beta)}{2}$$

O gráfico na Figura 4 apresenta a *fitness* média e qualidade da comunicação durante a simulação de uma população durante 2000 gerações do experimento, como nos resultados apontados Mirolli e Parisi [4]. Os resultados identificados foram os mesmos que os autores do modelo original, há a emergência da comunicação entre os organismos da população, como pode ser observada entre as gerações entre 1200 e 1370, a *fitness* média da população apresenta um valor elevado, próximo ao máximo possível.

Mas, a partir da geração 1370, acontece a desestabilização do sistema de comunicação, caracterizado pela perda da qualidade de comunicação e queda no desempenho média da população. Após o período de

instabilidade do sistema de comunicação, a população retorna ao estado inicial, e recomeça o processo de formação de um novo sistema de comunicação.

Além disso, na Figura 4, também é possível observar relação entre a *fitness* média e a qualidade da comunicação existente entre os indivíduos da população. O aumento ou diminuição da qualidade do sistema de comunicação se

releciona diretamente na *fitness* média da população. Uma vez que quanto mais específica (dois centroides bem separados) e quanto mais consistente a linguagem (se a distância média para os centroides for pequena) melhor é o desempenho dos indivíduos e consequentemente do seu *fitness*.

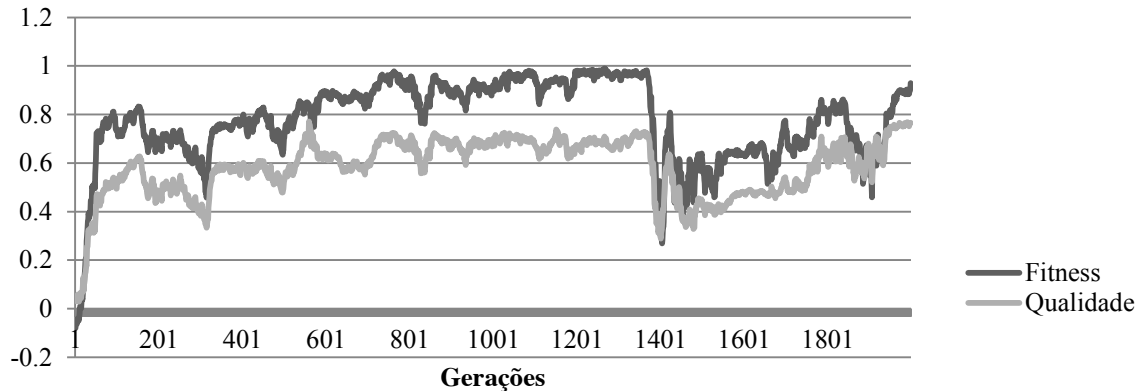


Figura 4. *Fitness* Média e qualidade da comunicação da população durante simulação

Terminado o processo de replicação do experimento de Mirolli e Parisi [4], foi iniciada a fase de inclusão de fatores externos presentes no modelo de Floreano, Mitri, Magnanet e Keller [3]. Dessa maneira, a organização dos indivíduos em colônias e a possibilidade de interação entre os organismos com alto grau de parentesco foram os fatores escolhidos que passariam a influenciar no modelo já desenvolvido.

Porém, devido às diferenças entre os modelos envolvidos e também por causa da necessidade de inserir gradualmente esses fatores externos na atividade desempenhada pelos organismos artificiais, algumas adaptações foram realizadas e serão descritas a seguir.

#### A. Colônia

Na Figura 5 ilustra o resultado obtido através de uma simulação da população utilizando 10% de *fitness* baseado nos resultados médios das colônias e 90% do *fitness* individual de cada agente artificial. Observa-se, que o desempenho médio da população e a qualidade da comunicação continuam se relacionando diretamente, alterações na qualidade da comunicação são observadas no

*fitness* médio. Primeiramente, analisando isoladamente a *fitness* média em comparação com os valores da simulação do modelo original de Mirolli e Parisi [4], na Figura 4, chega-se a conclusão de que continua existindo a emergência da comunicação na população, mas ainda existem quedas, não é completamente estável.

Nota-se que a inclusão do fator externo causou a diminuição da quantidade de grandes alterações na *fitness* da população e também que seu valor médio ao longo da simulação fosse elevado.

Quanto à qualidade da comunicação, observa-se que apesar da inclusão do fator externo, esta continua com forte relação com o desempenho médio da população, já que quedas na qualidade da comunicação influenciam diretamente na *fitness* da população. Além disso, também houve um aumento no valor médio ao longo das 2000 gerações.

A mudança da organização e a utilização da *fitness* por colônia no momento da reprodução dos agentes causou um aumento na cooperação na população, mas este não foi o suficiente para superar a competição existente, resultando na não estabilização da linguagem.

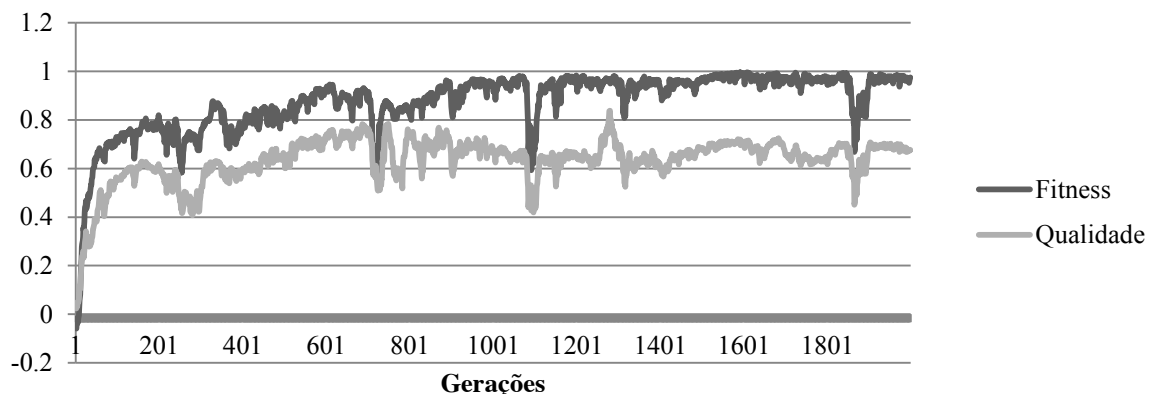


Figura 5. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 10% de utilização de *fitness* por colônia



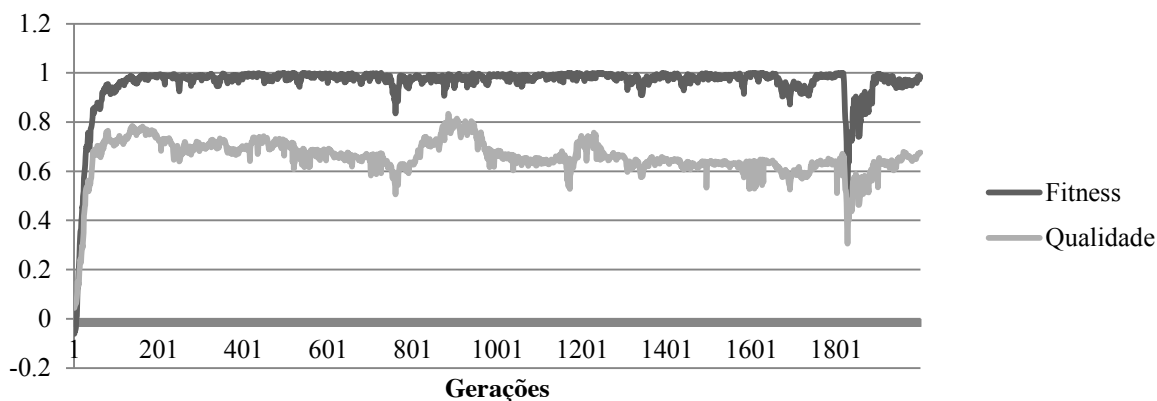


Figura 6. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 20% de utilização de *fitness* por colônia

A Figura 6 demonstra o resultado de uma simulação com 20% das reproduções através do método da roleta utilizando a *fitness* por colônia e o restante, 80%, com a *fitness* individual de cada integrante da população. Comparando com as simulações das Figuras 5 e 6, observa-se mudança no comportamento da *fitness* e da qualidade da comunicação.

Primeiramente, pode-se notar que a *fitness* e qualidade da comunicação atingiram valores elevados com um menor número de gerações, quando comparado com as simulações anteriores, simulação do modelo original e a simulação com 10% de utilização de *fitness* oriundo da colônia.

Além disso, a *fitness* média da população apresenta dois grandes intervalos de gerações, entre [160;760] e [780;1800], em que apresenta um alto nível de eficiência, com valores superiores a 0,95. Mostrando uma maior estabilidade da linguagem existente na população, em comparação com o modelo inicial e com a que apresenta 10% de influência do fator externo em análise.

O índice da qualidade da comunicação também apresentou melhor desempenho do que em comparação com outras simulações, permanecendo acima do valor de 0,6 durante grande parte das gerações.

Apesar da maior estabilidade apresentada, na geração 1800, houve uma queda acentuada na qualidade da comunicação da população, e conseqüentemente, na *fitness* média, seguida pelo aumento graduado até alcançar novamente um valor de *fitness* elevado na geração 1890. Através desse comportamento conclui-se que o sistema de comunicação formado nas gerações iniciais não se tornou 100% estável, e que quedas e o abandono do sistema de comunicação são possíveis nesse contexto simulado, de 20% de utilização de *fitness* de colônia.

Na Figura 7, observa-se o resultado da simulação utilizando 30% do valor de *fitness* das colônias no método de roleta. Com esse nível de influência, a cooperação entre os integrantes da população conseguiu superar a competição entre os mesmos. Isso aconteceu porque a partir do momento que ocorreu a emergência do sistema de comunicação, este permanece estável durante toda a simulação.

A linguagem que emergiu entre os agentes artificiais permitiu que a *fitness* da população, após atingir o valor de aproximadamente 0,96 na geração 120, permanecesse nessa faixa de altos valores durante todo restante da simulação.

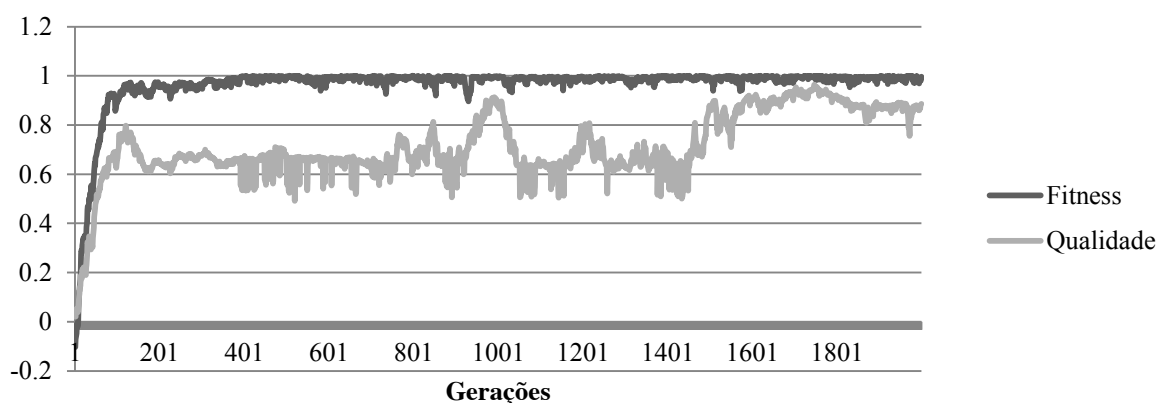


Figura 7. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 30% de utilização de *fitness* por colônia

Além disso, o sistema de comunicação apresentou média de qualidade superior às outras simulações, chegando ao valor de 0,96 na geração 1750, mostrando que os sinais que a população definiu para os dois tipos de cogumelos eram bem diferentes e que a linguagem era compartilhada por todos os indivíduos da população.

E também devido à maior influência da organização por colônias, as alterações existentes na qualidade da comunicação, por exemplo, nas gerações 1055 e 1410 não causaram as respectivas quedas na *fitness* da população.

A maior influência desse fator, aumentou uma tendência, existente desde o experimento original e observado durante as simulações do novo modelo, de que

não é necessário um alto nível de qualidade de comunicação para o que a o desempenho médio da população seja o maior possível.

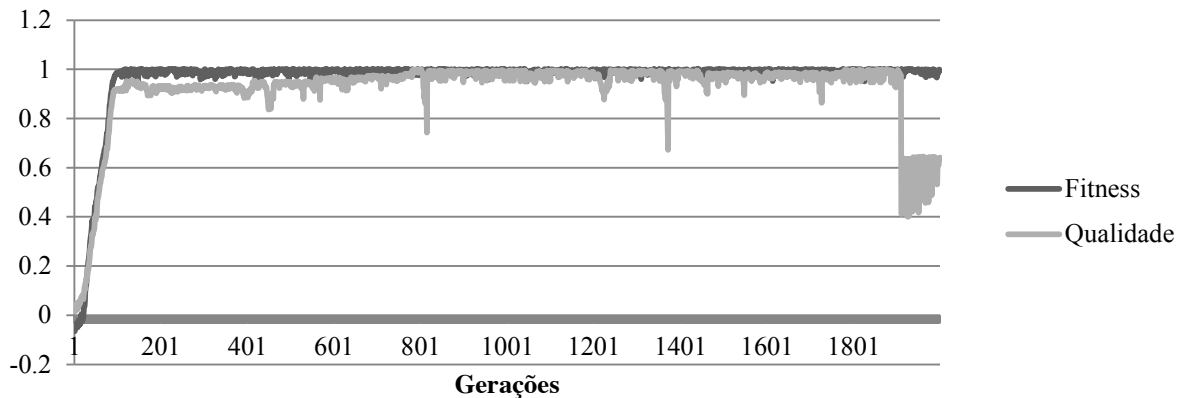


Figura 8. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 70% de utilização de *fitness* por colônia

Através dos resultados apresentados e de outras simulações com os mesmos parâmetros, conclui-se que a organização em colônias e a substituição da *fitness* individual em 30% das reproduções da população foram responsáveis pela estabilização do sistema de comunicação emergente.

Na Figura 8, observa-se o resultado de simulação com 70% de utilização da seleção por *fitness* de colônia. Como esperado, com o aumento desse fator externo, a comunicação emergente apresenta qualidade de comunicação elevada, próximo do máximo possível durante quase toda a simulação. Esse fenômeno é consequência do aumento da cooperação entre os organismos da população.

### B. Semelhança Genética

A possibilidade de simular a população de agentes artificiais com diferentes níveis de parentescos entre os mesmos é outro fator externo existente no modelo original de Floreano, Mitri, Magnenat e Keller [3], que mostraram

que quando os agentes interagem com outros com quem possuem alto grau de parentesco, este tendem a cooperar mais.

Para adaptar esse característica ao modelo de Mirolli e Parisi [4], foi incluída a possibilidade de o agente falante ser um clone do próprio ouvinte. Ou seja, o agente ouvinte receberia o sinal como se o próprio fosse o indivíduo que possui posição do outro lado do corredor e, portanto, recebe as características visuais do cogumelo. Dessa maneira, esse clone age como uma espécie de irmão gêmeo possuindo o maior grau de parentesco possível.

A inclusão gradual desse fator no modelo também foi desenvolvida. Antes das simulações é possível configurar a porcentagem de vezes que um agente, agindo como ouvinte, tem um clone como falante.

A simulação na Figura 9 mostra o resultado de uma simulação em que existe 1% de semelhança genética na população. Ou seja, em aproximadamente quatro cogumelos dos 420 testados, o ouvinte se comunicou com um clone dele mesmo.

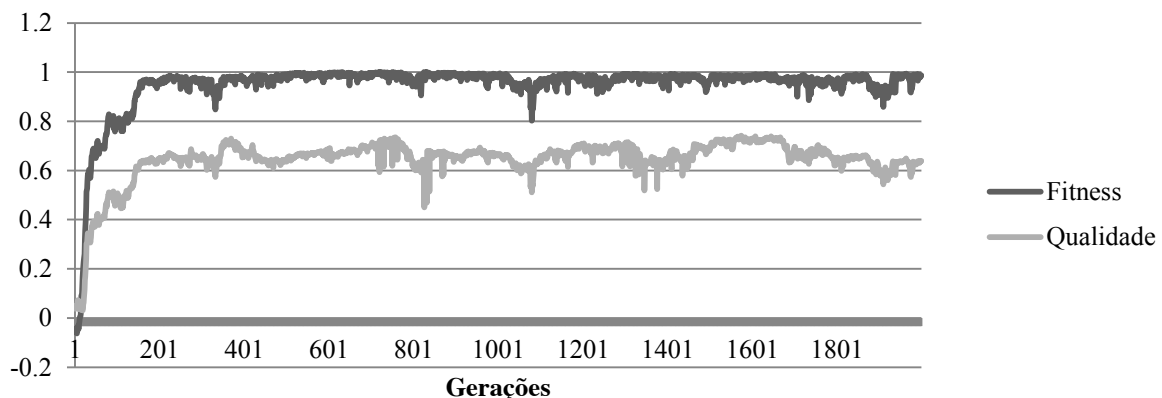


Figura 9. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 1% de chance alto grau de parentesco na população.

Neste caso, o falante, clone do ouvinte, possui exatamente os mesmos valores de pesos na rede neural. Dessa maneira, a comunicação realizada entre esses dois agentes é considerada perfeita, já que a rede neural responsável pela emissão de informações é a mesma a escuta e decifra os sinais recebidos.

A comunicação de agentes com alto grau de parentesco causou mudança na melhora inicial da *fitness* da população,

similar às simulações com 20% e 30% de *fitness* por colônia e mais rápida quando comparada ao modelo original de Mirolli e Parisi [4].

Após a geração número 160, quando o *fitness* da população atinge o valor de 0,96, a eficiência da população na realização da atividade permanece alta durante o restante da simulação.

Quanto à qualidade do sistema de comunicação, após a emergência da linguagem, esta apresentou regularidade ao longo da simulação, com valores superiores 0,6.

Dessa maneira, é possível concluir que com 1% de parentesco entre os agentes, o sistema de comunicação torna-se estável. Apesar de existir uma queda no *fitness* e qualidade do sistema de comunicação na geração número 1080, esta redução não foi prosseguida do descarte da linguagem por parte dos agentes, o que é comprovado pela rápida recuperação do sistema.

Mesmo com apenas 1% de chance, aproximadamente quatro cogumelos em um universo de 420, a inclusão desse fator externo foi o suficiente para tornar o sistema de comunicação estável. Devido ao fato de agir diretamente na atividade a ser realizada pelos agentes, esse fator externo possui poder de influência maior do que a organização por colônias.

Quando o ouvinte recebe o sinal de um clone, a informação é totalmente confiável, e acaba por agir como um reforço no treinamento da rede neural do ouvinte. E como o grau de parentesco é baseado em sorteios, a cada geração quatro novos cogumelos são selecionados, possibilitando o surgimento de agentes cada vez mais eficientes.

Na Figura 10 estão os resultados da simulação realizada com 2% de parentesco entre ouvinte e falante, é possível verificar a mesma curva inicial no *fitness* da população que existe na simulação anterior, da Figura 9.

Como na primeira simulação apresentada considerando esse fator externo, o sistema de comunicação emergente na população também alcança a estabilidade. Porém, no caso da Figura 10, o sistema de comunicação é mais estável, já que o nível de *fitness* médio da população permanece praticamente inalterado após a estabilidade.

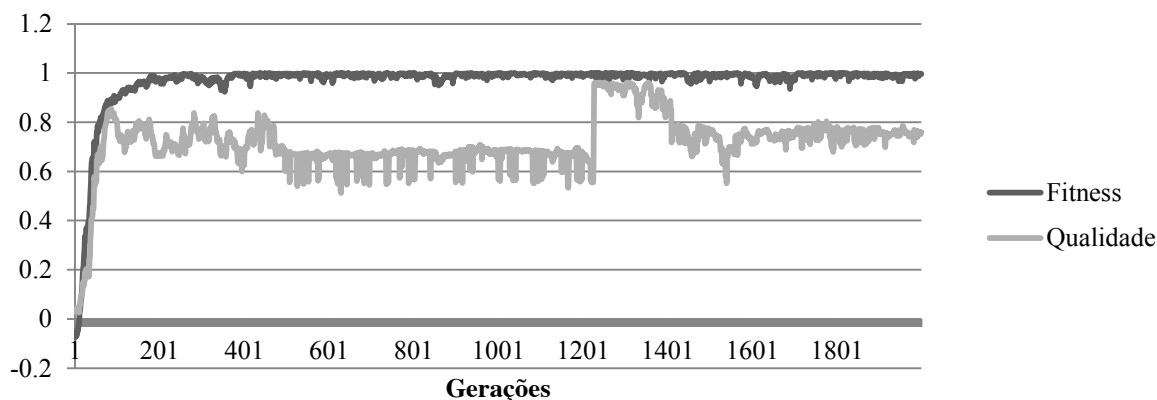


Figura 10. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 2% de chance alto grau de parentesco na população.

Na simulação com 2% de parentesco na Figura 10, a qualidade média do sistema de comunicação apresentada é um pouco superior ao da Figura 9. O *fitness* médio da população, umas vezes alcançado o valor máximo, permaneceu nesse patamar durante todas as 2000 gerações, com pequenas alterações, menores que 0,3 pontos.

O aumento da possibilidade de comunicação do ouvinte com indivíduo clone, também influenciou na qualidade da comunicação do sistema de comunicação, que na simulação apresentada na Figura 10 conseguiu atingir valores próximos ao máximo, como na geração 1228.

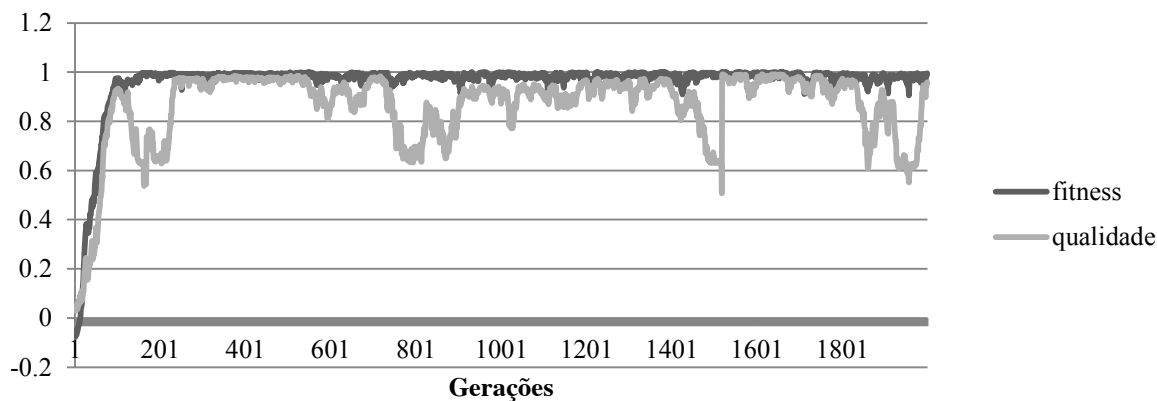


Figura 11. *Fitness* média e qualidade da comunicação da população durante simulação com 10% de chance alto grau de parentesco na população.

O gráfico existente na Figura 11 é representado o resultado da simulação com 10% de possibilidade de comunicação do ouvinte com um clone. Assim é possível identificar que o *fitness* da população se mantém constante, mostrando a estabilidade do sistema de comunicação. E a qualidade do sistema de comunicação também apresenta pontos em que alcança o máximo valor possível, mas com

essa porcentagem de parentesco entre os organismos, a qualidade da comunicação ainda apresenta quedas acentuadas, como na geração 1518.

Como também acontece na simulação existente na figura 10, o aumento da presença desse fator externo na população diminuiu a influência da qualidade de comunicação no desempenho dos agentes artificiais. As

gerações 163, 794, 1518, 1958 são exemplos de quedas acentuadas da qualidade da comunicação, mas que não foram acompanhadas por diminuição do *fitness* da população.

#### V. Considerações Finais

A defasagem na área da emergência da comunicação quando comparada com áreas das ciências naturais, física, química, ainda é grande. A continuação de pesquisas e estudos é de fundamental importância para o entender melhor o funcionamento dessa habilidade tão importante para evolução do homem e outros animais.

De maneira simplificada, tanto no modelo de Mirolli e Parisi, quanto no proposto por Floreano, Mitri, Magnenat e Keller, e no descrito neste artigo, é possível identificar como a existência da comunicação entre os agentes artificiais alterou o resultado da tarefa que lhe foi imposta.

Novas pesquisas e estudos nessa área trarão esclarecimentos sobre as condições necessárias para a emergência da comunicação, e também tornarão mais fácil o entendimento do processo de evolução da comunicação, e consequentemente, da linguagem.

Além disso, nota-se como é delicado e complexo o processo de emergência da comunicação. E como dois fatores externos, isoladamente, podem influenciar na análise do surgimento deste processo.

Assim, a proposta inicial era tornar estável um modelo computacional, que apesar da emergência da comunicação não apresentava estabilidade da mesma em longo prazo, devido à pressão da seleção do algoritmo impostas aos agentes artificiais, já que somente uma parcela de indivíduos mais eficientes na tarefa, possui a possibilidade de transmitir o código genético para a próxima geração, dessa maneira, aumentando a competição entre os mesmos.

Com esse intuito, acrescentou ao modelo dois fatores externos, com objetivo de interferir na relação da competição e cooperação entre os agentes artificiais. A possibilidade de comunicação com indivíduos com alto grau de parentesco, e a organização da população em grupos, possibilitou a seleção de através da *fitness* média da colônia.

Através das simulações, determinou-se que a inserção parcial dos dois fatores no modelo inicial foi suficiente para que estes influenciassem a população para que o sistema de comunicação emergente permanecesse estável e confiável.

A mudança da organização da população e utilização da *fitness* em colônia no processo seletivo do algoritmo genético aumentaram a cooperação entre os agentes artificiais, e quando a *fitness* foi utilizada em 30% dos casos da seleção, o sistema de comunicação conseguiu se estabilizar.

Já a opção de semelhança genética, não modificou muito o modelo inicial proposto por Mirolli e Parisi, mas a utilização de 2% chance de comunicação com outro organismos com alto grau de relacionamento foi o suficiente para estabilizar por completo o modelo inicial, que já possuía estabilidade, mas por poucas gerações.

Também é importante destacar que o estudo dos fatores foi realizado isoladamente, para entender como cada um deles modifica as relações entre os agentes artificiais,

alterando os níveis de competição e cooperação. Portanto, nos próximos passos, a pesquisa analisará qual o resultado obtido quando esses dois fatores externos atuam em conjunto.

Além disso, os fatores utilizados neste artigo, retirados do modelo proposto por Floreano, Mitri, Magnenat e Keller são apenas dois dentre diversos outros fatores existentes, que possuem papéis tão ou mais importantes na emergência da comunicação.

#### IV. Referências

[1] MacWhinney, Brian. "Models of the emergence of language." Annual review of psychology 49.1 (1998): 199-227.

[2] Gong, Tao, and Lan Shuai. "Computer simulation as a scientific approach in evolutionary linguistics." Language Sciences 40, 12-23, 2013.

[3]. Floreano, D., Mitri, S., Magnenat, S. and Keller, L., 2007. "Evolutionary conditions for the emergence of communication in robots". Current biology, 17(6), pp.514-519, 2007.

[4] Mirolli, M., & Parisi, D. "How producer biases can favor the evolution of communication: An analysis of evolutionary dynamics". Adaptive Behavior, 16(1), 27-52, 2008.

[5] Steels, Luc. "Modeling the cultural evolution of language." Physics of Life Reviews 8.4 (2011): 339-356, 2011

[6] Gong, Tao, Lan Shuai, and Menghan Zhang. "Modelling language evolution: Examples and predictions." Physics of life reviews 11.2, 280-302, 2014

[7] Christiansen, Morten H., and Simon Kirby. "Language evolution: Consensus and controversies." Trends in cognitive sciences 7.7, 300-307, 2003