

Imaginação Computacional Aplicada

Estudo das Arquiteturas aplicadas ao SIMNOS na tese de Hugo G. Marques

Carolina Bugulin da Fonseca

Resumo — O trabalho em questão destina-se a estudar a **Imaginação na Ciência Cognitiva aplicada à Inteligência Artificial**. Primeiramente, foram abordados alguns conceitos sobre o processo de Imaginação discutido e sobre que bases a Imaginação Artificial é realizada.

Em um segundo momento foram estudadas as aplicações da **Imaginação Computacional na literatura, dando destaque para as arquiteturas da tese de Hugo G. Marques aplicadas a plataforma de simulação SIMNOS**.

Termos índice — **Imaginação Computacional, SIMNOS, Consciência Artificial, Arquiteturas Artificial**.

I. INTRODUÇÃO

O Conceito de Imaginação é bastante discutido dentro da Filosofia e, com a evolução dos estudos dentro da Ciência Cognitiva aplicada à Inteligência Artificial, a Imaginação Computacional começa a criar seu espaço.

Não será o foco deste trabalho discutir as idéias filosóficas que cercam o conceito de Imaginação e suas relações com a Inteligência Artificial o que pode ser encontrado em [1]. No entanto, é necessário que haja uma abordagem inicial mostrando o que há de mais usado e interessante para a aplicação da imaginação em seres artificiais.

Um aspecto que todos os autores costumam concordar, sendo aqui o sentido mais amplo da Imaginação é que “Imaginação é a formação e manipulação das representações mentais de ações e entidades que não estão sensorialmente presentes.” [2]

Dentro desse contexto, muitos autores destacam e relacionam a imaginação com Percepção, Criatividade, Aprendizagem e, principalmente, Consciência. Com relação a este último a Imaginação mostra-se muito central, por isso não existem muitos estudos sobre a aplicação da Imaginação Artificial em si e sim ela sendo apenas uma componente dos estudos nos artigos de Inteligência Artificial sobre Consciência em Máquinas.

O filósofo mais citado nos trabalhos relacionados à Imaginação é Kant, principalmente por seus estudos sobre mente e a relação com Consciência.

O modelo de mente de Kant possui dois elementos fundamentais que são: as nossas percepções conscientes, ou

intuições, e a formação de conceitos através dos dados por nós percebidos [3]. O que é mais claramente traduzido pela sua frase: “Thoughts without content are empty, intuitions without concepts are blind” [4].

É sobre esse elemento que se forma a sua idéia de imaginação como Reprodutiva e Produtiva [5]. A primeira sendo relacionada ao que podemos reproduzir, não estando necessariamente presente, pelo fato de sensorirmos o mundo, aqui entra o conceito bastante discutido de embodiment. E a segunda, muito relacionada com a criatividade, sendo a nossa capacidade de criar novos elementos no mundo que não necessariamente existam da forma como o percebemos, além de ser essencial para a formação de qualquer pensamento e nossa autoconsciência.

II. IMAGINAÇÃO COMPUTACIONAL

A Imaginação Computacional é ainda uma vertente pouco estudada dentro da Ciência Cognitiva na Inteligência Artificial, pois, como dito anteriormente, ela geralmente é inserida como parte de um estudo sobre Consciência ou Criatividade em seres artificiais.

Uma das maiores bases da Imaginação Computacional está na Neurociência isso porque a maior parte das áreas do cérebro que são responsáveis pela percepção e ações reais está ativa durante o processo de imaginação, principalmente as relacionadas à visão.

Em seu artigo, Farah [6] estuda exatamente as relações entre o processo de imaginação relacionado com as áreas do cérebro humano. Ela faz os experimentos baseando-se em pessoas que perderam certa funcionalidade do cérebro e medições em pessoas que tem uma atividade normal. Ela também percebe em seu trabalho que algumas áreas podem ser ativadas durante um processo em que a memória é utilizada, o que poderia corresponder a uma imaginação proveniente de uma memória episódica, como será tratado no trabalho apresentado mais adiante.

Um outro aspecto importante da Imaginação Computacional e que está relacionado com a divisão de imaginação comentada anteriormente, é que ela não é baseada em tentativas e erros. Existe um processo que não está relacionado apenas com informações sensoriais, aqui entra a parte produtiva da imaginação, e que tem um impacto direto sobre o comportamento.

O processo de imaginação é também relacionado com um plano de ações, por isso torna-se mais robusto.

A implementação da Imaginação Computacional é geralmente, no trabalho de muitos autores [7, 8, 9], formada por Redes Neurais devido, principalmente, a sua capacidade de aprendizagem, que é uma das correlações do processo de imaginação.

III. IMAGINAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA

Um dos primeiros relatos na literatura de uma criatura que teve seu desenvolvimento focado em uma Imaginação Artificial é o do robô MetaToto [10]. Nesse projeto é desenvolvido um sistema baseado na arquitetura de subsunção de Brooks e que é uma evolução da de um robô chamado Toto. Este robô só é capaz de realizar atividades que podem ser fisicamente realizadas, em contrapartida, o MetaToto consegue realizar atividades que não foram previamente executadas. Uma de suas grandes funcionalidades nesse sentido é conseguir encontrar um ponto de referência baseado em descrições do ambiente. Sua implementação é feita através de um programa que simula a sua posição em determinada cena e que tipo de informações os seus sensores poderiam receber naquele local.

IV. ARQUITETURAS DE HUGO G. MARQUES

Em sua tese de doutorado [11], Hugo G. Marques estudou a Imaginação Computacional desenvolvendo arquiteturas e as implementando em um robô chamado CRONOS e SIMNOS, o primeiro sendo o robô físico e o segundo a própria mente do agente.

Em seu trabalho, Marques enfatiza que não procurou criar arquiteturas para reproduzir a forma com a qual o ser humano imagina, mas sim realizar uma arquitetura, com as ferramentas que possuía, para investigar o que era factível e tratável nessa área.

O SIMNOS é uma plataforma de simulação criada por [12] para ser utilizada no CRONOS, como parte de seu projeto. A idéia inicial para a qual essa plataforma foi desenvolvida foi de um experimento de Consciência em Máquinas. Pode-se ver aqui, como comentado anteriormente, a Imaginação Computacional relacionada como parte da Consciência em Máquinas.

Como parte do CRONOS, o SIMNOS possui uma representação gráfica 3D de um robô, com 40 graus de liberdade e a mesma localização dos sensores.

Uma de suas características mais importantes é poder representar a interação entre milhares de objetos em uma mesma cena, o que o torna uma ferramenta muito interessante de percepção.

A Imaginação no SIMNOS utiliza duas instâncias correlatas para ser constituída. A primeira para prever a interação com o mundo real e a segunda para modelar essa primeira interação de forma a conseguir prever as conseqüências sensoriais de suas ações.

Com base nessas instâncias, são definidos três conceitos para serem utilizados nas arquiteturas. O primeiro é o conceito de Alvo, que é o objeto do mundo para o qual a ação é dirigida. O segundo é o conceito de Ação, que é o que pode ser executado sobre o Alvo. Por fim, o terceiro conceito é o de Comportamento, que será a aplicação de uma ação sobre o alvo. Dentro do Conceito de comportamento, ainda são definidos dois tipos, o que é executado no meio real e o que será gerado apenas pela Imaginação do agente.

Um outro conceito a ser desenvolvido é o de Planejamento que é a execução de um comportamento direcionado a um objetivo, nesse momento existiria a intencionalidade. No entanto, vale ressaltar, que o planejamento que é descrito pelas primeiras arquiteturas é algo simples e de apenas um passo (single-step).

Marques constrói suas arquiteturas progressivamente, acrescentando módulos e funcionalidades a cada novo projeto. A Arquitetura Básica Reativa, mostrada na figura 1, funciona como descrito abaixo.

Os dados do ambiente são coletados através de um sensor e um objetivo (Goal), algo que o sistema deverá alcançar, é estipulado. A partir disso, um módulo de Avaliação é acionado e deve verificar se é possível realizar ou não este objetivo de acordo com a seleção de um Alvo e de uma Ação. Caso o Alvo e a Ação selecionados sejam suficientes para resolver o problema, o sistema aciona o módulo motor e a executa. Caso contrário, ele irá buscar uma solução factível através do processo de imaginação.

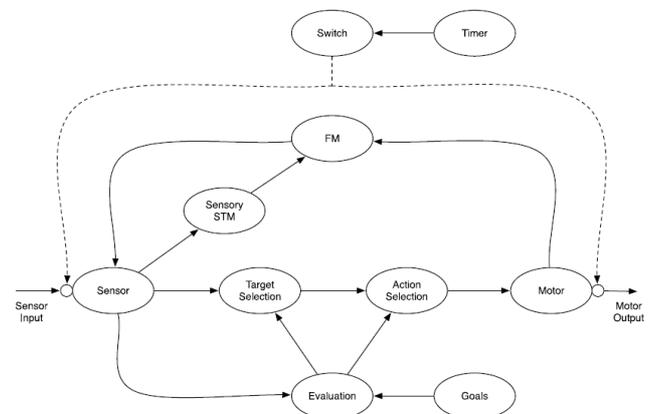


Figura 1: Arquitetura Básica Reativa

O processo de imaginação executa o seguinte procedimento: primeiramente o fechamento da chave, que inibe o sensoriamento do ambiente, a escolha de um novo objetivo e qualquer possível ação; depois, o acionamento do Timer, no qual é estipulado um tempo para que a solução do problema seja encontrada e, por fim, o estado atual de sensoriamento é armazenado no Sensor STM.

Após esse processo, o sistema começa a executar, deterministicamente, possíveis ações para resolver o problema especificado. Tais ações são testadas pelo módulo FM a partir dos dados do Sensor STM. Assim que a solução é encontrada, o sistema interrompe seu funcionamento, restaura os seus estados iniciais e executa a ação escolhida para realizar o objetivo.

No caso em que todo o tempo estipulado é consumido e a resposta para o problema não é encontrada, o sistema retorna que não foi possível executar uma ação para aquele objetivo.

A escolha das ações a serem tomadas, como explicado anteriormente, é feita de forma determinística e randômica. Um vetor é dividido em intervalos e para cada um é determinada uma ação correspondente. Isso causa uma certa imprecisão nesse sistema, pois ele apenas executa uma ação qualquer, nenhum outro fator é considerado. Para solucionar isso de uma forma muito simples, foi criado um método de seleção probabilístico que não daremos enfoque neste trabalho.

Um outro problema dessa arquitetura é que ela é reativa. Isso significa, em termos de execução do problema, que o processo de imaginação é finalizado assim que a solução é encontrada. Ou seja, nenhuma tentativa de uma escolha mais adequada àquele problema é considerada.

Para tentar solucionar essa questão, foi criado um novo módulo para a arquitetura em questão: o Target and Action Evaluation STM. Esse módulo é responsável por avaliar, através de um método de comparação, se a solução encontrada naquele momento é melhor que uma encontrada a priori. A nova arquitetura foi batizada então de Arquitetura Básica Racional e está ilustrada na figura 2.

Para que tal módulo funcione corretamente é necessário que o sistema não interrompa a execução do processo de imaginação assim que encontrar uma solução adequada, dessa forma, todo o período estipulado pelo Timer deverá ser utilizado para que o sistema busque novas soluções continuamente.

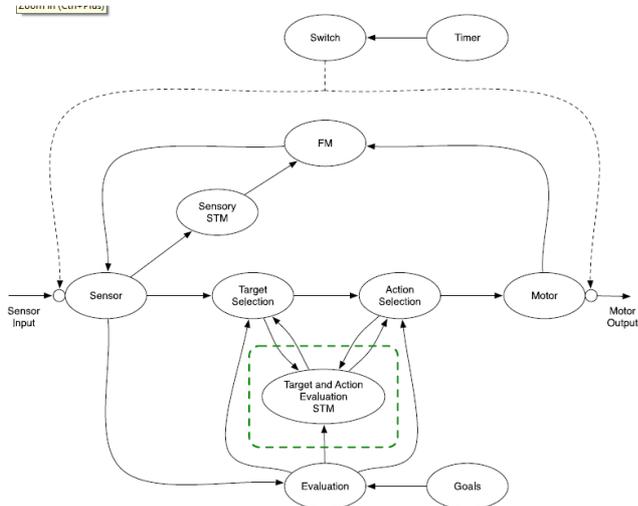


Figura 2: Arquitetura Básica Racional.

Apesar de existir um determinado tipo de memória nessa arquitetura, ela ainda é rudimentar e não permite que sejam buscadas informações passadas para resolver novos problemas. Isso se deve ao fato de esse módulo sobrescrever o melhor comportamento anterior assim que um melhor é encontrado, além de não possuir nenhum mecanismo que fosse capaz de utilizar essa informação caso ela fosse continuamente armazenada. São armazenados nesse módulo a Ação, o Alvo e a Avaliação, sendo armazenados todos os vetores de saliência.

As duas arquiteturas descritas até o momento foram submetidas a testes para analisar seu comportamento. O teste em questão utilizava um objeto vermelho, Alvo, e a Ação selecionada foi de jogar o objeto para que esse atingisse uma distância mínima. Esse teste foi executado por 50 vezes e os resultados para as duas arquiteturas foram próximos no sentido de conseguir realizar o objetivo, a Reativa acertou 48 das 50 tentativas e a Racional 49 das 50, mesmo que na segunda arquitetura a solução encontrada fosse mais plausível.

Mesmo com a evolução do Módulo de Avaliação, a arquitetura Racional ainda possuía muitas limitações, sendo a principal delas a de não possuir aprendizagem a partir dos planos que executava.

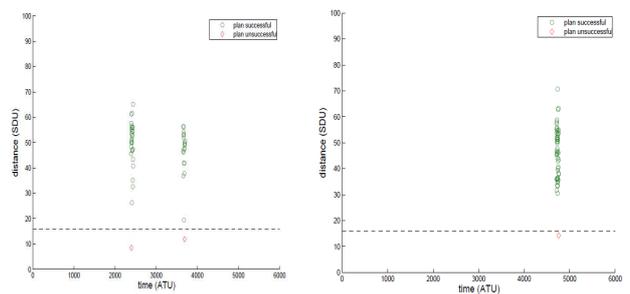


Figura 3: Resultado das simulações das duas arquiteturas, a Reativa e a Racional, respectivamente. Os resultados em verde mostram o resultado favorável da ação, os vermelhos mostram os erros de execução.

Como forma de avaliar a efetividade dos sistemas e verificar se um procedimento meramente aleatório iria gerar resultados semelhantes, foi realizada uma simulação da arquitetura sem o processo de imaginação. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, pois a simulação gerou 25 erros em 50 tentativas, exatamente o estatisticamente esperado para um sistema aleatório com duas possibilidades. O resultado pode ser verificado na figura 4.

Para evoluir as arquiteturas em questão, no entanto, uma arquitetura single-step mostrava-se muito limitada. Dessa forma, foi criada uma arquitetura multi-step que permitia uma evolução no planejamento dentro da criatura ao permitir o uso de um seqüenciamento de ações com o objetivo de atingir um determinado resultado, ou seja, ela possuía planejamento.

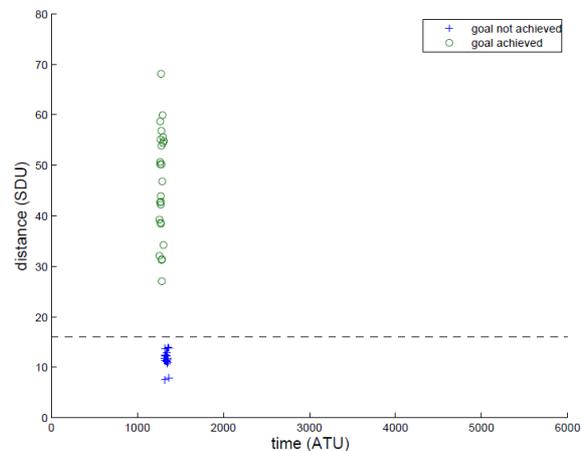


Figura 4: Resultado dos testes para a arquitetura sem imaginação.

Uma grande diferença no planejamento de uma arquitetura multi-step em relação a uma single-step está no fato de que na segunda o agente não consegue dizer se um passo intermediário é correto, ou suficiente, para atingir o objetivo, antes de finalizar todo o processo de imaginação. Somente depois de finalizadas todas as ações é que ele consegue saber se o procedimento foi bem sucedido ou não. Já no planejamento multi-step, o agente é capaz de inferir se o passo executado fará parte de uma sequência, plano, de sucesso ou não.

A outra diferença, mais evidente, é que uma arquitetura multi-step precisa que exista uma sequência adequada para realizar um plano, o que não ocorre na single step, pois essa só executa uma ação.

Baseada nessa idéia de planejamento que foi construída a primeira arquitetura multi-step, denominada Arquitetura Básica Multi-step, como pode ser visto na figura 5.

Esta é uma arquitetura definida como reativa, econômica e sem memória e possui seu fluxo de controle dividido em duas partes que são a Chave e o Comportamento.

Os novos módulos que foram incluídos na arquitetura foram o Seletor de Estados e a Memória Episódica.

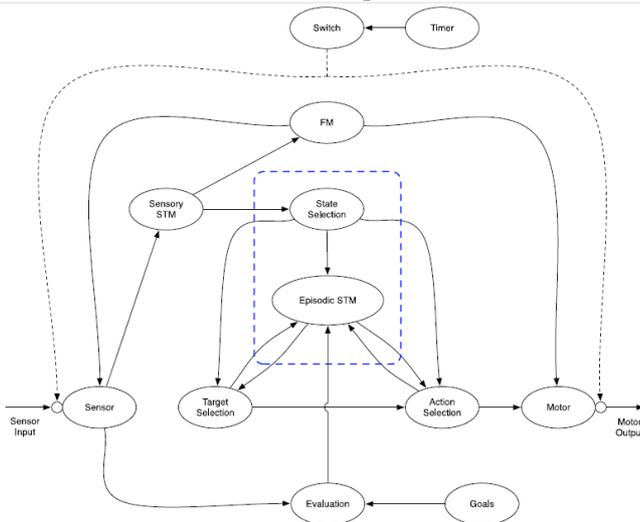


Figura 5: Arquitetura Básica multi-step, com os módulos de Memória Episódica e de Seletor de Estados.

O Seletor de Estados é responsável por identificar o estado de reforço baseando-se nas características do ambiente. Isso se mostra necessário ao pensarmos na questão do Frame Problem, que são justamente as características importantes em um determinado ambiente para a escolha adequada da solução. Um exemplo pode ser precisar realizar uma ação em um objeto, neste contexto informações sobre o tamanho do objeto seriam importantes o que não seria o caso de um problema em que se trabalha com música, no qual esse tipo de informação seria dispensável. Providos da informação gerada pelo Seletor de Estados, os mecanismos de Seleção de Ação e de Alvo são capazes de definir mais adequadamente as políticas de decisão da arquitetura.

O estado do agente é definido por quatro variáveis binárias que representam: a presença de um objeto próximo à mão direita do agente, a presença de um objeto do mesmo lado

direito, a presença de um objeto próximo à mão esquerda do agente e, por fim, a ausência de um objeto do mesmo lado.

Após os mecanismos responsáveis selecionarem a ação e o alvo, eles reportam esses dados para o módulo de Memória Episódica.

O módulo de Memória Episódica possui uma função central de formar e utilizar associações entre itens experienciados em um intervalo de tempo próximo.

De forma prática, a memória episódica armazena o estado, o alvo e a ação selecionados para cada estado, tudo isso sequencialmente. Dessa forma, ela consegue armazenar cada passo necessário para atingir um objetivo individualmente. Após isso, ela armazena o número de ciclos necessários para executar um episódio, informação que se mostra muito útil na determinação do tempo de execução de um objetivo e que será usada mais adiante em uma arquitetura mais completa. Essa característica faz parte também do sistema de reforço da arquitetura, a ser explicado adiante.

Utilizando a implementação descrita, a arquitetura é capaz de realizar um mecanismo de reforço positivo. Esse mecanismo é dado no momento em que as políticas de comportamento são atualizadas. Isso ocorre no momento em que uma ação é realizada com sucesso. Nesse instante os pesos correspondentes ao alvo e à ação de cada estado da Memória Episódica são alterados segundo a delta rule que é uma regra para atualização dos pesos de uma rede neural simples de uma camada de perceptrons. Apesar de não ser muito bem descrita a rede neural na tese de Marques, podemos verificar aqui o que foi dito anteriormente sobre a ampla utilização das mesmas nos processos de aprendizagem de criaturas artificiais.

Os resultados da implementação dessa arquitetura mostraram-se mais robustos, pois o agente consegue trabalhar com uma gama maior de problemas envolvendo, por exemplo, mais de um objeto na cena. Na figura 6 são apresentados os resultados do experimento realizado com a arquitetura em questão. Podemos verificar que ela teve grande eficiência em realizar os experimentos, não conseguindo encontrar a solução com o processo de imaginação apenas em quatro tentativas das 30 realizadas.

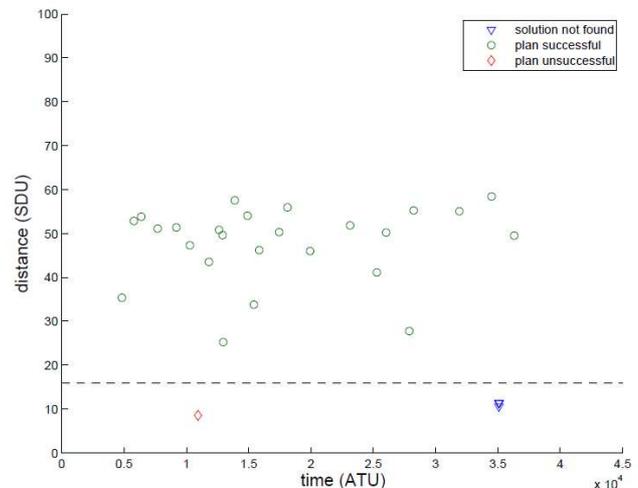


Figura 6: Resultados dos experimentos realizados com a arquitetura básica multi-step. Foram realizados 30 experimentos em que quatro não tiveram uma

solução encontrada, uma teve o planejamento incapaz de alcançar o objetivo e as outras 25 ações foram corretas.

No entanto, na questão de planejamento esta arquitetura ainda poderia melhorar, pois ela não é capaz de utilizar um passo definido anteriormente para um problema como solução de um novo. Não há nenhuma relação entre os estados já armazenados na memória episódica com eventuais ocasiões futuras.

Para solucionar essa condição, Marques cria a última arquitetura apresentada em sua tese, nomeada como Arquitetura Multi-step Reativa Econômica e Memorizadora que pode ser visualizada na figura 7.

O grande diferencial dessa arquitetura está no Módulo de Planejamento. Tal módulo é capaz de definir quando o agente deve utilizar uma ação que está na Memória Episódica, algum plano que já foi realizado anteriormente, e quando ele deve iniciar um novo processo de Imaginação. Esse módulo é tem uma entrada diretamente relacionada ao objetivo da arquitetura, isso é feito para que ele seja capaz de atribuir diferentes políticas e diferentes mecanismos de reforço, já que eles diferem para cada tipo de problema.

A forma de distinção entre realizar o que há na memória ou realizar um novo processo de imaginação é descrita a seguir.

Primeiro o sistema verifica se existe alguma solução possível no Módulo de Planejamento que seja solução, ou parte de uma, para o problema. Se existir, ele atualiza os estados dos módulos de seleção de ação e de alvo e executa o procedimento para realizar o objetivo. Caso não exista, ele executa a rotina de imaginação, iniciando por reconhecer o ambiente e gerar o estado de reforço. Após isso, ele verifica se esse estado existe no Módulo de Planejamento e, se existir, ele carrega os estados nos módulos de seleção de ação e de alvo e passa a executar o seu processo de imaginação a partir de então. Caso o estado não exista no Módulo de Planejamento, o sistema realiza o procedimento de imaginação para todas as ações.

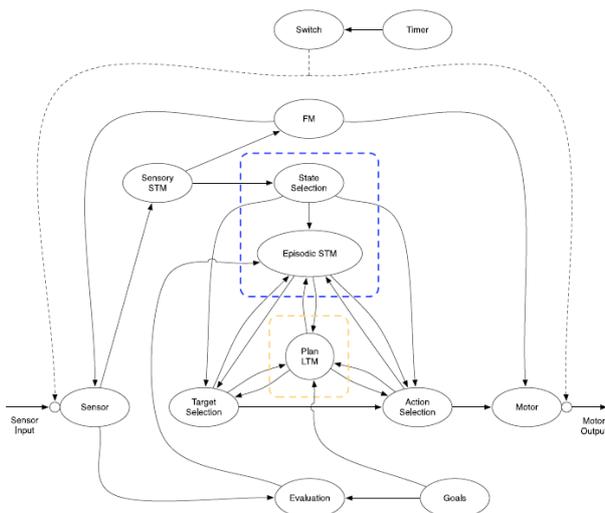


Figura 7: Arquitetura Multi-step Reativa Econômica e Memorizadora

Algo importante de se salientar é que o processo de armazenagem de um plano somente é ativado quando o do

reforço positivo termina, sendo este iniciado somente quando uma simulação tem sucesso. Isso permite que o modelo de reforço funcione adequadamente.

O experimento realizado para a implementação e teste dessa arquitetura foi dividido em quatro blocos de oito tentativas cada. Nos testes o círculo verde corresponde às ações efetivas e a cruz vermelha às que não conseguiram atingir o resultado esperado.

O primeiro bloco foi a primeira bateria de testes, e podemos perceber que o tempo para a execução das tarefas foi maior que nos segundo e terceiro blocos (o terceiro muito pouco maior). Isso se deve ao fato de que nesse primeiro estágio o Módulo de Planejamento está vazio, então o sistema deve executar toda a rotina de planejamento e do processo de imaginação.

No segundo bloco o mesmo experimento é realizado, porém o sistema mostra-se mais rápido. Isso se deve ao fato de, desta vez, ele utilizar os planos memorizados para a execução, não precisando recorrer ao procedimento de imaginação.

Em um terceiro momento, é feito um teste um pouco diferente. Antes o agente deveria reconhecer um objeto de uma cor, dentre um azul e um vermelho, e executar a ação de mover o azul (que ficava fora do seu campo de visão) e derrubar o vermelho. Diferentemente, na terceira bateria de testes, o agente precisa apenas derrubar o objeto vermelho. A diferença está no fato de o objeto azul participar do cenário aparecendo assim no seu campo de visão, o que antes não ocorria. Dessa forma, o agente executa um passo de imaginação em que o objeto azul é inserido na cena e, através da atualização das políticas, ele consegue realizar a tarefa sem precisar utilizar o processo inteiro de imaginação. Com essa tarefa, seu tempo de execução mostra-se muito mais rápido que o do primeiro bloco e muito próximo ao segundo bloco.

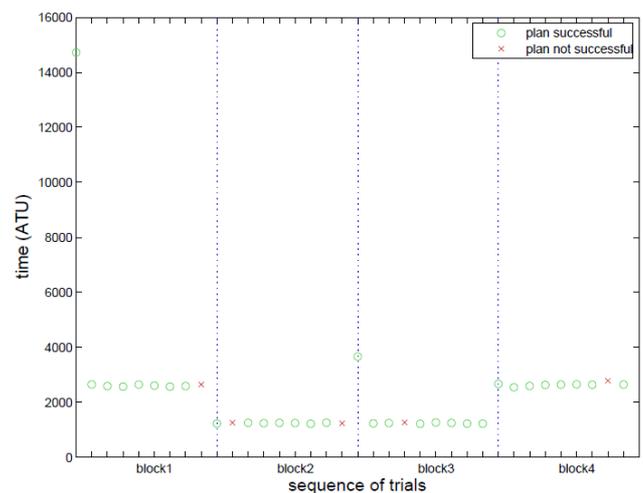


Figura 8: Experimentos realizados para verificar a validade da arquitetura proposta com relação ao processo de planejamento junto com memorização.

Por fim, um experimento é realizado para avaliar a influência do procedimento de atualização de políticas no tempo total de execução do objetivo. Assim, o primeiro

experimento é realizado novamente, juntamente com o sistema de atualizações de políticas e o resultado é que este pouco interfere no comportamento final do agente.

Os objetivos que não foram atingidos foram atribuídos aos erros do próprio sistema de vibrações que acabaram por derrubar o objeto vermelho antes de finalizada a ação efetivamente.

V. CONCLUSÃO

Podemos inferir através do estudo realizado que a Imaginação Computacional ainda é uma ciência incipiente e que suas bases estão muito atreladas a estudos de outras áreas da Ciência Cognitiva aplicada à Inteligência Artificial, principalmente a Consciência. As principais arquiteturas de seres artificiais que contém Imaginação tem sua implementação baseada em redes neurais, isso devido, principalmente ao fato de a rede neural ser capaz de aprender, que é uma das principais características e importância do processo de Imaginação em seres humanos. Como visto nas arquiteturas apresentadas, uma grande capacidade adquirida foi a de aprendizado por reforço.

Apesar de incipiente, a Imaginação em seres artificiais se mostra muito importante se quisermos construir seres que tenham realmente uma capacidade como a dos humanos de consciência e aprendizagem.

Mas o processo de Imaginação Computacional vai muito além de seres artificiais. Ele pode ser utilizado em aplicações que precisem de soluções inteligentes que exijam previsões sobre algum resultado de alguma ação futura, ou sobre o que ocorre durante um intervalo de algum problema. Sendo utilizado por esse aspecto, ele poderá ser um processo interessante de otimização e modelagem.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] R. Clowes, S. Torrance, R. Chrisley, "Machine Consciousness, Embodiment and Imagination" *Journal of Consciousness Studies*, 14, No. 7, 2007, pp. 7-14.
- [2] P. O. A. Haikonen, "You Only Live Twice: Imagination in Conscious Machines", *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 19-25.
- [3] S. Stuart, "The Binding Problem: Induction, Integration and Imagination", *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 12-18.
- [4] I. Kant, "The Critique of Pure Reason", Macmillan Press, 1929.
- [5] R. Chrisley, R. Clowes, S. Torrance, "Next-generation approaches to machine consciousness", *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 1-9.
- [6] M. J. Farah, "The Neural Bases of Mental Imagery", In MS Gazzaniga, editor, *The Cognitive Neurosciences* MIT Press, Cambridge MA, 2 edition, 2000, pp 963-975.
- [7] M. Shanahan, "Consciousness, Emotion, and Imagination - A Brain-Inspired Architecture for Cognitive Robotics" *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 25-35.
- [8] T. Ikegami, "Chaotic Itinerancy, Active Perception and Mental Imagery", *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 36-39.
- [9] J. Stening, H. Jacobsson, T. Ziemke, "Imagination and Abstraction of Sensorimotor Flow: Towards a Robot Model", *Proceedings of the AISB05 Symposium on Next Generation approaches to Machine Consciousness: Imagination, Development, Intersubjectivity, and Embodiment*, 2005, pp 50-58.
- [10] L. A. Stein, "Imagination and Situated Cognition", *Artificial Intelligence Laboratory - Massachusetts Institute of Technology, A.I. Memo N° 1227*, EUA, 1991, pp. 8.
- [11] H. G. Marques, "*Architectures for Embodied Imagination*", A thesis submitted for the degree of Ph.D. in Computer Science, School of Computer Science and Electronic Engineering - University of Essex, England, 2009, pp. 399.
- [12] D. Gamez, R. Newcombe, O. Holland, R. Knight, 'Two Simulation Tools for Biologically Inspired Virtual Robotics', *Proceedings of the IEEE 5th Chapter Conference on Advances in Cybernetic Systems*, Sheffield, 2006, pp. 85-90.