UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FRANCISCO ROBSON OLIVEIRA DE LIMA

PROJETO DE ORGANIZAÇÕES DE PROGRAMAS DE AGENTES ARTIFICIAIS EM SISTEMAS DE INTELIGÊNCIA AMBIENTAL

FORTALEZA – CEARÁ

2018

FRANCISCO ROBSON OLIVEIRA DE LIMA

PROJETO DE ORGANIZAÇÕES DE PROGRAMAS DE AGENTES ARTIFICIAIS EM SISTEMAS DE INTELIGÊNCIA AMBIENTAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Gustavo Augusto Lima de Campos

FORTALEZA – CEARÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Lima, Francisco Robson Oliveira de.
Projeto de Organizações de Programas de Agentes Artificiais em Sistemas de Inteligência Ambiental [recurso eletrônico] / Francisco Robson Oliveira de Lima. - .
1 CD-ROM: il.; 4 ¾ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico com folhas, acondicionado em caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação, Abaiara, .
Área de concentração: Ciencia da Computação.
Orientação: Prof. Dr. Gustavo Augusto Lima de Campos.

1. Ambientes Inteligentes. 2. AmI. 3. Simulações Baseadas em Multiagentes. I. Título.

FRANCISCO ROBSON OLIVEIRA DE LIMA

PROJETO DE ORGANIZAÇÕES DE PROGRAMAS DE AGENTES ARTIFICIAIS EM SISTEMAS DE INTELIGÊNCIA AMBIENTAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Aprovada em: 14 de Dezembro de 2018

BANCA EXAMINADORA

Gustavo Augusto Lima de Campos (Orientador)
Universidade Estadual do Ceará – UECE

José Everardo Bessa Maia
Universidade Estadual do Ceará – UECE

Marcos Antônio de Oliveira
Universidade Federal do Ceará – UFC

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, Maria Rosimeire e José Rômulo, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Obrigada meus irmãos, Paulo Denis, Camila Maria, e Bruno Henrique, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

À meu orientador professor Dr. Gustavo Campus pela paciência, oportunidade, incentivo e ajuda que foram indispensáveis para escrita deste trabalho.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação.

“If more of us valued food and cheer and song above hoarded gold, it would be a merrier world.”

(J.R.R. Tolkien)

RESUMO

A construção de grandes sistemas é uma atividade complexa que exige um alto nível de planejamento, ainda mais nas etapas iniciais do projeto. Erros nessa etapa se propagam durante todo o ciclo de vida do sistema, e podem aumentar seu custo ou até mesmo inviabilizá-lo. Quanto mais complexo o sistema, maiores são as chances de o projeto apresentar erros. Isso ocorre devido ao grande número de componentes que o sistema possui e ao alto grau de interação entre eles. Em aplicações de Ambientes Inteligentes (AmI), por exemplo, temos, em um determinado espaço físico, diversos dispositivos inteligentes, capazes de interagir com o ambiente e com usuários através de sensores e atuadores. Em ambientes pequenos e com pouca circulação de pessoas, o desenvolvedor poderia criar um projeto sem muitas dificuldades, mas, à medida que o ambiente ganha volume, o número de pessoas circulando cresce e a quantidade de dispositivos aumenta, ficando mais difícil determinar o comportamento exato do sistema. O objetivo deste trabalho é idealizar uma abordagem computacional capaz de contribuir com a criação de sistemas sociotécnicos complexos nas etapas de projeto e de avaliação de desempenho. Ou seja, pretendemos definir uma abordagem capaz de auxiliar desenvolvedores de sistema *AmI* a entender melhor o que eles pretendem construir, definindo suas funções, sua estrutura, e seu comportamento. A abordagem desenvolvida utilizará programas de agentes inteligentes, onde cada agente deverá pertencer a uma organização que representa uma entidade do sistema. Os agentes, além de serem capazes de representar as funcionalidades das entidades, devem fornecer ao desenvolvedor informações quanto ao seu desempenho dentro da organização. Além disso, para auxiliar o desenvolvedor a visualizar os resultados da sua visão do sistema, propomos também a utilização de simulações baseadas nos agentes definidos. O objetivo dessa simulação é mostrar ao desenvolvedor como o sistema irá se comportar antes que o processo de implementação seja iniciado, permitindo a detecção de possíveis falhas do projeto.

Palavras-chave: Ambientes Inteligentes. AmI. Simulações Baseadas em Multiagentes.

ABSTRACT

Construction of large systems is a complex activity that requires a lot of planning, even more in the project initial stages. Errors in this stage disseminate throughout the application lifecycle, increasing its cost. As the system grows, it becomes more complex and more error-prone. This is due to a large number of components the system has and the high degree of interaction between them. Ambient Intelligence (AmI) applications use several devices, spread throughout the environment to interact with users. In small environments with a low movement of people, a developer could build an AmI project with little concern related to project errors, but as the environment grows, more users arrive and more devices are used, becoming harder to establish the exact behaviour of the system. This work objective is to design a computational approach capable of contributing to the creation of complex sociotechnical systems in the design and performance evaluation stages. We intend to define a computational approach, capable of helping the system designer to better understand the system he intends to construct, defining its functions, structure, and behaviour. In order to help the developer visualize the results of his vision, defined according to our approach, we propose the use of multi-agent based simulations. The purpose of this simulation is to show the developer how the system will behave before the construction process is started, allowing the detection of possible project failures.

Keywords: Ambient Intelligence. AmI. Multi-Agent Based Simulatuions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ALGORITMOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAL	*Ambient Assisted Living*
ADS	*Agent Directed Simulation*
AmI	*Ambient Inteligence*
BDI	*Belief, Desire and Intentions*
DS	*Deontic Specification*
EI	*Eletronic Institution*
FIPA-ACL	*Foundation for Intelligent Physical Agents – Agent Communication Language*
FS	*Functional Specification*
INCOSE	*International Council of Systems Engineering*
ISTAG	*Information Society Technologies Program Advisory Group*
IoT	*Internet of Things*
MABS	*Multiagent Based Simulation*
OS	*Organization Specification*
RFID	*Radio-Frequency IDentification*
SS	*Structural Specification*
AFD	Automato Finito Determinístico
FEC	Função Estrutura e Comportamento
SMA	Sistemas Multiagentes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Ambientes inteligentes (*AmI*) são sistemas sociotécnicos, ou seja, sistemas distribuídos que envolvem interações complexas entre pessoas, máquinas e *softwares*, concebidos para realizar objetivos de interesse dos usuários do sistema em ambientes de tarefas difíceis. Todos esses componentes devem interagir para que, de maneira não intrusiva, o sistema perceba as informações do ambiente de tarefas e dos usuários, utilizando-as para selecionar um conjunto de ações a serem executadas. O propósito é realizar os objetivos dos usuários para os quais o sistema foi concebido. Nas aplicações de sistemas *AmI* o usuário é a entidade central do modelo.

Com a popularização da internet e a miniaturização dos dispositivos, houve um impulso para o surgimento e a inserção de sistemas *AmI*, através de vários objetos equipados com uma interface para conexão. Atualmente, esses dispositivos e outros objetos físicos fazem parte do cotidiano das pessoas e podem ser conectados à *internet*, visando implementar sistemas *AmI* que simplifiquem a vida delas de diversas maneiras. A popularidade desse tipo de implementação contribuiu para o surgimento do paradigma de "*Internet* das Coisas". Assim, tais sistemas e todos os seus serviços devem ser construídos a partir dos usuários, de seus objetivos, e do ambiente de tarefa.

Em ambientes inteligentes controlados, com pouco espaço, sem muitas mudanças, e com pouca circulação de pessoas, não existem muitas dificuldades no processo de criação dos sistemas *AmI*. Mas, à medida que o ambiente cresce e as condições de funcionamento passam a ser mais adversas, a chance do projeto do sistema *AmI* conter erros aumenta. Isso ocorre porque o desenvolvedor precisa entender como os componentes do sistema devem se comportar antes de construí-lo – o que pode ser relativamente simples para sistemas pequenos, mas praticamente impossível em sistemas *AmI* complexos.

Durante o projeto de sistemas *AmI* grandes e complexos, o desenvolvedor deve lidar com centenas ou milhares de componentes inteligentes espalhados por uma determinada região. Cada um desses componentes serve a um propósito específico, que, ao ser somado às ações de outros componentes, é capaz de atingir o objetivo do sistema. Tais componentes interagem com as pessoas que transitam na região a fim de produzir algum serviço útil para elas. Porém, devido à grande quantidade de componentes envolvidos nesse tipo de aplicação, a possibilidade de surgirem comportamentos imprevistos no sistema *AmI* é muito alta.

Além da grande quantidade de componentes nas aplicações de sistemas *AmI*, outro fator que contribui para a complexidade do sistema está relacionado às pessoas que frequentam

o ambiente. Esse fator não determinístico, em conjunto com a imprevisibilidade associada aos componentes do sistema, aumenta a complexidade imposta ao projeto do sistema *AmI*. Assim, a construção de tais sistemas complexos é uma tarefa árdua que necessita de muitos recursos e um alto nível de planejamento.

Qualquer erro na etapa de concepção do projeto pode ser propagado por todas as etapas seguintes, causando ainda mais falhas e, consequentemente, perda de tempo e recursos na tentativa de corrigi-lo. Em geral, os erros não estão relacionados à competência dos desenvolvedores, mas, sim, à alta complexidade associada à construção do sistema. Além das dificuldades impostas ao projeto por ambientes de tarefas difíceis, outro grande obstáculo está no processo de teste e validação dos sistemas. Portanto, o objetivo deste trabalho consiste em conceber uma abordagem computacional inteligente que seja capaz de contribuir com a criação de sistemas *AmI* complexos, principalmente nas etapas de projeto e de avaliação de desempenho do sistema.

Duas ideias principais estão presentes na abordagem. A primeira, para ajudar na concepção de um sistema *AmI*, consiste em representar formalmente determinadas decomposições funcionais do sistema através de organizações de programas de agentes artificiais Hübner, Sichman e Boissier (2002), Norvig e Russell (2004) e Wooldridge (2009). Já a segunda ideia consiste em utilizar uma plataforma de simulação multiagente, adequada à representação formal proposta, que permita ao projetista entender melhor o comportamento do sistema *AmI* em projeto, analisando seu desempenho em diferentes cenários do ambiente de tarefas, prevenindo erros e auxiliando na construção de projetos mais eficientes.

Mais especificamente, o esquema de representação proposto na primeira ideia é implementado a partir de um quadro formal denominado FEC. Esse quadro formal modulariza o sistema em três aspectos distintos, quais sejam: modelo funcional, modelo estrutural, e modelo comportamental. O modelo funcional determina os objetivos do sistema e as métricas que irão avaliar se eles foram alcançados. O modelo estrutural descreve as características necessárias para que o sistema possa alcançar esses objetivos, definindo a organização dos componentes e as formas de interação entre os componentes. O modelo comportamental estipula as funções computacionais necessárias para que o sistema possa alcançar seus objetivos, determinados no modelo de função, utilizando os recursos definidos no modelo estrutural.

A partir de um modelo FEC de um sistema *AmI*, é possível gerar simulações baseadas em agentes para permitir ao desenvolvedor verificar o comportamento do sistema em projeto, sem a necessidade de implantar toda a infraestrutura física necessária. A simulação ainda permite que o desenvolvedor tenha controle de todos os elementos da aplicação, permitindo que ele

adicione ou remova características de elementos, modifique condições ambientais, ou altere a quantidade de elementos presentes na simulação.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 destacamos todos os conceitos que fundamentam nossa abordagem, desde noções sobre ambientes inteligentes, passando por agentes inteligentes e suas organizações, até a engenharia de sistemas. No capítulo 3 salientamos os diversos trabalhos que nos inspiraram ou seguem um roteiro semelhante ao que propomos. Finalmente, no capítulo 4 descrevemos a abordagem que desenvolvemos neste trabalho. E no capítulo 5 apresentamos tanto os resultados obtidos quanto os trabalhos futuros.

1.2 MOTIVAÇÃO

A popularização dos sistemas *AmI*, aliada à expansão da "*Internet* das Coisas", torna a demanda por aplicações de inteligência ambiental cada vez mais comum. Neste trabalho é desenvolvida uma abordagem de concepção para sistemas de inteligência ambiental. Tal abordagem tem como principal objetivo auxiliar os desenvolvedores na definição inicial do sistema, e, em seguida, na sua evolução.

Outros trabalhos, como o de Garcia-Valverde *et al.* (2010), também definem uma metodologia de desenvolvimento para sistemas *AmI*. Já no trabalho de Mustafa (2013) são utilizadas simulações para coletar dados e aprimorar um sistema a ser construído. Ambos utilizam simulações multiagentes para melhorar um sistema a ser construído, porém, nenhum deles determina um quadro formal para auxiliar na construção dessa simulação, ou na definição de suas métricas, e o segundo trabalho não define uma metodologia para a construção do sistema.

A abordagem proposta elabora um sistema a partir de três aspectos distintos. O primeiro, *funcional*, define os objetivos do sistema e determina quais métricas serão usadas para extrair uma medida de desempenho. O segundo aspecto, *estrutural*, estabelece a arquitetura do sistema, definindo as entidades e suas conexões. Por fim, o aspecto *comportamental* delimita os comportamentos de cada entidade assim como sua forma de comunicação. A partir desse modelo inicial do sistema, é construída uma simulação de onde são coletados dados de acordo com as medidas estabelecidas no modelo de função. Com essas medidas, o sistema pode ser reformulado, visando melhorar sua performance. Esse ciclo de simulação e reformulação do sistema permite que ele amadureça mais rapidamente, ainda mais no caso de sistemas *AmI*, onde

são necessários dispositivos físicos no ambiente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor um quadro formal para auxiliar na concepção e desenvolvimento de aplicações para sistemas de ambientes inteligentes e na construção de simulações para contribuir com o teste e validação desses sistemas *AmI*.

O quadro formal proposto foi dividido visando levantar três modelos associados ao sistema *AmI* que se pretende desenvolver, sendo eles: modelo de função, modelo de estrutura, e modelo de comportamento. Com base nesses modelos, serão concebidas organizações de agentes que representam cada entidade do sistema. Cada agente inserido em cada organização cumprirá um papel associado a uma função da entidade de acordo com o nível de detalhamento pretendido pelo desenvolvedor.

Com a definição desses agentes, será desenvolvida uma simulação do sistema pretendido, com o propósito de estimar o desempenho do sistema em um ambiente virtual. O propósito é permitir que os desenvolvedores concebam diferentes modelos do sistema, que permitam a identificação e correção de situações imprevistas na etapa de concepção do sistema, evitando desperdício de tempo e recursos e permitindo testar o sistema em diferentes situações.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, mais especificamente, este trabalho propõe os seguintes objetivos:

a) Conceber um quadro formal que permita ao projetista do sistema *AmI* especificar adequadamente as suas funções, ou seja, os seus objetivos e as métricas que irão avaliar se eles foram alcançados.
b) Conceber um quadro formal que permita ao projetista do sistema *AmI* especificar a sua estrutura, ou seja, a organização dos componentes e as formas de interação entre os componentes do sistema.
c) Conceber um quadro formal que permita ao projetista do sistema *AmI* especificar o comportamento do sistema *AmI*, ou seja, o que é necessário para o sistema alcançar os objetivos no modelo de função empregando a organização definida

no modelo estrutural.

d) Aplicar o quadro formal no projeto de sistemas *AmI* e na simulação de sistemas projetados.

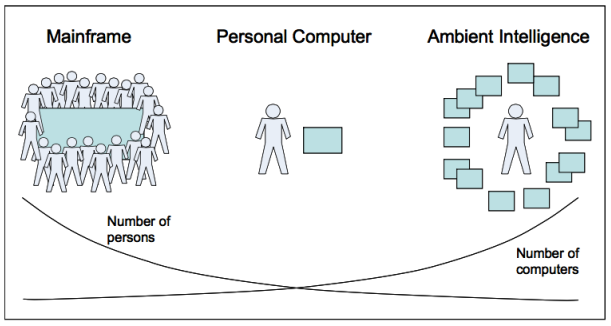
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os temas que serviram como base para as nossas pesquisas, detalhando mais profundamente os paradigmas de inteligência ambiental. Em seguida, explicaremos superficialmente o conceito de inteligência artificial, sobretudo em Sistemas Multiagentes. E, por último, abordaremos os conceitos que a engenharia de sistemas utiliza para a construção de sistemas complexos nas mais diversas áreas de atuação.

2.1 INTELIGÊNCIA AMBIENTAL

O termo Inteligência Ambiental, *AmI*, foi introduzido pelo comité Europeu *Information Society Technologies Program Advisory Group* (*ISTAG*). Esse termo é usado para descrever ambientes onde artefatos computacionais se misturam ao plano de fundo, tornando o ambiente sensível e responsivo. O conceito de *AmI* teve como base a noção de computação ubíqua, proposta por Weiser (1991). Sua proposta era que, com o avançar da tecnologia, os computadores se tornariam cada vez menores, incorporando-se aos objetos do ambiente, até o momento em que se tornassem invisíveis para as pessoas. Assim, usuários estariam a todo momento interagindo com inúmeros dispositivos computacionais de forma discreta e simples. A Figura 1 ilustra a evolução do volume de computadores com o passar do tempo.

Figura 1 – Relação entre o número de pessoas e o número de computadores com o passar do tempo.



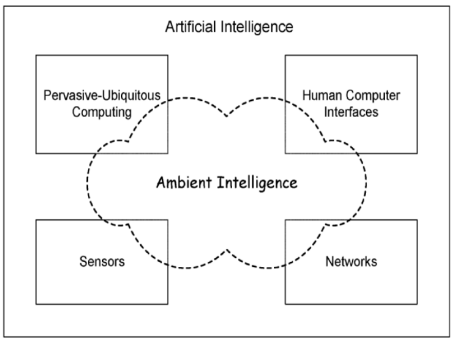
Fonte**:** Bick e Kummer (2008)

A computação ubíqua, ou computação pervasiva, apesar de ser fundamentalmente ligada à inteligência ambiental, possui uma diferença conceitual. A computação pervasiva enfatiza a presença de dispositivos físicos distribuídos pelo ambiente e a disponibilidade de recursos sem necessariamente tornar o ambiente inteligente (AUGUSTO, 2007). A necessidade de uma inteligência comandando os recursos do ambiente é a pedra fundamental do conceito de

ambientes inteligentes.

Sistemas *AmI* se relacionam com diversas subáreas da ciência da computação, além da computação ubíqua e inteligência artificial. A grande quantidade de sensores exige uma robusta rede de comunicação. Além disso, a interação entre os dispositivos e as pessoas no ambiente deve ocorrer da forma mais transparente possível, através de interfaces que exijam o mínimo de esforço dos usuários. A inteligência artificial deve permear todas essas áreas, seja otimizando funções do sistema ou provendo mais facilidades ao usuário. A Figura 2 ilustra as diferentes áreas que fazem parte da inteligência ambiental.

Figura 2 – Relação entre *AmI* e outras áreas.



Fonte**:** Augusto (2007)

A visão de um futuro cheio de objetos inteligentes e interativos oferece uma gama de oportunidades (BOHN *et al.*, 2005). Ambientes inteligentes podem ser utilizados nos mais diversos contextos. Algumas áreas que podem e até já se beneficiam do uso de sensores e objetos inteligentes são listadas abaixo.

- **Aplicações relacionadas à saúde** – Objetos inteligentes podem ser utilizados para fornecer serviços de monitoramento e análise dos pacientes de um hospital. Fornecendo aos médicos informações em tempo real do estado de cada um.
- **Serviços de transporte** – Carros inteligentes já estão em produção, e, apesar de ainda ser uma tecnologia muito nova, já mostra resultados animadores. Eles são equipados com sensores capazes de mapear o ambiente à sua volta e reconhecer outros carros próximos, evitando colisões e melhorando o fluxo de veículos.
- **Serviços de educação** – Instituições de ensino podem utilizar inteligência ambiental para monitorar seus alunos. Verificando sua frequência em sala de aula, acompanhando o progresso de suas atividades escolares, e, até mesmo, averiguando sua saúde.
- **Serviços de emergência** – Serviços de emergência em geral podem ter um tempo de

resposta melhor a um incidente. Por exemplo, casas equipadas com sensores de incêndio poderiam automaticamente enviar a sua localização aos bombeiros quando o fogo fosse detectado.

É interessante notar que os dispositivos utilizados em uma aplicação não necessariamente precisam estar no mesmo ambiente. Mais ainda, os objetos de uma aplicação podem ser utilizados não só por um, mas por vários sistemas. Por exemplo, digamos que um paciente esteja sendo monitorado em sua casa através de um conjunto de sensores; esses, por sua vez, enviam todas as informações captadas para o sistema do hospital através da internet. O sistema do hospital processa os dados e, em caso de emergência, comunica à ambulância mais próxima a localização do paciente, enviando também as informações necessárias para socorrê-lo. Essa conexão entre vários ambientes inteligentes tornou-se possível graças à "*Internet*das Coisas".

A *Internet das Coisas*, *Internet of Things* (*IoT*), é um fenômeno tecnológico derivado dos conceitos de comunicação ubíqua e inteligência ambiental (DOHR *et al.*, 2010). O termo *Internet of Things* foi usado pela primeira vez no fim da década de noventa, no trabalho de Ashton (2009), onde uma série de objetos eram capazes de se comunicar através de sensores *RFID*, possibilitando uma cooperação entre eles. Com o passar do tempo, esse conceito foi ampliado, permitindo que a comunicação acontecesse por outros meios como a *Internet*, fornecendo, assim, informações e serviços a usuários de diversos locais.

De uma perspectiva mais sistemática, a *Internet das Coisas* pode ser tratada como um sistema altamente dinâmico e radicalmente distribuído, composto por um grande número de objetos inteligentes, produzindo e consumindo informação (MIORANDI *et al.*, 2012). Esses objetos se comportam como interface entre o mundo real e o virtual. Eles são capazes tanto de sentir fenômenos físicos quanto de produzi-los, traduzindo-os em uma corrente de informações para o mundo virtual e agindo no ambiente físico através de atuadores quando certas condições são alcançadas.

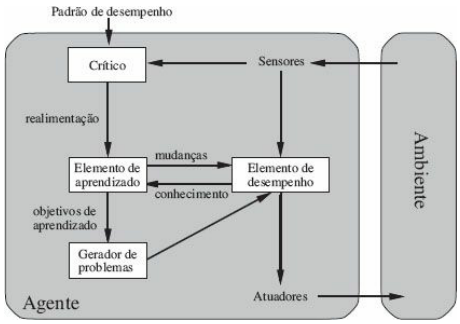
2.2 PROGRAMAS DE AGENTES ARTIFICIAIS RACIONAIS

Um agente é uma entidade capaz de perceber seu ambiente de tarefa por meio de sensores e agir nele por meio de atuadores. O comportamento de um agente pode ser descrito em termos matemáticos por uma função do agente capaz de mapear qualquer sequência de percepções para uma ação especifica. A função do agente é implementada concretamente pelo programa do agente, que é executado em uma arquitetura adequada (dispositivo de computação

com sensores e atuadores físicos). Idealmente, os agentes artificiais racionais, aqui decompostos em um programa de agente e em uma arquitetura, devem agir visando alcançar o melhor resultado esperado, avaliado de acordo com uma medida de desempenho (NORVIG; RUSSELL, 2004).

Norvig e Russell (2004) especificaram quatro tipos básicos de programas de agentes racionais que podem ser adaptadas para resolver problemas em diversos tipos de ambientes de tarefas difíceis. Esses programas incorporam os princípios subjacentes a quase todos os sistemas inteligentes, são classificados levando-se em consideração as informações empregadas no processo de tomada de decisão e as etapas componentes desse processo, ou seja, os agentes reativos simples e sua extensão baseados em modelos empregando regras condição-ação, e os agentes orientados por objetivo e sua extensão orientada por utilidade. Mais recentemente, esboçou-se uma estrutura para o agente com aprendizagem, isto é, a estrutura de um dos quatro tipos básicos com a capacidade de aprendizagem, conseguida pela integração à estrutura básica de três novas etapas à tomada de decisão. A Figura 3 apresenta o esboço da estrutura do agente com aprendizagem.

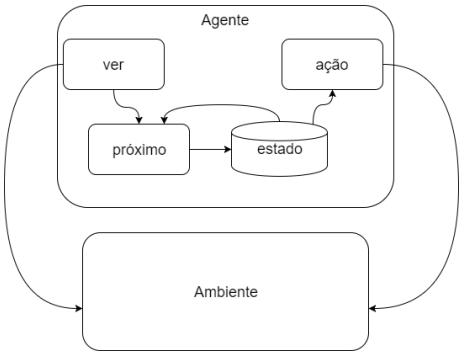
Figura 3 – Modelo geral de agentes com aprendizado.



Fonte**:** Norvig e Russell (2004)

Wooldridge (2009) descreveu formalmente as arquiteturas abstratas do agente reativo e do agente com estado interno, considerando três subsistemas (módulos) de processamento de informação componentes. Em seguida, destacou quatro maneiras diferentes de se concretizar projetos de agentes racionais, ou seja, os agentes lógicos, *subsumption*, *BDI*, e com arquiteturas em camadas. A Figura 4 destaca os três módulos de processamento da informação na arquitetura abstrata do agente com estado interno.

Figura 4 – Modelo de um agente com estado interno.



Fonte: Traduzido de Wooldridge (2009)

O comportamento do agente com estado interno pode ser resumido da seguinte forma: o agente inicia a partir de algum estado interno i_0, então, observa o estado do seu ambiente *e*, gerando a percepção *ver(e)*. O estado interno do agente é assim atualizado com a função próximo($ver(e), i_0$). O agente então seleciona uma ação com base na função *próximo* da seguinte forma *ação(próximo(ver(e), i_0))*. A ação é, portanto, executada, e, em seguida, inicia-se um novo ciclo, percebendo o ambiente através da função *ver*, atualizando o estado interno com a função *próximo*, e escolhendo uma ação com a função *ação*.

2.3 ORGANIZAÇÕES DE AGENTES RACIONAIS

Sistemas Multiagentes (SMA) são conjuntos de agentes que interagem, cooperando para atingir um objetivo comum, ou competindo por recursos no mesmo ambiente. Nesse contexto, uma organização é um padrão de cooperação entre agentes predefinido pelo designer da aplicação, ou gerado pelos próprios agentes a fim de atingir um propósito comum (BOISSIER; SICHMAN, 2004). Em uma casa inteligente, por exemplo, o time de agentes que controla o ambiente deve cooperar para maximizar o conforto das pessoas que residem naquele espaço.

Mas, para que a organização funcione da melhor forma, é necessário que o projetista seja capaz de resolver dois problemas relacionados ao time de agentes. Primeiro: ele deve ser capaz de criar agentes heterogêneos que, além de agirem de forma individual, sejam capazes de cooperar. Segundo: ele deve criar uma organização racional para esses agentes. Para criar organizações de agentes é necessário descrever formalmente a organização (FRANCO; CAMPOS; SICHMAN, 2016).

Organizações representam a racionalização e ordenação de vários instrumentos a fins de se atingir um objetivo específico (SELZNICK, 1948). Para que esses objetivos sejam

alcançados é necessário subdividi-los em diversos subobjetivos, que contribuem para o propósito geral da organização. Esses subobjetivos são definidos como papéis que são assumidos por agentes dentro de uma organização.

Organizações em SMA são apresentadas normalmente como estruturas monodimensionais. No entanto, na maioria dos casos, são compostas por diversos aspectos estruturais: autoridade, comunicação, delegação, tomada de decisão, poder etc. No trabalho de Grossi *et al.* (2005), as organizações são compostas por três dimensões, chamadas de: *poder*, *coordenação*, e *controle*, onde o *poder* está relacionado à delegação de atividades, a *coordenação* se relaciona ao conhecimento ou compartilhamento de informações, e o *controle* está ligado ao monitoramento de atividades. Formalmente, uma organização é representada pela tupla ilustrada a seguir.

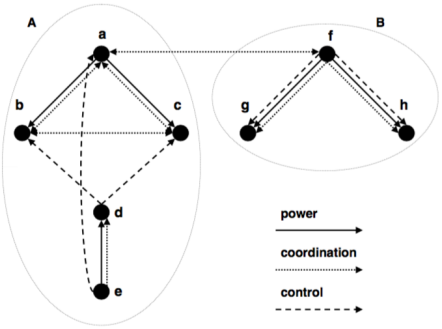
$$\langle R, R_{power}, R_{coord}, R_{control} \rangle \tag{2.1}$$

Cada papel em uma organização é assumido por apenas um único agente. Essa imposição torna mais explícita e simples a relação de poder entre os papéis pertencentes à organização. R representa o conjunto de todos os papéis da organização e R_{power}, R_{coord}, e $R_{control}$ são os relacionamentos entre papéis que caracterizam as estruturas de poder, coordenação, e controle. Tal que, $\forall r, s \in R$ temos que:

$$\begin{aligned} &(r,s) \in R_{poder} \Rightarrow \exists\, R_{coord}(r,s); \\ &(r,s) \in R_{poder} \Rightarrow \exists\, t \in R \mid R_{control}(t,s) \end{aligned} \tag{2.2}$$

A primeira parte da equação 2.2 determina que, para toda relação de poder entre o papel r e o papel s, existe uma relação de coordenação de r para s. Isso implica que sempre deve haver um fluxo de informação relevante do agente que assume papel r para o agente responsável pelo papel s. Já na segunda parte da equação, para cada relacionamento de poder entre dois papéis, existe um papel t responsável por controlar e monitorar suas ações. A Figura 5 ilustra em um grafo os relacionamentos de uma estrutura organizacional, onde duas subestruturas, A e B, comunicam-se.

Figura 5 – Exemplo de uma estrutura organizacional.



Fonte: Grossi *et al.* (2007)

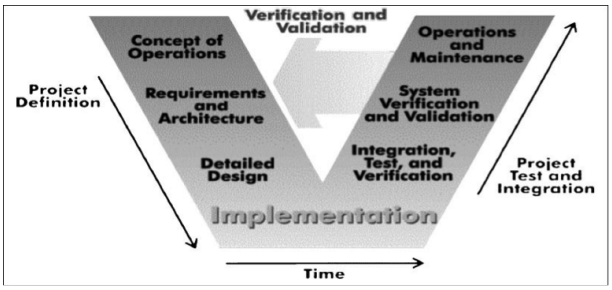
2.4 ENGENHARIA DE SISTEMAS

O Conselho internacional de Sistemas e Engenharia (*INCOSE*) define engenharia de sistemas como uma abordagem interdisciplinar que permite a criação de sistemas. Ela se preocupa em: (1) definir as necessidades do usuário e seus requerimentos no início do ciclo de desenvolvimento; (2) documentar requerimentos; (3) proceder com a síntese de criação; e (4) validar o sistema considerando o problema como um todo. Para a engenharia de sistemas, a chave para a criação de sistemas bem-sucedidos, que satisfaçam os requisitos do cliente dentro de um espaço de tempo esperado, está na definição dos limites do sistema (BARRY; KOEHLER; TIVNAN, 2009).

A engenharia de sistemas engloba todas as atividades envolvidas na aquisição, especificação, projeto, implementação, validação, implantação, operação e manutenção dos sistemas sociotécnicos (SOMMERVILLE *et al.*, 2003). Os engenheiros de sistemas se preocupam não apenas com o *software*, mas também com o *hardware* e com as interações entre o sistema, os usuários e o ambiente. Eles devem pensar sobre os serviços que o sistema oferece, as restrições sob as quais o sistema deve ser construído e operado e as maneiras pelas quais o sistema é usado para cumprir seu propósito ou finalidade.

O modelo V, ilustrado na Figura 6, representa um dos vários ciclos de vida da engenharia de sistemas. Na primeira parte, o modelo descreve detalhadamente o design dos subcomponentes do sistema, até o momento onde se atinge um entendimento mais completo do sistema e de como esses componentes trabalharão. Aí, os componentes são implementados e, em seguida, integrados e testados, até o ponto onde todo sistema esteja completo.

Figura 6 – Modelo V de desenvolvimento de sistemas.

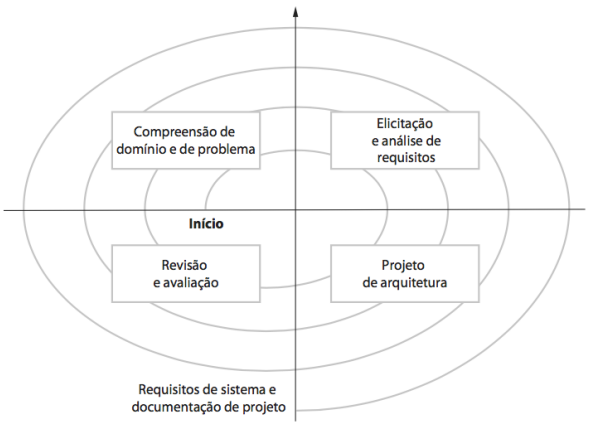


Fonte: Barry, Koehler e Tivnan (2009)

O processo de desenvolvimento ilustrado na figura 6 é utilizado na Engenharia de Sistemas devido ao grande número de componentes sendo construídos simultaneamente. Para sistemas que incluem *hardware* ou outros tipos de equipamentos físicos, alterações durante o desenvolvimento dos projetos acabam se tornando muito caras ou mesmo impossíveis. Isso torna necessário que os requisitos do sistema sejam assimilados pelo engenheiro antes de iniciar o desenvolvimento, ou construção, do *hardware*. Porém, a medida que o sistema é instalado, podem ser identificadas limitações no projeto, sejam por problemas no *hardware* ou por requisitos inalcançáveis.

Para evitar tal situação, é necessário criar algum projeto inicial para estruturar e organizar o processo de engenharia de requisitos. Nesse projeto, definiremos uma arquitetura de sistemas para, a partir dela, encontrar problemas com os requisitos existentes ou adicionar novos requisitos. Essa abordagem permite que o processo de definição de requisitos e de arquitetura seja tratado como algo contínuo na Engenharia de Sistemas. Consequentemente, podemos pensar nesses processos ligados em uma espiral, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Espiral de requisitos do projeto.



Fonte: Sommerville *et al.* (2003)

A espiral mostra como as decisões relacionadas a requisitos podem impactar no projeto e vice-versa. A partir de um ponto inicial, que representa a primeira versão do projeto, a espiral se afasta do centro, passando por todos os quadrantes do plano. Cada volta realizada representa uma nova adição ao projeto, ou um novo requisito.

De acordo com o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (LIGHTSEY, 2001), a engenharia de sistemas é um processo de gestão interdisciplinar, que busca comprovar, integrar e evoluir um conjunto de soluções, balanceadas através de um ciclo de vida, que ofereçam saídas capazes de satisfazer o cliente. A gestão na engenharia de sistemas visa controlar e integrar os processos que estão sendo construídos.

A gestão na engenharia de sistemas é alcançada através da integração de três outras atividades, a saber: fase de desenvolvimento; processo de engenharia de sistemas; e ciclo de vida e integração. Cada uma dessas atividades é essencial para atingir uma gestão adequada do desenvolvimento do sistema.

A fase de desenvolvimento é responsável pela conexão entre o design do sistema e a criação, ou aquisição, de tecnologia. Esse processo de desenvolvimento pode ocorrer nos seguintes estágios: (a) em um nível conceitual, onde é produzido um conceito do sistema; (b) em nível de sistema, produzindo uma descrição sobre a performance dele em relação aos seus requisitos; e (c) em nível de subsistema/componente, gerando descrições dos subsistemas/componentes, indicando suas performances e, ainda, uma descrição detalhada das suas características.

O processo de engenharia de sistemas é a etapa mais importante da engenharia de sistemas. O seu propósito é fornecer uma estrutura robusta e flexível, capaz de atender aos requisitos do sistema. Esse processo permite maior controle no desenvolvimento de soluções capazes de atender às necessidades do cliente. Esse procedimento é aplicado em cada nível de desenvolvimento do sistema para produzir uma descrição básica de configuração. Ele segue uma abordagem *top-down*, resolvendo problemas de forma iterativa e recursiva, aplicada de forma sequencial em todos os estágios de desenvolvimento. Esse processo é utilizado para transformar requisitos em um conjunto de produtos do sistema e descrições do processo, adicionando mais detalhes ao desenvolvimento e mais valor, gerando mais informações para auxiliar na tomada de decisões.

O ciclo de vida e integração se refere às ações associadas ao próprio ciclo de vida do sistema. Ele é necessário para garantir que a solução elaborada pelo sistema seja válida durante toda a sua execução. Essa etapa também inclui o planejamento associado ao desenvolvimento, assim como a integração das múltiplas funcionalidades relacionadas ao *design* e ao processo de

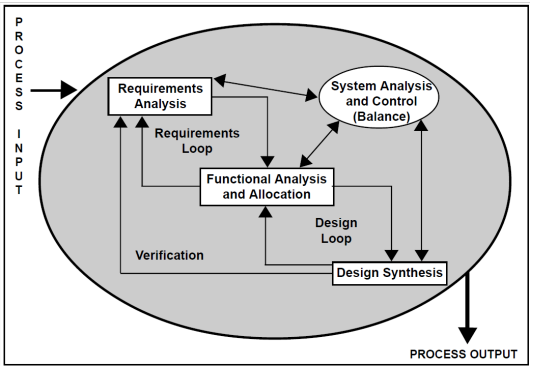
engenharia.

No processo de engenharia de sistemas, novas arquiteturas são criadas para descrever e compreender melhor o sistema. A palavra "arquitetura"é utilizada em diversos contextos dentro da engenharia de sistemas, geralmente para descrever como os subsistemas devem ser conectados. No entanto, segundo o Lightsey (2001), existem três tipos de arquitetura que podem ser usadas para retratar as diversas características de um sistema, a saber: arquitetura funcional, arquitetura física, e arquitetura do sistema.

A arquitetura funcional identifica e estrutura os requisitos funcionais e não funcionais. A arquitetura física retrata o sistema final, quebrando-o em diversos subsistemas. A arquitetura de sistemas identifica todos os artefatos relevantes para construir o sistema, incluindo os processos necessários para apoia-lo.

A Figura 8 mostra todas as etapas iniciais do processo de engenharia de sistemas. As atividades fundamentais são a análise de requisitos, análise e alocação funcional, e síntese de *design*, todas coordenadas pelo sistema de análise e controle.

Figura 8 – Processo de Engenharia de Sistemas.



Fonte**:** Lightsey (2001)

A primeira etapa do processo é analisar as entradas. A análise de requisitos é utilizada para desenvolver os requisitos funcionais e não funcionais. Ou seja, as exigências do cliente são traduzidas em um conjunto de requisitos que definem o que o sistema deve fazer e como deve ser seu desempenho. O engenheiro de sistemas deve assegurar que os requisitos sejam compreensíveis, inequívocos, abrangentes, completos e concisos.

Com a análise de requisitos são identificadas funções de alto nível, que são decompostas em diversas funções de baixo nível durante a análise de função. Os requisitos de performance associados a funções de alto nível são alocados para funções de baixo nível. O resultado desse procedimento é uma descrição lógica do sistema em termos de performance.

Isso também é conhecido como arquitetura funcional do sistema. A análise funcional e alocação possibilita um melhor entendimento daquilo que o sistema deve fazer, e de como fazer. Além de prover informações sobre as prioridades e conflitos associados às funções de baixo nível, fornecendo informações essenciais para a otimização de problemas físicos.

O *loop* de requisitos compara as funções analisadas e suas performances com seus respectivos requisitos, a fim de aproximar os resultados obtidos com aqueles definidos pelos requisitos. Esse é um processo interativo que revisa os requisitos à medida que sua análise é realizada.

A síntese de *design* define o sistema em relação aos seus elementos de *hardware* e *software*. Esse processo também é chamado de "arquitetura física". Cada um dos componentes é responsável por, pelo menos, um requisito funcional, e qualquer parte pode ter diversas funções. A arquitetura física é a estrutura básica para definir os parâmetros de especificação do sistema.

Com o fim da etapa de síntese, os resultados obtidos são comparados com os requerimentos da etapa de análise. Esse processo é chamado de "*loop* de verificação". Cada requisito deve ser examinado. Como esse processo do sistema passa por diversas etapas de desenvolvimento, são necessários diversos métodos de verificação, sendo alguns deles: o exame, a demonstração, a análise (modelagem e simulação), e o teste.

Os sistemas de análise e controle são compostos por técnicas de gestão de atividades necessárias para medir o progresso, avaliar e selecionar alternativas e tomar decisões. Essas atividades são aplicadas em todos os passos do processo de engenharia de sistemas.

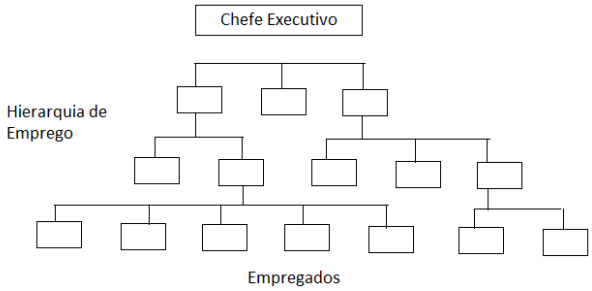
2.5 DESCREVENDO SISTEMAS EM NÍVEIS

Segundo Wilensky e Resnick (1999), um sistema pode ser visto como uma unidade funcional devidamente concebida para realizar algum objetivo em algum ambiente. Especificando um pouco mais a ideia, esse tipo de sistema também pode ser visto como um conjunto de partes (componentes) interdependentes que trabalham juntas como uma só, visando realizar o objetivo original do sistema.

A noção de níveis de descrição de sistemas historicamente vem sendo utilizada como meio para analisar e compreender uma ampla gama de sistemas naturais. Essa noção pode ser empregada para descrever e compreender melhor diversos tipos de sistemas, desde sistemas que estão em funcionamento atualmente quanto sistemas futuristas, que ainda não estão em funcionamento e são difíceis de projetar.

A noção de nível que está sendo proposta é denominada "visão emergente"de níveis. Essa ideia é bastante diferente da noção de nível em sistemas vistos como hierarquias clássicas, onde o controle do sistema é identificado por meio de uma cadeia de comandos que flui de níveis mais altos para níveis mais baixos, como ilustra a Figura 9, em algumas organizações empresariais: o executivo-chefe está no nível superior, depois o presidente, em seguida o vice-presidente, e assim por diante.

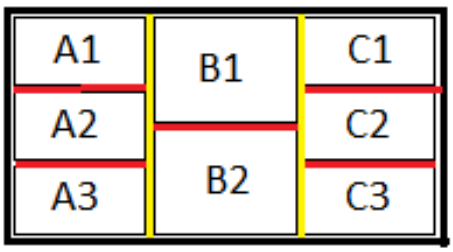
Figura 9 – Noção de níveis em uma hierarquia clássica.



Fonte**:** Elaborado pelo autor

A noção de níveis emergentes, em vez de enxergar CEOs – gerentes e trabalhadores de linha de montagem dentro de uma hierarquia –, enxerga e descreve uma organização empresarial em termos de divisões corporativas e dos funcionários dentro deles. Por exemplo, a Figura 10 ilustra de maneira genérica a descrição em níveis destacando um sistema composto de subsistemas inter-relacionados. Cada um desses subsistemas (A1-A3, B1-B2, C1-C3) pode ser descrito de maneira semelhante até que se atinja um determinado nível inferior de subsistemas elementares.

Figura 10 – Diferentes níveis de um sistema simples.



Fonte**:** Adaptado de Simon (1996)

A noção de níveis emergentes é também diferente da noção de nível em sistemas vistos como contêineres, baseada na ideia de partes e todos. Por exemplo, um dia é parte de uma semana, logo, está em um nível mais baixo do que o nível de uma semana, que está em

um nível mais baixo do que o nível de um mês, e assim por diante. A visão contêiner difere da visão hierárquica, em que os elementos de um nível inferior são partes dos elementos de um nível superior: um mês é parte de um ano, mas um vice-presidente não faz parte de um executivo-chefe.

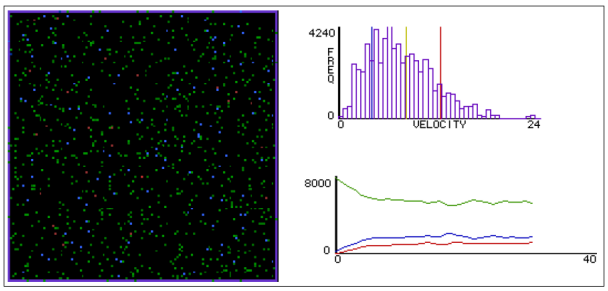
A noção de níveis de descrição, conhecida como "visão emergente"de níveis, foca em fenômenos que surgem de interações de objetos em níveis inferiores. Por exemplo, em sistemas rodoviários urbanos, o engarrafamento que emerge das interações entre os carros nas ruas (WILENSKY; RESNICK, 1999). Menos aparente que o engarrafamento, desempenho de uma divisão corporativa é resultado da complexa rede de relacionamentos e interações entre todos os seus funcionários. Um dos pontos fundamentais quando se pensa em níveis emergentes está no entendimento da noção de comportamento emergente. O comportamento emergente, ou objeto emergente, depende da forma com a qual o projetista se refere ao sistema. Enxergando o sistema como uma sociedade de (centenas, milhares, . . . de) objetos separados que cooperam entre si, ou como um único objeto que, sob determinadas condições, pode se dividir em várias partes. Ou seja, o surgimento desse comportamento está relacionado à forma como o projetista enxerga o sistema: referindo-se a ele como como uma unidade, ou como o resultado da interação de diversos componentes, empregando o pronome "ele"ou "eles", ou o verbo "é"ou "são"(WILENSKY; RESNICK, 1999).

Objetos que são vistos como singulares em um nível podem ser melhor compreendidos como plural em outro nível. A capacidade de enxergar o mesmo objeto como singular ou plural, dependendo da situação, permitirá ao projetista de um sistema *AmI* construir uma compreensão científica mais profunda dos fenômenos intrínsecos ao sistema em desenvolvimento, o que pode ser uma informação valiosa para tomada de decisão na etapa de desenvolvimento

Em sistemas naturais, por exemplo, muitas vezes o objeto emergente observado é descrito de maneira espacial. Isto é, uma aglomeração espacial de componentes (por exemplo, de células), que possui um padrão detectável na sua posição x-y. O padrão emergente não é detectável nas posições x-y, mas por outros parâmetros dos componentes do sistema. Como, por exemplo, a distribuição de velocidades/energias e os desempenhos associados aos componentes, como resultado de uma rede complexa de relacionamentos e interações entre todos os componentes. A Figura 11 ilustra esta ideia para o caso do comportamento de um gás em um recipiente selado.

No exemplo acima, centenas de partículas se encontram em um recipiente fechado. Elas se comportam como bolas de bilhar, colidindo de forma elástica quando se encontram ou

Figura 11 – Padrão de comportamento das partículas de um gás.



Fonte**:** Wilensky e Resnick (1999)

quando se chocam com as paredes do recipiente. Todas as moléculas de gás do experimento iniciam em uma mesma velocidade (coloridas em verde). À medida que colidem podem acelerar (se colorindo de vermelho) ou desacelerar (coloridas em azul). Esse experimento foi realizado com intuito de ilustrar a distribuição de Maxwell-Boltzmann. Após um número de interações, a quantidade de partículas azuis (lentas) aumenta e a velocidade das partículas vermelhas cresce, de forma que a energia do gás como um todo permanece constante. Essa reação continua até o momento em que as velocidades se estabilizam, formando as distribuições ilustradas na Figura 11.

Assim como no caso dos sistemas naturais, parâmetros associados a componentes que são observados ao longo do tempo são um padrão mais difícil de detectar, resultando em um objeto emergente que é menos perceptível e menos óbvio. No entanto, uma distribuição de velocidades em um sistema *AmI* e uma aglomeração espacial, como as partículas de um gás, de componentes em um sistema natural, estão na mesma categoria, ou seja, fundamentalmente ambos podem ser vistos como objetos emergentes.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Parunak, Savit e Riolo (1998) comparam duas formas de modelagem para a simulação de um sistema de cadeia de suprimentos. A primeira utiliza uma série de fórmulas matemáticas para simular o comportamento do sistema com o passar do tempo. A segunda utiliza modelagem baseada em agentes para construir virtualmente o sistema e observar seu funcionamento. Como conclusão, o autor define que, para sistemas centralizados, é mais apropriado o uso de modelagens com base matemática. Dessa forma, a modelagem baseada em agentes deve ser usada em sistemas com alto grau de distribuição.

Norling, Sonenberg e Rönnquist (2000) utiliza modelagens baseadas em agentes para construir simulações da sociedade humana capazes de exibir comportamentos mais realistas. Para alcançar esse resultado, os agentes que compõem a simulação utilizam um mecanismo de tomada de decisão chamado *NDM (Naturalistic Decision Making)*, que leva em consideração diversos fatores além da racionalidade para tomar uma decisão.

Davidsson (2000) realiza um estudo sobre o uso de modelagens centralizadas e descentralizadas no processo de criação de simulações. Para ilustrar o estudo são demonstrados os processos para uma simulação de sistema de desenvolvimento de *software*, tanto de forma centralizada quanto descentralizada, comparando cada uma das metodologias e gerando um conjunto de diretrizes que auxiliam o uso de simulações baseadas em agentes.

Davidsson e Boman (2005) utilizam *MABS* para modelar e simular um sistema que monitora e controla um escritório em um prédio comercial. O grande diferencial da abordagem proposta nesse trabalho é que todos os componentes do sistema (as pessoas, o *hardware*, e o próprio *software* do sistema) são representados na modelagem por agentes inteligentes. Utilizando essa abordagem, eles definem diversos comportamentos para cada um dos agentes, apresentando o desempenho do sistema com essa variação.

Mustafa (2013) descreve o processo de desenvolvimento de um simulador para aplicações em *Ambient Assisted Living* (*AAL*). Assim como aplicações *AmI*, sistemas de vivência assistida geram grandes fluxos de informação e dependem de sensores espalhados em um determinado ambiente. A aplicação descrita no trabalho utiliza um conjunto de regras sobre uma base de dados para gerar um sistema de inferência. Essas regras são determinadas por especialistas, mas o sistema é capaz de armazenar os dados coletados pelos sensores e utilizá-los para adaptar a aplicação às necessidades de cada usuário.

Macal e North (2014) apresentam um conjunto de boas práticas relacionadas ao

desenvolvimento de sistemas, utilizando modelagem baseada em agentes. Eles descrevem os contextos onde essa técnica pode ser utilizada, os tipos de agentes modelados e os tipos de relacionamentos elaborados a partir deles.

Franco, Campos e Sichman (2016) tratam de um problema de organização e *design* de times de agentes em um ambiente de competição onde cada um dos times deve disputar os recursos disponíveis em um ambiente. Apesar da abordagem do trabalho ser diferente, o problema é bastante similar ao enfrentado na elaboração de projetos de sistemas *AmI*, onde, dependendo da aplicação, podemos ter diversas entidades com objetivos conflitantes (*software* vs *hardware*, ou *software* vs usuário).

Grossi *et al.* (2005), Grossi *et al.* (2007) estabelecem um conjunto de técnicas que auxiliam na avaliação de organizações multiagentes. Em seus trabalhos são definidos diversos conceitos, baseados na teoria dos grafos, para extrair características como robustez, flexibilidade e eficiência de uma determinada organização. Essas características são utilizadas para comparar diferentes organizações quanto ao seu desempenho para a resolução de um determinado problema.

Barry, Koehler e Tivnan (2009) defendem que a utilização de simulações dirigidas por agentes (*ADS*) é essencial para a construção de sistemas complexos. A aplicação de *ADS* em conjunto com técnicas de engenharia de sistemas pode prover uma maior compreensão do sistema como um todo, facilitando seu *design* e melhorando sua performance.

Dentre as vantagens da utilização de *ADS* no processo de desenvolvimento, Barry, Koehler e Tivnan (2009) destacam as seguintes: (1) pode ser usada como uma ferramenta de geração de requerimentos; (2) permite prototipar e analisar funções do sistema; (3) pode ser usada como plataforma de visualização; (4) um componente pode ser usado para representar vários outros, modificando certas características para dar mais realismo à simulação; (5) o experimento pode ser realizado nos mais diversos contextos, ilustrando desde cenários ideais até ambientes catastróficos para o sistema.

Hübner, Sichman e Boissier (2002), Hübner, Sichman e Boissier (2007) descrevem a linguagem de modelagem organizacional Moise, que representa formalmente uma organização de agentes. Essa organização pode ser descrita através da especificação organizacional, *Organization Specification* (*OS*), que pode ser dividida em três dimensões: *Structural Specification* (*SS*), *Functional Specification* (*FS*), *Deontic Specification* (*DS*). A especificação estrutural (*SS*) determina os papéis e seus relacionamentos, além dos grupos que compõem a organização. A especificação funcional (*FS*) define os objetivos globais e o modo como eles serão alcançados.

E, por fim, a especificação deôntica (*DS*) relaciona essas duas dimensões, identificando qual conjunto de objetivos e funções da camada funcional será atribuído a cada papel da camada estrutural.

Rodríguez-Aguilar *et al.* (1999) definem, em seu trabalho sobre *Eletronic Institution* (*EI*), um protocolo capaz de representar sistemas complexos através de máquinas de estado. Em uma Instituição Eletrônica, cada estado simboliza uma cena e cada cena possui um conjunto de estados que representam as entidades que compõem o sistema. A utilização de máquinas de estado permite a automatização do processo de verificação das propriedades de um determinado estado. Cada uma ilustra um aspecto do sistema que será desenvolvido, detalhando as entidades envolvidas e as relações entre elas.

Garcia-Valverde *et al.* (2010) definiram a metodologia AVA, que é um conjunto de procedimentos que guiam o desenvolvedor na definição, criação, teste e validação do sistema *AmI*. O foco do seu trabalho é auxiliar na criação de ambientes inteligentes através de um paradigma de simulação onde cada componente é estudado separadamente. A simulação é criada a partir de uma modelagem de sistemas multiagentes, onde cada agente é especificado de acordo com um componente e suas interações.

A partir da definição dos modelos do ambiente e dos usuários são instanciados os modelos do sistema *AmI* a ser simulado. Com a implementação desses modelos, são executadas diversas simulações e em seguida seus resultados são analisados a fim de detectar *bugs* ou melhorias possíveis no sistema. Cada mudança no sistema reinicia o ciclo da metodologia, refatorando a modelagem da aplicação, seus modelos e suas implementações. Esse ciclo deve continuar até o ponto onde o desenvolvedor considera que o sistema é estável.

Um outro conceito bastante interessante inserido no trabalho de Garcia-Valverde *et al.* (2010) é a noção de inserção de realidade. Se o desenvolvedor da aplicação não encontrar erros na simulação, ele pode inserir elementos do mundo real na simulação de forma gradual, controlando cada etapa do sistema. A cada novo elemento "injetado", o ciclo de modelagem/simulação é repetido, tornando o sistema cada vez mais robusto. Esse processo pode continuar até o ponto onde todo o sistema tenha sido implantado no mundo real.

3.1 CONSIDERAÇÕES

O trabalho de Parunak, Savit e Riolo (1998) é utilizado como base para conceitos de modelagem de sistemas baseados em agentes, empregados não só em seu trabalho mas também

em vários dos outros trabalhos citados neste capítulo. A modelagem de sistemas multiagentes (*MABS*) é um conceito fundamental dos trabalhos de Davidsson e Boman (2005), Davidsson (2000), que serviram como inspiração inicial deste projeto. Nesses trabalhos são utilizadas sistemas baseados em agentes para modelar e simular ambientes inteligentes, tratando todas as partes envolvidas do sistema (software, usuários, e dispositivos) como agentes competindo por seus objetivos.

O trabalho de Norling, Sonenberg e Rönnquist (2000) também utiliza esse tipo de modelagem para simular a interação de usuários em um ambiente sociotécnico. Diferente de sistemas de inteligencia ambiental, sistemas sociotécnicos requerem apenas a interação com usuários, não necessariamente sendo inteligentes. O objetivo do seu não é o aperfeiçoamento do sistema, mas, sim, gerar agentes com um comportamento mais humano utilizando um processo de decisão natural baseado na psicologia.

Dentre as linguagens de modelagem para SMA, a linguagem *Moise* (HÜBNER; SICHMAN; BOISSIER, 2002; HÜBNER; SICHMAN; BOISSIER, 2007) descreve formalmente organizações de agentes através de três modelos que se complementam. No trabalho de Rodríguez-Aguilar *et al.* (1999), os SMA são descritos através das instituições eletrônicas, capazes de definir os protocolos de comunicação entre cada entidade. A linguagem Moise, apesar de fornecer uma excelente representação da organização de agentes, não ilustra com naturalidade as interações entre as entidades. Por outro lado, as instituições eletrônicas explicitam os protocolos de comunicação entre os agentes de uma organização, mas podem ser bastante complexas para certos tipos de sistema.

A metodologia AVA (GARCIA-VALVERDE *et al.*, 2010) define um conjunto de procedimentos que guiam o desenvolvedor na definição, criação, teste e validação de sistemas *AmI*. Para isso, ela utiliza uma série de simulações baseadas em sistemas multiagente, que, aos poucos, evoluem o sistema até o ponto em que o desenvolvedor considere suficiente para inserir elementos reais. A inserção de componentes reais do sistema na simulação é chamada de inserção de realidade, e permite que, aos poucos, os componentes da simulação sejam substituídos por elementos do mundo real, até o ponto em que o sistema esteja totalmente implantado no mundo em seu ambiente físico.

Apesar de auxiliar em diversas etapas da construção e simulação de sistemas *AmI*, a metodologia AVA não define uma abordagem para determinar os comportamentos dos agentes que compõem o sistema ou a simulação. A abordagem nesta dissertação utiliza conceitos propostos em *MABS* para definir um processo de simulação de sistemas, focando em sistemas

AmI, utilizando como base alguns dos conceitos propostos nos trabalhos de Hübner, Sichman e Boissier (2007) e Rodríguez-Aguilar *et al.* (1999). definindo um modelo comportamental, estrutural e funcional para os agentes do sistema.

4 DEFINIÇÃO DO MODELO FEC

O projeto de sistemas de Inteligência Ambiental complexos (sistemas *AmI*), compostos por outros sistemas menores, é uma tarefa complexa que exige um alto grau de planejamento. A falha do desenvolvedor em enxergar, de forma correta, o resultado das interações entre os diversos componentes projetados para o sistema pode causar perdas na qualidade do serviço a ser ofertado e, ainda, desperdício de tempo/dinheiro para corrigir erros na etapa de implementação. Essa tarefa fica ainda mais complexa à medida que o sistema cresce em número de componentes e, consequentemente, de interações entre eles, principalmente se a aplicação tiver um caráter inovador e original.

A engenharia de sistemas define uma série de métodos, ilustrados no diagrama V na Figura 6, que podem auxiliar no projeto e no teste dos sistemas *AmI*. A parte da descida do modelo V, que diz respeito às etapas aconselhadas para o projeto, compreende a definição dos conceitos da aplicação, sendo elas: análise de requisitos, análise funcional e a síntese do projeto. Em seguida, durante a etapa de implementação, a parte da subida do modelo V orienta a definição e execução de diversos tipos de testes, verificação e validação do sistema projetado.

A abordagem proposta neste capítulo consiste em uma contribuição à etapa de análise funcional do sistema. Permitindo o estudo de *feedbacks* para refinar as etapas de análise de requisitos e de síntese do projeto. Mais especificamente, a abordagem permitirá ao projetista realizar estudos experimentais, visando verificar/encontrar decomposições funcionais alternativas de subsistemas componentes capazes de atender aos requisitos funcionais e de desempenho do sistema *AmI*.

Como resultados, tais estudos poderão indicar ao projetista a necessidade de se revisar a etapa de análise de requisitos para resolver problemas funcionais. Isso pode levar a mudanças na etapa de síntese de projeto e, consequentemente, na busca de uma arquitetura física adequada, em termos de componentes de *hardware* e de *software* componentes do sistema.

A ideia principal da abordagem está em representar, formalmente, determinadas decomposições funcionais do sistema *AmI* através de organizações de programas de agentes artificiais. Em seguida, utilizar uma plataforma de simulação multiagente adequada ao formalismo proposto, que permita ao projetista entender melhor o comportamento do sistema *AmI* em projeto, analisando seu desempenho em diferentes cenários do ambiente de tarefas, prevenindo erros e auxiliando a construção de projetos mais eficientes. A abordagem propõe um quadro formal para o projetista empregar na representação das organizações de programas em seus

aspectos funcionais, estruturais e comportamentais.

As duas próximas seções apresentam a abordagem proposta. A Seção 4.1 define como o projetista deve enxergar o sistema *AmI* para que ele possa ser representado por uma organização de programas de agentes racionais. A Seção 4.2 descreve o quadro formal, denominado modelo FEC. Finalmente, o Capítulo 5 descreve como organizações, formalizadas por meio do modelo FEC, podem ser executadas em uma plataforma de simulação multiagente permitindo a observação do desempenho de um sistema *AmI* associado à medida que os programas interagem entre si e com um ambiente de tarefas simulado.

4.1 PRINCIPAIS PONTOS DE VISTA E PROPOSTAS NA ABORDAGEM

Esta seção descreve os principais pontos de vista e propostas na abordagem para ajudar no projeto de sistemas *AmI*. São elas:

P1 - Definição de sistema de Inteligência Ambiental (sistema *AmI*) como um conjunto formado por um sistema técnico que interage com um ambiente de tarefas contendo pessoas, visando realizar algum objetivo original.

P2 - Definição de sistema técnico como um composto de *hardware* e *software*, onde cada um de seus elementos pode ser representado por um agente artificial. Composto de uma arquitetura e um programa de agente.

P3 - Descrição informal de um sistema *AmI* por meio de uma organização de programas de agentes racionais, para representar tanto o *software* quanto o *hardware* e as pessoas usuárias do sistema técnico.

P4 - Descrição informal de uma organização com muitos programas de agentes interagindo em pelo menos dois níveis diferentes de aprofundamento/especificação.

P5 - Descrição formal da organização de programas de agentes, representando o sistema *AmI* em seus aspectos funcionais (modelo F), estruturais (modelo E) e comportamentais (modelo C) – modelo FEC da organização.

P6 - Utilização de estratégias de simulação baseada em agentes e a noção de objetos emergentes, que são medidas (distribuições) associadas ao desempenho do sistema técnico e de cada um de seus subsistemas componentes, previamente formalizados em um modelo FEC de uma organização de programas de agentes, como meio de avaliar o desempenho de um sistema em projeto em um ambiente de tarefas virtual.

P7 - Execução de simulações que permitam ao projetista entender como os efeitos da aleatori-

edade das ações (falhas), de alguns componentes do sistema interferem na forma e nas propriedades macro de uma distribuição.

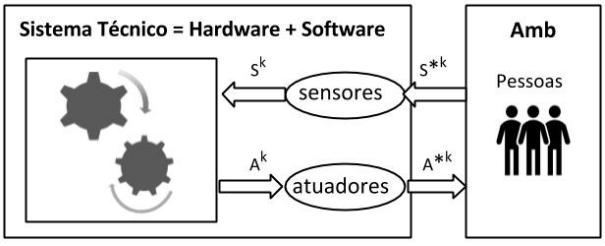
P8 - Simulação das condições de atuação do sistema técnico e das pessoas no ambiente real do sistema *AmI*. Simulação do comportamento dessas pessoas em programas de agentes na organização representando pessoas.

P9 - Definição da noção de caso de teste para avaliar o desempenho de um sistema *AmI* em projeto, como sendo qualquer configuração particular do ambiente de tarefas simulado. Ainda, um conjunto de casos de teste descreve diferentes configurações ambientais, isto é, problemas de diferentes níveis de dificuldade para o sistema, que permitem ao projetista entender e dominar os mecanismos que causam a emergência de diversas distribuições associadas aos componentes do sistema técnico.

Mais explicitamente, a proposta **P1** considera que um sistema de Inteligência Ambiental (sistema *AmI*) é composto por um sistema técnico e pelo sistema ambiental. O sistema técnico trata de todo o conjunto *hardware*/*software*, tais como: sensores, atuadores, artefatos computacionais, serviços e aplicações de software. Em aplicações *AmI*, o sistema técnico deve, de maneira não intrusiva, perceber informações de seu ambiente de tarefa, e, a partir delas, selecionar ações a serem executadas.

O sistema ambiental é composto por tudo que foge do controle do projetista na aplicação, ou seja, as pessoas e o próprio ambiente. Dessa forma, o sistema técnico interage com o ambiente e com as pessoas que circulam por ele, buscando realizar algum objetivo original (função global do sistema). A Figura 12 ilustra a ideia de um sistema *AmI* visto como um composto integrado de pessoas e um sistema técnico composto por duas partes principais.

Figura 12 – Separação do sistema *AmI* em sistema técnico e ambiental.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Muitos sistemas técnicos atuais são distribuídos e envolvem uma interação complexa entre pessoas e máquinas. Por exemplo, pode-se imaginar o *hardware* em um ambiente semelhante a um prédio, incluindo os sensores e atuadores, e o *software* para monitorar e controlar o

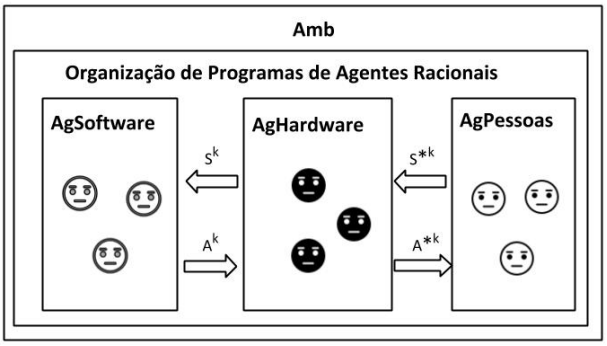
hardware no prédio, visando satisfazer as pessoas, por exemplo, adaptando a temperatura e a intensidade da luz de acordo com as preferências destas pessoas, e gastando o mínimo de energia possível, por exemplo, desligando automaticamente as lâmpadas e o ar-condicionado de salas vazias.

A proposta **P2**, em resumo, considera que o sistema técnico da aplicação *AmI* pode ser representado por um ou mais agentes artificiais. Isto é, um sistema formado por uma arquitetura, ou seja, algum tipo de dispositivo computacional com sensores e atuadores físicos, e por um programa de agente que implementa a função do agente, e mapeia percepções em ações. A arquitetura disponibiliza ao programa as percepções de seus sensores. O programa é executado para selecionar as ações de acordo com as informações recebidas. E, por fim, as ações são executadas pelos atuadores definidos na arquitetura. Cada programa de agente pode incorporar uma série de componentes funcionais associados à (*subsistemas*) percepção (*ver*), atualização de estado interno (*próximo*) e tomada de decisão (*ação*).

Assim, de acordo com a abordagem, qualquer sistema técnico poderá ser abstraído pela noção de agente artificial. Podem ser sistemas simples, como um ar-condicionado com controle inteligente, um robô mais sofisticado para prestar serviços de interesse das pessoas, ou mesmo um sistema técnico complexo, composto de vários subsistemas (agentes artificiais) conectados por um modelo de cooperação/competição, onde cada subsistema pode usar funcionalidades de outros para compensar ou complementar a sua própria funcionalidade, visando realizar o objetivo original do sistema *AmI*.

Com relação às duas primeiras propostas: a proposta **P3** considera que o sistema *AmI* pode ser descrito informalmente como uma organização de programas de agentes capazes de representar tanto o *software* ($AgSoftware$) quanto o comportamento de grande parte do *hardware* ($AgHardware$) que compõe a arquitetura do sistema técnico, e, ainda, das pessoas usuárias (*AgPessoas*) deste sistema. A Figura 13 ilustra tal ideia, considerando a ideia de sistema *AmI* na Figura 12.

Figura 13 – Representação dos componentes de um sistema *AmI* como agentes inteligentes.



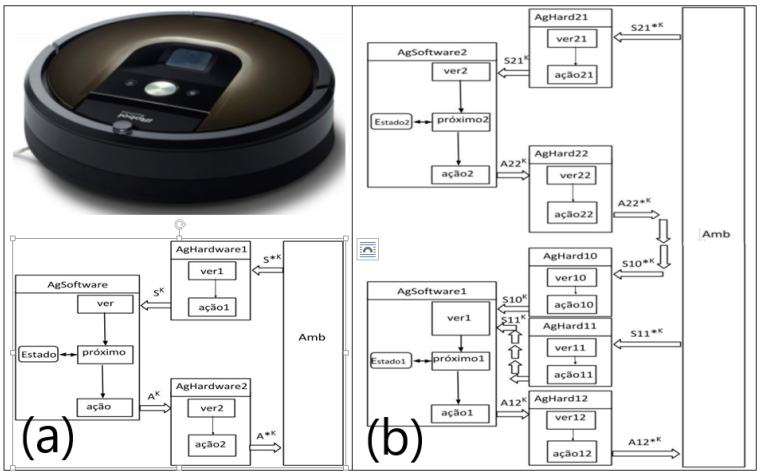
Fonte**:** Elaborado pelo autor.

Ou seja, além de definir o *software* do sistema ($AgSoftware$) como programas de agentes, que seriam responsáveis por monitorar e controlar o *hardware* do sistema, a abordagem propõe modelar tanto o comportamento dos usuários, quanto o desempenho dos sensores e atuadores definidos na arquitetura do sistema, utilizando programas de agentes racionais, respectivamente denominados *AgPessoas* e $AgHardware$. À medida do possível, considerando essa generalização, a descrição informal deve indicar o esboço de uma estrutura e do comportamento desejado para o grupo de programas na organização. Eles devem ser adequados ao ambiente de tarefas e, consequentemente, ao alcance do objetivo original do sistema.

Em **P4**, a proposta é que uma organização com muitos programas de agentes interagindo seja descrita informalmente em pelo menos dois níveis diferentes de aprofundamento/especificação. O objetivo é analisar e compreender melhor o sistema *AmI*, dessa forma:

- Nível 1: a aplicação *AmI* abstraída é como uma única entidade formada por um sistema técnico (agente artificial), descrito por uma organização de programas de agentes composta por um único programa do tipo $AgSoftware$, que interage com pelo menos um programa de agente do tipo $AgHardware$ para representar sensores e atuadores capazes de interagir com um ambiente, que pode conter programas de agentes do tipo *AgPessoas* (Figura 14a);
- Nível 2: a aplicação *AmI* é abstraída como uma entidade composta por vários sistemas técnicos (agentes artificiais) conectados. O sistema *AmI* é descrito por uma organização de organizações de programas de agentes, cada uma descrevendo um dos sistemas técnicos componentes (Figura 14b).

Figura 14 – Diferentes níveis de abstração de um sistema *AmI*.



Fonte**:** Elaborado pelo autor.

Tomemos como exemplo uma aplicação de inteligência ambiental em que o sistema é responsável por manter o ambiente limpo enquanto pessoas transitam pelo ambiente. A Figura 14a ilustra a situação onde esse sistema *AmI* é modelado por um único sistema técnico, ou seja, um robô aspirador de pó. Descrito por uma organização composta por um programa de agente $AgSoftware$ capaz de controlar o aspirador de pó e dois programas de agente $AgHardware1$ e $AgHardware2$ para representar respectivamente um sensor e um atuador do sistema técnico no ambiente. No exemplo, enquanto o programa $AgSoftware$ é do tipo com estado interno, os programas $AgHardware1$ e $AgHardware2$ são do tipo reativo simples.

Já a Figura 14b ilustra a situação desse mesmo sistema *AmI*, porém, modelado por dois sistemas técnicos. Agora, além do sistema técnico que representa os aspiradores de pó, temos um outro sistema para monitorar ambientes. Este utilizaria um conjunto de câmeras estáticas para reconstruir o estado do ambiente, incluindo a posição do robô aspirador de pó. O primeiro sistema técnico, o aspirador, descrito pela organização formada pelos programas $AgSoftware1$, $AgHard10$, $AgHard11$ e $AgHard12$, utiliza a funcionalidade de localização global gerada pelo segundo sistema técnico, o de monitoramento, descrito pela organização formada pelos programas $AgSoftware2$, $AgHard21$ e $AgHard22$, para selecionar uma estratégia mais inteligente de navegação e limpeza.

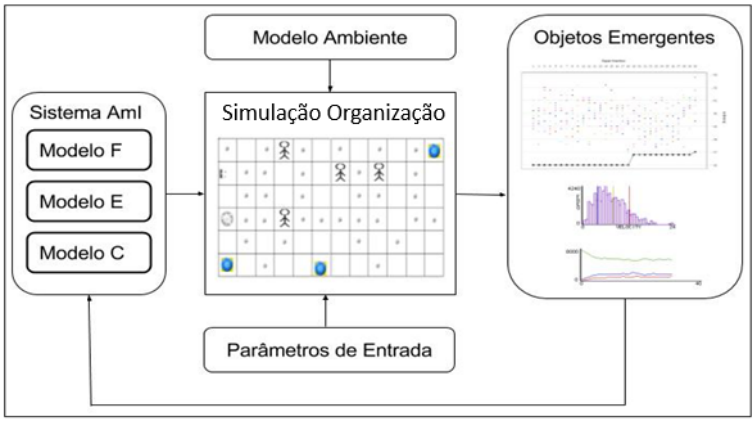
A proposta em **P5** é que a organização de programas de agentes, representando o sistema *AmI*, seja especificada previamente em seus aspectos funcionais (modelo F), estruturais (modelo E) e comportamentais (modelo C), empregando um formalismo adequado. O modelo F proposto refere-se à descrição formal da função global (objetivo original) de uma parte da

organização de programas representando o sistema técnico; o modelo E refere-se à descrição formal da estrutura visível da organização de programas representando o sistema *AmI*; e o modelo C refere-se à descrição formal dos processos que ocorrem dentro desta organização e, principalmente, como os programas de agentes representando o sistema técnico devem se comportar para alcançar os resultados desejados no ambiente de tarefas.

Em seguida, a proposta **P6** recomenda utilizar simulação baseada em agentes e a noção de objetos emergentes como meio de avaliar o desempenho de um sistema em projeto, previamente formalizado em um modelo FEC de uma organização de programas de agentes. Mais especificamente, a abordagem propõe que as interações entre os programas na organização, e desta com o ambiente de tarefas, seja simulada durante um período de tempo. Assim, o desenvolvedor pode perceber se a estrutura, descrita no modelo *E*, e o comportamento integrado destas entidades, descrito no modelo *C*, funcionam de maneira a realizar o objetivo original do sistema, descrito no modelo *F*.

Mais especificamente, a abordagem propõe a execução de simulações de modelos FEC em ambientes de tarefas virtuais, em diferentes configurações e devidamente programados em linguagem adequada. A partir das simulações são extraídos objetos emergentes que são medidas (distribuições) associadas ao desempenho do sistema técnico e de cada um de seus subsistemas componentes. Observando esses objetos emergentes, o desenvolvedor tem uma melhor noção da capacidade do sistema de cumprir seu objetivo original. A Figura 15 ilustra esta ideia.

Figura 15 – Fluxo de extração dos objetos emergentes.



Fonte**:** Elaborado pelo autor.

Assim, uma distribuição associada a um parâmetro de algum dos programas de agentes, componentes do sistema técnico, pode ser vista como uma descrição do que emerge

das interações do sistema com seu ambiente de tarefas. Isso permite ao projetista avaliar as propriedades macro das distribuições associadas ao programa de agente, como, por exemplo: média, variância e desvio padrão. Como consequência, o desenvolvedor poderá dominar os mecanismos que causam a emergência desses objetos e utilizar a seu favor na economia de esforço e tempo para o desenvolvimento de um sistema *AmI* racional.

Nesse contexto, a proposta **P7** coloca em destaque particular o caso de ambientes de tarefas não determinísticos. A abordagem considera que o projetista deve buscar entender como os efeitos da aleatoriedade das ações de alguns componentes do sistema técnico interferem na forma e nas propriedades macro de uma distribuição. Este entendimento deve servir para garantir que os componentes de confiabilidade baixa, integrados e implementados em um sistema *AmI* realizarão o objetivo desejado em seu ambiente de tarefas.

A proposta **P8** pode ser dividida em duas. Primeiro, a abordagem propõe que os programas de agentes *AgPessoas* devem simular o comportamento dos usuários do sistema. Essa imitação deve ser suficiente para que o efeito de suas ações no ambiente simulado gere como resposta um comportamento correspondente adequado dos programas de agentes dos tipos $AgHardware$ e $AgSoftware$, representando o sistema técnico. Segundo, propõe também que o ambiente de tarefas virtual deve simular adequadamente as condições de atuação do sistema técnico e das pessoas no ambiente real.

Sabe-se que a natureza de qualquer ambiente de tarefa pode ser classificada de acordo com sete dimensões (propriedades), sendo elas: observável-parcialmente observável, determinístico-estocástico, episódico-sequencial, estático-dinâmico, discreto-contínuo, agente único-multiagente, e conhecido-desconhecido. Assim, a abordagem considera que, em conjunto com outros objetos presentes em um ambiente real, essas propriedades devem ser também adequadamente simuladas.

Finalmente, a proposta **P9**, considera que uma configuração particular do ambiente simulado define um caso de teste para o sistema *AmI* em projeto, e que diferentes configurações compreendem diferentes casos de testes, definindo problemas de diferentes níveis de dificuldade para o sistema. Por exemplo, considerando-se um sistema *AmI* composto por um sistema técnico formado por uma certa quantidade de robôs para atuar em um local semelhante a um aeroporto, uma configuração particular do ambiente deve definir o número de obstáculos, de lixo e de pessoas em locais específicos do aeroporto. Neste tipo de ambiente, algumas configurações podem exigir dos robôs maior consumo de energia, enquanto outras podem colocar lixo em locais de mais fácil acesso aos robôs.

4.2 MODELO FEC DE UMA ORGANIZAÇÃO DE PROGRAMAS

Conforme dito na introdução da seção anterior, para avaliar o alcance de um objetivo original por parte de um sistema *AmI* em projeto, o projetista deve considerar a relação existente entre três partes, sendo elas: (1) o objetivo original do sistema; (2) o seu ambiente interno, aqui representado por uma organização de programas de agentes; e (3) o ambiente de tarefas em que o sistema funciona. De acordo com a proposta, para concluir que o sistema *AmI* é adequado ao ambiente de tarefas, o projetista necessita comprovar primeiro que organização de programas alcança o objetivo original do sistema, então ele poderá concluir que o projeto do ambiente interno do sistema está caminhando na direção da adequação ao ambiente externo.

Norvig e Russell (2004) enfatizam a importância de se especificar adequadamente a natureza dos ambientes de tarefas durante o projeto de sistemas compostos por agentes artificiais. Dependendo da natureza desses ambientes, o projetista pode entender a sua tarefa em diferentes graus de complexidade, variando desde problemas bem definidos, em ambientes de tarefas observáveis, determinísticos e estáticos, até problemas difíceis de exploração, em ambientes de tarefas parcialmente observáveis, não determinísticos, dinâmicos, desconhecidos e multiagentes competitivos. A literatura sobre o assunto disponibiliza diversas referências; elas apresentam diversos resultados de abordagens para sistemas de agentes artificiais em todos esses ambientes de tarefas.

O modelo FEC aqui proposto visa permitir que o projetista formalize adequadamente o primeiro e segundo termos dessa relação, permitindo uma descrição matemática e computacional deles, dessa forma facilitando que as organizações de programas de agentes, associadas aos sistemas *AmI* em projeto, possam ser implementadas, simuladas e avaliadas quanto à realização do seu objetivo original. No que diz respeito à formalização da organização (2), o modelo FEC visa permitir que o projetista se concentre nas partes (estruturas) de uma organização, no entendimento de como estas partes funcionam (comportamentos) e o que fazem (funções). Nesse contexto, a simulação de um modelo FEC permitirá ao projetista perceber relações que podem não ser aparentes entre as estruturas possíveis. Os comportamentos e as funções de uma organização representando um sistema *AmI*.

4.2.1 Modelo de Função (F)

O modelo de Função (F) de uma organização refere-se à descrição formal da função global (objetivo original) do sistema *AmI* (ou de algum de seus subsistemas). Este modelo deve

estar em sintonia com algumas das saídas da etapa de análise de requisitos, no processo de engenharia do sistema. Mais especificamente, o modelo F permite que o projetista formalize os objetivos dos atores interessados e envolvidos com o processo, além de orientar o projetista com mais clareza na especificação do modelo estrutural (E) e do modelo comportamental (C) da organização de programas de agentes. Esta formalização permite que o projetista obtenha uma medida de satisfação do objetivo do sistema *AmI*, determinando o desempenho da organização interagindo com um ambiente de tarefas virtual. É a partir da especificação do modelo F da organização que o projetista deve definir os objetos emergentes (medidas e distribuições) das simulações de interações da organização com o ambiente virtual, visando avaliar o desempenho dos componentes do sistema, especificados previamente na etapa de análise funcional.

A proposta considera que alguns dos objetivos originais dos atores interessados no projeto, descrevem determinadas exigências em relação ao sistema *AmI* pretendido. Outros objetivos podem descrever funções relevantes do sistema, ou qualidades que o sistema pretendido deve alcançar ou fornecer. Voltando ao exemplo do aspirador de pó. Pode ser requisitado ao sistema que, além de manter um determinado local (ambiente) limpo, ele deve também minimizar o uso dos recursos disponíveis utilizando, por exemplo, um *software* de monitoramento e controle para otimizar a movimentação dos robôs.

Os objetivos originais articulam as necessidades percebidas, desejos e requisitos a alcançar com as decisões relacionadas ao projeto do sistema *AmI*. Estes objetivos podem expressar generalidades (por exemplo: melhorar a qualidade dos serviços) e, frequentemente, não podem ser diretamente quantificados, necessitando maiores esclarecimentos em termos de objetivos próximos que sejam mensuráveis. Assim, o projetista deve definir formalmente tais objetivos próximos como substitutos do objetivo original, e seus valores de importância no contexto do objetivo original, indicando como os objetivos próximos contribuem com diferentes graus para a satisfação do objetivo original.

Por exemplo, no caso do sistema *AmI* para limpeza de ambientes públicos mencionado, o projetista pode definir que o objetivo original (O_0) do sistema técnico consiste em prestar um serviço de alta qualidade, com um mínimo de despesas e o máximo de educação com as pessoas presentes no ambiente. Como consequência, de maneira a satisfazer o objetivo original do sistema, o projetista pode definir para os agentes aspiradores pelo menos quatro objetivos próximos possíveis de serem medidos, ou seja: manter o ambiente limpo (O_1), manter energia suficiente na bateria (O_2), trabalhar em equipe (O_3), e cumprimentar as pessoas (O_4).

De acordo com o esquema de decomposição do objetivo original proposto, a ideia no

modelo F é de que o projetista deve definir, formalmente, o objetivo original do sistema *AmI* por meio de uma função de utilidade que considera: (1) um vetor de funções escalares associadas aos objetivos próximos; e (2) os valores de importância desses objetivos no contexto do objetivo original. Cada função escalar (av_i) no modelo F associa valores no domínio dos números reais com um conjunto de episódios possíveis (Ep), descritos em termos de um conjunto de estados do ambiente (percepções S) e um conjunto de ações possíveis para o sistema (A).

Por exemplo, a Tabela 2 exemplifica alguns valores de satisfação/insatisfação nos objetivos próximos O_1 e O_2 (funções escalares av_1 e av_2), relacionados aos objetos emergentes de energia e limpeza, medidos em diversos episódios (Ep_k) na história das interações (k) mantidas por um programa de agente aspirador de pó em um ambiente de tarefas simulado. Os valores das funções indicam que cada agente artificial deve se movimentar e limpar um ambiente, maximizando os níveis de limpeza do ambiente e de energia em sua bateria ao final da tarefa.

Tabela 2 – Histórico de ações do agente aspirador

Ep^K	S^K	A^K	$av_1(Ep^K)$	$av_2(Ep^K)$
k	...L...	asp	0.0	-1.0
k+1	...L...	les, oes, nor, sul	1.0	-2.0
k+2	...L...	nop	0.0	0.0
k+3	...S...	asp	2.0	1.0
k+4	...S...	les, oes, nor, sul	-1.0	-2.0
k+5	...S...	nop	-1.0	0.0

Fonte**:** Elaborado pelo autor

A segunda coluna (S^k) descreve uma parte das informações nas percepções do agente em cada episódio possível (L = local limpo; S = local sujo). A terceira coluna (A_k) descreve as ações possíveis para o agente nestes episódios (asp = aspirar; les = leste; dir = direita; oes = oeste; nor = norte; sul = sul; nop = não operar). Na quarta e quinta colunas (av_1 e av_2), respectivamente associadas aos objetivos de limpeza (O_1) e de energia (O_2), estão as funções escalares para medir a satisfação dos objetivos pelo agente em cada episódio de sua história no ambiente de tarefas.

O restante desta seção formaliza as funções de avaliação e a função utilidade, componente principal do modelo F, que podem ser utilizadas para medir o desempenho de sistemas *AmI* do interesse do projetista. Ou seja, o modelo F permite que a performance de cada um dos agentes componentes do sistema e, mais especificamente, dos programas de agentes dos tipos $AgSoftware$ e $AgHardware$, componentes do sistema técnico, seja mensurada. Esses componentes podem ser identificados como *AgentAmI* no quadro formal abaixo. O quadro apresenta

o esquema de representação e a definição correspondente dos principais termos envolvidos na definição da função utilidade:

- S = $s_1, s_2, \ldots$ – estados do ambiente do agente – em qualquer instante k o ambiente está em um dos estados do conjunto de estados do ambiente;
- A = $a_1, a_2, \ldots$ – capacidade efetuadora do agente – um conjunto de ações possíveis de serem executadas pelos atuadores do agente em qualquer instante k;
- ação : $S^* \rightarrow A$ – comportamento de um agente – uma função que mapeia sequências de estados do ambiente $s \in S^*$ em ações $a \in A$, ou seja, intuitivamente, um agente decide que ação executar baseado em sua história, sua experiência até o momento da decisão;
- amb : $S \times A \rightarrow S$ – comportamento (determinístico) de um ambiente – uma função que mapeia o estado corrente do ambiente $s \in S$ e uma ação $a \in A$, em um estado $amb(s,a)$ resultantes da execução da ação a no estado s;
- AgentAmI – um programa de agente implementando concretamente a função ação de um dos agentes nos conjuntos de agentes $AgPessoas$, $AgHardware$ e $AgSoftware$;
- Amb – um programa ambiente implementando a função amb, capaz de interagir com um programa AgentAmI por meio de algum protocolo de interação;
- Ω – um conjunto de descrições de cenários de ambientes de tarefa factíveis de instanciar em Amb e avaliar AgentAmI;
- $Cenario_i \in \Omega$ – uma descrição específica de cenário ambiental;
- $Cenarios \in P(\Omega)$ – um subconjunto de descrições de cenários ambientais (conjunto de casos de teste);
- $h(Cenario_i) \in (S \times A)N^{Int}$ – história de comprimento $Nint$ de $AgentAmI$ em Amb correspondente ao $Cenario_i \in \Omega$ – uma sequência $s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \xrightarrow{a_2} \ldots s_{Nint-1} \xrightarrow{a_{Nint-1}} s_(Nint)$, tal que s_0 é o estado inicial do ambiente, a_{Nint-1} é a última ação que o agente escolheu para executar, e s_{Nint} é o último estado do ambiente;
- $Ep^k(h(Cenario_i)) \in (S \times A)$ – episódio na interação k, $k \leq Nint$, da história de $AgentAmI$ em Amb correspondente ao caso $Cenario_i \in \Omega$;
- $H(Cenarios) \in P((S \times A)N^{Int})$ – conjunto de histórias de comprimento $NInt$ de $AgentAmI$ em Amb considerando $ProtocolInteracao$ e todos os cenários ambientais em $Cenarios \in P(\Omega)$;

Considerando o esquema de representação acima. O objetivo original a ser alcançado por um programa $AgentAmI$, em um ambiente de tarefas simulado por um programa Amb, pode ser formalizado por meio de um vetor de $M(M \geq 1)$ funções objetivo próximo (implícitas)

do objetivo original estabelecido pelo projetista. Considerando um conjunto de cenários em H(Cenários), temos:

$$f(H(Cenarios)) = f_1(H(Cenario), f_2(H(Cenario), \ldots, f_M(H(Cenario) \in R^M \tag{4.1}$$

Supondo-se que o número de cenários no conjunto H(Cenários) seja *NCenarios*, a satisfação de um objetivo próximo $m(m = 1 \ldots M)$ alcançado por um *AgentAmI* em *Amb* pode ser formalizada:

$$f_m(H(Cenarios)) = \frac{1}{NCenario} \sum_{i=1}^{NCenario} av_m(h(Cenario_i)) \tag{4.2}$$

Supondo-se que o comprimento de cada história do programa *AgentAmI* em *Amb* seja *NInt*, o valor medido de recompensa/penalização em um objetivo próximo m, alcançado pelo programa *AgentAmI* em *Amb* considerando o $Cenario_i \in \Omega$, pode ser formalizada:

$$av_m(h(C_i)) = \sum_{k=1}^{Nint} av_m(Ep^k(h(Cenario_i))) \tag{4.3}$$

tal que $av_m(Ep_k(h(Cenario_i)))$ é o valor medido de recompensa/penalização no objetivo próximo *m* atribuído ao episódio *k* da história associada ao $Cenario_i \in \Omega$.

Finalmente, a função Utilidade permitirá ao projetista obter medidas de desempenho de *AgentAmI* em *Amb* considerando um conjunto de cenários ambientais em $H(Cenarios)$. Supondo-se que o grau de utilidade de um objetivo próximo independe dos valores assumidos pelos demais (função é preferencialmente independente), este trabalho considera uma forma especial de função utilidade, ou seja, uma função aditiva no formato linear:

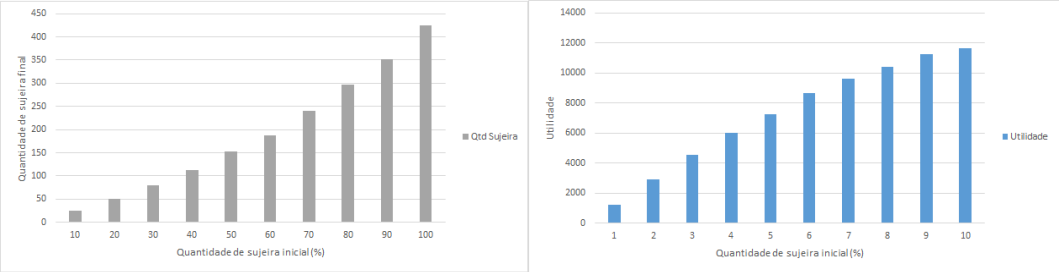
$$Utilidade(f(H(Cenarios))) = \sum_{m=1}^{M} w_m \cdot f_m(H(Cenario))) \tag{4.4}$$

tal que $w_m \geq 0$, $m = 1, \ldots, M$.

Por exemplo, a Figura 16 ilustra os valores da função objetivo próximo de energia (f_1) e os valores de função utilidade, considerando também os valores de uma função objetivo próximo de limpeza (f_2), ao longo de cem, considerando dez cenários ambientais em cada um.

Além de ajudar ao projetista a avaliar o desempenho de cada um dos programas de agentes artificiais em uma organização projetada, ou seja, dos subsistemas técnicos componentes

Figura 16 – Função objetivo em diversos cenários.



Fonte**:** Elaborado pelo autor.

do sistema técnico no sistema *AmI*, as medidas obtidas com estas funções de utilidade em simulações permitirão ao projetista realizar um julgamento a respeito do comportamento da organização de programas de agentes racionais em particular e, consequentemente, do próprio sistema *AmI* em projeto.

4.2.2 Modelo de Estrutura (E)

O projeto de uma estrutura organizacional de programas de agentes artificiais adequada a um ambiente de tarefas capaz de representar satisfatoriamente um sistema *AmI* em projeto é um problema combinatório complexo. Ainda mais considerando os muitos subsistemas técnicos, componentes e a quantidade de interações possíveis (conexões) entre eles. O projetista precisa montar e escolher uma estrutura adequada para o sistema, isto é, definir o número e os tipos de subsistemas, assim como quais subsistemas devem interagir entre si, de maneira que o comportamento resultante dessa integração seja adequado ao seu ambiente de tarefas, maximizando a função de utilidade que foi definida no modelo F da organização de programas de agentes representando o sistema.

Mais especificamente, o modelo E de uma organização de programas de agentes refere-se à descrição formal da sua estrutura. O modelo visa contribuir com a busca de soluções para o problema de projeto de estruturas organizacionais que possam ser facilmente testadas em simulações em computador.

O quadro formal que define o modelo E proposto pode ser dividido em duas partes. A primeira parte permite ao projetista definir o conjunto de programas de agentes, conjunto de papéis que esses programas podem assumir na organização e as relações entre esses papéis, além dos grupos de programas e a cardinalidade destes grupos. A segunda parte do modelo permite ao projetista definir o mapa das interações que ocorrem entre os programas de agentes em diferentes papéis dentro dos grupos que compõem a organização. O quadro abaixo apresenta o esquema

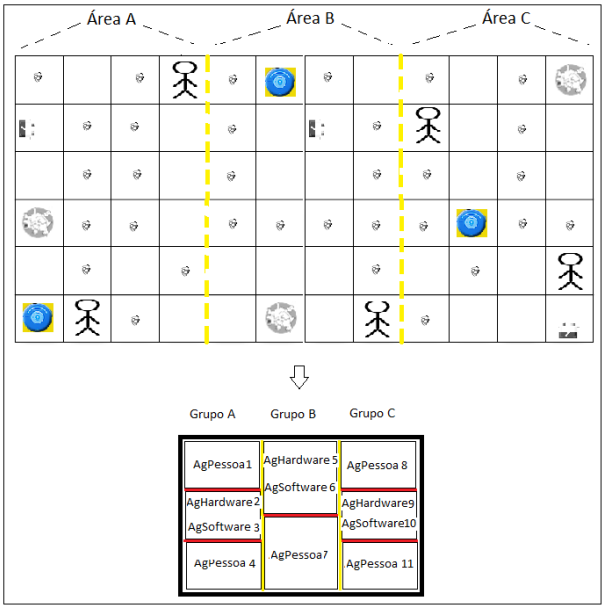
de representação adotado e a definição correspondente dos principais termos componentes do modelo:

- Agents – representa um conjunto de N_A programas *AgentAmI* na organização (lembrar que, no modelo F, *AgentAmI* foi definido como um programa de agente implementando concretamente a função ação de um dos agentes nos conjuntos de agentes *AgPessoas*, $AgHardware$ e $AgSoftware$);
- Roles – representa um conjunto de N_R papéis que podem ser atribuídos aos programas de agentes $AgentAmI \in Agents$;
- AgentRoles – uma família de N_R conjuntos do tipo $AgentAmIR_j (j = 1 \ldots N_R)$, onde cada conjunto $AgentAmI_{Rj}$ é formado por N_{Rj} programas $AgentAmI \in Agents$ desempenhando o papel $R_j \in Roles$;
- Groups – uma família de NG conjuntos de programas de agentes, onde cada conjunto identifica um grupo de agentes exercendo seus papéis na organização;
- Bond – uma família de relações do tipo $Bond_x(AgentAmI_{Ri}, AgentAmI_{Rj})$, onde cada relação $Bond_x(AgentAmI_{Ri}, AgentAmI_{Rj})$ representa uma relação binária de um tipo $x \in \{knowledge, control, coordination, authority\}$, existente entre os programas de agentes no conjunto $AgentAmIR_i \in AgentsRoles$ e os programas de agentes no conjunto $AgentAmIR_j \in AgentsRoles$, tal que para todo $Agent_1 \in AgentAmIR_i$ e todo $Agent_2 \in AgentAmIR_j$:
  - se $(Agent_1, Agent_2) \in Bond_{knowledge}(AgentAmIR_i, AgentAmIR_j)$, então, o agente $Agent_1$ (agente no papel r_i) tem o conhecimento da existência do agente $Agent_j$ (agente no papel R_j);
  - se $(Agent_1, Agent_2) \in Bond_{control}(AgentAmIR_i, AgentAmIR_j)$, então, o agente $Agent_1$ deve monitorar as atividades do $Agent_2$, e assumir as tarefas que este não conseguir realizar;
  - se $(Agent_1, Agent_2) \in Bond_{coordination}(AgentAmIR_i, AgentAmIR_j)$, então, cada ato de informação do programa $Agent_1$ ao programa $Agent_2$ gera o conhecimento correspondente no programa $Agent_2$;
  - se $(Agent_1, Agent_2) \in Bond_{authority}(AgentAmIR_i, AgentAmIR_j)$, então, toda delegação de tarefas do programa $Agent_1$ ao programa $Agent_2$ cria uma obrigação correspondente no programa $Agent_2$;
- Communication – uma relação em $Agents \times Agents$ descrevendo formalmente quem pode enviar mensagens para quem na organização de agentes;
- Frequency – uma matriz sociométrica associando a cada par de agentes $(AgentAmI_x, AgentAmI_y) \in$

Communication, um valor linguístico de frequência f_{xy} (p. ex: $f_{xy} = \{baixa, media, alta\}$ indicando a frequência com que, em geral, um agente $AgentAmI_x \in Agents$ troca mensagens com outro agente $AgentAmI_y \in Agents$.

Por exemplo, a parte superior da Figura 17 ilustra um sistema *AmI* envolvendo cinco pessoas usuárias e um sistema técnico composto por três aspiradores de pó. Todos inseridos em um cenário ambiental representando um ambiente físico (prédio), dividido em três áreas distintas. A parte inferior esboça uma estrutura para uma organização formada por onze programas de agentes correspondentes, representando tanto as pessoas usuárias quanto os componentes do sistema técnico do sistema *AmI* nas três áreas.

Figura 17 – Ambiente de tarefas e organização de programas de agentes.



Fonte**:** Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta o modelo *E* para a organização esboçada na Figura 17. Ela mostra um conjunto de onze programas de agentes, divididos em três grupos, cada grupo responsável por uma área do ambiente. A tabela apresenta apenas algumas relações do tipo Conhecimento, omitindo-se as relações de Controle, Coordenação e Autoridade existentes entre os papéis que podem ser exercidos pelos programas.

Tabela 3 – Organização dos agentes de acordo com o modelo de estrutura.

Agent	$\{AgPessoa_1, AgHardware_2, AgSoftware_3, AgPessoa_4, AgHardware_5, AgSoftware_6, AgPessoa_7, AgPessoa_8, AgHardware_9, AgSoftware_{10}, AgPessoa_{11}\}$
Roles	{User, Device, Controller}
AgentRoles	{AgentAmIUser, AgentAmIDevice, AgentAmIController}
AgentAmIUser	$\{AgPessoa_1, AgPessoa_4, AgPessoa_7, AgPessoa_8\}$
AgentAmIDevice	$\{AgHardware_2, AgHardware_5, AgHardware_9\}$
AgentAmIController	$\{AgSoftware_3, AgSoftware_6, AgSoftware_{10}\}$
Groups	$\{\{AgPessoa_1, AgHardware_2, AgSoftware_3, AgPessoa_4\}, \{AgHardware_5, AgSoftware_6, AgPessoa_7\}, \{AgPessoa_8, AgHardware_9, AgSoftware_{10}, AgPessoa_{11}\}\}$
Bond	$\{Bond_{knowledge}$(AgentAmIUser, AgentAmIDevice), $Bond_{knowledge}$(AgentAmIDevice, AgentAmIController)$\}$
$Bond_{knowledge}$(AgentAmIUser, AgentAmIDevice)	$\{(AgPessoa_1, AgHardware_2), (AgPessoa_4, AgHardware_2), (AgPessoa_7, AgHardware_5), (AgPessoa_8, AgHardware_9), (Agpessoa_{11}, AgHardware_9), \ldots\}$;
$Bond_{knowledge}$(AgentAmIDevice, AgentAmIController)	$\{(AgHardware_2, AgSoftware_3), (AgHardware_5, AgSoftware_6), (AgHardware_9, AgSoftware_{10})\}$
$\vdots$	$\vdots$
Communication	$\{(AgPessoa_1, AgHardware_2), (AgPessoa_1, AgHardware_5), (AgHardware_2, AgSoftware_3), (AgHardware_2, AgPessoa_4), (AgHardware_2, AgHardware_5), (AgHardware_2, AgPessoa_7), \ldots\}$
Frequency	Ilustrado na Figura 18

Fonte**:** Elaborado pelo autor

Os programas de agentes $AgPessoa_1$, $AgPessoa_4$, $AgPessoa_7$, $AgPessoa_8$ e $AgPessoa_{11}$ são programas empregados para representar pessoas. Esses agentes exercem o papel de usuários do prédio (*User*), que são capazes de caminhar em direção a qualquer local desejado.

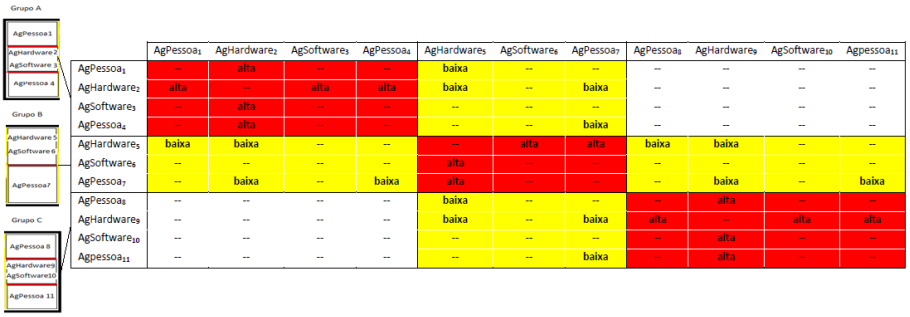
Os programas de agentes $AgHardware_2$, $AgHardware_5$ e $AgHardware_9$, são programas empregados para representar o *hardware* dos sistemas técnicos no sistema *AmI*. Estes programas exercem o papel de sensores e/ou de atuadores (*Devices*), capazes de perceber o ambiente, movimentar um aspirador e aspirar sujeira, além de interagir com os programas do tipo *AgPessoas*.

Os programas de agentes $AgSoftware_3$, $AgSoftware_6$ e $AgSoftware_{10}$ são programas que implementam os componentes do *software* no sistema técnico do sistema *AmI*. Esses

programas exercem o papel de controladores (*Controller*) capazes de interagir com os agentes *AgHardware*, requisitando informações dos sensores e indicando ações adequadas para serem executadas pelos atuadores no ambiente.

A segunda parte do modelo E foca no componente da estrutura organizacional que descreve formalmente o mapa das interações entre os agentes na organização. Este mapa contém dois tipos de informações: (1) a relação *Communication* na Tabela 3 informa quem pode enviar mensagem para quem, dentro de um mesmo grupo e entre grupos diferentes de programas de agentes na organização; (2) a matriz sociométrica *Frequency*, ilustrada na Figura 18, informa a frequência com que os programas de agentes trocam mensagens entre si, isto é, a frequência que, em geral, é necessária para dar suporte às relações binárias existentes entre os programas (Conhecimento, Controle, Coordenação e Autoridade) em diferentes papéis na organização.

Figura 18 – Mapa das interações entre os programas de agentes de diversos grupos.



	$AgPessoa_1$	$AgHardware_2$	$AgSoftware_3$	$AgPessoa_4$	$AgHardware_5$	$AgSoftware_6$	$AgPessoa_7$	$AgPessoa_8$	$AgHardware_9$	$AgSoftware_{10}$	$Agpessoa_{11}$
$AgPessoa_1$	--	alta	--	--	baixa	--	--	--	--	--	--
$AgHardware_2$	alta	--	alta	alta	baixa	--	baixa	--	--	--	--
$AgSoftware_3$	--	alta	--	--	--	--	--	--	--	--	--
$AgPessoa_4$	--	alta	--	--	--	--	baixa	--	--	--	--
$AgHardware_5$	baixa	baixa	--	--	--	alta	alta	baixa	baixa	--	--
$AgSoftware_6$	--	--	--	--	alta	--	--	--	--	--	--
$AgPessoa_7$	--	baixa	--	baixa	alta	--	--	--	baixa	--	baixa
$AgPessoa_8$	--	--	--	--	baixa	--	--	--	alta	--	--
$AgHardware_9$	--	--	--	--	baixa	--	baixa	alta	--	alta	alta
$AgSoftware_{10}$	--	--	--	--	--	--	--	--	alta	--	--
$Agpessoa_{11}$	--	--	--	--	--	--	baixa	--	alta	--	--

Fonte**:** Elaborado pelo autor.

A matriz sociométrica acima informa a frequência f_{xy} com que cada par de programas de agentes $(AgentAmI_x, AgentAmI_y) \in Communication$ trocam mensagens entre si. A matriz permite informar também as concentrações de interações densas, ou seja, programas de agentes em um mesmo grupo estão agrupados na matriz, de forma que as células que possuem os maiores valores de frequência ficaram numa linha de submatrizes quadradas ao longo da diagonal principal e todos as células fora destes quadrados da diagonal têm valores de frequência zero ou muito pequeno.

Nesse tipo de estrutura organizacional quase decomponível é possível distinguir as trocas de mensagens entre grupos de agentes (amarelo) e as trocas dentro dos grupos (vermelho). Nessas organizações, as trocas de mensagens entre grupos são menos frequentes, mas não são desprezíveis. Assim, se dois agentes – $AgentAmI_x$ e $AgentAmI_y$ – estiverem em um mesmo grupo e existir uma "parede" comum entre eles, então, a frequência da troca de informações entre eles será: $f_{xy} = alta$. E se os agentes estiverem em grupos diferentes e existir uma parede

separando-os, então, a frequência será: $f_{xy} = baixa$ (ou, dependendo do caso, $f_{xy} = media$).

Assim, considerando que a maioria dos sistemas *AmI* pode ser descrita por organizações de programas de agentes em uma estrutura quase decomponível, o projetista pode agir de duas maneiras diferentes, considerando as ideias implícitas no modelo E. Ele pode empregar a primeira parte do modelo para formalizar previamente os grupos de agentes na organização e, em seguida, empregar a segunda parte do modelo para formalizar o mapa de interações sociais em função dos grupos formalizados. Mas ele pode também formalizar previamente o mapa de interações entre os agentes e, em seguida, formalizar os grupos operacionalmente considerando uma medida de frequência de interação no mapa.

4.2.3 Modelo de Comportamento (C)

Depois de se concentrar na descrição estrutural, empregando o modelo E da organização de programas de agentes representando o sistema *AmI*, o projetista deve ser capaz de descrever como a estrutura projetada deve funcionar (comportamento) para realizar o objetivo original do sistema, sua função descrita no modelo F, no ambiente de tarefas. O modelo de comportamento (modelo C) permitirá a descrição formal de procedimentos de tomada de decisão nos programas de agentes, em seus papéis na organização e nos processos que ocorrem dentro da organização, definindo como os programas de agentes, integrados na estrutura organizacional, devem agir de maneira a alcançar os resultados desejados.

O quadro formal que define o modelo C pode ser dividido em duas partes. A primeira parte permitirá ao projetista determinar os “esqueletos” dos programas de agentes, definidos no conjunto $Agents$ do modelo E. Estes "esqueletos"de programa deverão ser customizados de acordo com os papéis que assumirão em um domínio específico de aplicação. Essa customização implica na definição do conjunto de comportamentos que cada programa deve ser capaz de executar quando adotar algum papel na organização – no modelo E, aqueles papéis definidos no conjunto $Roles$. A segunda parte do quadro permitirá ao projetista definir o protocolo de interação descrevendo as trocas de mensagens possíveis – no modelo E, descritas na relação $Communication$ –, visando coordenar as ações dos programas em seus papéis na organização.

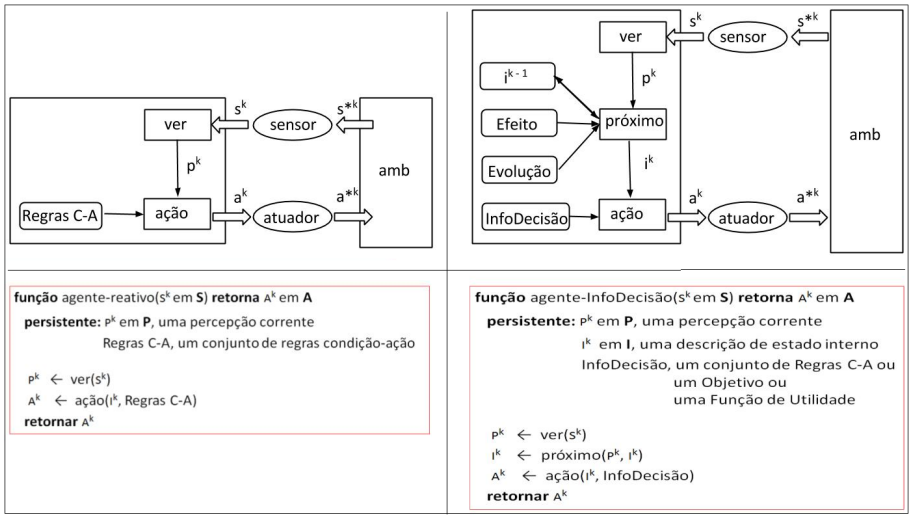
4.2.3.1 Descrição Formal dos “Esqueletos” de Programas de Agentes

No nível individual, o modelo C permitirá ao projetista descrever formalmente os esqueletos dos programas de agentes na organização. Cabe ao projetista definir a especificação do

conjunto de comportamentos a serem incorporados nesses esqueletos, que devem ser adequados aos papéis $R_j \in Roles$ que os programas nos conjuntos $AgentAmIRj \in AgentRoles$, descritos no modelo E, devem assumir no domínio de aplicação de interesse do projetista. O formalismo para descrição desses esqueletos foi sintetizado a partir dos trabalhos de Norvig e Russell (2004), sobre estruturas de programas de agentes, e de Wooldridge (2009), sobre arquiteturas abstratas de agentes. A Figura 19 ilustra graficamente a estrutura e os esqueletos de pelo menos quatro tipos diferentes de programas de agentes resultantes dessa síntese.

Mais especificamente, a figura ilustra um refinamento em duas etapas do subsistema de tomada de decisão, $ao : S^* \rightarrow A$ (função que mapeia sequências de estados do ambiente $s \in S^*$ em ações $a \in A$), apresentada na seção que descreve o quadro formal associado ao modelo F da organização. À esquerda, o primeiro refinamento dando origem ao subsistema de percepção do agente. À direita, o segundo refinamento dando origem ao subsistema de estado interno do agente. O primeiro refinamento apresenta a arquitetura e o esqueleto de programas de agentes reativos simples baseados em regras condição-ação. O segundo refinamento apresenta a arquitetura e o esqueleto de programas de agentes reativos baseados em modelos, orientados por objetivos e por metas, dependendo do tipo de informação ($InfoDeciso$) que o projetista desejar incorporar ao processo de tomada de decisão (regras, objetivos, utilidades).

Figura 19 – Estrutura dos programas de agente.



Fonte**:** Elaborado pelo autor.

Além de serem empregados na concepção de programas de agentes para representar pessoas e o *software* do sistema, esses esqueletos devem ser utilizados também na concepção de programas de agentes, para representar o *hardware* do sistema. Esses agentes são ilustrados

na Figura 19 como elipses, com os nomes sensor e atuador, conforme ilustram os esqueletos de agentes reativos simples empregados para representar estes componentes do *hardware* nos sistemas técnicos ilustrados na Figura 14. O quadro apresentado na Tabela 4 consiste em uma extensão do quadro inicialmente desenvolvido no modelo F, o qual apresenta o esquema de representação e a definição correspondente dos principais termos envolvidos na definição dos esqueletos de programas de agentes ilustrados na Figura 19.

Tabela 4 – Definição dos termos envolvidos no esqueleto do programa de agente.

$P = \{P_1, P_2, \ldots\}$	Percepção do ambiente do agente - em qualquer instante o agente recebe por meio de sensores entradas perceptivas em um conjunto de percepções do ambiente;
$ver : S \rightarrow P$	Subsistema de percepção do programa - captura a habilidade do agente observar seu ambiente, uma função que mapeia estados do ambiente para percepções;
$I = \{I_1, I_2, \ldots\}$	Estados internos do ambiente - em qualquer instante o agente mantém em memória uma descrição de estado em um conjunto de estados interno do ambiente;
próximo: $I \times P \rightarrow I$	Subsistema de atualização de estado interno do programa – função que mapeia um estado interno e a percepção atual, que chega da função ver, em um estado interno;
ação: $I \rightarrow A$	Subsistema de tomada de decisão do programa – função que mapeia estados internos em ações.
$Sucessor : I \rightarrow P(I \times A)$	Efeito das ações do agente no ambiente – função que mapeia um estado interno em um conjunto de pares estado interno e ação;
Ações: $I \rightarrow 2^A$	Conjunto de ações possíveis para o agente em um estado – mapeia um estado interno em um conjunto de ações possíveis de serem executadas no estado;
$RESULTADO : I \times A \rightarrow I$	Modelo de transição – descrição formal do que cada ação faz, uma função que mapeia um estado interno e uma ação em um novo estado interno;
Meta:$I \rightarrow \{V, F\}$	Função que mapeia uma descrição de estado interno em um valor verdade;
$Utilidade : I \rightarrow \mathbb{R}$	Função que mapeia uma descrição de estado interno em um valor real.

Fonte**:** Elaborado pelo autor

Em resumo, à esquerda na Figura 19, um programa agente reativo simples seleciona suas ações baseando-se apenas em sua percepção atual e em um conjunto de regras no formato condição-ação. À direita na Figura 19, um programa agente reativo baseado em modelos mantém internamente em memória uma descrição de estado de seu ambiente, o qual depende do histórico de suas percepções. Essa mesma figura pode representar um programa agente orientado por objetivos, que, além das informações em memória, considera a informação sobre os objetivos que descrevem situações desejadas no ambiente. O programa do agente orientado por utilidade possui uma função utilidade que mapeia uma descrição de estado do ambiente em um grau de felicidade associado.

O subsistema de atualização de estado interno (próximo) dos agentes reativos baseados em modelos, orientados por objetivos e por utilidade, e o subsistema de tomada de decisão (ação) dos dois últimos, em comum, processam informações de dois tipos, ou seja: sobre como o ambiente evolui independentemente das ações do agente (Evolução) e sobre o efeito das ações do agente no ambiente (Efeito). A utilização dessas informações nos dois subsistemas pode ser representada por meio de uma função Sucessor de estado, e/ou por meio das funções *Ações* e *RESULTADO* no quadro.

As informações sobre o objetivo, processadas pelo subsistema de tomada de decisão do agente orientado por objetivo, é representada por um teste Meta. Quando verdadeiro, esse teste diz ao agente que ele pode parar o seu processo de deliberação. De forma semelhante, o agente orientado por utilidade deve empregar uma função utilidade, do tipo especificado no modelo F, para medir a qualidade dos estados realizados por ações que ele tenha como alternativas.

O algoritmo 1 descreve uma função tomada de decisão de um programa de agente aspirador de pó, do tipo $AgSoftware$, no papel Controlador. O programa deve ser capaz de controlar o aspirador visando varrer uma área e aspirar aqueles locais que contém sujeira. O aspirador deve realizar um movimento horizontal (direita ou esquerda) na área enquanto não perceber sujeira e obstáculos. Quando perceber que existe um obstáculo (parede ou pessoa), impossibilitando-o de realizar um movimento, o aspirador deve realizar um movimento vertical para cima/baixo (girar 90° no sentido anti-horário e seguir em frente). Em seguida, modificar a direção horizontal (esquerda/direita e vice-versa) e seguir em frente em busca de novos locais contendo sujeira.

Algoritmo 1: Descrição parcial da função tomada de decisão de um agente reativo.

função ação (p^k em S) retorna a^k em A
início
    ...
    se p^k = obstáculo **então retornar** a^k = aspirar;
    senão se p^k = obstáculo **então retornar** a^k = rotacionar 90° esquerda;
    senão se p^k = limpo **então retornar** a^k = frente;
    ...
fim

A função tomada de decisão diz respeito a um programa de um agente do tipo reativo simples baseado em regras de condição-ação. As expressões que definem as condições nas regras são estabelecidas levando-se em consideração as informações no conjunto de percepções do

ambiente que são possíveis para o agente $P = \{P_1, P_2, \ldots\}$. Os programas de agentes baseados em modelos são mais adequados para ambientes parcialmente observáveis. Eles podem empregar as informações que descrevem o estado interno, $I = \{I_1, I_2, \ldots\}$, para evitar retornar em locais por onde já passaram. E, ainda, evitar passar em locais que foram visitados recentemente por outros agentes, através de um processo cooperativo de troca de mensagens em um sistema composto por mais de um aspirador.

4.2.3.2 Descrição Formal do Protocolo de Interação Global Entre os Agentes

Na subseção anterior, descrevemos a parte do modelo *C* que representa o comportamento interno de um agente. Mas essa parte do modelo só é capaz de descrever sistemas que contenham agentes únicos. Em vez de um sistema *AmI* formado por um único aspirador, vale considerar a situação em que um grupo de aspiradores são capazes de cooperar uns com os outros. Os agentes podem trocar mensagens contendo informações úteis sobre o ambiente de tarefas, visando alcançar da melhor maneira o objetivo original do sistema.

O processo de comunicação e intercâmbio de conhecimento é conhecido como cooperação. Dependendo do ambiente de tarefas, a cooperação pode ser um requisito crucial. Por exemplo, cada agente pode cooperar utilizando a operação coletiva *broadcast*, ou seja, operação de transmissão de uma mesma mensagem para todos os outros agentes no grupo.

A ideia é que, para alcançar seus objetivos e o objetivo original do sistema, os agentes componentes possam se comunicar através de uma linguagem de comunicação em que os atos de fala são visualizados como ações (da mesma forma que as ações executadas pelos atuadores do agente), cujos efeitos ocorrem principalmente nos modelos que os falantes e os ouvintes mantêm uns dos outros. Neste contexto, os atos de fala dos agentes podem ser integrados nos processos de atualização de estado interno (informação sobre efeito de um ato) e de tomada de decisão dos programas de agentes (por exemplo, como consequentes em regras condição-ação).

A segunda parte do modelo *C* foca na descrição do quadro formal, que pode ser adaptado para definir o protocolo de comunicação entre os agentes em um mesmo grupo e entre os agentes em grupos diferentes na organização. A abordagem considera que os agentes são capazes de trocar mensagens por meio de canais de comunicação. Cada agente atua assincronamente monitorando uma fila de mensagens de entrada, que chegam pelo canal, e enviando mensagens para uma fila de saída, que serão transmitidas pelo canal para um ou mais agentes.

A principal parte do quadro proposto para a segunda parte do modelo *C* consiste em

uma variação do quadro empregado para a definição formal da noção de autômatos de estados finitos (AFD). O quadro resultante empresta algumas ideias implementadas no formalismo para a especificação de cenas em instituições eletrônicas (VASCONCELOS; SIERRA; ESTEVA, 2002), baseado na noção de autômatos finitos não determinísticos. No modelo *C*, um protocolo de interação entre agentes é descrito como um AFD, onde os estados representam diferentes estágios de conversação e os arcos direcionados, conectando os estados, são rotulados com mensagens escritas em uma linguagem de comunicação, ou com alguma condição descrita em termos de um período de tempo entre dois instantes consecutivos de transmissão de mensagens no processo de conversação. Ou seja:

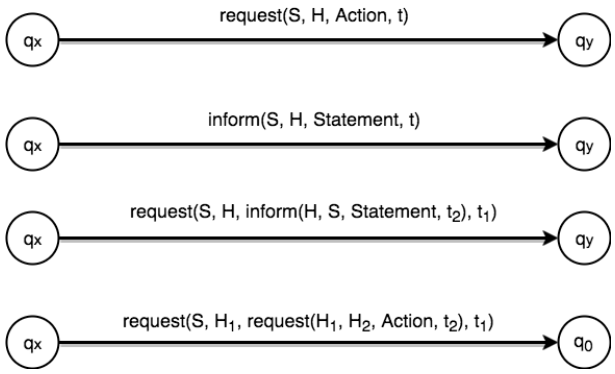
Definição 1 *Protocolo* $= (T, LC, Q, q_0, \delta, G)$*, tal que:*

- $T = \{t_1, \ldots, t_m\}$ *- um conjunto discreto e parcialmente ordenado de instantes, para marcar a transmissão de mensagens em um processo de conversação;*
- *LC – linguagem empregada para a comunicação entre os agentes;*
- *Q – conjunto de estados possíveis do protocolo (é finito);*
- $q_0 \in Q$ *– estado inicial do protocolo;*
- δ *– função programa ou função transição (função parcial) – associa estados em Q e mensagens em LC, ou uma condição descrita em termos de T, a estados em Q, ou seja,* δ*:* $Q \times (LC \cup condição(T)) \rightarrow Q$*;*
- $G \subset P(Agentes)$ *– família de conjuntos de agentes que podem participar do processo de conversação especificado no protocolo.*

A especificação de um protocolo de comunicação entre um grupo de agentes *G* considera um único estado inicial q_0. Apesar de não existirem estados finais, o estado inicial também representa as diferentes possibilidades de um agente finalizar uma conversação. Com relação à linguagem para comunicação (*CL*), o modelo *C* considera uma linguagem de atos de fala que podem ser gerados a partir de dois atos de fala considerados como mensagens fundamentais: *request* e $inform$. A Figura 20 ilustra o formato proposto para estas mensagens e dois exemplos de composições destas mensagens visando gerar atos de fala de perguntas (*requests to inform*) e solicitações envolvendo pelo menos três agentes (*requests to request*).

Cada mensagem transmitida deve conter representações de informações sobre a intenção da mensagem dos agentes falantes (*S*) e os ouvintes (*H*), assim como sobre o conteúdo da mensagem a ser trocada entre os agentes ($Action$ ou $Statement$) e o instante (t) da conversação. Qualquer agente falante *S* que envia uma mensagem do tipo *request* objetiva fazer com que algum

Figura 20 – Troca de mensagens entre os agentes da organização.



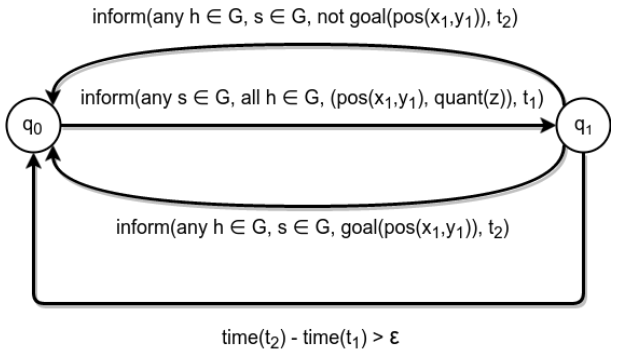
Fonte**:** Elaborada pelo autor.

agente ouvinte H execute uma ação $Action$. Qualquer agente falante S que envia uma mensagem do tipo $inform$ objetiva fazer com que o agente ouvinte H acredite em alguma afirmação ($Statement$). Assim como no caso da formulação de mensagens envolvendo questões, toda a semântica dos atos de fala que compõem a linguagem de comunicação *FIPA-ACL* (*Foundation for Intelligent Physical Agents – Agent Communication Language*) pode ser definida em termos de $inform$ e $request$.

Para ilustrar a formalização da noção de protocolos, vale considerar o exemplo do grupo de aspiradores capazes de cooperar uns com os outros, visando limpar o ambiente no menor tempo possível. Por exemplo, cada agente pode cooperar utilizando a operação coletiva *broadcast*, transmitindo uma mesma mensagem para todos os outros agentes no grupo. Assim, quando perceber um local (célula) contendo sujeira, o agente pode transmitir a posição da célula e a quantidade de sujeira aos outros. Quando a mensagem for recebida, cada agente pode armazenar as informações no estado interno e, em seguida, decidir se vai em direção ao local, avisando ou não ao agente que enviou a mensagem. Quando limpar uma célula, o agente pode transmitir esta informação novamente para os outros agentes no grupo. Quando a mensagem for recebida, o agente pode remover do estado interno a informação sobre sujeira na célula que foi limpa.

A Figura 21 descreve graficamente uma parte da função transição (δ) componente do protocolo de comunicação entre os agentes. O protocolo considera um conjunto de dois estados possíveis, $Q = \{q_0, q_1\}$, com o estado inicial representado por q_0. A figura supõe que o processo de conversação envolve uma família formada por um conjunto contendo os programas no papel Controller, isto é, G = AgentAmIController (como G é unitário, em vez de fazer referência ao conjunto AgentAmIController, a figura faz referência à própria família G).

Figura 21 – Protocolo de transição.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Na primeira etapa do processo de conversação, no instante t_1, representada pelo componente da função transição $\delta(q_0, inform(\ldots, t_1)) = q_1$, um agente falante s $\in$ G pode enviar sua posição (x_1, y_1) e a quantidade de sujeira z na posição para todos os outros agentes ouvintes h $\in$ G. Na segunda etapa, no instante t_2, alguns dos agentes ouvintes podem responder a mensagem dizendo se definiram, ou não, a posição (x_1, y_1) como meta, $\delta(q_1, inform(\ldots, t_2) = q_0$. Entretanto, os agentes podem não enviar mensagem de retorno. Neste caso, depois de ε unidades de tempo, contadas a partir do horário de início da conversação no instante t_1 (tempo(t_1)) até um tempo limite em que uma mensagem de retorno deve ser enviada no instante t_2 (tempo(t_2)), o protocolo transita para o estado inicial, $\delta(q_1$, tempo(t_2) – tempo(t_1) > ε, t_2) = q_0, em que os agentes poderão iniciar novo processo de conversação.

Conforme ilustra o mapa das iterações sociais na Figura 18, a descrição parcial da função transição omitiu as trocas de mensagens que existem entre os agentes no papel *AgentAmIDevice* e os agentes no papel $controller$. Estas trocas ocorrem com muita frequência e, assim como possíveis trocas entre os agentes no papel *AgentAmIDevice* com os agentes no papel $AgentAmIUser$, devem ser especificadas de maneira a completar a definição do protocolo de interação global entre todos os agentes no grupo exemplificado.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta **P6**, escrita na introdução deste capítulo, consiste na utilização de simulação computacional baseada em agentes (*ADS*) como um meio para examinar a dinâmica de um sistema *AmI*. A *ADS* permitirá ao projetista experimentar diversos contextos operacionais do sistema *AmI*, possibilitando a aquisição de novos conhecimentos sobre o funcionamento do sistema em seu ambiente, e outras formas de adaptar o seu modelo estrutural (E) e o comportamental (C), visando melhorar o desempenho do sistema quando for necessário, de acordo com o que for especificado no modelo F.

Conforme a Figura 15 (na seção de introdução deste capítulo) indica, a execução de uma simulação considera como informações de entrada, o modelo FEC do sistema *AmI*, o modelo do ambiente de tarefas e os valores dos parâmetros de entrada. Descrevendo um contexto operacional de funcionamento do sistema no ambiente, a execução de uma *ADS* deve gerar como saída as informações sobre o desempenho do sistema conforme descrito no modelo F. Essas informações de desempenho, ou objetos emergentes, são resultado das interações descritas no modelo C, executadas por programas de agentes na organização estruturada no modelo E.

Uma execução pode ser vista como uma dedução de alguma informação sobre o sistema *AmI* sendo projetado. Uma coleção destas deduções, obtidas metodicamente pela execução de várias *ADS*, pode ser vista como a informação necessária para o projetista realizar inferências (indutivas) sobre o comportamento do sistema, permitindo a ele deduzir se o sistema será capaz de realizar o objetivo original em seu ambiente de tarefas.

5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Este capítulo apresenta uma primeira aplicação da abordagem proposta no capítulo anterior para o projeto de sistemas de inteligência ambiental (sistemas *AmI*). Conforme mencionado, a abordagem consiste em uma contribuição para a etapa de análise funcional do sistema e no *feedback* que ela pode dar para refinar a análise de requisitos e a síntese do projeto. O domínio de aplicação da ideia escolhido pertence à área de pesquisa e desenvolvimento tecnológico resultante da combinação da robótica autônoma e da inteligência ambiental, mais especificamente o campo dos robôs aspiradores de pó.

Apesar do domínio de aplicação específico, como o mundo dos aspiradores de pó, o capítulo visa mostrar aos projetistas de sistemas *AmI* em geral, como projetar estes sistemas em termos de modelos FEC associados e como realizar estudos experimentais objetivando verificar/encontrar decomposições funcionais alternativas de subsistemas componentes capazes de atender aos requisitos funcionais e de desempenho dos sistemas *AmI*. O ambiente de tarefas, os programas dos agentes representando as pessoas e os robôs aspiradores de pó foram implementados em NetLogo (TISUE; WILENSKY, 2004), uma plataforma de *software* que facilita o desenvolvimento das capacidades dos programas dos agentes e do dinamismo do ambiente. A razão para a escolha dessa plataforma é a alta simplicidade em representar os agentes, facilitando a construção de ambientes complexos em curto espaço de tempo. Os códigos utilizados para construir a simulação podem ser observados no seguinte endereço [1].

O capítulo foi dividido em mais quatro seções. A Seção 5.1 descreve o domínio de aplicação, isto é, o sistema *AmI* pretendido e seu ambiente de tarefas. A Seção 5.2 apresenta o cenário de teste adotado, as propriedades do ambiente de tarefas e as funcionalidades necessárias ao sistema neste ambiente. A Seção 5.3 apresenta os principais aspectos associados à plataforma de simulação NetLogo, que são importantes para a compreensão dos resultados. A Seção 5.4 apresenta os projetos em modelos FEC e os resultados (objetos emergentes) de suas simulações na NetLogo. E, finalmente, na seção 5.5, discutimos os resultados obtidos nos experimentos.

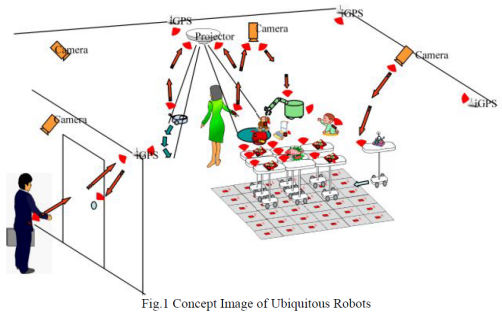
5.1 DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

O domínio proposto está dentro de uma combinação das áreas de robótica autônoma e de inteligência ambiental. De um lado, a robótica autônoma visando criar robôs compostos por sensores, atuadores e controladores, que sejam capazes de viver em casas e locais públicos, e

[1] https://bitbucket.org/rob_oliveira/netlogocleanersim

sejam habilidosos na realização de tarefas físicas que ajudem na vida cotidiana das pessoas. De outro lado, a inteligência ambiental visando criar redes de dispositivos domésticos inteligentes capazes de fornecer informações, comunicação e serviços para as pessoas. A Figura 22 ilustra um exemplo desses robôs autônomos em um ambiente de computação ubíqua inteligente, em que existem muitos computadores e redes sensores no ambiente para a geração de informações úteis para o controle dos robôs.

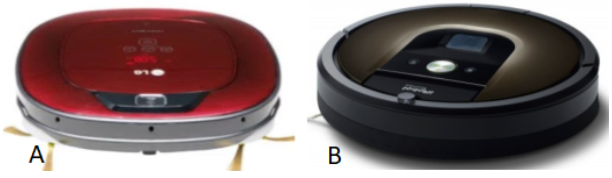
Figura 22 – Ilustração da ideia de inteligência ambiental e robôs autônomos



Fonte**:** Elaborada pelo autor

Dentro do contexto da combinação da robótica autônoma e da inteligência ambiental, o sistema *AmI* para aplicação da abordagem envolve o campo dos robôs aspiradores de pó. Este tipo de robô faz parte do mundo atualmente conhecido como Internet das Coisas (*IoT*). O propósito de um robô aspirador é ser um servo para as pessoas, economizando o tempo e esforço, limpando a sujeira de locais de interesse. Por exemplo, a fabricante LG disponibiliza uma vasta gama de aparelhos inteligentes que são controlados por um aplicativo de mensagens. Em particular, tal empresa fabrica um robô aspirador denominado *HomeBot Square* (Figura 23a). Através do aplicativo de mensagens, o *HomeBot Square* e outros dispositivos inteligentes LG podem ser programados com comandos em linguagem natural.

Figura 23 – Aspiradores de pó inteligentes: HomeBot Square e Roomba 980



Fonte**:** Elaborado pelo Autor

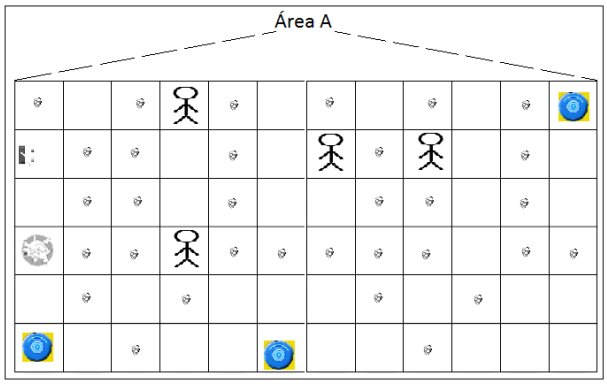
A companhia iRobot fabrica o robô aspirador Roomba 980 (Figura 23b). Conhecido

como o aspirador da Internet das Coisas, o Roomba 980 pode ser controlado por meio de aplicativos. A companhia garante que o robô é capaz de executar suas tarefas em um tempo contínuo de duas horas, retornando automaticamente à sua base de carga e em seguida voltar ao trabalho até que o local pretendido esteja limpo. Roomba é capaz de limpar área abertas movendo-se em linhas paralelas, empregando um conjunto de sensores para adaptar este padrão quando necessário, navegando perfeitamente entre os móveis e a desordem. Essencialmente, a iRobot instalou uma câmera em cima do Roomba 980, a qual constantemente mapeia o local à medida que o robô se movimenta, tornando-o mais eficiente.

5.2 CENÁRIO DE TESTE

Para ilustrar a aplicação da abordagem, o cenário de teste considera um sistema técnico composto por um conjunto de agentes artificiais robôs aspiradores de pó responsáveis por limpar uma área quadrada (retangular) em um aeroporto, que pode conter obstáculos, sujeira e pessoas, distribuídas de maneira aleatória em uma área determinada. A Figura 24 ilustra um cenário específico, contendo um conjunto de quatro agentes artificiais, quatro usuários, três obstáculos, três pontos de recarga de energia e bastante lixo.

Figura 24 – Exemplo de um cenário de teste.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

O ambiente de tarefas é parcialmente observável e não determinístico, pois alguns atuadores dos robôs podem falhar. As pessoas que circulam pelo ambiente podem depositar sujeira pelos locais por onde passam, tornando o ambiente dinâmico. Uma configuração particular do ambiente pode ser definida considerando-se as quantidades de robôs, de obstáculos, de lixo e de pessoas em locais específicos do aeroporto. Diferentes configurações compreendem diferentes cenários (casos) de teste, definindo problemas de diferentes níveis de dificuldade. Por exemplo,

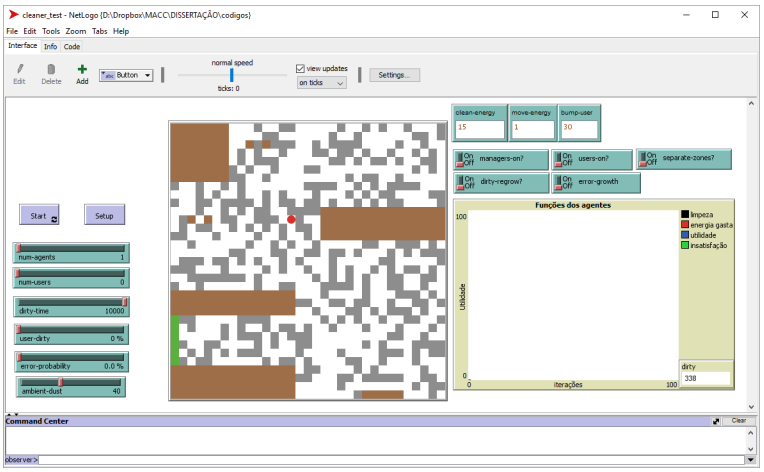
algumas configurações podem exigir dos robôs maior consumo de energia, enquanto outras podem colocar lixo em locais de mais fácil acesso aos robôs.

Nesse tipo de ambiente difícil, cada agente artificial aspirador de pó deve ser capaz de perceber e atualizar seu conhecimento sobre o ambiente sempre que se mover, identificando e localizando cada um dos objetos, visando realizar o objetivo original do sistema, ou seja, limpar o máximo de sujeira possível, gastando o mínimo de energia e evitando obstáculos quando for necessário. Ele também deve ser capaz de cooperar com os outros agentes no ambiente, por meio de processos de comunicação e troca de conhecimentos úteis para a realização de seus objetivos e do objetivo original do sistema. A Seção 5.4 descreve em detalhes a funcionalidade de cada um dos agentes no cenário proposto.

5.3 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

O ambiente de simulação e os programas dos agentes representando as pessoas e os robôs aspiradores de pó foram implementados em NetLogo (TISUE; WILENSKY, 2004), uma plataforma de *software* que facilita o desenvolvimento das capacidades dos programas dos agentes e do dinamismo do ambiente. O ambiente é concebido como um recipiente em que existem objetos observáveis, incluindo obstáculos, lixo e pessoas. As propriedades dos objetos podem ser alteradas e novos objetos podem ser concebidos facilmente e inseridos no ambiente. A Figura 25 ilustra um ambiente em tempo de execução. Neste ambiente existe um agente aspirador de pó (vermelho), cinco obstáculos (marron) e uma grande quantidade de sujeira (cinza).

Figura 25 – Simulação NetLogo: programa aspirador de pó em um ambiente de tarefas.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A NetLogo disponibiliza uma linguagem de programação com atributos multiagentes. Ela possui capacidades que a tornam muito poderosa, tanto para produzir quanto para visualizar simulações de Sistemas Multiagentes. A NetLogo é implementada em Java, seu código é compacto e simples de compreender, tornando-a ideal para demonstrar ideias complexas de forma sucinta. Além disso, permite que os usuários adicionem extensões para a linguagem, criando novos comandos (TEAHAN, 2010).

Há quatro tipos de agentes em NetLogo. São eles: *patches*, *turtles*, *links* e o *observer*. Os agentes *turtles* são capazes de se movimentar e interagir com o ambiente. Os agentes *Patches* representam o ambiente por onde os *turtles* caminham. Em um ambiente bidimensional os *patches* são representados por um *grid*, onde cada célula contém um *patch*. Estes dois tipos são os principais agentes utilizados para construir aplicações.

Os agentes *links* não possuem uma representação visual, mas simbolizam uma ligação entre dois ou mais agentes *turtles*. O agente *observer* é o agente gestor, capaz de controlar toda a aplicação, não sendo permitido ao usuário utilizá-lo. Ele também não possui uma representação visual, e é usado para adicionar ou remover entidades da aplicação, além de observar seu comportamento.

5.4 PROJETANDO O SISTEMA *AMI*

O objetivo desta seção consiste em apresentar a aplicação da abordagem proposta em cenários de teste semelhantes aos descritos na Seção 5.2. A apresentação é realizada em diversas subseções. Cada subseção foi dividida em duas partes. A primeira apresenta o modelo FEC

associado a uma organização de programas de agentes empregada para representar um sistema técnico, composto por um ou mais robôs aspiradores e as pessoas no ambiente de tarefas. A segunda parte apresenta os objetos emergentes resultantes de simulações, considerando diferentes configurações do ambiente de tarefas, ou seja, fixando dimensões e obstáculos, variando a quantidade de sujeira, o número de pessoas usuárias e os tipos de robôs aspiradores no ambiente.

As subseções componentes foram organizadas em uma sequência tal que os detalhes da aplicação do modelo FEC são apresentados evolutivamente. A Subseção 5.4.1 considera um sistema *AmI* composto por um único sistema técnico, ou seja, um único robô aspirador, que interage com um ambiente de tarefas contendo apenas sujeira e obstáculos. A Subseção 5.4.2 modifica o ambiente, tornando-o dinâmico, e adiciona um elemento não determinístico ao comportamento do aspirador. A seção 5.4.3 adiciona a entidade usuário à simulação. Na seção 5.4.4, observamos o comportamento do sistema quando um conjunto de aspiradores é inserido no ambiente. A seção 5.4.5 adiciona uma outra entidade, chamada "coordenador", que tem o objetivo de controlar as ações dos aspiradores. E, finalmente, na seção 5.4.6, dividimos os agentes da simulação em grupos no ambiente.

5.4.1 Sistema *AmI* com um único sistema técnico em um ambiente sem pessoas

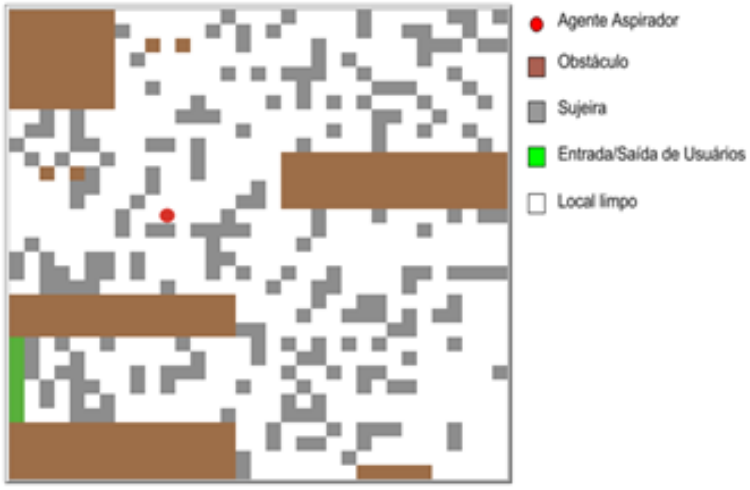
O primeiro experimento considera um sistema *AmI* com um sistema técnico formado por um único robô aspirador em um ambiente de tarefas que consiste em um certo local em um aeroporto. A Figura 26 ilustra um ambiente representado por uma grade de 32×32 *patches*. Os obstáculos (marrom) e a sujeira (cinza) são os únicos objetos observáveis no ambiente. O aspirador (vermelho) deve realizar o objetivo original (O_O) do sistema *AmI* em um horário em que não existem pessoas transitando.

O agente aspirador se movimenta pelo local visando limpar toda a sujeira nele contida. Ele deve evitar colisão com os obstáculos e procurar minimizar o gasto de energia. O ambiente é parcialmente observável e determinístico. As simulações das interações do sistema técnico com o ambiente consideram diversos cenários diferentes quanto à quantidade e distribuição inicial de sujeira, mas idênticos quanto à posição dos obstáculos no ambiente.

5.4.1.1 Modelo F

A Figura 27 ilustra a relação agente-ambiente, empregando o termo *AgentAmI* para representar o programa de agente $AgSoftware$ componente do sistema técnico, cujo *hardware*

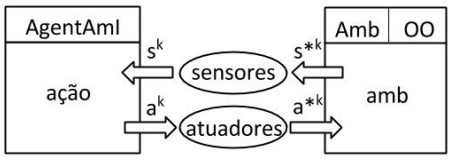
Figura 26 – Sistema *AmI* aspirador único em ambiente sem pessoas.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

é formado por um sensor e um atuador. A figura ilustra também outros termos empregados na concepção do quadro formal que define o modelo F. Em qualquer instante k, o sensor do aspirador percebe (s^{*k}) uma grade de 32×32 *patches*, os quais podem ser do tipo limpo, sujo ou obstáculo, e o seu atuador executa uma ação adequada (a^{*k}) entre aquelas que são possíveis de serem executadas pelo aspirador.

Figura 27 – Interações do programa AgentAmi no ambiente Amb.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A figura identifica um episódio Ep^K do programa *AgentAmI* concebido para realizar o objetivo original O_O no ambiente de tarefas *Amb*, tal que:

- $S = \{s^1, s^2, \ldots\}$ – Estados do ambiente — em qualquer instante k o sensor do aspirador disponibiliza um estado s^k consistindo uma grade menor, contida na grade 32×32 *patches* que representa o local, de tamanho 3×3 *patches*, ou seja, o conjunto de estados do ambiente é formado por todas as grades desse tamanho, em que cada *patch* pode representar uma parte limpa (branco) ou suja (cinza) do local, ou a presença de um obstáculo (marrom) na parte;
- $A = \{a^1, a^2, \ldots\}$ – Capacidade efetuadora -– em qualquer instante k o atuador do aspirador consegue executar uma ação a^k, que pode ser: locomover-se do *patch* em que o aspirador

está para outro *patch*, em qualquer direção (norte, sul, leste, oeste), ou limpar o *patch* em que o aspirador está (aspirar);

- ação:$S^* \rightarrow A$ – Comportamento -– função para seleção de ações em A adequadas aos estados em S, ou seja, o aspirador deve aspirar em *patches* cinza, e deve mudar para um *patch* vizinho que seja cinza se estiver em um *patch* branco;
- amb: $S \times A \rightarrow S$ – Comportamento (determinístico) ambiente — função para mudança de estados do ambiente de acordo com as ações executadas pelo agente – se o aspirador limpar em um *patch* cinza, então, ele deve mudar para branco, e se o aspirador seguir de um *patch* para outro em uma determinada direção, então, mudar posição do agente para outro *patch*;
- AgentAmI – Um programa de agente implementando concretamente em linguagem NetLogo a função ação de um agente aspirador;
- Amb – Um programa ambiente implementando concretamente em linguagem NetLogo a função amb;
- Ω – Um conjunto formado por todas as grades de tamanho 32×32 *patches*, diferentes quanto à quantidade de *patches* do tipo cinza;
- $Cenario_i \in \Omega$ – Uma grade de tamanho 32×32 *patches*, os quais podem ser do tipo branco, cinza ou marrom;
- $Cenario_i \in P(\Omega)$ – Um subconjunto formado por $10(N_{Cenarios})$ grades de 32×32 *patches*, os quais podem ser do tipo branco, cinza ou marrom;
- $h(Cenario_i) \in (S \times A)^{Nint}$ – Uma história formada por 100 ($NInt$) de *AgentAmI* em *Amb* correspondente ao $Cenario_i \in \Omega$;
- $Ep^k(h(Cenario_i)) \in (S \times A)$ – Um episódio na interação k, $k \leq 10$, da história de *AgentAmI* em *Amb* correspondente ao caso $Cenario_i \in \Omega$;
- $H(Cenario_i)) \in P((S \times A)^{Nint})$ – Um conjunto de 10 histórias de comprimento 100 de *AgentAmI* em *Amb*;

Neste experimento, o objetivo original (O_O) do sistema consiste em prestar um serviço de alta qualidade com um mínimo de despesas no ambiente. O modelo F aplicado propõe definir formalmente O_O – por meio de uma função de utilidade, a qual considera um vetor de duas funções (f_1 e f_2) – objetivos próximos (O_1 e O_2) de O_O, que têm o mesmo valor de importância no contexto de O_O e são expressas em termos de duas funções escalares (av_1 e av_2), associadas aos atributos de descrição de estados, ou seja, à limpeza do ambiente e à quantidade de energia utilizada. A Tabela 5 coloca em destaque os dois objetivos próximos e a notação

empregada para as funções objetivas e escalares associadas.

Tabela 5 – Objetivos próximos ao objetivo original.

Objetivo	Descrição	Função Objetivo	Recompensa
O_1	Manter o ambiente limpo	$f_1(H(Cenarios))$	$av_1(Ep^k(h(Cenario_i)))$
O_2	Manter energia na bateria	$f_2(H(Cenarios))$	$av_2(Ep^k(h(Cenario_i)))$

Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Cada uma das funções escalares, av_1 e av_2, associa valores no domínio dos números reais, ou seja, valores de satisfação/insatisfação nos objetivos próximos, O_1 e O_2, com um conjunto de episódios possíveis $(Ep(s,a) \in S \times A)$, descritos em termos de um conjunto de estados do ambiente ($s \in S$) e um conjunto de ações possíveis para o aspirador ($a \in A$). Abaixo, a definição formal das funções escalares empregadas neste experimento:

$$av_1(Ep((s^k,a^k)) = \begin{cases} 15 & \text{se } s^k = \text{cinza e } a^k = \text{aspirar,} \\ 0 & \text{se } s^k = \text{branco e } a^k = \text{aspirar,} \\ 0 & \text{se } s^k = \text{cinza ou branco e } a^k = \text{norte ou sul ou leste ou oeste} \end{cases}$$

e,

$$av_2(Ep((s^k,a^k)) = \begin{cases} 2 & \text{se } s^k = \text{cinza ou branco e } a^k = \text{aspirar,} \\ 1 & \text{se } s^k = \text{cinza ou branco e } a^k = \text{norte ou sul ou leste ou oeste} \end{cases}$$

Consequentemente, as funções objetivas podem ser definidas para para um conjunto formado por 10 cenários de teste ($N_{Cenarios} = 10$), cada cenário associado a uma história formada por 100 episódios ($N_{Int} = 100$) de interação do aspirador no ambiente:

$$f_1(H(\text{Cenários})) = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} Av_1(h(Cenrio_i))$$

e,

$$f_2(H(\text{Cenários})) = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} Av_2(h(Cenrio_i)),$$

tal que:

$$Av_1(h(\text{Cenário}_i)) = \sum_{k=1}^{100} av_1(Ep((s^k, a^k))$$

e,

$$Av_2(h(\text{Cenário}_i)) = \sum_{k=1}^{100} av_2(Ep((s^k, a^k))$$

E, finalmente, considerando que os dois objetivos próximos têm o mesmo valor de importância, a função utilidade para medir o alcance do objetivo original pelo aspirador pode ser definida.

$$U(f(H(Cenrios)) = f_1(H(Cenrios)) - f_2(H(Cenrio))$$

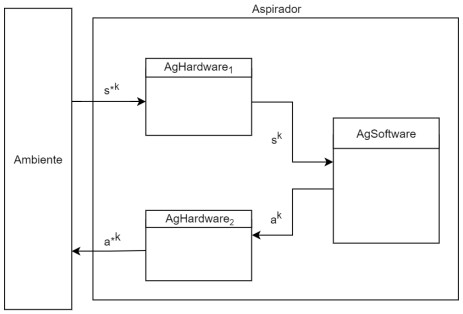
Assim, se o aspirador de pó for capaz de maximizar a função utilidade, isto é, se ele for capaz de maximizar a quantidade de *patches* limpos em 100 interações, minimizando o gasto de energia, então será adequado ao seu ambiente de tarefas, pois é capaz de realizar os objetivos próximos com os quais está comprometido e, consequentemente, de satisfazer o objetivo original do sistema.

5.4.1.2 Modelo E

O termo *AgentAmI*, na Figura 27, foi empregado para representar o componente de *software*, ou seja, um programa de agente do tipo $AgSoftware$ do sistema técnico aspirador de pó, o qual tem como componentes de *hardware* um sensor e um atuador. Assim, de acordo com as propostas P_2 e P_3 na abordagem, este primeiro experimento considerou dois programas de agente do tipo $AgHardware$, um capaz de simular a realização do processamento de informações perceptivas (s^{*k}) realizado pelo sensor e outro para simular a execução de ações (a^{*k}) pelos atuadores do aspirador. A Figura 28 esboça os programas e a maneira como estão organizados na representação do sistema *AmI*.

Os dois programas de agente $AgHardware_1$ e $AgHardware_2$ representam respectivamente o sensor e o atuador do sistema técnico no ambiente. O programa $AgSoftware$ processa as informações perceptivas oriundas do processamento do programa $AgHardware_1$, seleciona ações e envia para o programa $AgHardware2$, o qual deve executar essas ações no ambiente.

Figura 28 – Organização de programas de agentes representando o robô aspirador.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Quanto ao modelo E, associado à figura, ele consiste na definição dos conjuntos de programas de agentes e de papéis que os programas podem assumir na organização das relações entre os papéis, dos grupos de programas e da cardinalidade desses grupos, ou seja:

- $Agents$ – $\{AgHardware_1, AgHardware_2, AgSoftware\}$ – conjunto de três ($N_A = 3$) programas *AgentAmI* na organização.
- $Roles$ – $\{Device, Controller\}$ – conjunto de dois ($N_R = 2$) papéis que podem ser atribuídos aos programas de agentes *AgentAmI*.
- $AgentsRoles$ – $\{AgentAmIDevice, AgentAmIController\}$ – família de dois ($N_R = 2$) conjuntos, tal que:
  - $AgentAmIDevice$ – $\{AgHardware_1, AgHardware_2\}$ – conjunto de programas no papel *Device*;
  - $AgentAmIController$ – $\{AgSoftware\}$ – conjunto de programas no papel *Controller*.
- $Bond$ – $\{Bond_{knowledge}(AgentAmIDevice, AgentAmIController)$, $Bond_{knowledge}(AgentAmIController, AgentAmIDevice)$, $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIDevice, AgentAmIController)$, $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIDevice)\}$ – família de quatro relações entre os programas nos conjuntos *AgentAmIDevice* e *AgentAmIController*, tal que:
  - $Bond_{knowledge}(AgentAmIDevice, AgentAmIController) - \{(AgHardware_1, AgSoftware)$, $(AgHardware_2, AgSoftware)\}$ – programas $AgHardware_1$ e $AgHardware_2$ (papel *Device*) têm o conhecimento da existência do programa $AgSoftware$ (papel *Controller*);
  - $Bond_{knowledge}(AgentAmIController, AgentAmIDevice) - \{(AgSoftware, AgHardware_1)$, $(AgSoftware, AgHardware_2)\}$ – programa $AgSoftware$ têm o conhecimento da existência dos programas $AgHardware_1$ e $AgHardware_2$;
  - $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIDevice, AgentAmIController) - \{(AgHardware_1, AgSoftware\}$

– cada ato de informação do programa $AgHardware_1$ ao programa $AgSoftware$ gera o conhecimento correspondente no programa $AgSoftware$;

– $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIDevice)$ – $\{(AgSoftware, AgHardware_2)\}$ – cada ato de informação do programa $AgSoftware$ ao programa $AgHardware_2$ gera o conhecimento correspondente no programa $AgHardware_2$.

- *Groups* –$\{AgHardware_1, AgHardware_2, AgSoftware\}$ – família de um ($N_G = 1$) conjunto de programas de agentes exercendo seus papéis na organização.
- *Communication* – $\{(AgHardware_1, AgSoftware), (AgSoftware, AgHardware_2)\}$ – relação descrevendo quem pode enviar mensagens para quem na organização;
- *Frequency* – Figura 29 – matriz sociométrica informa a frequência com que os programas de agentes trocam mensagens entre si.

Os dois últimos itens descrevem a segunda parte do modelo. A Figura 29 define a matriz sociométrica de acordo com o ponto de vista do projetista. Esta matriz permite ao projetista definir o mapa das interações que ocorrem entre os programas de agentes em diferentes papéis dentro dos grupos que compõem a organização.

Figura 29 – Matriz sociométrica.

	AgHardware$_1$	AgSoftware	AgHardware$_2$
AgHardware$_1$	--	alta	--
AgSoftware	alta	--	alta
AgHardware$_2$	--	alta	--

Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Por exemplo, a matriz sociométrica acima informa que a frequência *freq(*$AgHardware_1$*, AgSoftware)* com que o par de programas de agentes $(AgHardware_1, AgSoftware) \in Communication$ troca mensagens entre si é alta. A matriz informa essas concentrações de interações densas neste único grupo, de maneira que as células com os maiores valores de frequência ficaram ao longo da diagonal principal, e todos as células fora destes quadrados da diagonal têm valores de frequência zero.

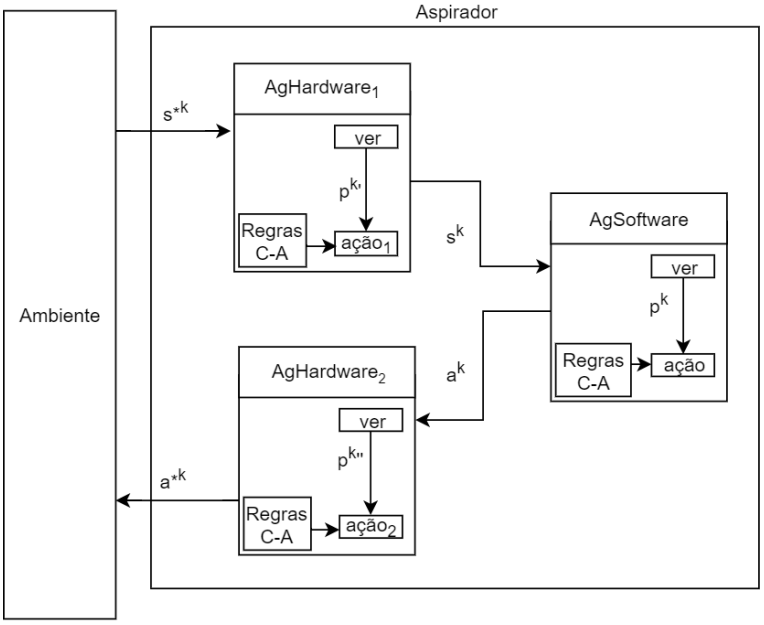
5.4.1.3 Modelo C

O modelo comportamental descreve como a estrutura projetada deve funcionar para realizar o objetivo original do sistema, sua função descrita no modelo F, no ambiente de tarefas. O modelo de C neste primeiro experimento consiste na descrição formal dos procedi-

mentos de tomada de decisão nos três programas de agentes em seus papéis na organização, $Agents = \{AgHardware_1, AgHardware_2, AgSoftware\}$, e dos processos que ocorrem dentro da organização, isto é, como os três programas de agentes integrados na estrutura organizacional devem agir.

No que diz respeito aos procedimentos de tomada de decisão, os "esqueletos" dos programas representando o agente aspirador de pó na Figura 28, os programas $AgHardware_1$ e $AgHardware_2$, no papel *Device* no modelo E, são do tipo reativo simples, e o programa $AgSoftware$, no papel $Controller$ no modelo E, também do tipo reativo. A Figura 30 ilustra a customização dos "esqueletos"dos programas representando o agente artificial aspirador de pó único, interagindo com um ambiente que representa um local onde não há pessoas transitando.

Figura 30 – "Esqueletos"dos programas de agentes representando o sistema *AmI*.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Estendendo-se o quadro desenvolvido no modelo F para os três programas de agentes reativos, tem-se que:

- $S^* = \{s^{*1}, s^{*2}, \ldots\}$ – Estados do ambiente – em qualquer instante k o programa $AgHardware_1$, representando o sensor do aspirador, percebe um estado s^{*k}, consistindo uma grade de 32×32 *patches* que representa uma parte do ambiente.
- $P_1 = \{p^{1\prime}, p^{2\prime}, \ldots\}$ – Percepção do programa $AgHardware_1$ – em qualquer instante k, o programa $AgHardware_1$, ao receber do ambiente entradas perceptivas $s^{*k} \in S^*$ – estados do ambiente consistindo de uma grade de tamanho 32×32 *patches* – representa estas informações em uma linguagem interna adequada $p^{k\prime} \in P_1$.

- $ver_1 : S^* \rightarrow P_1$ – Subsistema de percepção de $AgHardware_1$ – mapeia estados $s^{*k} \in S^*$ para percepções na linguagem interna $p^{k\prime} \in P_1$.
- ação$_1 : P_1 \rightarrow S$ – Subsistema de tomada de decisão de $AgHardware_1$ – função que mapeia percepções na linguagem $p^{k\prime} \in P_1$ em entradas perceptivas $s^k \in S$ – estados do ambiente consistindo de uma grade de tamanho 3×3 *patches* – enviadas para o programa $AgSoftware$.
- $P = \{p^1, p^2, \ldots\}$ – Percepção do programa $AgSoftware$ – em qualquer instante k, o programa $AgSoftware$, ao receber do programa $AgHardware_1$ as entradas perceptivas $s^k \in S$ – estados do ambiente consistindo uma grade de tamanho 3×3 *patches* – representa estas informações em uma linguagem interna adequada $p^k \in P$.
- $ver : S \rightarrow P$ – Subsistema de percepção de $AgSoftware$ – mapeia estados $s^k \in S$ para percepções na linguagem interna $p^k \in P$.
- ação : $P \rightarrow A$ – Subsistema de tomada de decisão de $AgSoftware$ – função que mapeia percepções na linguagem $p^k \in P$ em descrições de ações $a^k \in A$ – locomover-se de um *patch* para outro vizinho, em qualquer direção (norte, sul, leste, oeste), ou limpar o *patch* em que o aspirador está (aspirar) – enviadas para o programa $AgHardware_2$.
- $P_2 = \{p^{1\prime\prime}, p^{2\prime\prime}, \ldots\}$ Percepção do programa $AgHardware_2$ – em qualquer instante k o programa $AgHardware_2$ ao receber de $AgSoftware$ descrições de ações $a^k \in A$, representa estas informações em uma linguagem interna adequada $p^{k\prime\prime} \in P_2$.
- $ver_2 : A \rightarrow P_2$ – Subsistema de percepção de $AgHardware_2$ – mapeia descrições de ações $a^k \in A$ para percepções em uma linguagem interna adequada $p^{k\prime\prime} \in P_2$.
- ação$_2 : P_2 \rightarrow A$ – Subsistema de tomada de decisão de $AgHardware_2$ – função que mapeia percepções na linguagem $p^{k\prime\prime} \in P_2$ em ações $a^{*k} \in A$ – locomover-se de um *patch* para outro vizinho, em qualquer direção (norte, sul, leste, oeste), ou limpar o *patch* em que o aspirador está (aspirar).

O conjunto de regras C-A do agente $AgHardware_1$ busca representar a noção de ambiente parcialmente observável pelo sensor do aspirador de pó, determinando a redução na quantidade de informações a respeito do ambiente presente em $p^{k\prime} \in P_1$, isto é, estados consistindo uma grade de tamanho 32×32 *patches*, descritos na linguagem interna de $AgHardware_1$. Tais regras orientam as ações deste programa, isto é, entradas perceptivas $s^k \in S$; neste experimento uma redução para uma grade de tamanho 3×3 *patches*, enviadas para o programa $AgSoftware$. As regras C-A do $AgHarware_2$, neste momento, não interferem nas ações do agente $Agsoftware$, ou seja, $a^{*k} = a^k \in A$.

O conjunto de regras C-A orientam a seleção de ações adequadas à percepção $p^{k\prime\prime} \in P_2$, gerada na linguagem interna de $AgSoftware$ a partir das entradas perceptivas $s^k \in S$, geradas por $AgHardware_1$ e enviadas para o programa $AgHarware_2$, ou seja: locomover-se de um *patch* para outro vizinho, em qualquer direção (norte, sul, leste, oeste), ou limpar o *patch* em que o aspirador está. O algoritmo 2 ilustra o conjunto de regras C-A incorporado no programa $AgSoftware$.

Algoritmo 2: Conjunto de regras condição-ação do programa controlador *AgSoftware*.

função ação (p^k em S) retorna a^k em A
início
...
se p^k (grade 3×3 *patches*) *patch* do aspirador cinza (sujo) **então** a^k = aspirar;
se p^k *patch* do aspirador branco (limpo) e *patch* cinza a norte **então** a^k = norte;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* cinza a sul **então** a^k = sul;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* cinza a leste **então** a^k = leste;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* cinza a oeste **então** a^k = oeste;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* marrom a norte **então** a^k = sul;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* marrom a sul **então** a^k = norte;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* marrom a leste **então** a^k = oeste;
se p^k *patch* do aspirador branco e *patch* marrom a oeste **então** a^k = leste;
se p^k *patch* do aspirador branco e outros *patches* brancos **então** a^k = mover-random;
...
fim

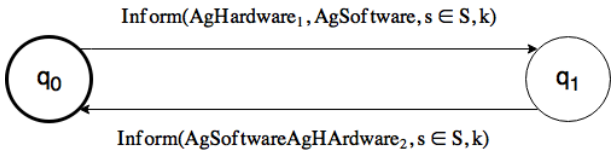
O conjunto de regras determina o comportamento do aspirador no ambiente de operação. Conforme indicado na seção que define o Modelo F, cada *patch* possui uma cor simbolizando sujeira (ou não) e a presença de obstáculos. Em resumo, sempre que o aspirador estiver sobre um *patch* de cor cinza, ele deve selecionar a ação aspirar. Se ele estiver sobre um *patch* branco (limpo), então deverá seguir para o local sujo mais próximo. Se o aspirador não detectar sujeira dentro do perímetro escaneado, ele escolherá de maneira aleatória uma direção para seguir em frente.

O conjunto de regras especificado visa exemplificar a descrição do componente de tomada de decisão do programa $AgSoftware$, por isso não foi detalhado com o rigor necessário para realizar os objetivos próximos do objetivo original, implícitos na função utilidade descrita no modelo F da organização. O conjunto de regras encerra a especificação do modelo C, associado ao comportamento do componente de *software* do sistema *AmI* proposto no primeiro experimento.

Dando continuidade à descrição do modelo C, no que diz respeito à sua segunda

parte, a Figura 31 determina o protocolo de interação, descrevendo as trocas de mensagens possíveis no modelo E indicadas na relação $Communication$.

Figura 31 – Protocolo de interação entre os programas na organização.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A relação $Communication$ descreve quem pode enviar mensagens para quem na organização, $Communication = \{(AgHardware_1, AgSoftware), (AgSoftware, AgHardware_2)\}$. A família de conjuntos de programas que compõem a organização contém um único conjunto de três agentes, $G = \{AgHardware_1, AgHardware_2, AgSoftware\}$. O protocolo considera um conjunto de dois estados possíveis, $Q = \{q_0, q_1\}$. O estado inicial foi representado por q_0.

No início da interação, no instante k, o agente aspirador de pó percebe seu ambiente de tarefas por meio de seu sensor. Ou seja, o programa ambiente Amb envia a informação $s^* \in S^*$ para o programa $AgHardware_1$, que, depois de processá-la, envia a informação $s \in S$ para o programa $AgSoftware$, isto é, $\delta(q_0, inform(AgHardware_1, AgSoftware, s \in S, k)) = q_1$. Posteriormente, o programa $AgSoftware$ processa essa informação, toma uma decisão e envia uma ação para ser executada no ambiente por um de seus atuadores. Ou seja, no modelo C, $AgSoftware$ envia a informação $a \in A$ para o programa $AgHardware_2$, $\delta(q_1, inform(AgHardware_2, AgSoftware, s \in S, k)) = q_0$, que, depois de processá-la, encerra a interação k, enviando uma ação $a^* \in A$ para o programa ambiente Amb.

Por motivos de simplicidade, a Figura 31 não ilustra as interações entre o aspirador e o seu ambiente de tarefas, isto é, o envio de mensagem contendo informação $s^* \in S^*$ do programa ambiente Amb para o programa sensor $AgHardware_1$, e de mensagem contendo informação $a^* \in A$ do programa atuador $AgHardware_2$ para o programa Amb. A figura encerra a especificação do modelo FEC para o sistema AmI formado por um único aspirador em um local em que não há pessoas transitando. A próxima subseção apresenta os objetos emergentes de interesse associados ao modelo F deste sistema AmI.

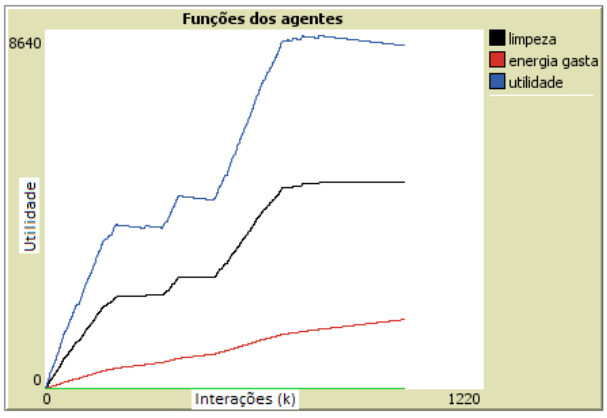
5.4.1.4 Objetos Emergentes

Conforme a Figura 15 indica, a simulação do sistema *AmI* utiliza como informações de entrada o modelo FEC, construído para o sistema. Além disso, são utilizados dados do ambiente de tarefas e parâmetros de inicialização da aplicação para descrever um contexto operacional de funcionamento do sistema no ambiente. Ao executar a simulação com as informações fornecidas, ela deve gerar como saída dados sobre o desempenho do sistema, conforme descrito no modelo F. Isto é, os objetos emergentes resultantes das interações descritas no modelo C e da racionalidade das ações selecionadas pelos programas de agentes na organização estruturada no modelo E.

Este experimento buscou investigar o desempenho do programa $AgSoftware$, responsável pelo controle do agente artificial aspirador de pó, variando a quantidade inicial de sujeira no ambiente. Em um primeiro momento, o agente será inserido em um cenário onde 10% dos *patches* do ambiente estará sujo. Em cada um dos cenários posteriores, a quantidade de *patches* sujos será aumentada em 10%. Serão ao todo dez cenários analisados, culminando em um cenário onde todos os *patches* disponíveis estarão sujos.

Para cada um dos dez cenários de teste foram realizadas 100 simulações, totalizando mil execuções. A Figura 32 ilustra um exemplo da evolução dos valores das funções escalares empregadas neste experimento e da função utilidade, ao longo de 1000 interações do agente com o ambiente em um único cenário ambiental.

Figura 32 – Medidas de desempenho em 1000 interações.



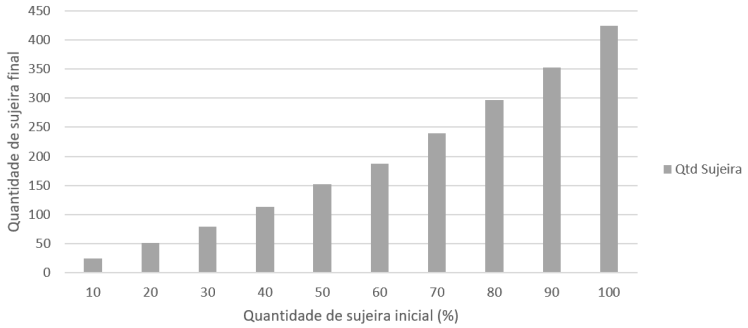
Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A cada simulação executada são observadas informações a respeito dos objetivos próximos definidos no modelo F. Os objetivos O_1, manter o ambiente limpo, e O_2, economizar

energia, são associados respectivamente às funções escalares av_1 e av_2. Essas funções são representadas na Figura 32 pelas curvas de limpeza e energia. A função Utilidade, que representa o desempenho do sistema em seu objetivo original O_O (prestar um serviço de alta qualidade com um mínimo de despesas no ambiente), é composta por ambas as funções av_1 e av_2. Observando o comportamento dessas funções, podemos deduzir informações sobre o desempenho do sistema *AmI*.

Uma coleção dessas deduções, obtidas metodicamente pela execução de 100 simulações em cada cenário, permite a realização de inferências sobre o desempenho do sistema, em termos de medidas de distribuições, e se ele será capaz de realizar o objetivo original em seu ambiente de tarefas. As Figuras 33 e 34 ilustram essas medidas de distribuições obtidas no primeiro experimento.

Figura 33 – Distribuição do objetivo O_1.

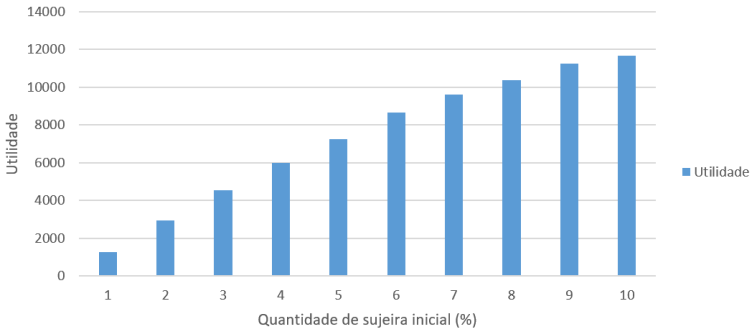


Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A Figura 33 apresenta uma distribuição associada à quantidade de sujeira que permaneceu no ambiente ao fim da simulação, representando a eficiência do agente em manter o ambiente limpo. Lembrando que medida associada ao objetivo O_1 representa a limpeza do ambiente da perspectiva do aspirador e não do ambiente. Não surpreendentemente, os resultados observados em cada um dos cenários caracterizam uma curva que cresce quase que linearmente à medida que aumenta a quantidade inicial de sujeira no ambiente.

Por outro lado, a distribuição associada à função utilidade, apresentada na Figura 34, segue um padrão quase que logarítmico, tendendo a um valor máximo. Esse comportamento também já era esperado, pois, independente da estratégia de limpeza adotada, o sistema *AmI* é composto por um único agente aspirador para todo o ambiente.

Figura 34 – Distribuição de Utilidade do experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

5.4.2 Sistema *AmI* com um único sistema técnico em um ambiente não determinístico

Em vez de buscar melhorar o subsistema de tomada de decisão do programa controlador $AgSoftware$ no modelo C, nesta segunda parte do experimento vamos "injetar realidade" nas simulações, envolvendo o mundo do aspirador de pó único, ou seja, tornando o ambiente dinâmico e não determinístico. Para simular um ambiente dinâmico, periodicamente o programa ambiente *Amb* deposita sujeira em locais que foram previamente limpos pelo aspirador. Para simular um ambiente não determinístico, o programa $AgHardware_2$, representando os atuadores do aspirador, poderá deixar de executar uma ação enviada por $AgSoftware$, caracterizando uma falha.

A simulação em um ambiente de tarefas não determinístico está relacionada com a proposta **P7** na abordagem. Especificamente neste experimento, o projetista deve entender como os efeitos da aleatoriedade das ações executadas pelos atuadores do aspirador interferem na forma e nas propriedades macro de cada distribuição. Esse entendimento deve servir para garantir que tal componente de confiabilidade baixa e integrado no aspirador não o impedirá de alcançar o objetivo original em um ambiente de tarefas dinâmico. No que diz respeito ao modelo FEC associado ao experimento, somente o modelo C deve ser alterado, mantendo-se os modelos F e E já definidos.

5.4.2.1 Modelo C

No que diz respeito aos procedimentos de tomada de decisão, os "esqueletos" dos programas $AgHardware_1$ e $AgSoftware$ são os mesmos apresentados na Figura 28 e no resto do modelo C descrito na mesma seção. Somente o "esqueleto"do programa $AgHadware_2$, no papel *Device* no modelo E, deve sofrer alteração. No experimento anterior, as regras C-A do agente

$AgHardware_2$ repetiam as ações que eram executadas pelo agente $AgSoftware$.

Neste experimento, o programa $AgHardware_2$ será do mesmo tipo, porém, seu conjunto de regras será modificado para simular que os atuadores do aspirador estão sujeitos ao não determinismo. Ou seja, ele pode falhar em executar as ações selecionadas por $AgSoftware$. Mais formalmente, em algumas ocasiões pode ser que $a^{*k} \neq a^k \in A$.

O conjunto de regras C-A no subsistema de tomada de decisão de $AgHarware_2$ implementam as falhas possíveis no atuador do aspirador de pó, isto é, a ação $a^{*k} \in A$ que vai ser executada no ambiente, em função da ação $a^k \in A$ enviada por $AgSoftware$, mais especificamente, da representação desta informação $p^{k\prime\prime} \in P$, gerada na linguagem interna de $AgHardware_2$ e do instante k das interações do aspirador com o seu ambiente. O algoritmo 3 ilustra o conjunto de regras incorporado no programa $AgHardware_2$.

Algoritmo 3: Conjunto de regras condição-ação do programa atuador *AgHardware-2*.

função ação ($p^{k\prime\prime}$ em P) retorna a^{*k} em A
início
  ...
  se $p^{k\prime\prime}$ = norte e falha(k) **então** a^{*k} = move-random;
  senão se $p^{k\prime\prime}$ = norte **então** a^{*k} = norte;
  se $p^{k\prime\prime}$ = sul e falha(k) **então** a^{*k} = move-random;
  senão se $p^{k\prime\prime}$ = sul **então** a^{*k} = sul;
  se $p^{k\prime\prime}$ = leste e falha(k) **então** a^{*k} = move-random;
  senão se $p^{k\prime\prime}$ = leste **então** a^{*k} = leste;
  se $p^{k\prime\prime}$ = oeste e falha(k) **então** a^{*k} = move-random;
  senão se $p^{k\prime\prime}$ = oeste **então** a^{*k} = oeste;
  ...
fim

O conjunto de regras acima determina o comportamento do atuador do aspirador no ambiente de operação. Em resumo, $AgHarware_2$ pode não executar exatamente uma ação $a^k \in A$ enviada por $AgSoftware$. Dependendo do instante k, cada uma das ações pode falhar com uma certa probabilidade. Neste caso em que a função *booleana* falha(k), retorna um valor do tipo *true*, a ação $a^{*k} \in A$ executada por $AgHardware_2$ é igual à ação que retorna da função *move-randon*. Nos casos em que a função *booleana* falha(k) retorna um valor do tipo *false*, a ação a^{*k} executada por $AgHardware_2$ é igual à ação selecionada por $AgSoftware$.

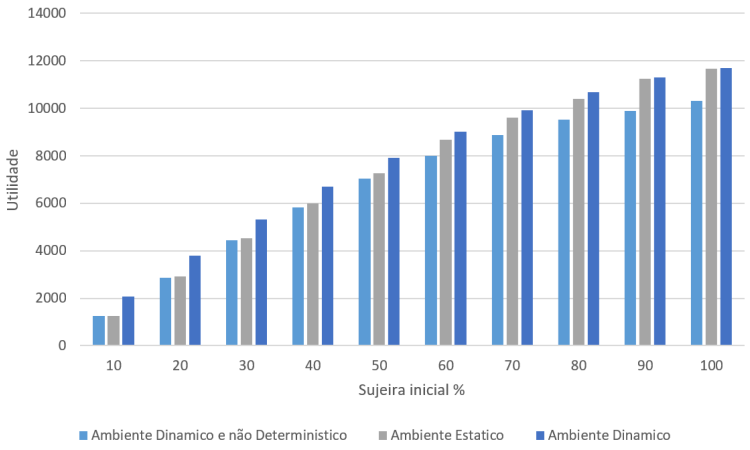
Nos experimentos, a probabilidade dos atuadores falharem aumenta à medida que o instante k vai aumentando até chegar em 1000 interações, quando a simulação é terminada. O objetivo é simular algum tipo de desgaste que possa ocorrer com uso contínuo dos atuadores

no mundo real. Apesar da possibilidade de não determinismo e do ambiente dinâmico, nenhum refinamento ocorreu no "esqueleto"do programa *AgSoftware* para lidar com estas mudanças nas propriedades do ambiente de tarefas. Entretanto, tal refinamento pode ocorrer evoluindo o programa para o tipo orientado por metas ou, preferencialmente, orientado por utilidade.

5.4.2.2 Objetos Emergentes

Os objetos emergentes analisados nesta subseção são extraídos de três experimentos distintos. O primeiro, e mais básico, é similar ao que já foi apresentado anteriormente; nele vamos estudar novamente o comportamento do agente *AgSoftware* em um ambiente estático, repetindo o primeiro experimento. No segundo, vamos avaliar o comportamento do mesmo agente, mas, desta vez, ele estará inserido em um ambiente dinâmico, onde o programa do ambiente deposita novamente sujeira em locais que foram limpos previamente. Por fim, no terceiro, vamos utilizar o agente não determinístico no mesmo ambiente dinâmico. Nosso objetivo é comparar o desempenho do agente nas três situações. As Figuras 35 e 36 ilustram as medidas de desempenho obtidas nesses experimentos.

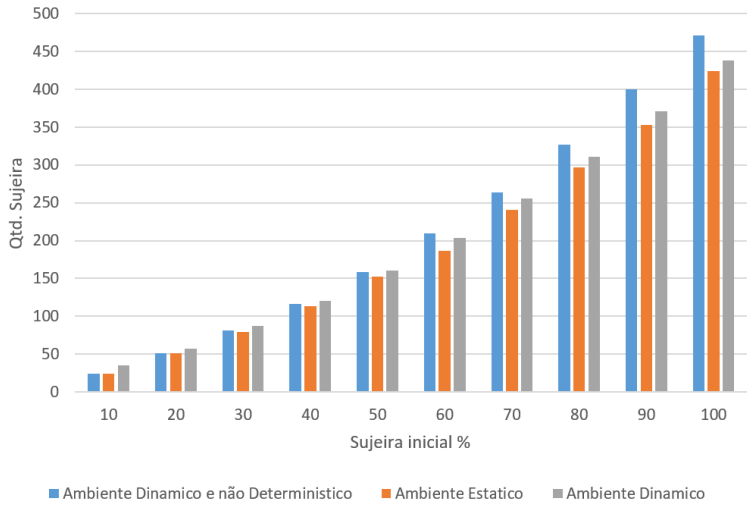
Figura 35 – Distribuição de utilidade no experimento 2.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Na Figura 35 podemos perceber que, de todos os cenários observados, o que exibe um melhor desempenho é o cenário associado ao agente determinístico inserido em um ambiente dinâmico. Isso acontece devido ao fato de a todo instante o ambiente depositar novas sujeiras em *patches* limpos, aumentando o desempenho associado à função av_1 e, consequentemente, à utilidade. O agente não determinístico possui o pior desempenho, pois é o único com a desvantagem capaz de afetar a função av_1.

Figura 36 – Distribuição do objetivo O_1 no experimento 2.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Na figura 36, as medidas associadas a quantidade de sujeira no fim do experimento deixam claro o quanto as falhas nos componentes do agente afetam seu objetivo. Novamente, o agente determinístico em ambiente estático teve um desempenho melhor, como era esperado. Mas o experimento em ambiente dinâmico, que também utiliza um agente determinístico, apresentou uma performance bastante similar.

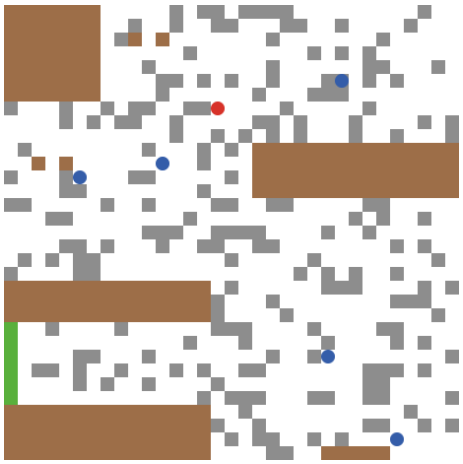
5.4.3 Sistema *AmI* com um único sistema técnico em um ambiente com pessoas

No experimento anterior, observamos o comportamento do sistema operando com um único agente aspirador em um ambiente vazio e sem circulação de pessoas. No entanto, na aplicação real serão raras as ocasiões em que o agente estará sozinho no ambiente. Para tornar essa simulação um pouco mais condizente com a realidade, neste experimento vamos inserir no modelo do sistema um conjunto de agentes usuários que circulam pelo ambiente e o modificam, interagindo com os aspiradores de forma indireta.

Cada agente usuário será representado por um único agente inteligente. Eles utilizam uma arquitetura reativa simples e seu um único objetivo é sair do ambiente, mas, sua principal função neste experimento é atrapalhar os agentes aspiradores. Na simulação, cada agente usuário é representado por um círculo azul, como ilustrado na Figura 37.

Este experimento será realizado no mesmo ambiente de simulação utilizado na seção 5.4.2, ou seja, os agentes estarão inseridos em um ambiente dinâmico, que muda com o passar do tempo. Os aspiradores também deverão manter seus componentes não determinísticos que representam suas falhas. Dessa forma, os usuários serão inseridos em um ambiente dinâmico e

Figura 37 – Simulação do ambiente com cinco usuários e um aspirador.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

não determinístico mais próximo do que seria um ambiente real.

Conforme descrito na segunda seção do Capítulo 4, a proposta **P3** na abordagem consiste em uma descrição do sistema *AmI* por meio de uma organização de programas de agentes racionais, representando o *software* e o *hardware* componentes do sistema técnico, mas também as pessoas usuárias deste sistema. No que diz respeito ao modelo FEC da organização simulada nos experimentos anteriores, os modelos F, E e C neste experimento foram estendidos para acomodar as pessoas no sistema *AmI*. As subseções a seguir especificam o que foi estendido.

5.4.3.1 Modelo F

Esta seção ilustra as alterações nos componentes do modelo F da organização relacionados ao programa $AgSoftware$ no papel $Controller$ empregado nos dois experimentos anteriores. Apesar da presença de pessoas no ambiente, também representadas por programas de agentes na organização, a seção não dá ênfase às alterações nos componentes do modelo F associados aos programas no papel de usuários, visto que os experimentos estão registrando o desempenho do programa no papel $Controller$. Entretanto, o mesmo tipo de especificação pode ser feito para os programas representando pessoas.

A Figura 27 ilustra uma interação do sistema técnico ($AgentAmI = AgSoftware$, *hardware* formado por um sensor e um atuador) com o ambiente em um instante k. Diferente do primeiro experimento, considerando que existem pessoas no ambiente, em qualquer instante k, o sensor do aspirador percebe (s^{*k}) uma grade de 32×32 *patches*, os quais podem ser do tipo limpo, sujo, obstáculo ou pessoa. Assim, a primeira alteração no modelo F está na descrição dos estados do ambiente do aspirador de pó:

- $S = \{s^1, s^2, \ldots\}$ – Estados do ambiente – em qualquer instante k o agente $AgSoftware$ recebe o estado s^k consistindo uma grade de 3×3 *patches*, contida no ambiente definido pelo cenário, que mostra as características dos *patches* (branco, cinza e marrom) e quais agentes estão sobre eles (usuário e aspirador);
- ação : $S^* \rightarrow A$ – Comportamento – função para seleção de ações em A adequadas aos estados em S, ou seja: o aspirador deve limpar *patches* cinza, mudar para um *patch* vizinho que seja cinza se estiver em um *patch* branco, e deve mudar de direção se estiver em frente a um usuário;

A inserção de usuários no sistema permite que seja observada uma outra característica importante no seu desempenho. Para isso, devemos atualizar o objetivo original (O_O). Agora, além dos objetivos anteriores, manter o ambiente limpo e economizar energia, o agente aspirador deve também priorizar o bem-estar dos usuários, evitando incomodá-los enquanto caminham pelo ambiente. Dessa forma, o objetivo original passa a ser composto por três vetores, ilustrados na tabela 6.

Tabela 6 – Objetivos próximos do terceiro experimento.

Objetivo	Descrição	Função Objetivo	Recompensa
O_1	Manter o ambiente limpo	$f_1(H(Cenarios))$	$av_1(Ep^k(h(Cenario_i)))$
O_2	Manter energia na bateria	$f_2(H(Cenarios))$	$av_2(Ep^k(h(Cenario_i)))$
O_3	Evitar colisões com usuários	$f_3(H(Cenarios))$	$av_3(Ep^k(h(Cenario_i)))$

Fonte**:** Elaborada pelo autor.

As funções escalares av_1 e av_2, definidas no experimento anterior, não serão afetadas diretamente com a inserção dos agentes usuários. Mas, agora, precisamos definir uma função que associe o objetivo O_3 a um valor escalar, representando o desempenho do agente neste objetivo. A função av_3 é descrita em função do conjunto de episódios $Ep(s,a) \in S \times A$, onde $s \in S$ e $a \in A$. A definição dessa função é mostrada na equação abaixo.

$$Av_3(Ep((s^k,a^k)) = \begin{cases} 15 & \text{se } s^k = \text{frente norte e azul e } a^k = \text{norte}, \\ 15 & \text{se } s^k = \text{frente sul e azul e } a^k = \text{sul}, \\ 15 & \text{se } s^k = \text{frente leste e azul e } a^k = \text{leste}, \\ 15 & \text{se } s^k = \text{frente oeste e azul e } a^k = \text{oeste}, \\ 0 & \text{se } s^k = \text{frente X e não azul e } a^k = \text{Y}, \end{cases}$$

tal que $X, Y \in \{norte, sul, leste, oeste\}$

A função descrita acima associa os episódios em que o agente aspirador percebe usuários posicionados a sua frente e seleciona a ação de colidir. Essa ação representa a tentativa do agente aspirador de se mover em direção a um *patch* já ocupado por um usuário. Dessa forma, em um conjunto formado por N cenários, onde cada cenário possui uma história de M episódios, temos que a função associada a O_3 é:

$$f_3(H(Cenrios)) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} Av_3(h(Cenario_i)) \tag{5.1}$$

, onde:

$$Av_3(h(Cenrio_i)) = \sum_{k=1}^{M} (Ep(s^k, a^k) \tag{5.2}$$

Para finalizar o modelo F, a função utilidade do agente aspirador deve ser atualizada para medir os valores observados pela função f_3. Neste experimento, consideramos que o objetivo O_3 tem um valor de importância maior do que os outros objetivos. Portanto, a função utilidade do objetivo original do sistema será:

$$Utilidade(f(H(Cenrios))) = f_1(H(Cenrios)) + f_2(H(Cenrios)) - 2 \times f_3(H(Cenrios)) \tag{5.3}$$

Com essa atualização na função Utilidade, é possível observar o desempenho do sistema em situações onde o agente está em um ambiente com usuários. Quanto mais usuários no ambiente, maiores serão as chances do aspirador se chocar com algum usuário, diminuindo o valor de utilidade e, portanto, seu desempenho.

5.4.3.2 Modelo E

Como o usuário não faz parte do sistema técnico da aplicação, ele deve ser representado por um único agente. Isso significa que não existirão intermediários entre ele e o ambiente, logo, suas percepções e ações dependem apenas de seus próprios sensores e atuadores. O programa de agente que interpreta o usuário na aplicação é chamado $AgUser$.

A definição da organização sistema elaborada no primeiro deve ser atualizada para que contemple também o agente usuário, associando o programa de agente usuários aos seus respectivos papéis e ainda definindo suas relações com os outros agentes definidos previamente.

- Agents – $\{AgHardware_1, AgHardware_2, AgSoftware, AgUser\}$ – conjunto de programas *AgentAmI* na organização ($N_A = 4$).

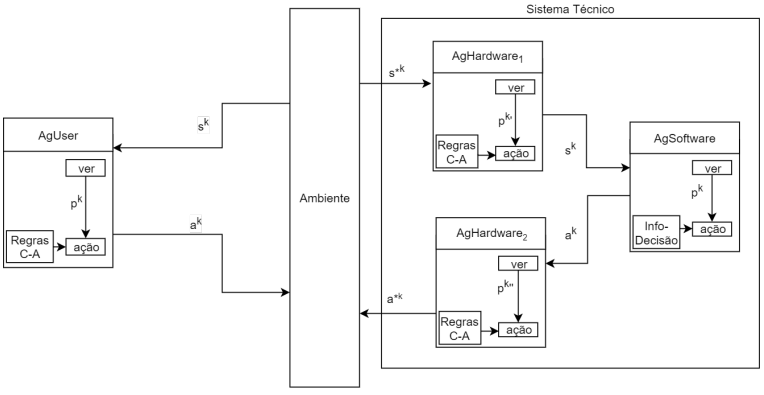
- Roles – $\{Device, Controller, User\}$ – conjunto de papéis ($N_R = 3$) que podem ser atribuídos aos programas de agentes $AgentAmI$.
  - $AgentAmIUser$ – $\{AgUser_1, \ldots, AgUser_N\}$ – conjunto de programas no papel $User$;
- $Bond_{knowledge}(AgentAmISoftware, AgentAmIUser)$ – $\{(AgSoftware, AgUser_1), \ldots, (AgSoftware, AgUser_M)\}$ – programa $AgSoftware$ (papel $Controller$) têm o conhecimento da existência dos programas $AgUser_1, \ldots, AgUser_M$ (papel $User$), tal que $0 \leq M \leq N$;
- Groups – $\{AgHardware_1$, $AgHardware_2$, $AgSoftware$, $AgPessoa_1$, ..., $AgPessoa_N\}$ – família de um ($N_G = 1$) conjunto de programas de agentes exercendo seus papéis na organização.

As definições acima atualizam os conjuntos definidos nos experimentos anteriores. Os grupos omitidos não sofreram alterações. A última parte do modelo E define os relacionamento de comunicação entre os agentes. Porém, como o agente usuário não interage diretamente com nenhum agente do sistema técnico, não há necessidade de estabelecer um processo de comunicação entre eles.

5.4.3.3 Modelo C

O modelo C também deve ser atualizado neste experimento para descrever o comportamento do agente usuário e adequar o desempenho do agente aspirador aos novos estímulos. O agente usuário, por não precisar apresentar um comportamento complexo, é representado por um agente reativo simples, assim como os agentes $AgHardware_1$ e $AgHardware_2$ descritos no experimento anterior. A Figura 38 abaixo mostra um esboço do agente usuário interagindo com o ambiente juntamente com os agentes definidos previamente.

Figura 38 – "Esqueletos"dos agentes definidos no terceiro experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

O agente usuário enxerga o conjunto de estados do ambiente s^k e utiliza sua função ver para extrair informação desse conjunto, formando sua percepção p^k. Utilizando suas regras C-A, o usuário informa ao ambiente qual foi a ação selecionada. O algoritmo 4 abaixo apresenta o conjunto de regras condição-ação do agente usuário.

Algoritmo 4: Conjunto de regras condição-ação do programa *AgUser*.

função ação ($p^{k\prime\prime}$ em P) retorna a^{*k} em A
início
    ...
    se p^k = cinza **então** a^{*k} = move-random;
    se p^k = branco **então** a^{*k} = throw-dirt;
    se p^k = verde **então** a^{*k} = get-out;
    se p^k = marrom **então** a^{*k} = change-dir;
    ...
fim

Sempre que o agente usuário fica sobre um *patch* sujo, ele se move para um *patch* vizinho aleatório. Se o usuário estiver sobre um *patch* limpo, a função *throw-dirt* é acionada, fazendo com que o *patch* se torne sujo com uma certa probabilidade. Nos experimentos realizados neste trabalho, a função *throw-dirt* tem uma probabilidade de 5% de sujar locais que o agente usuário passa. A função *get-out* é acionada sempre que o agente usuário encontrar a saída, representada por um conjunto de *patches* verdes; quando executada, o usuário sai do ambiente.

Com relação ao aspirador, para que ele continue de acordo com o que foi definido no modelo F, é preciso atualizar suas regras condição-ação obedecendo aos objetivos adicionados. O objetivo próximo O_3, definido no modelo de função deste experimento, estabelece que o agente aspirador deve evitar incomodar os usuários, prevenindo qualquer colisão com eles. Para isso, adicionamos a seguinte regra na base do agente *AgSoftware*:

Algoritmo 5: Nova regra do agente *AgSoftware*.

função ação ($p^{k\prime\prime}$ em P) retorna a^{*k} em A
início
    ...
    se user-close(p^k) **então** a^{*k} = move-away;
    ...
fim

A função *user-close* verifica o conjunto de percepções do agente aspirador, buscando um agente usuário. Se for identificado que existe um usuário em uma posição dentro do raio de percepção do agente, a função *move-away* é acionada. Essa função usa a posição do usuário e a

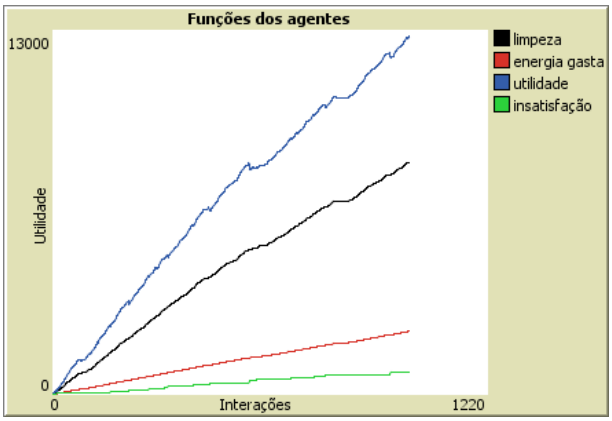
direção para a qual ele está apontando para determinar o caminho por onde ele deverá percorrer. Se a posição do aspirador estiver neste caminho, o aspirador deve girar noventa graus em relação ao usuário e se mover para o *patch* vizinho.

Tendo em vista que os agentes usuários e os aspiradores não se comunicam diretamente, não é necessário alterar o comportamento de comunicação, definido anteriormente, para o agente aspirador. Na seção a seguir, apresentaremos os objetos emergentes obtidos na simulação criada a partir do modelo FEC já exibido.

5.4.3.4 Objetos Emergentes

Diferente do experimento anterior, a quantidade inicial de sujeira no ambiente será mantida fixa em 25% em todas as execuções. Nesta terceira prática, vamos observar o desempenho do agente $AgSoftware$ no ambiente à medida que novos usuários são inseridos. Serão observados quinze cenários diferentes: no primeiro serão inseridos cinco usuários no ambiente de simulação, e a cada cenário seguinte serão inseridos mais cinco, totalizando 75 usuários no último experimento

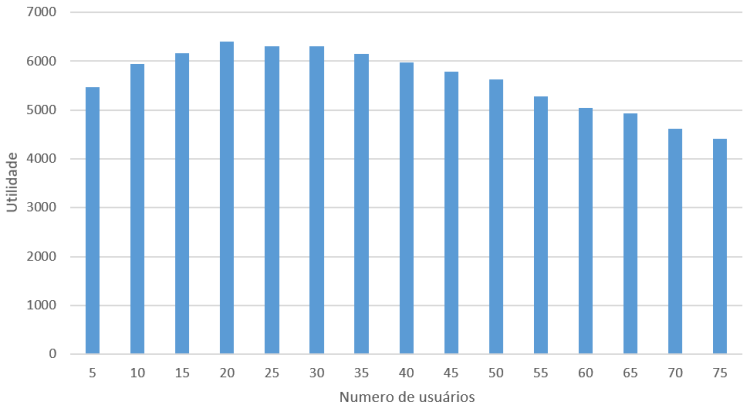
Figura 39 – Objetos emergentes em uma execução da simulação.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A Figura 39 mostra as distribuições de cada um dos objetivos próximos do sistema durante a execução de um cenário que contém vinte usuários. A insatisfação, apresentada na cor verde, indica o desempenho do agente relacionado ao objetivo próximo O_3. A Figura 40 abaixo apresenta um histograma da utilidade do aspirador durante os quinze cenários do experimento.

Figura 40 – Utilidade do terceiro experimento.

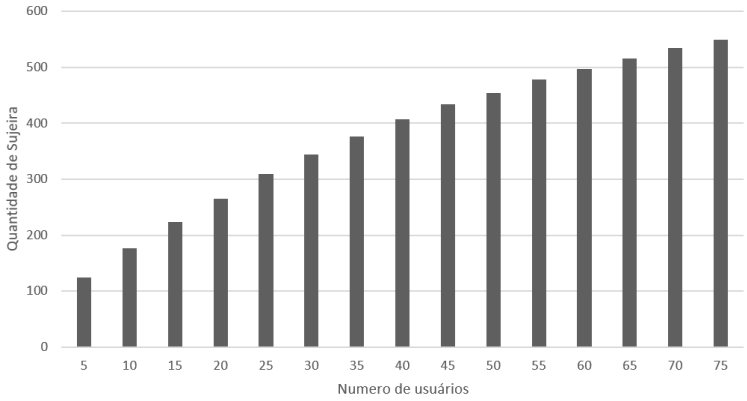


Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Como podemos observar na Figura 40, o valor da utilidade do agente aspirador, em um primeiro momento, cresce juntamente com o número de usuários no ambiente. Porém, do quinto cenário em diante, esse valor passa a decrescer. Esse crescimento inicial é atribuído à propriedade do usuário de gerar novas sujeiras no ambiente, facilitando a busca do aspirador e, consequentemente, alimentando o objetivo próximo de manter o ambiente limpo (O_1). Mas, à medida que o número de usuários cresce nos cenários seguintes, a utilidade passa a decrescer devido às penalidades impostas pelo novo objetivo próximo O_3, inserido neste experimento.

A Figura 41 acima apresenta a variação de sujeira ao fim de cada um dos cenários. É

Figura 41 – Desempenho de limpeza no terceiro experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

fácil perceber que, quanto mais usuários no ambiente, maior será a quantidade de sujeira inserida nele. Isso mostra que um único agente aspirador não é suficiente para manter o ambiente limpo quando grandes quantidades de pessoas circulam por ele.

5.4.4 Sistema *AmI* com múltiplos aspiradores

No experimento anterior, inserimos um novo agente usuário, representando as pessoas que utilizarão o sistema *AmI* em um ambiente dinâmico interagindo com um único agente aspirador não determinístico. Neste quarto experimento, vamos inserir outros aspiradores no ambiente e observar o desempenho do sistema em satisfazer seu objetivo original.

O aspirador é representado por um conjunto de agentes que simulam o comportamento do aspirador de pó no ambiente. Cada aspirador é composto por dois agentes do tipo $AgHardware$ e um do tipo $AgSoftware$, como mostrado nos experimentos anteriores. As extensões inseridas no modelo FEC são explicadas a seguir.

5.4.4.1 Modelo F

Diferente do experimento anterior, que considera a existência de pessoas no ambiente, em qualquer instante k, o sensor do aspirador percebe (s^{*k}) uma grade de 32×32 *patches*, os quais podem ser do tipo limpo, sujo, obstáculo, pessoa ou aspirador. Assim, a única alteração no modelo F está na descrição dos estados do ambiente do aspirador de pó:

- $S = \{s^1, s^2, \ldots\}$ – Estados do ambiente – em qualquer instante k o sensor do aspirador disponibiliza um estado s^k consistindo de uma grade menor, contida na grade 32×32 *patches* que representa o local, de tamanho 3×3 *patches*, ou seja, o conjunto de estados do

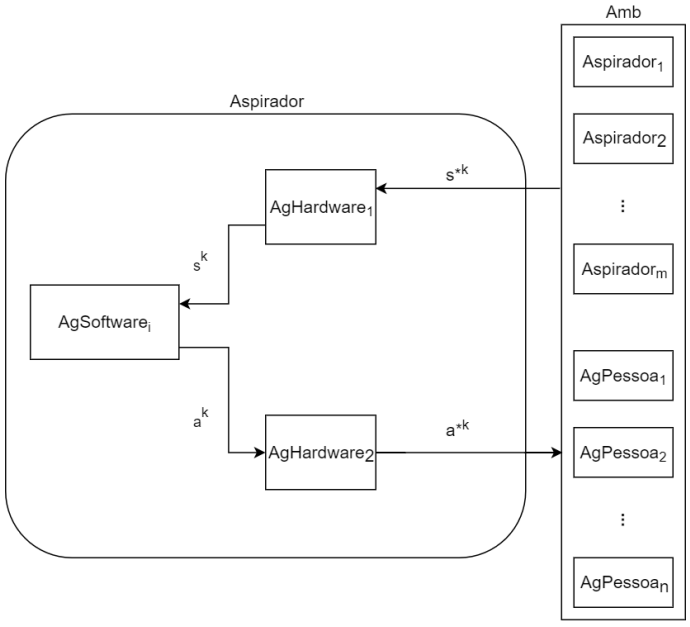
ambiente é formado por todas as grades desse tamanho, em que cada *patch* pode representar uma parte limpa (branco) ou suja (cinza) do local, ou a presença de um obstáculo (marrom), de uma pessoa (azul), ou de um aspirador (vermelho).

Apesar da presença de outros aspiradores, o objetivo original do sistema não foi modificado, mas é importante explicitar que outros objetivos poderiam ser adicionados. Poderíamos considerar como outros objetivos próximos, evitar colisões entre os próprios aspiradores, ou a cooperação entre eles. Porém, como o objetivo deste trabalho é apenas definir um modelo de criação de sistemas *AmI*, optamos por um caminho mais simples, mantendo os objetivos definidos anteriormente.

5.4.4.2 Modelo E

A Figura 42 consiste em uma organização de programas de agentes racionais representando o sistema *AmI* formado por M aspiradores de pó independentes. Cada programa $AgSoftware_i$ processa as informações perceptivas oriundas do processamento de seu programa $AgHardware_{1i}$, seleciona ações que evitem colisões com cada um dos N programas representando pessoas, e envia estas ações para o seu programa $AgHardware_{2i}$, o qual as executa no ambiente.

Figura 42 – Organização de agentes no experimento quatro.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Quanto ao modelo E associado à figura, é necessário estender o conjunto de progra-

mas de agentes e de papéis que os programas podem assumir na organização, e de relações entre programas especificadas no último experimento, ou seja:

- Agents – $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{2M}, AgSoftware_M, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_N\}$ – conjunto $N_A = N + 3 \times M$ programas *AgentAmI* na organização.
- AgentAmIDevice $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{2M}\}$ – conjunto de programas no papel *Device*;
- AgentAmIController $\{AgSoftware_1, \ldots, AgSoftware_M\}$ – conjunto de programas no papel *Controller*.
- Bond $\{Bond_{knowledge}(AgentAmIDevice, AgentAmIController)$, $Bond_{knowledge}(AgentAmIControlle$r, $AgentAmIDevice)$, $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIDevice, AgentAmIController)$, $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIDevice)$, $Bond_{knowledge}(AgentAmIController, AgentAmIUser)$, $Bond_{knowledge}(AgentAmIController, AgentAmIController)\}$ – família de seis relações entre os programas nos conjuntos *AgentAmIDevice*, *AgentAmIController* e *AgentAmIUser* tal que:
  - $Bond_{knowledge}(AgentAmIController, AgentAmIController) - \{(AgSoftware_1, AgSoftware_2), \ldots, (AgSoftware_1, AgSoftware_M), \ldots, (AgSoftware_M, AgSoftware_1), \ldots, (AgSoftware_M, AgSoftware_{M-1})\}$ – programa $AgSoftware_i$ (papel *Controller*) têm o conhecimento da existência dos programas $AgSoftware_1, \ldots, AgPessoa_N$ (papel *User*), tal que $0 \leq i \leq M$;
- Groups – $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{21}, AgSoftware_M, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_N\}$ – família de um ($N_G = 1$) conjunto de programas de agentes exercendo seus papéis na organização.

As informações apresentadas no modelo E do último experimento que não são mencionadas no quadro acima não sofreram alterações com a adição de outros aspiradores no ambiente. Apesar de cada programa $AgSoftware_i$ no papel *Controller* poder conhecer um número $M-1$ de programas no papel *Controller*, não existe troca de mensagens entre eles. Dessa forma, a matriz sociométrica do primeiro experimento também não sofre alteração.

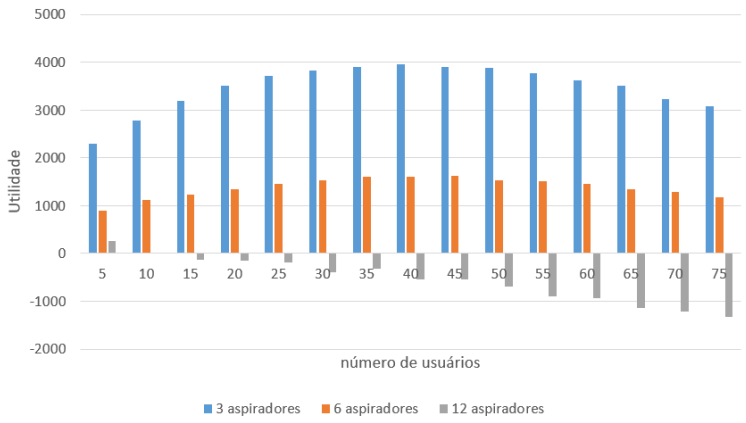
5.4.4.3 Modelo C

Apesar dos aspiradores não trocarem mensagens entre si, o modelo comportamental descrito anteriormente foi estendido. O subsistema de tomada de decisão do programa *AgSoftware* sofreu alteração visando incorporar as percepções sobre os programas aspiradores (*patches* em vermelho na simulação NetLogo), ou seja, pela presença de novas regras no conjunto. Mais especificamente, essas regras possibilitam que um aspirador evite colisões com outros aspiradores, mudando a direção de seu movimento sempre que perceber que está diante de outro aspirador no ambiente.

5.4.4.4 Objetos Emergentes

Para observar o comportamento do sistema neste experimento, analisamos três configurações do ambiente, variando a quantidade de agentes aspiradores e de agentes usuários. Na primeira configuração, fixamos a quantidade de aspiradores em três e variamos a quantidade de usuários da mesma forma que o experimento anterior. Na segunda, dobramos a quantidade de agentes aspiradores, sendo seis agora. E, na terceira, passam a circular no ambiente um total de doze agentes aspiradores. A Figura 43 abaixo mostra as distribuições obtidas observando a média da utilidade dos agentes.

Figura 43 – Variação da utilidade no quarto experimento.

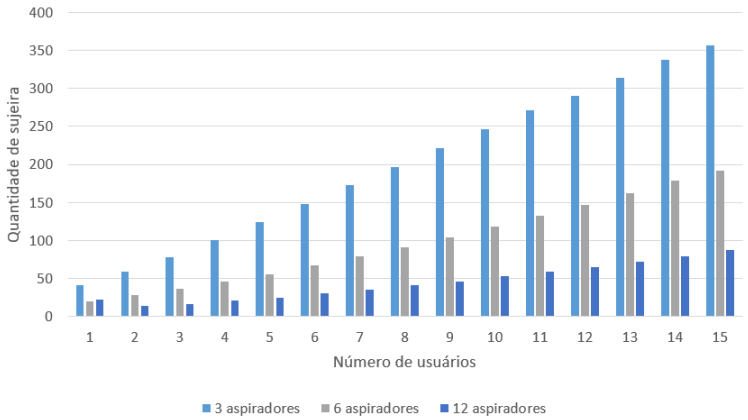


Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Como o valor observado é a média das utilidades de cada um dos aspiradores, era esperado que os valores de utilidade decrescessem muito quando comparados aos experimentos anteriores. Um outro fator que também diminui a performance dos agentes neste experimento é a quantidade de usuários. À medida que o número de pessoas no ambiente cresce, a possibilidade

dos aspiradores colidirem com eles também sobe, e, como o peso associado ao objetivo próximo O_3 é maior que os outros, isso acaba causando uma grande queda nas medidas do O_O.

Figura 44 – Variação da limpeza no ambiente no quarto experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Com relação à sujeira no ambiente, a Figura 44 acima deixa bem claro que a quantidade de aspiradores é uma propriedade muito importante para a limpeza do ambiente. Porém, como vimos na distribuição exibida pela Figura 43, é necessário que exista uma mudança de estratégia para que o desempenho do sistema não seja afetado.

5.4.5 Sistema *AmI* com Agentes Coordenadores

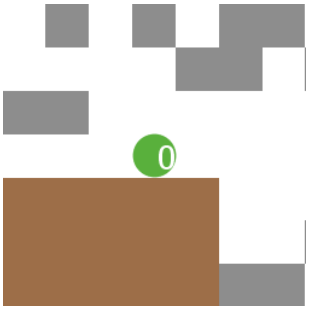
No experimento anterior observamos o desempenho de um sistema *AmI*, composto por diversos agentes aspiradores, interagindo com múltiplos usuários em um ambiente. Apesar da grande quantidade de aspiradores apresentar bons resultados, em relação à limpeza do ambiente, sua utilidade tende a ser muito baixa.

Esse desempenho é uma consequência direta do comportamento dos aspiradores. Apesar de existir um time de agentes que possuem o mesmo objetivo, não há nenhum tipo de cooperação entre eles. Cada um age como se estivesse sozinho, sem nenhuma comunicação com outros agentes. Além disso, a estratégia utilizada para buscar sujeira no ambiente obriga os aspiradores a se movimentarem continuamente, procurando por *patches* sujos em áreas que já foram completamente limpas.

Para tentar melhorar o desempenho do sistema, vamos adicionar uma nova entidade que estende o agente aspirador chamada de "agente coordenador". Essa entidade será responsável por enviar mensagens a outros aspiradores, informando sobre locais com alta concentração de sujeira ou solicitando que o aspirador entre em modo de descanso. Ele será representado na

simulação por um círculo verde, como apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Agente coordenador no ambiente simulado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o coordenador também é um tipo de aspirador, seu modelo de função não será alterado neste momento, porém, é necessário alterar seus modelos de estrutura e comportamento. Nas subseções a seguir, detalhamos adições necessárias aos modelos FEC para que este agente seja inserido na simulação.

5.4.5.1 Modelo E

O agente coordenador também é composto por dois agentes do tipo $AgHardware$, representando seus sensores e atuadores e um do tipo $AgSoftware$, estruturado e forma semelhante à apresentada na Figura 30. A seguir, apresentamos as novidades na estrutura deste experimento.

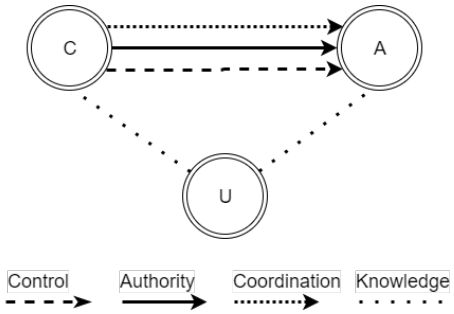
- Agents – $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, AgHardware_{12}, AgHardware_{22}, AgSoftware_2, AgHardware_{13}, AgHardware_{23}, AgSoftware_3, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{2M}, AgSoftware_M, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_N\}$ – conjunto com $N_A = N + 3 \times (3 + M)$ programas *AgentAmI* na organização tal que $M \geq 0$, ou seja, existem pelos menos 3 aspiradores no local.
- Group – $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{2M}, AgSoftware_M, AgPessoa_1, ..., AgPessoa_N\}$ – família de conjuntos de programas de agentes ($N_G = 1$) exercendo seus papéis na organização.
- Bond – $\{Bond_{Authority}(AgentAmIController, AgentAmIController)\}$ – Relação de autoridade entre o agente controlador pertencente a um coordenador e um agente controlador pertencente a um aspirador.
  - $\{Bond_{Authority}(AgentAmIController, AgentAmIController)\}$ – $\{(AgSoftware_1, AgSoftware_4)$, $(AgSoftware_1, AgSoftware_5)$, $\ldots$, $(AgSoftware_1, AgSoftware_M)$, $(AgSoftware_2, AgSoftware_4)$, $(AgSoftware_2, AgSoftware_5)$, $\ldots$, $(AgSoftware_2, AgSoftware_M)$,

($AgSoftware_3$, $AgSoftware_4$), ($AgSoftware_3$, $AgSoftware_5$), ..., ($AgSoftware_3$, $AgSoftware_M$)} – cada programa $AgSoftware_i$ (papel *Controller*) pode delegar uma ou mais tarefas ao programa $AgSoftware_j$, onde i = {1, 2, 3}, e j = {4, ..., M};

- *Communication* – {$AgentAmIController$, $AgentAmIController$} – relação descrevendo quem pode enviar mensagens para quem na organização;

O relacionamento de autoridade definido acima permite que um agente no papel *Controller*, que faça parte de um coordenador, seja capaz de delegar tarefas a um outro agente no papel *Controller* em um aspirador. Isso permite que os coordenadores enviem mensagens aos aspiradores contendo informações referentes a tarefas que eles irão executar. Neste experimento foram definidos três agentes do tipo $AgSoftware$, que pertencem à entidade coordenador. Eles são representados na tabela de relacionamentos acima pelos agentes $AgSoftware_1$, $AgSoftware_2$ e $AgSoftware_3$. A Figura 46 ilustra os relacionamentos entre as três entidades do experimento. Assim como o aspirador, o coordenador também tem um relacionamento *knowledge* com o usuário, o que significa que seu relacionamento se limita ao conhecimento da existência um do outro.

Figura 46 – Relações do coordenador com outros agentes no ambiente.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

O relacionamento de autoridade entre o coordenador e o aspirador implica necessariamente a existência dos relacionamentos *control*, *coordination* e *knowledge*. Ou seja, além de delegar tarefas ao aspirador, este deve manter o coordenador informado sobre suas atividades. A Figura 47 apresenta a matriz sociométrica que relata a frequência de comunicação entre essas entidades.

Apesar de, internamente, os aspiradores e coordenadores serem uma composição de agentes do tipo $AgHardware$ e $AgSoftware$, podemos considerar que todos estão em um mesmo grupo na organização (vermelho). Esses novos relacionamentos inseridos no modelo de estrutura, ainda que simples, levam a grandes mudanças no comportamento dos agentes.

Figura 47 – Matriz de relacionamento entre os agentes do quinto experimento.

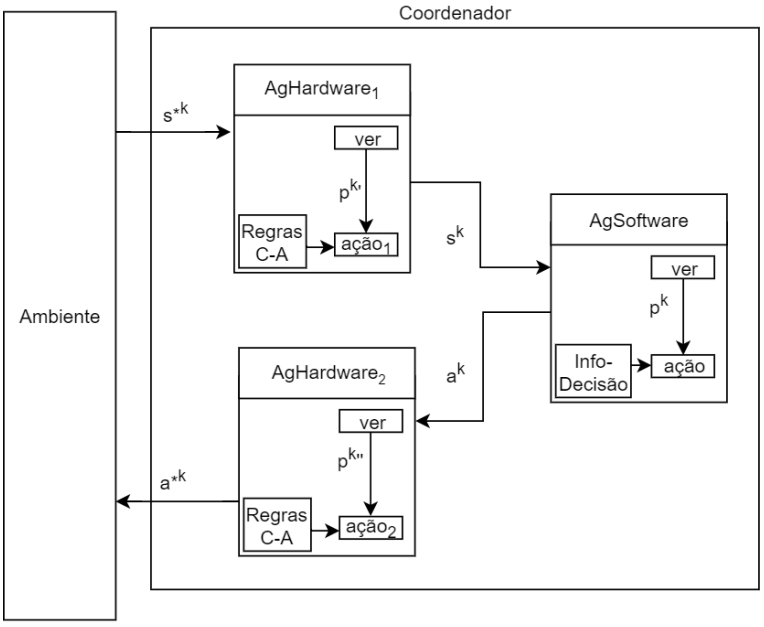
	AgAsp	AgCoord	AgUser
AgAsp	--	Media	--
AgCoord	Media	--	--
AgUser	--	--	--

Fonte**:** Elaborada pelo autor.

5.4.5.2 Modelo C

Por ser uma extensão do aspirador, o coordenador também tem os mesmos objetivos definidos no objetivo original do sistema e, portanto, deve se comportar de forma a atingi-los. Mas, por ser uma versão melhorada do aspirador, ele possui um conjunto de funções que o tornam mais complexo. A Figura 48 mostra os "esqueletos"dos programas de agente que representam o coordenador.

Figura 48 – "Esqueletos"dos agentes que compõem o coordenador.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

A maior diferença, apresentada na figura acima, entre o coordenador e o aspirador, é que o coordenador possui um *AgSoftware* do tipo orientado por objetivos. Isso permite que ele tenha um maior poder de decisão, além de possibilitar que sejam armazenadas informações sobre outras entidades do sistema. Abaixo apresentamos uma extensão do modelo F, definido no primeiro experimento, para o agente coordenador.

- $P_1 = \{p^{1\prime\prime}, p^{2\prime\prime}, \ldots\}$ – Percepção do programa $AgHardware_1$ – em qualquer instante k o agente $AgHardware_1$ ao receber do ambiente entradas perceptivas $s^{*k} \in S$ – estados do ambiente consistindo de uma grade de tamanho 5×5 *patches*
- ação$_1 : P_1 \rightarrow S$ – Subsistema de tomada de decisão de $AgHardware_1$ – função que mapeia percepções $p^{k\prime\prime} \in P_1$ em entradas perceptivas $s^k \in S$ – estados do ambiente consistindo de uma grade de tamanho 5×5 *patches* – enviadas para o programa $AgSoftware$.
- $P = \{p^1, p^2, \ldots\}$ – Percepção do programa $AgSoftware$ – em qualquer instante k o agente $AgSoftware$ ao receber do programa $AgHardware_1$ as entradas perceptivas $s^k \in S$ – estados do ambiente consistindo de uma grade de tamanho 5×5 *patches* – representa estas informações em uma linguagem interna adequada $p^k \in P$.
- ação : $P \rightarrow A$ – Subsistema de tomada de decisão de $AgSoftware$ – função que mapeia percepções na linguagem $p^k \in P$ em descrições de ações $a^k \in A$ – enviadas para o programa $AgHardware_2$.

O sensor do aspirador, definido no modelo de função do primeiro experimento, é capaz de perceber toda sujeira em um raio de três *patches*, já o sensor do coordenador é capaz de sentir sujeira em um raio de até cinco *patches*. Essa nova capacidade permite que o coordenador seja mais eficiente na busca por locais sujos. Ao encontrar sujeira, o coordenador pode enviar suas posições para outros agentes aspiradores no mesmo grupo, ou ir ao local e limpar ele mesmo.

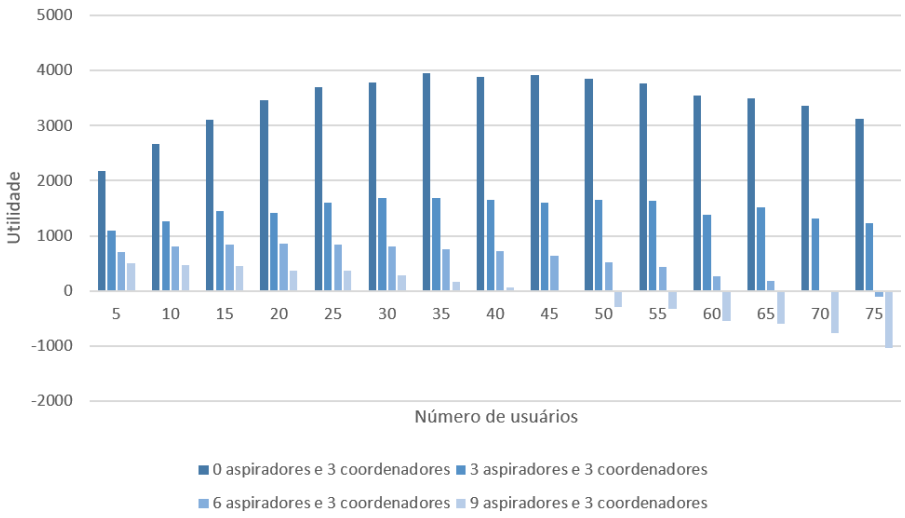
Além de informar aos aspiradores sobre a localização de sujeiras no ambiente, o coordenador também pode enviar uma série de mensagens para que os aspiradores possam agir de acordo com sua estratégia. Se o aspirador considerar que uma região do ambiente está limpa, ele pode emitir mensagens aos aspiradores próximos para que se movam ou para que entrem em modo de espera, evitando desperdiçar energia.

5.4.5.3 Objetos Emergentes

As modificações no desempenho do sistema, com relação ao seu objetivo original podem ser observadas na Figura 49 abaixo.

A curva de utilidade observada para um primeiro cenário, onde temos apenas 3 agentes coordenadores no ambiente, é similar à curva apresentada no quarto experimento, onde tínhamos três aspiradores simultâneos no ambiente. O desempenho passa a decrescer com a adição de novos agentes na simulação, porém, apresenta um ganho em relação ao experimento

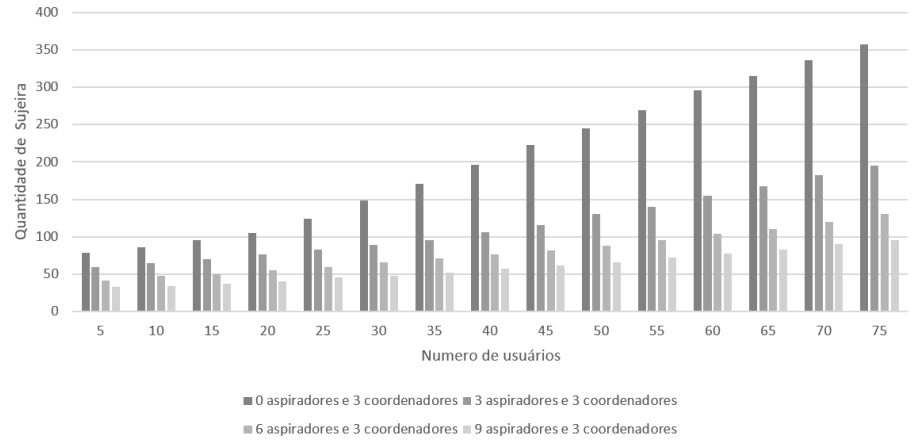
Figura 49 – Utilidade do sistema no quinto experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

anterior.

Figura 50 – Limpeza do sistema no quinto experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

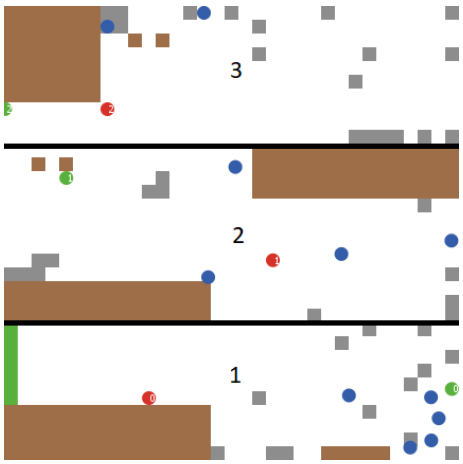
Com relação à sujeira do ambiente, não é possível visualizar uma diferença significativa entre a abordagem utilizada no experimento anterior e a atual. Parte disso pode ser explicado pela nova estratégia utilizada, que permite ao coordenador enviar sinais de parada aos demais aspiradores, forçando eles a economizar energia mas impedindo que busquem por sujeira.

5.4.6 Sistema *Ami* dividido em grupos

Para tentar melhorar mais um pouco os valores de utilidade do sistema, neste experimento vamos modificar o modelo de estrutura da organização, dividindo os agentes em

três grupos responsáveis por áreas diferentes do ambiente. O objetivo é espalhar melhor os aspiradores e os coordenadores, diminuindo sua necessidade de locomoção e maximizando sua área de cobertura. A Figura 51 abaixo exemplifica como o ambiente será dividido.

Figura 51 – Divisão do ambiente no sexto experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

O ambiente da simulação será dividido em três zonas, onde apenas os usuários são livres para circular entre elas. Cada zona terá um agente coordenador responsável, e cada aspirador atuará em uma dessas zonas. Tanto o coordenador quanto o aspirador podem circular apenas por suas zonas.

Neste experimento, só foi necessário estender o modelo FEC da organização simulada nos experimentos anteriores nas suas dimensões estrutural (E) e comportamental (C), pois não surgiram novas entidades no ambiente, nem novos objetivos próximos. O modelo E foi alterado para acomodar o esquema de divisão em subgrupos. Já o modelo C foi alterado para acomodar os agentes coordenadores.

5.4.6.1 Modelo E

Para que o sistema seja capaz de se dividir no ambiente, conforme mostrado na Figura 54, é necessário estender o modelo de estrutura do conjunto de programas de agentes e de papéis que os programas podem assumir na organização, além das relações entre programas inseridas no último experimento. Mais especificamente, para o caso de três coordenadores conduzindo diferentes subgrupos de aspirador, alocados em zonas distintas do ambiente, onde cada subgrupo contém pelo menos o aspirador de pó coordenador, vale o seguinte modelo estrutural estendido:

- Agents – $\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, AgHardware_{12}, AgHardware_{22}, AgSoftware_2, AgHardware_{13}, AgHardware_{23}, AgSoftware_3, \ldots, AgHardware_{1M}, AgHardware_{2M}, AgSoftware_M, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_N\}$ – conjunto com $N_A = N + 3 \times (3 + M)$ programas *AgentAmI* na organização tal que $M \geq 0$, ou seja, existem pelos menos 3 aspiradores no local, cada um em uma das três zonas e N pessoas espalhadas nas três zonas.
- Groups – $\{\{AgHardware_{11}, AgHardware_{21}, AgSoftware_1, \ldots, AgHardware_{1Ma}, AgHardware_{2Ma}, AgSoftware_{Ma}, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_{Na}\}, \{AgHardware_{22}, AgHardware_{22}, AgSoftware_2, \ldots, AgHardware_{1Mb}, AgHardware_{2Mb}, AgSoftware_{Mb}, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_{Nb}\}, \{AgHardware_{13}, AgHardware_{23}, AgSoftware_3, \ldots, AgHardware_{1Mc}, AgHardware_{2Mc}, AgSoftware_{Mc}, AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_{Nc}\}\}$ – família de três ($N_G = 3$) conjuntos de programas de agentes exercendo seus papéis na organização, tal que $Ma + Mb + Mc = M$ e $Na + Nb + Nc = N$.
- Bond – $\{Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIController)\}$ – Relação de coordenação entre programas que utilizam do grupo *AgentAmIController* tal que:
  - $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIController)$ – $\{(AgSoftware_1, AgSoftware_2), (AgSoftware_1, AgSoftware_3), \ldots, (AgSoftware_1, AgSoftware_{Ma}), (AgSoftware_2, AgSoftware_1), (AgSoftware_2, AgSoftware_3), \ldots (AgSoftware_2, AgSoftware_{Mb}), (AgSoftware_3, AgSoftware_1), (AgSoftware_3, AgSoftware_2), \ldots, (AgSoftware_3, AgSoftware_{Mc})\}$ – cada ato de informação do programa $AgSoftware_i$ (papel *Controller*) ao programa $AgSoftware_j$ ($i \neq j$) gera o conhecimento correspondente no programa $AgSoftware_j$;
- *Communication* – $\{(AgSoftware_1, AgSoftware_2), (AgSoftware_1, AgSoftware_3), \ldots, (AgSoftware_1, AgSoftware_{Ma}), (AgSoftware_2, AgSoftware_1), (AgSoftware_2, AgSoftware_3), \ldots (AgSoftware_2, AgSoftware_{Mb}), (AgSoftware_3, AgSoftware_1), (AgSoftware_3, AgSoftware_2), \ldots, (AgSoftware_3, AgSoftware_{Mc})\}$

Vale ressaltar que o modelo E do experimento anterior foi estendido a partir da inserção da relação $Bond_{\text{Coordenação}}(AgentAmIController, AgentAmIController)$ na família *Bond* e de outros pares ordenados na relação *Communication*. Com esse novo relacionamento, todos os agentes no papel *Controller* passam a ser capazes de se comunicar, permitindo que exista uma maior cooperação entre eles. Ou seja, além da relação de autoridade entre os agentes no papel *Controller* que compõem coordenadores e aspiradores, podemos contar também com a relação

de coordenação entre os agentes $AgSoftware$ que compõem apenas os Coordenadores.

A matriz sociométrica descrita na Figura 52 define o mapa das interações que ocorrem entre os programas de agentes dentro de um mesmo subgrupo e entre os três programas coordenadores em subgrupos diferentes.

Figura 52 – Matriz sociométrica representando as interações entre os programas.

Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Na figura, a tabela menor indica que cada programa $AgAsp_i$ representa um aspirador i do sistema técnico, ou seja, uma agregação de três programas na organização, isto é: $AgHardware_{1i}$, $AgHardware_{2i}$ e $AgSoftware_i$. A tabela maior informa uma baixa frequência de troca de mensagens entre os três coordenadores ($AgAsp_1$, $AgAsp_2$, $AgAsp3$) dos três grupos, uma frequência média entre os coordenadores de cada grupo e os seus coordenados ($AgAsp_1, \ldots, AgAsp_{Ma}$; $AgAsp_2, \ldots, AgAsp_{Mb}$; $AgAsp_3, \ldots, AgAsp_{Mc}$), e que tanto coordenadores quanto seus coordenados não interagem com os programas, representando as pessoas nas três zonas ($AgPessoa_1, \ldots, AgPessoa_{Na}$; $AgPessoaNa+1, \ldots, AgPessoa_{Nb}$; $AgPessoa_{Nb+1}, \ldots, AgPessoa_{Nc}$).

5.4.6.2 Modelo C

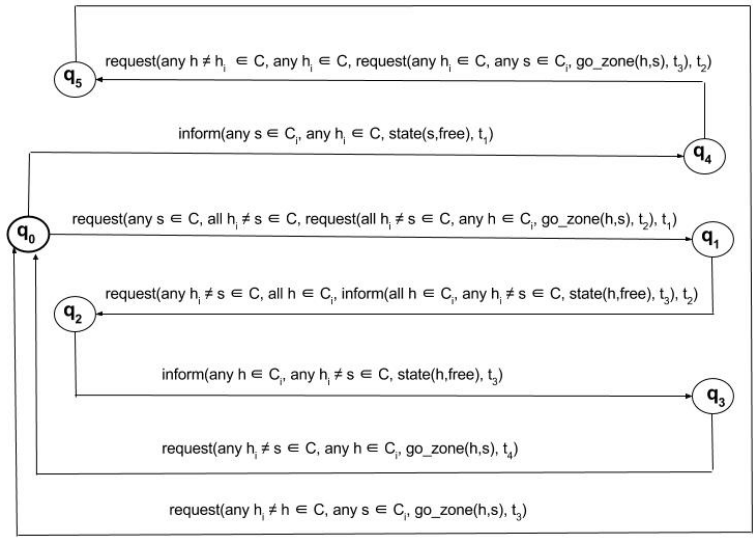
Conforme mencionado, o modelo C foi alterado para acomodar os agentes coordenadores. Esta acomodação implicou na definição do comportamento de cada programa no papel $Controller$ coordenando um dos três grupos ($AgSoftware_1$, $AgSoftware_2$, $AgSoftware_3$), em uma alteração no modelo do comportamento dos outros programas no papel $Controller$

coordenados em um dos grupos ($AgSoftware_4$, ..., $AgSoftware_{Na}$, $AgSoftware_{Na+1}$, ..., $AgSoftware_{Nb}$, $AgSoftware_{Nb+1}$, ..., $AgSoftware_{Nc}$), e no protocolo de interação entre os programas.

Apesar do modelo F não ter sido estendido, as informações sobre os estados do ambiente, percebidas pelos programas no papel *Device* representando sensores, agregam informações a respeito de linhas divisórias entre as zonas compondo o ambiente. Assim, quando recebem estas informações, os programas no papel *Controller* sendo coordenados e coordenadores evitam ultrapassar estas linhas. Entretanto, sempre que precisar, um coordenador pode requisitar a outro coordenador que envie alguns dos aspiradores para a sua zona. Neste caso, o coordenador que recebeu a mensagem deve consultar seus coordenados visando descobrir aspiradores disponíveis, os quais devem assimilar a ideia e partir para a zona que requisitou ajuda.

A Figura 53 ilustra o protocolo de interação entre os programas no papel *Controller*. A descrição do processo de comunicação considera um conjunto de seis estados possíveis, $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$, em que o estado inicial foi representado por q_0. A figura supõe que o processo de conversação envolve uma família de quatro conjuntos de programas $G = \{C, C_1, C_2, C_3\}$, ou seja: um conjunto de três programas coordenadores $C = \{AgAsp_1, AgAsp_2, AgAsp_3\}$, um conjunto de programas coordenados pelo coordenador $AgAsp_1$ da zona 1, isto é, $C_1 = \{AgAsp_4, \ldots, AgAsp_{Ma}\}$; um conjunto de programas coordenados pelo coordenador $AgAsp_2$ da zona 2, isto é, $C_2 = \{AgAsp_{Ma+1}, \ldots, AgAsp_{Mb}\}$; e um conjunto de programas coordenados pelo coordenador $AgAsp_3$ da zona 3, isto é, $C_3 = \{AgAsp_{Mb+1}, \ldots, AgAsp_{Mc}\}$.

Figura 53 – Protocolo de interação entre os programas na organização.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

De acordo com a relação *Communication*, o protocolo de interação indica que os programas coordenadores se comunicam entre si e cada um com os programas por ele coordenados. As transições entre os estados $q_0 - q_1$ e $q_4 - q_5$ correspondem a solicitações envolvendo pelo menos três agentes (*requests to request*), a transição entre os estados $q_1 - q_2$ corresponde a uma pergunta (*requests to inform*) envolvendo pelo menos dois agentes. O restante das transições corresponde às mensagens fundamentais para solicitar e informar (*request e inform*) um outro agente.

No instante t_1, a partir do estado inicial q_0, há duas possibilidades de transição. Primeiro, qualquer coordenador s no conjunto de coordenadores C pode solicitar que cada coordenador h_i no conjunto C solicite que seus coordenados no conjunto C_i se dirijam à zona do coordenador s. No instante t_2, o coordenador h_i em C pergunta aos seus coordenados em C_i a respeito de seus estados atuais. No instante t_3, um programa h em C_i que está livre informa este fato ao seu coordenador h_i em C. No instante t_4, o coordenador h_i solicita que seu coordenado h se dirija à zona do coordenador s, o qual solicitou essa ação no instante t_1.

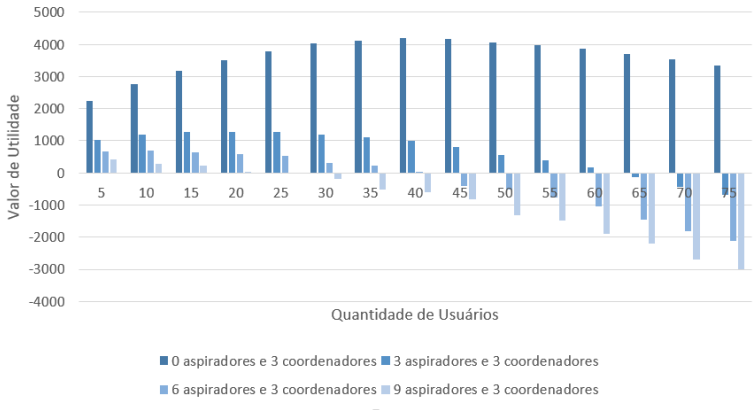
Na segunda transição possível no instante t_1, um programa coordenado h em um conjunto C_i informa ao seu coordenador h_i em C que está livre. Sendo assim, se em t_2 algum coordenador s em C solicitar que o coordenador h_i solicite que seus coordenados se dirijam à zona do coordenador s, então, em t_3, o coordenador h_i poderá solicitar imediatamente que h no conjunto C_i se dirija à zona de s, o qual solicitou esta ação no instante t_2, depois que h informou que estava livre em t_1.

A Figura 53 omitiu a transição para o então inicial q_0 na situação em que os programas coordenados e/ou coordenadores não enviam mensagens de retorno para as solicitações. Por exemplo, depois de ε unidades de tempo, contadas a partir do horário de início da conversação no instante $t_2(time(t_2))$ até um tempo limite em que uma mensagem de retorno deve ser enviada no instante $t_3(time(t_3))$, o protocolo deve transitar para o estado inicial, $\delta(q_2, time(t_3)\check{}time(t_2) > \varepsilon) = q_0$, em que os programas poderão iniciar novo processo de conversação.

5.4.6.3 Objetos Emergentes

Os objetos emergentes, resultantes das modificações realizadas neste experimento, são apresentados nesta subseção. As condições são as mesmas observadas no experimento anterior. Em cada teste serão três coordenadores, cada um responsável por uma zona. A quantidade de aspiradores por teste será variada da mesma forma que o experimento anterior.

Figura 54 – Utilidade do sistema no sexto experimento.

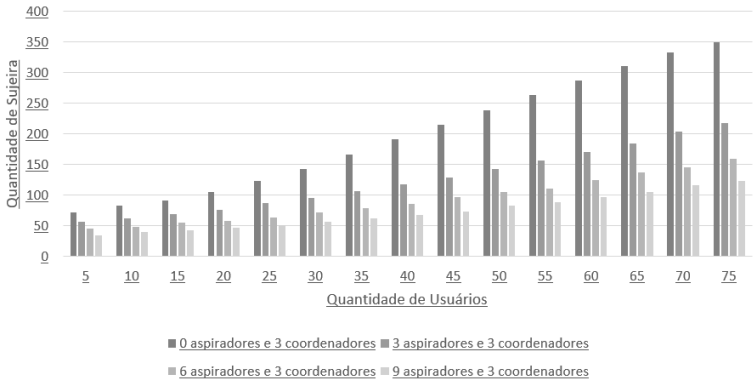


Fonte**:** Elaborada pelo autor.

Conforme podemos observar na Figura 54, o desempenho do sistema foi bem inferior aos experimentos anteriores. Isso pode ser atribuído a um fator observado durante a execução. Como tanto os coordenadores quanto os aspiradores têm um espaço de movimento mais limitado, quando eles se posicionam em certas áreas, como nos cantos de suas respectivas zonas, eles têm menos opções de movimento, forçando o agente a seguir por uma direção que pode estar ocupada por algum usuário causando uma colisão com ele. Como a função associada ao objetivo de evitar incomodar os usuários tem prioridade maior que as outras, o desempenho do sistema é bastante afetado.

Como podemos observar na Figura 55 acima, não é possível determinar uma dife-

Figura 55 – Limpeza do ambiente no sexto experimento.



Fonte**:** Elaborada pelo autor.

rença significativa entre o desempenho, relacionado à limpeza do ambiente, neste experimento e no observado na Figura 50. Isso reforça a hipótese de que a baixa performance do objetivo original está relacionada ao objetivo próximo O_3.

5.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi mostrada a utilização do modelo FEC, elaborado no capítulo 4, para uma aplicação de sistemas de inteligência ambiental. Para construir o modelo dessa aplicação foi utilizada uma abordagem incremental, inserindo novos elementos no sistema a cada experimento e, consequentemente, aumentando sua complexidade. Cada um dos experimentos gera um conjunto de dados que são utilizados para avaliar o modelo construído para o sistema. A aplicação utilizada para o teste desse modelo tem como base o experimento clássico do aspirador de pó. Ela consiste em um sistema de inteligência ambiental, onde um conjunto de agentes aspiradores de pó deve manter limpo um ambiente em que circulam grupos de pessoas. O objetivo desse sistema *AmI* é manter o ambiente limpo, minimizando os custos de energia e evitando atrapalhar as pessoas que estão passando.

No primeiro experimento realizado, a aplicação é simulada em um ambiente estático contendo apenas um agente aspirador. O intuito deste experimento é verificar se o modelo gerado para o agente aspirador é capaz de cumprir um dos objetivos da aplicação, limpar o ambiente, e validar o modelo de função gerado para esse objetivo.

O segundo experimento também tem como objetivo observar o comportamento do agente e de seu modelo de função, mas dessa vez em um condições diferentes. O agente aspirador único é mantido na aplicação, porém, o ambiente de aplicação se torna dinâmico. Ou seja, o próprio programa de ambiente passa a inserir sujeira no ambiente. Além disso, o agente aspirador

passa a apresentar falhas em seu atuador, perdendo sua característica determinística.

O terceiro experimento mantém as novas características do ambiente e do agente aspirador e adiciona um novo elemento à simulação, o agente usuário. Neste experimento são observadas as medidas extraídas, a partir do modelo de função atualizado, da simulação em função da quantidade de pessoas no ambiente.

No quarto experimento, passamos a observar na simulação um ambiente contendo dois ou mais agentes aspiradores. Nele são extraídas medidas de três situações diferentes: na primeira são observadas as medidas em um ambiente contendo três aspiradores, na segunda passam a ser seis, e na terceira uma dúzia de aspiradores.

O quinto experimento adiciona um novo agente à aplicação, chamado de "agente coordenador". Com esse novo elemento, a aplicação passa a apresentar características organizacionais mais complexas e novos elementos de cooperação. Isso gera mudanças mais profundas nos modelos de estrutura e comportamento definidos anteriormente, além de refletir nas medidas obtidas através do modelo de função.

Finalmente, o sexto experimento divide o ambiente da aplicação em três partes, onde cada uma dessas partes contém um agente coordenador que gerencia os aspiradores da sua zona. Ambos os experimentos, cinco e seis, são realizados em condições semelhantes às do quarto experimento, examinando diferentes situações do ambiente em função da quantidade de pessoas que passam por ele.

Para simplificar a apresentação dos experimentos, foram omitidas algumas características dos modelos FEC que se mantinham de um experimento para outro. Em cada experimento foram geradas duas distribuições, uma contendo as medidas associadas ao modelo de função, caracterizando o desempenho da aplicação em relação aos objetivos do sistema, e outra ilustrando especificamente a performance do sistema em relação à limpeza do ambiente. Essas distribuições extraídas da simulação permitem que o desenvolvedor possa observar características do sistema antes de iniciar sua implantação no mundo real.

Neste trabalho, os experimentos foram realizados com o objetivo de validar o modelo FEC proposto, cada um dos experimentos apresenta evoluções no modelo relacionadas à inserção de realidade no sistema *AmI*. As representações geradas na simulação a partir dos modelos foram aceitáveis, expondo características do sistema que não poderiam ser observadas antes de sua construção. Isso pode ser observado principalmente nos três últimos experimentos, onde podemos notar que as mudanças de comportamento e estrutura propostas no sistema não são capazes de gerar ganhos significativos de acordo com o modelo de Função adotado.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos um quadro formal para auxiliar desenvolvedores no processo de criação e teste de sistemas complexos, mais especificamente em sistemas de inteligência ambiental. Sistemas *AmI* são aplicações que utilizam dispositivos distribuídos por um ambiente que, através de programas de *software* inteligentes, são capazes de fornecer uma série de serviços para os usuários.

São diversas as possibilidades de aplicações em sistemas *AmI* e com a popularização tanto dos dispositivos móveis (celulares, *tablets*, *smartwatches*) e dos sensores inteligentes, esses sistemas se tornam cadas vez mais comuns. Grandes empresas já possuem sistemas que utilizam *smartphones* e outros sensores instalados nas casas dos usuários para prover uma série de facilidades aos moradores, variando desde um sistema de entretenimento comandado por voz, até sistemas de segurança capazes de reconhecer os moradores da casa.

A construção de ambientes inteligentes, no entanto, ainda é processo bastante complexo que pode envolver um conjunto muito grande de artefatos. Esses artefatos, dispositivos de *hardware* e *software*, interagem entre si e entre um grupo de pessoas no ambiente. Tal complexidade torna-se ainda maior quando consideramos que esse tipo de sistema só pode ser testado após a instalação do *hardware* necessário no ambiente. Ou seja, grande parte dos erros relacionados à estrutura do projeto, e até mesmo do código, só será descoberto após a sua construção, elevando ainda mais os custos de produção.

A abordagem proposta neste trabalho, considera que o sistema *AmI* a ser construído deverá ser controlado por um Sistema Multiagente, onde cada agente é capaz de controlar um ou mais dos dispositivos espalhados pelo ambiente. A utilização de SMAs permite uma melhor utilização das características distributivas da inteligência ambiental, além de possibilitar uma construção individual de cada entidade.

A utilização de SMAs possibilita também a representação de cada entidade do sistema como um conjunto de agentes. Neste trabalho, cada agente que representava uma entidade do sistema técnico da aplicação de inteligência ambiental é representado em uma simulação por um conjunto contendo três agentes que atuam nos papéis de sensor, atuador e controlador. Essa visualização das entidades do sistema como um conjunto de agentes, juntamente com o modelo FEC proposto neste trabalho, permite ao desenvolvedor criar simulações de sistemas *AmI* sendo capaz de controlar diversos aspectos do ambiente e do próprio *hardware* que compõe o dispositivo.

O modelo FEC proposto neste trabalho divide o sistema em três partes. Na primeira, denominada modelo de Função, são definidas as entidades (agentes) que fazem parte da aplicação, suas percepções e ações. Nela também definimos o objetivo original do sistema e seus objetivos próximos, determinando um conjunto de funções capazes de medir a satisfação do sistema em relação ao alcance desses objetivos. No modelo de Estrutura são determinados os relacionamentos entre os agentes criados, definindo os tipos de mensagens que podem ser enviadas e estipulando uma frequência de comunicação. Por último, no modelo de Comportamento são elaborados os esqueletos dos programas dos agentes da aplicação. Neste ponto são definidas as estratégias que serão utilizadas a fim de alcançar os objetivos definidos no modelo F.

Com os modelos FEC definidos, podemos construir uma simulação da aplicação de inteligência ambiental. Essa simulação deverá ser capaz de mostrar ao desenvolvedor do sistema as falhas nas estratégias utilizadas, permitindo a ele corrigir os modelos e testar novas estratégias ainda em tempo de projeto.

Para validar o modelo FEC proposto, elaboramos uma aplicação *AmI* simples que utiliza um grupo de agentes aspiradores de pó para limpar um ambiente onde circulam um grande número de pessoas. A simulação gerada a partir desse modelo foi construída utilizando a plataforma NetLogo (TISUE; WILENSKY, 2004), cujos códigos podem ser acessados no seguinte endereço [1]. A aplicação é estudada ao longo de vários experimentos, cada um deles é gerado a partir de modificações nos modelos FEC. A cada experimento são extraídos dados relacionados a performance do sistema; essas informações são construídas com base no modelo F proposto.

O desempenho do sistema, observado no Capítulo 5, mostra a utilidade da aplicação em cada um dos cenários. Os três primeiros experimentos têm como objetivo mostrar que o agente criado é minimamente capaz de atingir os objetivos do sistema independente dos obstáculos inseridos no ambiente. Os três últimos experimentos ilustram estratégias diferentes que a aplicação pode utilizar para atingir os objetivos. No primeiro são inseridos diversos agentes aspiradores no ambiente, eles interagem com os agentes usuários e o próprio ambiente, buscando alcançar os objetivos definidos. No segundo, inserimos um agente coordenador, capaz de delegar tarefas aos demais agentes. E, no último, os agentes são separados em grupos, diminuindo sua areá de atuação.

Apesar das diferenças entre as estratégias utilizadas, as performances observadas no fim dos experimentos foram semelhantes, embora inferiores às esperadas. Entre os três

[1] https://bitbucket.org/rob_oliveira/netlogocleanersim

últimos experimentos, o experimento 5.4.4, apesar de mais simples, foi o que obteve os melhores resultados, demonstrando que as estratégias utilizadas nos experimentos 5.4.5 e 5.4.6, ou o modelo de função proposto, devem ser repensadas.

Mesmo com um desempenho abaixo do esperado, podemos considerar que os experimentos foram um sucesso, tendo em vista que o objetivo do trabalho é validar o modelo FEC proposto. Com a construção das simulações através dos modelos, o desenvolvedor da aplicação pode testar diversas estratégias para a resolução de um determinado problema de forma rápida, sem a necessidade dos dispositivos físicos e com um custo baixo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como este trabalho apresenta um novo quadro formal para a construção de sistemas e simulações, ainda devem existir diversos trabalhos evoluindo e diversificando os conceitos apresentados. Como primeiro passo, é necessário evoluir os modelos elaborados aqui, simplificando-os e tornando-os mais flexíveis para diferentes tipos de sistema. Para isso, também devemos testar o modelo FEC em uma aplicação real para validar, de fato, a sua eficiência.

Um outro trabalho possível é a criação de uma ferramenta capaz de modelar sistemas seguindo os conceitos apresentados neste trabalho. A partir desses modelos, poderíamos gerar códigos para a criação de simulações em linguagens como NetLogo, aumentando ainda mais a velocidade de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ASHTON, K. That ‘internet of things’ thing. **RFiD Journal**, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009.

AUGUSTO, J. C. Ambient intelligence: the confluence of ubiquitous/pervasive computing and artificial intelligence. In: **Intelligent Computing Everywhere**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. p. 213–234.

BARRY, P. S.; KOEHLER, M. T.; TIVNAN, B. F. Agent-directed simulation for systems engineering. In: SOCIETY FOR COMPUTER SIMULATION INTERNATIONAL. **Proceedings of the 2009 spring simulation multiconference**. [S.l.], 2009. p. 15.

BICK, M.; KUMMER, T.-F. Ambient intelligence and ubiquitous computing. In: **Handbook on Information Technologies for Education and Training**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. p. 79–100.

BOHN, J.; COROAMĂ, V.; LANGHEINRICH, M.; MATTERN, F.; ROHS, M. Social, economic, and ethical implications of ambient intelligence and ubiquitous computing. In: **Ambient intelligence**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. p. 5–29.

BOISSIER, O.; SICHMAN, J. Organization oriented programming. In: **Tutorial Notes, 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2004), New York, USA**. [S.l.: s.n.], 2004.

DAVIDSSON, P. Multi agent based simulation: beyond social simulation. In: **Multi-Agent-Based Simulation**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. p. 97–107.

DAVIDSSON, P.; BOMAN, M. Distributed monitoring and control of office buildings by embedded agents. **Information Sciences**, Elsevier, v. 171, n. 4, p. 293–307, 2005.

DOHR, A.; MODRE-OSPRIAN, R.; DROBICS, M.; HAYN, D.; SCHREIER, G. The internet of things for ambient assisted living. **ITNG**, v. 10, p. 804–809, 2010.

FRANCO, M. R.; CAMPOS, G. A.; SICHMAN, J. S. An empirical approach for relating environmental patterns with agent team compositions. In: **Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems XII**. [S.l.]: Springer, 2016. p. 98–115.

GARCIA-VALVERDE, T.; CAMPUZANO, F.; SERRANO, E.; BOTIA, J. A. Human behaviours simulation in ubiquitous computing environments. In: CITESEER. **MALLOW**. [S.l.], 2010.

GROSSI, D.; DIGNUM, F.; DASTANI, M.; ROYAKKERS, L. Foundations of organizational structures in multiagent systems. In: ACM. **Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems**. [S.l.], 2005. p. 690–697.

GROSSI, D.; DIGNUM, F.; DIGNUM, V.; DASTANI, M.; ROYAKKERS, L. Structural aspects of the evaluation of agent organizations. In: **Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems II**. [S.l.]: Springer, 2007. p. 3–18.

HÜBNER, J. F.; SICHMAN, J. S.; BOISSIER, O. A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems. In: SPRINGER. **Brazilian Symposium on Artificial Intelligence**. Berlin, Heidelberg, 2002. p. 118–128.

HÜBNER, J. F.; SICHMAN, J. S.; BOISSIER, O. Developing organised multiagent systems using the moise+ model: programming issues at the system and agent levels. **International Journal of Agent-Oriented Software Engineering**, Inderscience Publishers, v. 1, n. 3-4, p. 370–395, 2007.

LIGHTSEY, B. **Systems engineering fundamentals**. [S.l.], 2001.

MACAL, C.; NORTH, M. Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. In: IEEE PRESS. **Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference**. [S.l.], 2014. p. 6–20.

MIORANDI, D.; SICARI, S.; PELLEGRINI, F. D.; CHLAMTAC, I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, 2012.

MUSTAFA, B. Simulation support for monitored assisted living system development: A vision for the future. In: IEEE. **Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies (NGMAST), 2013 Seventh International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 244–249.

NORLING, E.; SONENBERG, L.; RÖNNQUIST, R. Enhancing multi-agent based simulation with human-like decision making strategies. In: **Multi-Agent-Based Simulation**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. p. 214–228.

NORVIG, P.; RUSSELL, S. J. Inteligência artificial. **editora Campus**, 2004.

PARUNAK, H. V. D.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In: SPRINGER. **Multi-agent systems and agent-based simulation**. [S.l.], 1998. p. 10–25.

RODRÍGUEZ-AGUILAR, J. A.; MARTÍN, F. J.; GARCIA, P.; NORIEGA, P.; SIERRA, C. Towards a formal specification of complex social structures in multi-agent systems. In: **Collaboration between Human and Artificial Societies**. [S.l.]: Springer, 1999. p. 284–300.

SELZNICK, P. Foundations of the theory of organization. **American sociological review**, JSTOR, v. 13, n. 1, p. 25–35, 1948.

SIMON, H. A. **The sciences of the artificial**. [S.l.]: MIT press, 1996.

SOMMERVILLE, I. *et al.* **Engenharia de software**. [S.l.]: Addison Wesley São Paulo, 2003. v. 6.

TEAHAN, W. J. **Artificial Intelligence–Agents and Environments**. [S.l.]: BookBoon, 2010.

TISUE, S.; WILENSKY, U. Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In: A. **International conference on complex systems**. [S.l.], 2004. v. 21, p. 16–21.

VASCONCELOS, W.; SIERRA, C.; ESTEVA, M. An approach to rapid prototyping of large multi-agent systems. In: IEEE. **Automated Software Engineering, 2002. Proceedings. ASE 2002. 17th IEEE International Conference on**. [S.l.], 2002. p. 13–22.

WEISER, M. The computer for the 21st century. **Scientific american**, Nature Publishing Group, v. 265, n. 3, p. 94–104, 1991.

WILENSKY, U.; RESNICK, M. Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. **Journal of Science Education and technology**, Springer, v. 8, n. 1, p. 3–19, 1999.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.