



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Ethologie*

Présentée et soutenue par *Niriaska Perozo*
Le *30/09/2011*

Titre : *Modélisation multi-agents pour systèmes émergents et auto-organisés*

JURY

Professeur Francisco Hidrobo
Professeur Franklin Rivas
Professeur Haydemar Nuñez
Professeur Carlos Gershenson
Professeur Marie-Pierre Gleizes

Ecole doctorale : *CLESCO*
Unité de recherche : *CRCA*

Directeur(s) de Thèse : *Dr. Jose Aguilar, Dr. Guy Theraulaz et Dr. Oswaldo Terán*
Rapporteurs : *Professeur Haydemar Nuñez et Professeur Carlos Gershenson*

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS
APLICADAS



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
ECOLE DOCTORALE CLESCO
DOCTORAT UNIVERSITAIRE
EN NEUROSCIENCES

UNIVERSITE
PAUL
SABATIER



TOULOUSE III

MODELADO MULTIAGENTE PARA SISTEMAS EMERGENTES Y AUTO-ORGANIZADOS

Autor: Niriaska Perozo Guédez

Tutores:

Dr. Jose Aguilar

Dr. Guy Theraulaz

Dr. Oswaldo Terán

TESIS DOCTORAL PRESENTADA EN COTUTELA ANTE LA UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES Y LA UNIVERSIDAD PAUL SABATIER COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR

SEPTIEMBRE 2011

A Todos Mis Seres Queridos

Resumen

En este trabajo se define una arquitectura multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados llamada MASOES. Esta arquitectura permite la posibilidad de modelar un sistema emergente y auto-organizado a través de una sociedad de agentes (homogéneos o heterogéneos), que trabajen de manera descentralizada, con diferentes tipos de comportamiento: reactivo, imitativo o cognitivo, pudiendo también, cambiar dinámicamente su comportamiento según su estado emocional, para que los agentes puedan adaptarse dinámicamente a su entorno, favoreciendo la emergencia de estructuras. Para ello, se propone un modelo afectivo bidimensional que considera emociones positivas y negativas. La importancia de este modelo emocional radica en el hecho de que no existen modelos emocionales para estudiar y comprender cómo modelar y simular procesos auto-organizados y emergentes en un entorno multiagente, y en su utilidad, para estudiar también algunos aspectos de la interacción social multiagente (por ejemplo, la influencia de las emociones en el comportamiento individual y colectivo de los agentes). Por otra parte, se especifica también una metodología de uso para el modelado con MASOES, que explica cómo describir los elementos, las relaciones y los mecanismos a nivel individual y colectivo de la sociedad de agentes, que favorece el análisis del fenómeno emergente y auto-organizado sin modelar matemáticamente el sistema. Se propone, además, un método de verificación para MASOES basado en el paradigma de la sabiduría de las multitudes y los mapas cognitivos difusos (MCDs), para comprobar el cumplimiento de las especificaciones de diseño y los criterios de verificación que se establecieron tales como: densidad, diversidad, independencia, emotividad, auto-organización y emergencia, entre otros. Se muestra también, la aplicabilidad de MASOES para modelar diversos casos de estudio en diferentes contextos tales como: Wikipedia, Desarrollo del Software Libre y el Comportamiento Colectivo de los Peatones a través del Modelo de Fuerzas Sociales. Finalmente, los dos modelos que se proponen en MASOES: el modelo multiagente inicial y el modelo con MCDs basado en ese modelo multiagente inicial se complementan mutuamente. Esto significa que es posible hacer pruebas en el modelo multiagente a través del meta-modelo basado en MCDs. Ello representa una alternativa novedosa para estudiar, probar, verificar o validar la auto-organización y emergencia en sistemas complejos y hacer pruebas en el modelo multiagente, ya que es difícil hacerlas en este tipo de sistemas directamente por el nivel de incertidumbre y complejidad que manejan.

Palabras Claves: *Sistemas Multiagente, Auto-Organización, Emergencia, Computación Emocional, Sistemas Auto-organizados, Mapas Cognitivos Difusos, Inteligencia Colectiva.*

ABSTRACT

In this work a multi-agent architecture for self-organizing and emergent systems (MASOES) is defined. This architecture allows the possibility of modeling a self-organizing and emergent system through a society of agents (homogenous or heterogeneous), who work in a decentralized way, with different types of behavior: reactive, imitative or cognitive. Also they are able to dynamically change their behavior according to their emotional state, so that the agents can adapt dynamically to their environment, favoring the emergence of structures. For it, a two-dimensional affective model with positive and negative emotions is proposed. The importance of this affective model is that there are not emotional models for studying and understanding how to model and simulate emergent and self-organizing processes in a multi-agent environment and also, its usefulness to study some aspects of social interaction multi-agent (e.g. the influence of emotions in individual and collective behavior of agents). On the other hand, a methodology for modeling with MASOES is specified, it explains how to describe the elements, relations and mechanisms at individual and collective level of the society of agents, that favor the analysis of the self-organizing and emergent phenomenon without modeling the system mathematically. It is also proposed a verification method for MASOES based on the paradigm of wisdom of crowds and fuzzy cognitive maps (FCMs), for testing the design specifications and verification criteria established such as: *density, diversity, independence, emotiveness, self-organization and emergence, among others*. It also shows the applicability of MASOES for modeling diverse case studies (in a diversity of contexts) such as: *Wikipedia, Free Software Development and collective behavior of pedestrians through the Social Force Model*. Finally, the two models proposed in MASOES: the initial multi-agent model and the model with FCMs based on that initial multi-agent model complement each other. This means that it is possible to test the multi-agent model through the meta-model based on FCMs. Besides, it represents a novel alternative to study, test, verify or validate self-organization and emergence in complex systems and test the multi-agent model, since it is difficult to make tests in these systems directly, given the level of uncertainty and complexity they manage.

KeyWords: *Multi-agent Systems, Self-Organization, Emergence, Affective Computing, Self-Organizing Systems, Fuzzy Cognitive Maps, Collective Intelligence.*

RÉSUMÉ

Dans ce travail, une architecture multi-agents pour systèmes émergents et auto-organisés (MASOES) est définie. Cette architecture permet la possibilité de modéliser un système émergent et auto-organisé à travers une société d'agents (homogène ou hétérogène), qui travaillent de manière décentralisée, avec différents types de comportement: réactive, imitative et cognitive. En outre, ils sont capables de modifier dynamiquement leur comportement en fonction de leur état émotionnel, de sorte que les agents peuvent s'adapter dynamiquement à leur environnement, en favorisant l'émergence de structures. Pour cela, un modèle à deux dimensions affectives avec des émotions positives et négatives est proposé. L'importance de ce modèle affectif, c'est qu'il y a pas des modèles émotionnels pour étudier et comprendre comment modéliser et simuler émergentes et auto-organisés des processus dans un environnement multi-agent et aussi, son utilité pour étudier certains aspects de l'interaction sociale multi-agent (influence des émotions dans les comportements individuels et collectifs des agents). D'autre part, une méthodologie pour faire la modélisation avec MASOES est spécifiée, elle explique comment décrire les éléments, relations et mécanismes au niveau individuel et collectif de la société d'agents, qui favorisent l'analyse de phénomène auto-organisateur et émergent sans modéliser le système mathématiquement. Il est également proposé une méthode de vérification pour MASOES basée sur le paradigme de la sagesse des foules et de cartes cognitives floues (CCFs), pour tester les spécifications de design et les critères de vérification établis, tels que: *la densité, la diversité, l'indépendance, l'émotivité, l'auto-organisation et émergence, entre autres*. Il montre également l'applicabilité de MASOES par des études de cas diverses dans différents contextes comme : *Wikipedia, développement de logiciel gratuit et comportement collectif des piétons par le modèle de forces sociales*. Finalement, les deux modèles proposés dans MASOES: le modèle multi-agent initiale et le modèle avec CCFs basé sur ce modèle multi-agent initiale se complètent mutuellement. Cela signifie qu'il est possible de tester le modèle multi-agent à travers le méta-modèle basé sur les CCFs. En outre, il représente une nouvelle alternative pour étudier, tester, vérifier ou valider l'auto-organisation et émergence dans les systèmes complexes et de tester le modèle multi-agent, car il est difficile de faire des tests dans ces systèmes pour le niveau d'incertitude et de complexité qu'ils traitent.

Mots-Clefs: *Systèmes Multi-agents, Auto-Organisation, Émergence, Informatique Affective, Systèmes Auto-Organisés, Cartes Cognitives Floues, Intelligence Collective.*

Agradecimiento

Realmente tendría que abarcar muchas hojas para expresar mi agradecimiento, ya que realmente soy una mujer muy afortunada al contar siempre con personas que me quieren y me ayudan a alcanzar mis metas de una manera desinteresada y bondadosa. Trataré de ser breve....

A la Divina Misericordia y a la Madre de la Misericordia, por darme esta maravillosa oportunidad de crecer como persona y como profesional. En Ustedes siempre Confío!

A mis padres, a mis hermanos, a mi esposo y su familia, porque sin Uds. estoy completamente segura que este sueño no fuese sido realidad, gracias por su apoyo, su amor, paciencia y comprensión. Los Amo.

A mis hijos, quiero agradecerles su espera y amor. Sé que Uds. no comprendían mis ausencias pero, espero que más adelante este logro les sirva como inspiración para alcanzar metas aún mayores, y para entender que todo lo que nos proponamos alcanzar en la vida es posible, pero requerirá de mucha entrega, dedicación y sacrificio. Dios me los cuide siempre, monos.

A mis amigos: Heidy, Luisa, Alis, Alba, Adison, Taniana, Teresa, Carmen, Fernando, Claudia, Tatiana, Juanita, Wilber, Wilfredo, Joyne y Joseph, quienes en todo momento me han apoyado y me ayudaron a sentirme como en casa. Éxitos queridos amigos.

A mis primas hermanas, que me han apoyado y animado siempre a luchar por esta meta. Gracias por su compañía y oración.

A mis tutores: Dr. Jose Aguilar, Guy Theranlaç y Oswaldo Terán, por su orientación y dedicación para sacar este trabajo adelante. Mis mejores deseos para Ustedes, cuente siempre con mi gratitud y respeto.

A mi querida Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" (UCLA, VENEZUELA), quién siempre ha confiado en mí y me ha llenado de muchas oportunidades, permitiéndome siempre avanzar y mejorar profesionalmente.

Al Programa Alban por su apoyo a la investigación y avance científico en América Latina, por apoyarme económicamente en el logro de este meta.

Al Centro de Estudios en Microelectrónica y Sistemas Distribuidos (CEMISID-ULA, VENEZUELA) por el apoyo brindado, especialmente a mis compañeros por su optimismo y disposición.

Al Centre de Recherches sur la Cognition Animale (CRCA-UPS, FRANCIA), especialmente a Simon Garnier y Mehdi Moussaïd por su apoyo y ayuda incondicional. Muchos éxitos para ambos.

A todos los que de una u otra forma han colaborado conmigo, no me queda más que pedirle a Dios los bendiga y les multiplique todo lo que hayan hecho por mí.

Índice de Figuras

Nº de Figura	Descripción	Página
1	Tipos de Conocimiento y Aprendizaje en MASOES.....	38
2	Fases involucradas en la Gestión General del Conocimiento en MASOES...	38
3	Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados....	40
4	Componentes de MASOES a Nivel Colectivo.....	41
5	Componentes de MASOES a Nivel Individual.....	42
6	Modelo Afectivo para MASOES.....	46
7	Estados emocionales positivos y negativos con su comportamiento asociado.....	47
8	Distintas representaciones de un Mapa Cognitivo: Representación gráfica y matriz de conexión.....	52
9	Representación gráfica de un MCD cualitativo.....	53
10	MCD del Nivel I para la verificación de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (criterios de verificación).....	58
11	MCD del nivel II para verificar los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas del nivel I.....	59
12	MCD del Nivel III para verificar los conceptos arquitectónicos del nivel II y III.....	60
13	Ejemplo para establecer las relaciones entre los distintos conceptos dinámicamente.....	62
14	MCD integrado con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos.....	63
15	MCD Inicial para Wikipedia en Inglés.....	75
16	Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés.....	76
17	MCD Inicial para Wikipedia en Español.....	77
18	Resultados obtenidos para Wikipedia en Español.....	78
19	Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés sin páginas de discusión....	79

20	Resultados obtenidos para Wikipedia en Español sin páginas de discusión...	80
21	MCD Final para Wikipedia en Inglés.....	81
22	MCD extendido para estudiar el modelo afectivo en Wikipedia.....	82
23	Resultados obtenidos en el Caso de Grado de Satisfacción y Activación Alto.....	84
24	Resultados obtenidos en el Caso de Grado de Activación Medio.....	85
25	Resultados obtenidos en el Caso de Grado de Activación Bajo.....	85
26	Resultados obtenidos en el Escenario 2: Grado de Satisfacción y Activación bajo	86
27	Resultados obtenidos en el Escenario 3: Grado de Satisfacción y Activación Medio	86
28	Escenario 1: MCD para la CDKL.....	100
29	Resultados Obtenidos para el escenario 1 de la CDKL	100
30	Resultados Obtenidos para el escenario 2: Afectando el Mecanismo de Agregación	102
31	Resultados Obtenidos para el escenario 3: DSL según Estilo Catedral	104
32	Escenario 1: MCD Inicial para el MFS.....	112
33	Resultados Obtenidos para el Escenario 1: El MFS a través de MASOES ...	113
34	Resultados Obtenidos para el Escenario 2: Impacto del Comportamiento Emocional y la Heterogeneidad en el MFS.....	115
35	El MFS a través del Método de Verificación para MASOES Extendido.....	116

Indice de Tablas

Nº de Tabla	Descripción	Página
1	Algunos ejemplos de enjambres en la naturaleza.....	17
2	Descripción del Algoritmo de Clasificación o Agrupamiento.....	20
3	Descripción del Algoritmo de ACO.....	21
4	Comportamientos manejados por el agente de acuerdo a su estado emocional.....	47
5	Asociación de las fases para la gestión de conocimiento propuestas en MASOES y los criterios de verificación definidos.....	55
6	Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MCD del nivel I.....	56
7	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II.....	58
8	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III.....	59
9	Valores posibles para las relaciones.....	61
10	Actores con algunas de sus Tareas en Wikipedia.....	65
11	Componentes individuales de MASOES en Wikipedia.....	67
12	Componentes Colectivos de MASOES en Wikipedia.....	68
13	Procesos Colectivos de MASOES en Wikipedia.....	69
14	Wikipedia a través de las fases de gestión general del conocimiento.....	70
15	Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MDC del nivel I para Wikipedia.....	71
16	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II para Wikipedia.....	72
17	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III para Wikipedia.....	73
18	Estadísticas Generales para las dos Wikipedias.....	75

19	Proporción del número total de páginas para las dos Wikipedias	75
20	Conceptos Anexados que representan los Sub-componentes del Componente Conductual y las Dimensiones del Espacio Afectivo.....	83
21	Agentes y Tareas Involucradas en la CDKL.....	89
22	Componentes Individuales de MASOES en la CDKL.....	91
23	Componentes Colectivos de MASOES en la CDKL.....	92
24	Procesos Colectivos de MASOES en la CDKL.....	92
25	Desarrollo del Software Libre a través de las Fases de Gestión del Conocimiento.....	94
26	Definición de Conceptos Vinculados a las Propiedades Emergentes y Auto-Organizadas (Criterios de Verificación) Involucrados en el MCD del Nivel I para la CDKL.....	96
27	Definición de los Conceptos Arquitectónicos Involucrados en el MCD del Nivel II para la CDKL.....	97
28	Definición de los Conceptos Arquitectónicos Involucrados en el MCD del Nivel III para la CDKL.....	99
29	Componentes individuales de MASOES en el MFS.....	108
30	Componentes Colectivos de MASOES en el MFS.....	109
31	Procesos Colectivos de MASOES en el MFS.....	109
32	El MFS a través de las Fases de Gestión de Conocimiento.....	109
33	Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MDC del nivel I para el MFS.....	110
34	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II para el MFS.....	111
35	Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del Nivel III para el MFS.....	111
36	Definición de Algunos Conceptos Involucrados en la Extensión (Enfoque Cualitativo) del MCD Inicial para el MFS.....	116
37	Representación de los Conceptos del Método de Verificación para MASOES de acuerdo con el Enfoque Cuantitativo para el MFS.....	117

Indice General

Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Resume.....	VII
Agradecimiento.....	VIII
Indice de Figuras.....	X
Indice de Tablas.....	XII
Capitulo 1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Justificación e Importancia.....	6
1.5. Organización de la Tesis.....	8
Capitulo 2. Marco Teórico.....	9
2.1. Inteligencia Artificial Distribuida.....	9
2.1.1. Sistemas Multiagente.....	9
2.2. Inteligencia Colectiva.....	14
2.3. Auto-Organización y Emergencia.....	23
2.3.1. Auto-Organización y Emergencia en los Sistemas Multiagente.....	28
2.4. Computación Emocional.....	31
2.4.1. Hacia la Captación de las Expresiones Emocionales.....	32
2.4.2. Rol de las Emociones en los Agentes Artificiales.....	33
Capitulo 3. Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados (MASOES).....	37
3.1. Aspectos Generales Acerca de MASOES.....	37
3.2. Propiedades de la Arquitectura.....	39
3.3. Descripción de la Arquitectura Propuesta.....	39
3.3.1. Componentes de la Arquitectura a Nivel Colectivo o Social.....	40
3.3.2. Componentes de la Arquitectura a Nivel Individual.....	41
3.4. Metodología para el Modelado de Sistemas Emergentes y Auto-Organizados usando MASOES.....	44
3.5. Un Modelo Emocional Para MASOES.....	45
Capitulo 4. Un Método de Verificación para MASOES.....	49
4.1 Bases Teóricas del Método de Verificación para MASOES.....	49
4.1.1. Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes.....	49

4.1.2. Mapas Cognitivos Difusos.....	52
4.2. Descripción del Método de Verificación para MASOES.....	54
4.2.1. Definición de los Criterios de Verificación.....	55
4.2.2. Mapas Cognitivos Difusos Propuestos.....	56
4.2.3. Metodología para usar el Método de Verificación para MASOES.....	60
Capítulo 5. Casos de Estudio.....	64
5.1. Wikipedia.....	64
5.1.1. Modelado de Wikipedia con MASOES.....	64
5.1.2. Escenarios y Resultados Aplicados en la Wikipedia en Inglés y Español.....	74
5.1.3. Escenarios y Resultados para el Análisis y Verificación del Modelo Emocional Propuesto para MASOES.....	81
5.2. Desarrollo del Software Libre.....	87
5.2.1. Modelado de la Comunidad del Kernel de Linux (CDKL) con MASOES...	88
5.2.2. Escenarios y Resultados Aplicados en la CDKL.....	99
5.3. Comportamiento Colectivo de los Peatones.....	105
5.3.1. Descripción Matemática del Modelo de Fuerza Social (MFS).....	105
5.3.2. Modelado del Comportamiento Colectivo de los Peatones con MASOES...	107
5.3.3. Escenarios y Resultados Aplicados al MFS.....	112
5.3.4. Posibles Extensiones al Método de Verificación para MASOES.....	115
Conclusiones y Recomendaciones.....	119
Referencias.....	124

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Hay actualmente un interés creciente en sistemas inspirados biológicamente, no solamente desde los investigadores, sino también desde la industria. Por ejemplo, según [1] el interés reciente de compañías como IBM, (como su programa de computación autónoma), o como Microsoft (como su iniciativa de sistemas dinámicos (“*Dynamic Systems Initiative*”, en inglés)) indica la importancia de la emergencia y auto-organización para gestionar recursos distribuidos y alcanzar una infraestructura dinámica que permita que los sistemas se auto-administren. Por otro lado, las aplicaciones futuras basadas en tecnología inteligente estarán disponibles en ropas, paredes, y en general en el ambiente, y las personas podrán libremente utilizarlas. Además, estas aplicaciones, por su naturaleza empotrada¹, ubicua² y a gran escala³, exhiben características emergentes y auto-organizadas debido a la alta densidad de elementos e interacciones entre ellos, lo que podría ganar en robustez y adaptabilidad si son programadas y consideradas como sistemas auto-organizados y emergentes desde su concepción.

Ahora bien, cuando hablamos de diseñar e implementar sistemas emergentes y auto-organizados, los sistemas multiagente surgen como una herramienta ideal para modelar estos tipos de sistemas según [1, 2, 3, 4], ya que en los sistemas multiagente un número de agentes se agrupan y forman sociedades de agentes, tal que estos últimos trabajan juntos para resolver problemas que van más allá de sus capacidades individuales. Un agente se comunica directa o indirectamente con los otros agentes para propósitos de cooperación o competición. Usualmente, en un sistema multiagente las dinámicas de interacción entre los agentes y/o con el

¹ Un sistema embebido o empotrado es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones en tiempo real y además, la mayoría de sus componentes se encuentran incluidos en una placa base [5].

² Adj. Que está presente a un mismo tiempo en todas partes, omnipresente [6]. Se entiende por computación ubicua la integración de la informática en el entorno de la persona, de forma que los ordenadores no se perciban como objetos diferenciados. Algunos autores la han denominado inteligencia ambiental [7], aunque ese término es usado por otros autores más ampliamente.

³ Aplicaciones distribuidas de gran tamaño como Internet, aplicaciones de monitoreo industrial, entre otras [8].

entorno no son predefinidas y conducen a una estructura o funcionalidad emergente en el sistema multiagente, sin que ningún componente del mismo sea responsable por si solo de alcanzar un objetivo global, sino que la comunidad coadyuva a alcanzar el mismo. Para todo esto, los agentes necesitan tener habilidades sociales y un comportamiento interactivo que les permita comunicarse, coordinarse, cooperar y negociar entre ellos de manera dinámica. De esta manera, con los sistemas multiagente es posible modelar sistemas que tengan una alta densidad de agentes, que trabajen de manera descentralizada basado en sus interacciones locales, y con un comportamiento emergente que favorezca su adaptación frente a situaciones cambiantes.

Así, este trabajo está dedicado al modelado multiagente de sistemas emergentes y auto-organizados. Este capítulo describe el problema planteado, los antecedentes, los objetivos, la importancia de este trabajo, y una breve descripción de lo que se presentará en los próximos capítulos.

1.1. Planteamiento del Problema

La naturaleza provee muchos ejemplos de emergencia y auto-organización. Muchos sistemas naturales muestran una estructura u organización a nivel macro. Ejemplo de tales sistemas incluyen galaxias, sistemas planetarios, células, organismos y sociedades. Hay diferentes mecanismos que permiten a esas organizaciones naturales y sociales alcanzar un comportamiento global coherente.

Por otro lado, algunas aplicaciones distribuidas actuales ya muestran un comportamiento emergente y auto-organizado, ya que están situadas en entornos altamente cambiantes, están compuestas por un gran número de componentes heterogéneos sin un control central sobre ellos, y de las interacciones de sus componentes emergen sus capacidades adaptativas (por ejemplo, aplicaciones para seguridad y gestión de redes, robótica distribuida, sistemas de control de manufactura, infraestructuras para procesos de negocios, entre otras).

Otro ejemplo interesante es la Web. La Web ha hecho posible el surgimiento de un nuevo modelo de producción de conocimiento construido alrededor de una “arquitectura de participación” [9]. Muchas aplicaciones sobre la Web explotan la posibilidad de obtener contribuciones pequeñas, a muy bajo costo, de un gran y diverso grupo de colaboradores, para producir productos y servicios de información. Este modelo de producción está basado en una forma de emergencia y auto-organización social muy diferente de la manera centralizada de los sistemas de control [10].

Comprender los sistemas ejemplificados en los párrafos anteriores es importante para entender cómo pequeñas contribuciones locales pueden resolver problemas de gran complejidad, cómo se coordinan y auto-organizan miles de

colaboradores, entre otras cosas. Con el objeto de afrontar tales cuestiones, el enfoque de modelado multiagente puede ser utilizado. Así, cada uno de estos sistemas sería visto como una sociedad de agentes que interactúan con el objetivo de cooperar de forma autónoma, tal que el sistema multiagente tendría un comportamiento macroscópico derivado de las interacciones locales de sus agentes (en esta escala macro, el comportamiento colectivo del sistema es lo que importa). El modo flexible en el que los agentes operan e interactúan (con otros de su entorno), los hace ideales para el modelado de escenarios dinámicos y no predecibles.

Para que los agentes dentro de un sistema multiagente (SMA) emergente y auto-organizado alcancen sus objetivos, necesitan gestionar problemas dinámicos (por ejemplo: variación en el número de agentes, aparición/desaparición de agentes con diferentes tipos de comportamientos, cambios en el entorno y en las metas individuales y colectivas, entre otros). Ahora bien, gracias al área de inteligencia colectiva se han dado, si se quiere, los primeros pasos en intentar solucionar esta problemática; sólo que se ha centrado en SMA compuestos de agentes reactivos.

Considerando que con las tecnologías actuales y emergentes, tales como la computación ubicua y la Internet, hay una tendencia clara hacia el uso de sistemas emergentes y auto-organizados, los SMA pueden jugar un rol fundamental en las tareas de diseño, estudio, implementación y mantenimiento de tales sistemas, para dar respuestas a los nuevos requerimientos que surjan. En ese sentido, tenemos que el tema central de esta investigación es la propuesta de un modelo multiagente para diseñar y analizar sistemas emergentes y auto-organizados.

1.2. Antecedentes

Considerando que este estudio está centrado en el modelado multiagente de sistemas emergentes y auto-organizados, veremos brevemente algunos trabajos que muestran las tendencias y uso de los sistemas multiagente para generar un comportamiento emergente y auto-organizado en el área de la Inteligencia Colectiva. Finalmente, se presentan algunos trabajos que plantean metodologías orientadas a agentes para modelar sistemas emergentes y auto-organizados

Actualmente existen algunos trabajos que señalan algunos requerimientos que deben ser considerados para desarrollar algún modelo multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados en proyectos ingenieriles, entre estos tenemos [1, 2, 3, 4]. En estos trabajos se explica cómo las propiedades inherentes a un SMA pueden ser utilizados como herramienta prominente para modelar sistemas complejos, y sus comportamientos emergentes y auto-organizados, imitando algunos mecanismos auto-organizativos naturales tales como: el sistema inmune, las neuronas, o el paradigma estigmérgico (basado en la interacciones indirectas)

de las sociedades de insectos. Esos trabajos mencionan las características de un sistema emergente y auto-organizado que deben ser modeladas en un SMA (por ejemplo, alta conectividad entre las partes, flexibilidad, descentralización, interacciones locales, entre otras), para asegurar un comportamiento adaptativo y darle robustez al sistema. Además, en [3] se plantean ciertos requerimientos a nivel de diseño y validación que deberían ser tomados en cuenta en el desarrollo futuro de propuestas, por ejemplo, las especificaciones de adaptación a partir del espacio posible de configuraciones del sistema (conjunto de estados posibles del sistema en términos del número de roles e individuos), o la dinámica de adaptación que defina cómo se espera que el sistema ejecute las transiciones entre los estados macroscópicos. Con respecto a la validación, proponen el diseño de casos de uso de sistemas emergentes y auto-organizados para validar cada requerimiento en el prototipo que se realice.

Entre los trabajos que podemos mencionar que utilizan auto-organización e interacción indirecta para alcanzar un comportamiento emergente y auto-organizado en los SMA están [11, 12, 13, 14, 15]. En [11, 12, 14] se diseña un sistema de control de manufactura (productos, recursos y ordenes) basado en agentes usando interacciones indirectas como mecanismo de coordinación, a través de un campo disipativo basado en feromona imitando la manera en que trabajan los insectos sociales para coordinar sus comportamientos. Con respecto a la robótica multiagente también encontramos trabajos como [13, 15], que muestran el uso de la inteligencia colectiva para, por ejemplo, coordinar un equipo de robots en ambientes inciertos para el alcance de sus objetivos. En esos trabajos se desarrollan soluciones a tareas colectivas con comportamientos simples de los agentes, a través de un control descentralizado y una coordinación dinámica de las actividades a través del entorno.

En cuanto a las metodologías orientadas a agentes existentes para modelar sistemas emergentes y auto-organizados, según [16], actualmente se han enfocado en manejar solo los aspectos microscópicos, tales como: los agentes, la forma como interactúan y reglas, sin explícitamente manejar el comportamiento macroscópico requerido y la gestión del conocimiento individual y colectivo involucrado. Existen algunos trabajos [17, 18, 19] que conscientes de esto, han realizado algunos aportes a este respecto, tal como [18] donde se describe una metodología general que consta de un vocabulario para describir sistemas auto-organizados, un mecanismo de control basado en restricciones (mediadores) del comportamiento de los agentes para tratar de incrementar la satisfacción del sistema, promoviendo la sinergia entre los elementos y reduciendo la fricción (conflictos) que puede resultar de la competición por recursos limitados, entre otras cosas. En [19] también se presenta una metodología para el diseño de

sistemas auto-organizados ingenieriles, basado en procesos unificados⁴. El desarrollo de soluciones es llevado a cabo por medio de la incorporación de variables macroscópicas que describen el comportamiento macroscópico, y el ajuste o calibración de ciertos parámetros claves dentro del sistema. Estas variables macroscópicas representan las propiedades emergentes que el sistema exhibe a nivel macro. Además, según sus mismos autores, aún falta mucho trabajo por hacer para que esta metodología pueda ser utilizada, por ejemplo, se requiere antes el diseño de directrices, herramientas y modelos, así como también, una guía para la elección de las variables macroscópicas. Finalmente, podemos mencionar ADELFE [17], metodología para el diseño de sistemas adaptativos a través de agentes cooperativos. Esta metodología intenta generar auto-organización considerando que las interacciones entre los agentes dependerán de su visión local y de su habilidad para cooperar entre ellos. Es un ajuste del proceso unificado racional (“*Rational Unified Process*”, en inglés) que utiliza el lenguaje de modelado unificado (“*Unified Modeling Language*”, en inglés) como notación. En ADELFE, las fallas de cooperación (llamadas situaciones no cooperativas (SNC)) y los procedimientos para que los agentes se recuperen de éstas deben ser definidas a priori, ya que cuando un agente se encuentre en una SNC tal como conflicto, concurrencia, etc., el agente debe regresar a un estado cooperativo, y de esta manera se auto-adapta permanentemente a las situaciones impredecibles que se produzcan mientras aprende de los otros. En este sentido, la adaptación será gestionada por los agentes a través de un modelo de SNC, ya que la auto-organización se basa en la capacidad que un agente posee para ser cooperativo a nivel local, esto no quiere decir que siempre tiene que ayudar a los demás sino sólo que es capaz de reconocer las fallas de cooperación, tratarlas y recuperarse de ellas a través del modelo de SNC, para volver a un estado cooperativo.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados.

Objetivos Específicos

- I. Investigar los aspectos teóricos relacionados a la auto-organización y emergencia en las áreas de Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) e Inteligencia Colectiva.

⁴ Marco de desarrollo de software que se caracteriza por estar dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura, y por ser iterativo e incremental. El refinamiento más conocido y documentado del Proceso Unificado es el Proceso Unificado de Rational o simplemente RUP [20].

- II. Estudiar las arquitecturas, modelos y marcos de referencia (“framework”) de sistemas multiagente emergentes y auto-organizados desarrollados hasta el momento.
- III. Definir un modelo multiagente que permita caracterizar un sistema emergente y auto-organizado.
- IV. Especificar una metodología de uso del modelo multiagente propuesto para describir un sistema emergente y auto-organizado.
- V. Desarrollar un método de verificación para el modelo multiagente propuesto.
- VI. Aplicar el modelo multiagente propuesto en diversos casos de estudio en diferentes contextos, para comprobar su utilidad.

1.4. Justificación e Importancia

Cada vez más, los que trabajan en SMA centran sus esfuerzos en como modelar e implementar sistemas descentralizados que generen un comportamiento emergente, como es observado en la naturaleza para la resolución de problemas, para combatir la complejidad y superar las dificultades en la escalabilidad de los mecanismos centralizados de coordinación.

Por otro lado, el área de inteligencia colectiva se inspira en el comportamiento de las sociedades de insectos para estudiar los sistemas emergentes y auto-organizados. Este comportamiento entre agentes reactivos está basado en la realización de reglas muy sencillas que se encuentran en todos los agentes de una sociedad, pero que, contribuyen a la generación de un comportamiento complejo partiendo de las simples interacciones locales de ellos. Inspirados en lo anterior, hoy en día existen trabajos que intentan generar un comportamiento emergente y auto-organizado, pero son sólo aplicables a los SMA donde todos los agentes sean reactivos, y no son aplicables sobretodo en el modelado de sistemas sociales humanos que requieren agentes que puedan ejecutar comportamientos mucho más complejos.

A nivel de los SMA es aconsejable tener formalismos que permitan modelar y estudiar sistemas complejos, que puedan adaptarse dinámicamente a su entorno, y permitan la emergencia de estructuras y la auto-organización del SMA. Además, es necesario tener la posibilidad de diseñar SMA como un conjunto de agentes homogéneos o heterogéneos, que trabajen de manera descentralizada, con diferentes tipos de comportamiento, que cambien dinámicamente su comportamiento, y por supuesto, que consideren los componentes a nivel individual y colectivo y los mecanismos esenciales para generar un comportamiento emergente y auto-organizado a nivel macro, entre otras cosas.

En ese sentido, MASOES intenta dar respuesta a estas necesidades proveyendo una arquitectura multiagente para diseñar, modelar y estudiar sistemas emergentes y auto-organizados. En esta arquitectura se describen los elementos, las relaciones y los mecanismos, tanto a nivel individual como colectivo, que determinan la emergencia y los fenómenos auto-organizativos en un sistema, sin modelar matemáticamente el sistema, considerando, tanto los aspectos macroscópicos como microscópicos de un sistema, y gestionando el conocimiento generado tanto a nivel individual como colectivo. También, MASOES permite a los agentes tener diferentes tipos de comportamientos (reactivo, imitativo y cognitivo), y cambiarlos dinámicamente de acuerdo a su estado emocional. Para ello, propone un modelo afectivo con diferentes tipos de emociones, positivas y negativas, generadas a partir del grado de satisfacción y activación del agente. De esta manera, MASOES posibilita modelar sistemas sociales de agentes homogéneos y/o heterogéneos, con comportamientos complejos mucho más reales. MASOES es instanciado en varios casos de estudio: Wikipedia, Desarrollo del Software Libre y el Comportamiento Colectivo de los Peatones. Con la idea de comprobar los modelados realizados con MASOES, también se define en este trabajo un método de verificación, que permite, a través de los mapas cognitivos difusos, analizar y evaluar los criterios de verificación establecidos entorno a la emergencia y auto-organización del sistema modelado con MASOES.

Por otra parte, para complementar el estudio de los sistemas emergentes y auto-organizados se ha estudiado el flujo de grupos de peatones a nivel experimental, cuyos resultados son utilizados en uno de los casos de estudio modelados con MASOES. Este estudio experimental es realizado en el Centro de Investigaciones sobre la Cognición Animal (CRCA-Université Paul Sabatier (UPS), Francia), gracias al apoyo financiero del Programa Alban para realizar estudios doctorales en cotutela Venezuela-Francia. Para esto, se han utilizado métodos y herramientas de la etología⁵ para llevar a cabo los experimentos y analizar los datos. Así, con la ayuda de estas herramientas ha sido posible cuantificar los comportamientos individuales de los peatones en relación con las características del entorno, la importancia del flujo, y la información disponible a los sujetos (instrucciones, la información dispersa en el entorno). Nuestras observaciones se han realizado en ambientes naturales, a partir de las cuales se está elaborando un modelo matemático del fenómeno.

⁵ Durante mucho tiempo, la etología ha desarrollado una serie de técnicas destinadas a la observación y cuantificación (por ejemplo, el análisis de imágenes de vídeo y el uso de cuadrículas de comportamiento) que objetivamente tienen en cuenta los comportamientos individuales, así como las interacciones de los sujetos con su entorno.

1.5 Organización de la Tesis

En el capítulo 1 se describe el problema planteado y los objetivos de esta investigación, su importancia, y los trabajos ya realizados sobre sistemas emergentes y auto-organizados en el área de inteligencia artificial distribuida (IAD) e inteligencia colectiva.

En el capítulo 2 se establecen algunos aspectos teóricos relacionados a la IAD, específicamente en relación a los SMA e inteligencia colectiva. Por otra parte, se detallan otros aspectos referentes a la auto-organización y emergencia, y finalmente, sobre la computación emocional, ya que se propone un modelo emocional para los agentes en el capítulo 3.

En el capítulo 3 se propone una arquitectura multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados, llamada MASOES (“*Multiagent Architecture for Self-Organizing and Emergent Systems*”, por sus siglas en inglés), para modelar sistemas emergentes y auto-organizados. También se especifica una metodología para el modelado de sistemas emergentes y auto-organizados a través de MASOES. Finalmente, se propone un modelo emocional para que los agentes puedan cambiar dinámicamente su comportamiento de acuerdo a su estado emocional.

En el capítulo 4 se desarrolla un método para verificar el comportamiento emergente y auto-organizado de un sistema modelado con MASOES. Para ello, se describen algunos aspectos relacionados al paradigma de la sabiduría de las multitudes (“*Wisdom of Crowds*”) y a los mapas cognitivos difusos, ya que se utilizan para la definición del método propuesto. También se plantean los criterios de verificación y los mapas cognitivos difusos a utilizar. Finalmente, se explica cómo usar el método de verificación.

En el capítulo 5 se desarrollan algunos casos de estudio, a fin de verificar la utilidad de MASOES, a través de la instanciación de diversos sistemas: Wikipedia, desarrollo del software libre (comunidad del kernel de linux), y el comportamiento colectivo de los peatones. El caso de estudio que se refiere al comportamiento colectivo de los peatones es realizado utilizando los resultados obtenidos en un estudio experimental sobre los desplazamientos colectivos de los peatones en el Centro de Investigaciones sobre la Cognición Animal (CRCA-*Université Paul Sabatier*, France). Cada caso de estudio es modelado a través de MASOES. Luego, se diseñan algunos escenarios y se aplica el método de verificación. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo, basado en las propuestas realizadas y los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta una visión general sobre los aspectos teóricos más relevantes de las diversas áreas de interés para este trabajo, tales como: la inteligencia artificial distribuida, la inteligencia colectiva, la auto-organización y emergencia en los sistemas multiagente, y para finalizar, la computación emocional.

2.1. Inteligencia Artificial Distribuida (IAD)

Los sistemas distribuidos han ganado importancia en los últimos años, debido por una parte, al incremento de los recursos disponibles en las redes (cada vez más rápidas y extensas), y por otra parte, a la gran capacidad de cálculo que tienen los nodos de dichas redes. Esta situación ha favorecido la distribución de las aplicaciones, y con esta distribución han aparecido nuevos servicios y productos. La Inteligencia Artificial (IA) no ha sido ajena a esta evolución, dando una nueva dimensión a las soluciones dadas a problemas existentes [21].

Dicha distribución, según [21], ha dado lugar a la IAD, como un subcampo de la IA que se encarga del estudio y el modelado de las acciones y el conocimiento de sistemas colaborativos. A su vez, la IAD se divide en dos áreas de estudio; la *Resolución de Problemas Distribuidos* (RPD) y los *Sistemas Multiagente* (SMA). La RPD considera que un problema puede ser dividido en varios módulos, o nodos, que cooperan y comparten el conocimiento de que disponen, quedando toda la interacción entre los nodos prefijada en tiempo de diseño como parte integrante del sistema. Por otra parte, un SMA se puede definir como una red de solucionadores de problemas (agentes) con un nivel muy bajo de acoplamiento, que trabajan conjuntamente, lo que posibilita que se enfrenten a problemas más complejos que los abordables de forma individual.

Debido a que en este trabajo se hace uso de los SMA, vamos a detallar a continuación algunos aspectos teóricos claves al respecto.

2.1.1. Sistemas Multiagente

La teoría de agentes puede ser vista como una evolución de la inteligencia artificial en la búsqueda de aportar autonomía a los sistemas computacionales. De hecho, aun cuando la definición de agente ha sido

motivo de un amplio debate entre la comunidad de investigación de la IAD, existe el acuerdo de que la autonomía es la característica principal que describe a un agente, entendiendo como autonomía la capacidad del agente de actuar sin la intervención de un usuario o de otro sistema. Una definición de agente ampliamente aceptada es citada por [22]: “*Un agente es un sistema computacional que está situado en un ambiente, y que es capaz de tomar acciones autónomas en ese ambiente con el fin de cumplir sus objetivos de diseño*”. Así, los agentes inteligentes, además de atributos y métodos (propiedades del paradigma de orientación por objetos), poseen creencias, deseos e intenciones que los vinculan con su entorno, y les proveen estados mentales de los cuales depende su comportamiento. Cada agente posee una serie de propiedades, entre las que se cuentan movilidad, racionalidad, reactividad, sociabilidad, proactividad⁶, y por supuesto, autonomía. Además, pueden estar dotados de mecanismos de razonamiento que les permiten abordar situaciones de manera inteligente y evolucionar por medio de la experiencia. En ese caso, los agentes se denominan “*agentes inteligentes*”. La interpretación e implementación de las características de los agentes puede significar la diferencia en el logro de las metas propuestas. La integración de diversas disciplinas y áreas de investigación que convergen en ese concepto coherente, brinda posibilidades reales de solución a problemas complejos. Veamos en detalles algunas propiedades [22, 23]:

Autonomía. Los agentes pueden tener sus propias motivaciones a partir de sus objetivos. Sin embargo, podrían depender de la ayuda o colaboración de otros agentes, lo cual pone límite a su autonomía [23]. Según varios autores, la autonomía es la principal característica de los agentes. Weiss, en su libro “*Multiagent Systems*”, dice [22]: “*autonomía es la noción central de agencia*”, esto lo argumenta diciendo que los agentes son autónomos en la medida en que actúan sin la intervención humana ni de otros sistemas externos. Se puede dar una noción general de autonomía, definiéndola como la capacidad que tiene un agente de tener un comportamiento propio, y reaccionar a los estímulos externos basándose en su estado interno.

Comunicación. La capacidad de cada agente de conversar utilizando un lenguaje basado en ontologías⁷ y realizar intervenciones asíncronas, constituye un paso adelante en llevar el concepto real de conversación al ámbito computacional. Para comunicarse los agentes realizan intervenciones, traducidas en mensajes compuestos por un sobre y un contenido, el sobre especifica los datos del agente emisor, datos de

⁶ Capacidad del agente de tomar la iniciativa dependiendo de sus metas y objetivos [22].

⁷ Una ontología es una colección de conceptos, predicados, secuencias, términos y relaciones entre estos elementos, que son entendibles por una sociedad de agentes [22].

los agentes receptores, y los datos de la intervención, tales como el lenguaje, la ontología y el protocolo utilizado. El contenido incluye dos partes: una *performativa* que indica la acción general del mensaje, y una *frase compuesta* por elementos pertenecientes a la ontología usada, que indica sobre que aspectos habla la performativa. Cada agente comprende esta intervención, en consecuencia afecta su estado interno, y eventualmente reaccionará con un conjunto de intervenciones. Existe otro tipo de comunicación, que es indirecta. Este tipo de comunicación deriva de las investigaciones en inteligencia artificial, específicamente de las sociedades de insectos, y está basada en variables compartidas por todos los agentes y por mediciones del ambiente donde estos se desenvuelven [24].

Movilidad. Es la habilidad del agente de moverse en el ambiente. Esta capacidad posibilita una computación menos centralizada y más distribuida. Un agente puede alojarse en cualquier nodo y realizar sus tareas utilizando los recursos locales, para después volver a su nodo origen llevando la información procesada. Este tipo de comportamiento ahorra ancho de banda, ya que no se trasmite la información intermedia que se genera cuando se solicita un servicio remoto. Otra ventaja de los agentes móviles es que pueden moverse por una red pequeña, mediana, o incluso a través de Internet, visitando nodos distantes geográficamente.

Racionalidad. Los agentes pueden tener un conjunto de objetivos predefinidos, y emprenden acciones para conseguirlos. La decisión de cual acción seguir y en que momento hacerlo es definida según un principio de racionalidad, es decir, prefieren la acción más prometedora o eficiente para conseguir sus metas.

Inteligencia. Generalmente, la cualidad de inteligencia es asociada directamente con el concepto de agente. Debido a que un agente debe analizar, ordenar ideas y conocimiento sobre el entorno para llegar a una conclusión, y tomar una acción de forma autónoma, es necesario implementar esta característica utilizando alguna tecnología o técnica computacional, para lo cual generalmente se utilizan técnicas inteligentes [22]. Los sistemas expertos es la técnica predilecta para imprimir inteligencia a los agentes, ya que permiten a través de un conjunto de reglas finitas, las cuales pueden estar asociadas a variables del ambiente, llegar a una conclusión que genere o inhibe a una determinada acción. Esto encaja con la noción de inteligencia que se les atribuye a los agentes; pero no es la única técnica que puede ser utilizada cuando se diseñan SMA. El paradigma basado en agentes nace como una extensión de la inteligencia artificial, y no como un caso particular de los sistemas expertos. Se

pueden utilizar un conjunto variado de técnicas inteligentes en la construcción de agentes, entre las cuales se pueden nombrar a las reglas difusas para analizar situaciones dinámicas, las redes neuronales para predecir comportamientos y variables del ambiente, las colonias de hormigas como una técnica de coordinación entre agentes, y los algoritmos genéticos como método de búsqueda, entre otros. En la medida en que se integren más técnicas inteligentes a la construcción de agentes, se logrará un acercamiento más certero a la característica inteligente de los agentes.

Razonamiento. Algunos autores asocian a la idea de inteligencia la capacidad de razonar. Esa capacidad se refiere a que un agente puede decidir qué objetivo perseguir o a qué evento reaccionar, cómo actuar para conseguir un objetivo, o suspender o abandonar un objetivo para dedicarse a otro [25]. Es decir, es la capacidad de ordenar ideas con el fin de concluir algo.

Reactividad. Los agentes perciben su entorno respondiendo a los cambios que ocurren en él. La capacidad de emitir una acción inmediata al recibir una señal o percibir un estado en el ambiente, es lo que caracteriza a los agentes reactivos. Los agentes, por lo general, no reaccionan de inmediato, ya que deben procesar la información y “pensar” sus acciones. La reactividad en los agentes posibilita acciones rápidas, cruciales en sistemas de tiempo real, que no ameritan aplicar reglas complejas [22].

Sociabilidad. Los agentes interactúan con otros agentes mediante algún tipo de comunicación y convenios colectivos. Esta capacidad está muy relacionada con el aspecto comunicacional, ya que la comunicación juega un papel importante en la eficiencia de las sociedades de agentes. Una sociedad de agentes es un grupo de agentes que interactúan, se comunican, conversan, “piensan” y actúan en conjunto para lograr un objetivo común. En este sentido, varios autores han sugerido un conjunto de protocolos basados en esquemas utilizados por las sociedades de humanos. Por ejemplo, uno de los más populares es el Contract-Net [26], que tiene como finalidad establecer una relación de contrato entre dos o más agentes. Este protocolo consiste en que un agente “iniciador” envía un mensaje a un grupo de agentes demandando un servicio, y cada agente receptor puede enviar una propuesta o un mensaje rechazando la demanda del servicio. El agente iniciador evalúa cada una de las propuestas y escoge un ganador, con el cual se establece un contrato de servicio. Así como este protocolo, existen otros orientados a subastas y bolsas bursátiles, entre otros, que intentan imitar conductas grupales que llevan al logro de objetivos específicos.

Existen otras cualidades que se les atribuyen también a los agentes, tales como cooperación, colaboración, competencia, proactividad, entre otras, que se consideran muy relacionadas con las explicadas anteriormente. Por ejemplo, la colaboración y la competencia son esquemas de la sociabilidad de los agentes, y la proactividad está estrechamente ligada con la autonomía de los agentes.

Por otro lado, según [27] existen características representativas de los SMA, interesantes para realizar cualquier estudio a nivel de los sistemas complejos actuales:

- **Modularidad.** En los SMA, una distinción lógica es hecha entre los módulos y sus interacciones. Módulos particulares (entidades, subsistemas) de un sistema son representados por los agentes respectivos. Dependiendo de la granularidad del modelo, cada uno de esos módulos puede estar compuesto de módulos más pequeños. Es diferente desde un punto de vista monolítico, que trata al sistema como un todo. Un punto de vista modular permite la reconfiguración y extensibilidad del SMA de una manera más fácil.
- **Redundancia.** Un SMA consiste generalmente de un gran número de agentes, muchos de ellos similares en función y diseño. Esto significa, por un lado, que las instancias críticas no son representadas por un solo agente, y por otro lado, que el sistema no se cae si un agente falla de alguna manera, brindándole robustez al sistema.
- **Descentralización.** Un SMA no es regido por un control centralizado. En lugar de eso, las competencias y capacidades, entre otras cosas, son distribuidas entre los diversos agentes. Esto les permite “crear” un control “*bottom-up*”, de una manera auto-organizada, como resultado de la interacción entre los diferentes agentes.
- **Comportamiento Emergente.** En un SMA, la interacción entre los agentes puede producir un comportamiento nuevo (y estable) en el nivel global de todo el sistema. Esto representa una nueva cualidad que resulta del comportamiento agregado de los agentes, y por lo tanto, no puede ser reducido a los agentes individuales. Además, debido a los efectos no lineales, es frecuentemente difícil predecir las propiedades emergentes del sistema a partir de las propiedades individuales.
- **Funcionalidad.** Aunque cada agente puede tener sus propias funciones (o “comportamientos”), la funcionalidad del sistema como un todo, por ejemplo, la resolución de un problema, no es asignado a

agentes específicos sino que resulta de la interacción de los diferentes agentes.

- **Adaptación.** La modularidad, la descentralización y la funcionalidad emergente son las bases para que el SMA se adapte a situaciones cambiantes. Aquí el exceso de capacidad provista por los agentes redundantes pueden jugar un rol importante también. Como en la evolución natural, esta asegura una reserva que puede ser utilizada en situaciones imprevistas, es decir, para la exploración de nuevas posibilidades u oportunidades, sin perder la funcionalidad del sistema. La adaptación (algunas veces llamada aprendizaje colectivo) también necesita que el sistema pueda olvidar/desaprender sus viejos estados, e interacciones, entre otras cosas, para adaptarse a nuevas situaciones. Esto se da, por ejemplo, a través del refuerzo y evaporación de la feromona utilizado en los sistemas basados en el comportamiento de las colonias de hormigas, o en los mecanismos de recompensa y castigo en los sistemas colaborativos, entre otros.

Dependiendo de la manera de abordar la construcción del agente, existen algunas arquitecturas clásicas o comunes, tales como [28]:

- **Las Arquitecturas Reactivas.** Proponen un enfoque conductista, siguiendo un modelo estímulo-respuesta, y están formadas generalmente por agentes puramente reactivos.
- **Las Arquitecturas Deliberativas.** Contiene un modelo del mundo simbólico y explícitamente representado. La toma de decisiones se realiza por medio de razonamiento simbólico. Está formada por agentes basados en metas o en la utilidad.
- **Las Arquitecturas Híbridas.** Surgen desde los años 90, a partir de numerosas alternativas que intentan combinar lo mejor de las arquitecturas deliberativas y reactivas.

2.2. Inteligencia Colectiva

Según [29], la inteligencia de enjambre (“*Swarm Intelligence*”, en inglés), o también llamada inteligencia colectiva, es un campo de investigación científica, multidisciplinaria, que se interesa en los procesos distribuidos (no supervisados) de una organización, y como este modelo está presente en un cierto número de sociedades animales para resolver problemas complejos en ellas [30]. Este campo ha propuesto un gran número de sistemas artificiales bio-inspirados para diferentes cosas: *resolver problemas de optimización, coordinación de robots, auto-ensamblaje, organización de bases de datos, protección de virus*, entre otras [31, 32]. Este

término aparece por primera vez en el año 1989 en las publicaciones de Benis Hackwood y Wang [33] sobre los sistemas de robótica celular. Posteriormente en 1999, Bonabeau, Dorigo y Theraulaz presentan en [29], la concepción de algoritmos de resolución distribuida de problemas inspirados por el comportamiento colectivo de las colonias de insectos sociales y de otras sociedades animales, que ha inspirado diversas aplicaciones.

Según [30], los comportamientos colectivos mostrados por las colonias de insectos se pueden categorizar de acuerdo a cuatro funciones que emergen a nivel de la colonia y que organizan su comportamiento global. Estas funciones son: *coordinación, cooperación, deliberación y colaboración*. Así, estas funciones apoyan el procesamiento de información de la colonia de acuerdo a dos ejes principales:

- I. La coordinación y colaboración forman estructuras sociales, temporales y espaciales que resultan del trabajo de la colonia. La coordinación regula la densidad espacio-temporal de los individuos mientras que la colaboración regula la asignación de sus actividades.
- II. La cooperación y deliberación provee herramientas para que la colonia pueda enfrentar los retos ambientales. La deliberación permite los mecanismos que apoyan las decisiones de la colonia, mientras la cooperación representa los mecanismos que superan las limitaciones individuales.

Las estructuras complejas a nivel de colonia, y muchos aspectos de la llamada inteligencia de enjambre de los insectos sociales, pueden ser comprendidos en término de redes de interacción y ciclos de retroalimentación entre los individuos. Estos son los elementos básicos que permiten la emergencia de patrones dinámicos a nivel de la colonia. Estos patrones pueden ser *materiales* (como el agrupamiento de cadáveres y construcción de nidos) o *sociales* (como la división de tareas), y conducen a la colonia a estructurar su entorno (por ejemplo, la construcción de nidos) o a resolver problemas (por ejemplo, tomar decisiones colectivas) [30]. Los sistemas realizados bajo el enfoque de la inteligencia colectiva se caracterizan por exhibir características que hacen a las sociedades de insectos exitosas en su entorno, tales como: flexibilidad, robustez, control descentralizado y auto-organización. Particularmente, cuando hablamos de inteligencia colectiva debemos tratar dos aspectos claves [29]: *la auto-organización y la interacción indirecta*.

- a. **Auto-Organización.** Según [34], la auto-organización en este tipo de sistemas *es un proceso en el que el patrón (arreglo organizado particular de objetos en espacio o tiempo) en el nivel global de un sistema emerge solamente de las interacciones numerosas entre los componentes de nivel inferior del sistema*. Por otra parte, las reglas que especifican las interacciones entre los componentes del sistema se ejecutan usando solamente información local, sin

referencia al patrón global. Por ejemplo, las estructuras emergentes en el caso de la búsqueda de comida (forrajeo) en las hormigas incluyen redes organizadas espacial y temporalmente de rastros de feromona (sustancia química excretada por algunos animales que influye en el comportamiento de los de su misma especie). La esencia de la auto-organización es que un sistema adquiere una estructura espacial, temporal o funcional sin interferencia específica del exterior. La organización puede desarrollarse en el tiempo o en el espacio, puede mantenerse en una forma estable, o puede mostrar fenómenos transitorios. La característica principal de estos sistemas auto-organizativos es su capacidad de lograr tareas colectivas complejas con comportamientos individuales simples, sin un control central o estructura jerárquica. Esta capacidad para resolver problemas complejos se debe al **comportamiento emergente** (un comportamiento nuevo y estable) que es producido por el sistema y, que es más complejo que el comportamiento de componentes individuales del sistema.

La auto-organización requiere de cuatro insumos [29]:

- **Retroalimentación Positiva.** Está constituida por reglas de comportamiento simple que promueven la creación de estructuras. Por ejemplo, el reclutamiento y el reforzamiento realizado en las hormigas a través del rastro dejado por la feromona, o por la danza en el caso de las abejas.
- **Retroalimentación Negativa.** Permite el equilibrio con la retroalimentación positiva y ayuda a estabilizar el patrón colectivo: puede tomar la forma de saturación, agotamiento o competición. En el ejemplo de forrajeo, la retroalimentación negativa proviene del número limitado de hormigas disponibles, agotamiento de la fuente de alimento, multitud en la fuente de alimento, o competición entre las fuentes de alimento.
- **Amplificación de las Fluctuaciones (Aleatoriedad).** No sólo las estructuras emergen, a pesar de la aleatoriedad, sino que la aleatoriedad es frecuentemente crucial ya que permite el descubrimiento de nuevas soluciones que pueden actuar como semillas para que nuevas estructuras se desarrollen y se fortalezcan. Por ejemplo, una hormiga que se pierda siguiendo el rastro de sus compañeras. Aunque este fenómeno puede parecer ineficiente, esto favorece la exploración de nuevas áreas, y poder encontrar fuentes de alimento no explotadas.
- **Múltiples Interacciones.** Un simple individuo puede generar una estructura auto-organizada, tal como un rastro estable

provisto de un tiempo de vida feromonal suficiente. Sin embargo, la auto-organización generalmente requiere de una densidad mínima de individuos tolerantes mutuamente. Además, los individuos deben ser capaces de hacer uso de los resultados de sus propias actividades, como también de las actividades de los otros. Por ejemplo, redes de rastro pueden auto-organizarse y ser usadas colectivamente si los individuos usan la feromona de los otros.

Según [35], un enjambre está definido como la auto-organización útil de múltiples entidades a través de interacciones locales. En la tabla 1 se resumen algunos ejemplos de este comportamiento en la naturaleza.

Tabla 1. Algunos ejemplos de enjambres en la naturaleza [35]

COMPORTAMIENTO ENJAMBRE	ENTIDADES
Generación de patrones	Bacterias, Moho Fangoso
Formación de caminos	Hormigas
Organización de nidos	Hormigas
Transporte cooperativo	Hormigas
Selección de la fuente de alimentos	Hormigas, Abejas
Termo-regulación	Abejas
Asignación de tareas	Avispas
Construcción de colmenas	Abejas, Avispas, Avispones, Termitas
Sincronización	Luciérnagas, bancos de peces, bandadas de aves
Construcción de redes	Arañas
Cardumen "Schooling"	Peces
Bandadas "Flocking"	Aves
Asedio de presas "Prey Surrounding"	Lobos

- b. **Interacción Indirecta** ("*Stigmergy*", en inglés). En el caso de "Stigmergy", es un mecanismo de retroalimentación usado para reflejar las interacciones indirectas entre los agentes y el entorno.

Permite alcanzar formas emergentes de comportamiento coordinado a nivel de la sociedad [12]. Este concepto fue introducido por Grassé [20] en 1959. Grassé estudio el comportamiento de un tipo de termitas durante la construcción de sus nidos, y notó que el comportamiento de las obreras durante el proceso de construcción era influenciado por la estructura de las construcciones. Este mecanismo es un poderoso principio de cooperación en las sociedades de insectos. Ha sido observado dentro de muchas otras sociedades de insectos, como las avispas, abejas y hormigas [34]. Está basado en el uso del entorno como medio de inscripción de los efectos de comportamientos pasados, para influenciar el futuro. Se inspira en las investigaciones de algunas sociedades biológicas de insectos que han demostrado que se coordinan produciendo un campo disipante o de acción en su ambiente. Este mecanismo está basado en un proceso llamado auto-catalítico, que significa que mientras más ocurre un proceso mas posibilidad tiene de ocurrir en el futuro [1].

Un SMA necesita operar en ambientes heterogéneos y dinámicos, y debe ser capaz de manejar frecuentemente los cambios requeridos, por ello deben ser flexibles, robustos y adaptables a las circunstancias. Actualmente, muchas aplicaciones que requieren cierto grado de auto-organización y un comportamiento emergente son diseñadas bajo el enfoque de SMA que utilizan mecanismos de comunicación y coordinación basados en el comportamiento de algunas sociedades de insectos, para aprovechar, por un lado, las ventajas inherentes a los SMA, como: *autonomía, robustez, flexibilidad, reactividad, localidad, entre otras* [36, 22], y por otro lado, el comportamiento colectivo, auto-organizado y emergente de algunas sociedades de insectos.

Un agente estigmérgico es reactivo y utiliza intensamente el ambiente. Los principios de este enfoque son:

- Los agentes son simples, reactivos, e inconscientes de otros agentes o de las actividades complejas que emergen de la sociedad de agentes.
- El ambiente es un mecanismo importante para dirigir las actividades de estos agentes, y para acumular información sobre las actividades en curso de la sociedad entera de agentes.
- La coordinación de actividades a través de la comunicación directa es remplazada por interacciones indirectas que permiten tener agentes más simples y reducir los requerimientos de comunicación entre agentes.

Los beneficios de la inteligencia colectiva basada en el comportamiento de las sociedades de insectos son ilustrados por una variedad de modelos y aplicaciones descritas en [29, 34]. Estas aplicaciones incluyen el enrutamiento del tráfico de la red en sistemas de telecomunicaciones, problemas de transporte multi-robot, análisis y clasificación de datos, y búsquedas de soluciones aproximadas a problemas complejos computacionalmente, entre otras. Entre los diversos modelos existentes vamos a describir dos de los más utilizados:

I. Modelo de Agrupamiento y Clasificación. Diversas especies de hormigas agrupan los cadáveres para formar un cementerio y así, clasificar sus larvas en varias pilas. Hay un simple modelo que imita este comportamiento, donde los agentes se mueven aleatoriamente en el espacio, depositando y recogiendo elementos sobre la base de la información local. Este modelo puede ser utilizado para análisis de datos y partición de grafos. El mecanismo principal de este fenómeno de agregación es una atracción entre los elementos de un mismo tipo: agrupaciones pequeñas crecen atrayendo a las obreras a depositar más elementos. Esto es un proceso de retroalimentación positiva que conduce a la formación de grupos más y más grandes [29], en la tabla 2 se describe el algoritmo.

La idea es definir una distancia o disimilaridad d entre los objetos en el espacio de atributos. Por ejemplo, $d(O_i, O_j) = 0$ si O_i y O_j son objetos idénticos; y $d(O_i, O_j) = 1$ si O_i y O_j son objetos completamente diferentes. El algoritmo introducido por Lumer y Faieta consiste en proyectar el espacio de atributos hacia un espacio dimensional más pequeño, típicamente de dimensión $Z=2$, así que las agrupaciones tienen la siguiente propiedad: *las distancias intra grupos* (distancia de atributos entre objetos del mismo grupo) *deben ser pequeñas con respecto a las distancias inter grupos* (distancias de atributos entre objetos que pertenecen a diferentes grupos). Los agentes se están moviendo en un área S^2 , una vecindad cuadrada $S \times S$ de lugares alrededor de un radio r). Supongamos que un agente está localizado en un sitio r en el tiempo t , y encuentra un objeto O_i en ese sitio, podemos determinar $f(O_i)$ (función de similitud que determina que tanto un objeto es semejante a sus vecinos o no):

- a. Si todos los lugares alrededor de r están ocupados por objetos que son similares a O_i (para todo O_j que pertenece a su vecindad, $d(O_i, O_j) = 0$), entonces $f(O_i) = 1$, el objeto debe ser recogido con una baja probabilidad.

- b. Si todos los lugares alrededor de r están ocupados por objetos que no son similares a O_i (para todo O_j que pertenece a su vecindad, $d(O_i, O_j)=d_{max}$), entonces $f(O_i)$ es pequeño y el objeto debe ser recogido con una alta probabilidad.
- c. Si todos los lugares alrededor de r están vacíos entonces obviamente $f(O_i)=0$, el objeto debe ser recogido con una alta probabilidad.

La función $f(O_i)$ es mostrada en la tabla 2 (llamada también función de densidad). Además, se usan dos funciones de probabilidades, una para determinar si hay que recoger a un objeto (Pr), y otra para determinar si hay que depositar un objeto (Pd).

Tabla 2. Descripción del Algoritmo de Clasificación o Agrupamiento

	INICIO DEL ALGORITMO
Inicialización	REPITA PARA Cada Elemento O_i Colocar O_i aleatoriamente sobre el Grid FIN REPITA REPITA PARA Todos los Agentes Colocar el agente en un lugar seleccionado aleatoriamente en el grid bidimensional FIN REPITA
Ciclo Principal	REPITA DESDE $t=1$ HASTA $t_{maxpasos}$ REPITA PARA Todos los agentes SI (Agente_Desocupado) Y (Lugar_Ocupado_oi) Entonces Calcular $f(o_i)$ Y $Pp(o_i)$ Obtener aleatoriamente un valor real R (entre 0 y 1) SI $R \leq Pp(o_i)$ ENTONCES Recoger_oi SINO SI (Agente_Cargando_Oi) Y (Lugar_Vacio) Entonces Calcular $f(o_i)$ Y $Pd(o_i)$ Obtener aleatoriamente un valor real R (entre 0 y 1) SI $R \leq Pd(O_i)$ ENTONCES Depositar_oi FIN SI Moverse aleatoriamente en el grid a un lugar no ocupado por otro agente FIN REPITA /*Agentes*/ FIN REPITA /*Tiempo*/ Imprimir_Localización_Elementos
	FIN DEL ALGORITMO
Función de Densidad	$f(O_i) = \begin{cases} 1/S^2 \sum_{o_j \in \text{Vecindad}_{(S,S)}(r)} [1 - d(o_i, o_j)/\alpha] & ; \text{Si } f > 0 \\ 0 & ; \text{caso contrario} \end{cases}$ <p>$f(o_i)$ es una medida de la similitud del objeto o_i con los otros objetos o_j, α es una constante que define la escala de disimilaridad (importante para determinar si dos elementos deben o no estar localizados uno cerca del otro), S^2 representa el área de una vecindad circular $S \times S$ de lugares alrededor del radio r, y $d(o_i, o_j)$ la distancia.</p>
Probabilidades	De Recoger: $P_p(o_i) = [k_1 / (k_1 + f(o_i))]^2$ De Depositar: $P_d(o_i) = \begin{cases} 2 f(o_i) & ; \text{Si } f(o_i) < k_2 \\ 1 & ; \text{Si } f(o_i) \geq k_2 \end{cases}$ Donde k_1 y k_2 son constantes

II. Modelo de Optimización Basada en Colonia de Hormigas (ACO, “Ant Colony Optimization”, en inglés). ACO es un método basado en una población para resolver problemas de optimización combinatoria (POC) [29, 37]. Está inspirado en el rastro y seguimiento de feromonas realizado por las hormigas como medio de comunicación. ACO utiliza una representación de conocimiento basada en grafos para encontrar la solución al problema de optimización combinatoria (ver detalle del algoritmo en la tabla 3). Para esto se hace un recorrido al grafo de construcción $GC = (V, E)$. GC es un grafo totalmente conectado y el conjunto de componentes C (lista de adyacencia) se asocian ya sea a los vértices o a los arcos de GC. De esta forma, el grafo es representado por medio de un vector de n componentes representando los vértices o arcos del grafo, y cada componente consta de una lista o campo indicando los vértices/arcos adyacentes. Por ejemplo, la primera versión de ACO se utilizó para resolver el problema del viajero de comercio. Así, el grafo de construcción se crea asociando una ciudad a cada vértice y el paso de una ciudad a otra corresponde a los componentes de solución. El movimiento de la ciudad i a la ciudad j es el componente de solución C_{ij} . El peso de los arcos indica la distancia entre ciudades (la longitud de los arcos) y el nivel de feromona se asocia a los arcos.

En este modelo la solución se construye de la siguiente manera:

- Las hormigas se mueven de un vértice a otro, a través de los arcos del grafo de construcción, para construir una solución de forma incremental.
- Las hormigas depositan una cantidad de feromona en los componentes (puede ser en los vértices o en los arcos que visitan).
- La cantidad de feromona depositada $\delta\tau$ depende de la calidad de la solución encontrada.
- Las siguientes hormigas utilizan la información de la feromona depositada como una guía en la búsqueda de soluciones dentro del espacio de búsqueda.

Veamos la descripción del algoritmo de ACO en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción del Algoritmo de ACO

	INICIO DEL ALGORITMO
Inicialización	Se inicializan parámetros y rastros de feromona.
Ciclo Principal	MIENTRAS No_Coincidan_Condiciones_De_Terminación HACER Construccion_Soluciones

	<p>Actualización_Feromonas FIN MIENTRAS Retornar_Mejor_Solución_Generada</p>
	<p>FIN DEL ALGORITMO</p>
<p>Construcción soluciones</p>	<p>Se inicia con una solución parcial vacía s^p, que se extiende a cada paso añadiéndole un componente de solución factible c_{ij} elegido entre los vecinos $N(s^p) \subset C$. Esto es equivalente a encontrar una ruta en el grafo de construcción $G_c = (V, E)$ guiada por el mecanismo de construcción en paralelo que sigue el rastro de feromona existente, y la conveniencia de las soluciones para ello, define el conjunto $N(s^p)$ con respecto a la solución parcial. La elección de un elemento de $N(s^p)$ se hace de manera probabilística en cada paso de construcción y la manera en que se hace varía dependiendo de la variante de ACO, pero una de las mejores es la del sistema “Ant System (AS)” [38].</p> $p(c_{ij} s^p) = \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta(C_{ij})^\beta}{\sum_{C_{il} \in N(s^p)} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta(C_{il}^\beta)}, \forall C_{ij} \in N(s^p),$ <p>Donde,</p> <ul style="list-style-type: none"> • p es la probabilidad de movimiento al componente C_{ij}. • τ_{ij} es la intensidad de la feromona asociado al componente C_{ij}. • $\eta(\cdot)$ es una función que asigna en cada paso de construcción un valor heurístico a cada solución factible $c_{ij} \in N(s^p)$, (información heurística). <p>Es el costo de la solución construida.</p> <ul style="list-style-type: none"> • α y β son parámetros positivos que determinan la relativa importancia de la feromona con respecto a la información heurística.
<p>Actualización feromonas</p>	<p>En este paso se quiere aumentar el nivel de feromona de las rutas prometedoras y disminuir el de las rutas no tan buenas. Primero se decrementan todos los valores de feromona por medio de una evaporación de feromona, y después se incrementa el nivel de feromona al conjunto de soluciones buenas S_{upd}</p> $\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \sum_{s \in S_{upd} C_{ij} \in S} F(s),$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • τ_{ij} es el rastro de feromona. • S_{upd} es el conjunto de soluciones que se actualizaran. • $\rho \in (0, 1]$ es un parámetro llamado tasa de evaporación. • $F : S \rightarrow \mathbb{R}^+$ es una función tal que $f(s) < f(s') \implies F(s) \geq F(s')$, $\forall s \neq s' \in S$. • $F(\cdot)$ es conocida como la función de aptitud. <p>La evaporación de feromona evita una convergencia demasiado rápida del algoritmo. Además, esta forma de olvidar permite la exploración de nuevas áreas del espacio de búsqueda. Las versiones de algoritmos ACO difieren en la forma de actualizar los valores de feromona como “Ant Colony System-ACS” [39] o “MAX - MIN Ant System-MMAS” [40].</p>

2.3. Auto-Organización y Emergencia

Según [1, 41, 42] el término “auto-organización” se usa ampliamente en la literatura científica pero no parece haber una definición clara del mismo. Esta situación no es extraña por la propia pluralidad de fenómenos que parecen estar regidos por principios auto-organizativos. Se habla de auto-organización para explicar fenómenos puramente físicos (como la formación de tornados o láseres), químicos (como estructuras disipativas⁸), biológicos (como reacciones básicas del metabolismo o las sociedades de insectos), y formales (como los que se producen en las redes booleanas y autómatas celulares) [43]. Además, según [42], existe mucha confusión con respecto a los términos emergencia y auto-organización. Según estos autores, una de las razones para que esto ocurra es el hecho que una combinación de ambos fenómenos ocurre en los sistemas dinámicos frecuentemente.

En cuanto al concepto de “emergencia” en el contexto de los sistemas dinámicos, según [42] es usado por primera vez por el filósofo inglés G. Lewes en 1875 para distinguir entre los componentes químicos “resultante” y “emergente” en una reacción química. El término de Lewes es usado durante la década de 1920 para formar la columna vertebral de un movimiento en las ciencias, filosofía y teología llamado **evolucionismo emergente o proto-emergentista**. El concepto de emergencia fue debatido y usado contra el reduccionismo (que afirmaba que un sistema puede ser reducido a la suma de sus partes). Este movimiento tuvo pocas respuestas en tratar de comprender como la emergencia era posible, es decir, como las entradas en el nivel mas bajo son transformadas en las salidas del nivel más alto durante la emergencia. Un segundo movimiento, llamado **neo-emergencia o teoría de la complejidad** trata de comprender el término emergencia desde diversas áreas tales como: cibernética, física, biología evolutiva, inteligencia artificial, vida artificial, etc. Hay principalmente cuatro escuelas de investigación que influencia la forma en que la emergencia es estudiada en los sistemas complejos [42]:

- **Teoría de los Sistemas Adaptativos Complejos.** Usa el término emergencia para referirse a los patrones que surgen a nivel macro de la interacción de los agentes, esto viene del Instituto Santa Fé.

⁸ Las estructuras disipativas constituyen la aparición de estructuras coherentes, auto-organizadas en sistemas alejados del equilibrio. En relación a los procesos auto-organizativos no lineales que las originan, muestran una gran sensibilidad a las condiciones iniciales, dependiendo de éstas pueden generar comportamientos ordenados, caóticos o complejos [41].

- **Teoría de los Sistemas Dinámicos No Lineales y Teoría del Caos.** Promueve el concepto de atractores, es decir, un comportamiento específico al que el sistema evoluciona.
- **La Escuela Sinergetica.** Inició el estudio de la emergencia en los sistemas físicos. Describen la idea de un parámetro de orden que influencia el fenómeno coherente a nivel macro que el sistema exhibe.
- **Termodinámica Lejos del Equilibrio.** Es introducido por Ilya Prigogine [44] y se refiere a los fenómenos emergentes como estructuras disipativas, que surgen de las condiciones lejos del equilibrio.

Según estos autores, un sistema presenta **emergencia** cuando hay propiedades, comportamiento, estructura, patrones, etc. coherentes a nivel macro que dinámicamente surgen de las interacciones entre las partes a nivel micro. Estas propiedades, comportamiento, estructura, patrones, etc. son nuevas con respecto a las partes individuales del sistema [42]. Además, señalan algunas características que explican los diferentes aspectos involucrados en este concepto de emergencia:

- **Efecto Micro-Macro.** El comportamiento global del sistema (es decir, las propiedades emergentes) es el resultado de las interacciones entre las distintas entidades del sistema.
- **Novedad Radical.** El comportamiento global es nuevo con respecto a los comportamientos individuales en el nivel micro, es decir, los individuos en el nivel micro no tienen una representación explícita del comportamiento global.
- **Coherencia.** La coherencia se refiere a una correlación lógica y coherente de las partes.
- **Interacción de las Partes.** Las propiedades emergentes surgen de las interacciones entre las partes.
- **Dinamismo.** En los sistemas con emergencia, las propiedades emergentes surgen cuando el sistema evoluciona en el tiempo. Tal propiedad emergente es un nuevo tipo de comportamiento que se hace posible en un momento determinado en el tiempo.
- **Control Descentralizado.** El control descentralizado es posible usando mecanismos locales para influir en el comportamiento global. No hay control central, es decir, ninguna parte del sistema orienta el comportamiento a nivel macro.
- **Relación Bidireccional.** En los sistemas emergentes existe una relación bidireccional entre el nivel macro y el nivel micro. Del nivel micro al nivel macro, las partes dan lugar a una estructura emergente ("efecto micro-macro). En la otra dirección, la estructura emergente

influencias sus partes (las propiedades a alto nivel tienen efectos causales en el nivel inferior).

- **Robustez y Flexibilidad.** La falla o reemplazo de una entidad no causará una falla general a nivel de las propiedades emergentes. Esta flexibilidad hace que las entidades individuales puedan ser reemplazadas, y que la estructura emergente pueda permanecer.

Por otra parte, la noción de una organización espontánea producida dinámicamente es muy antigua. El fenómeno se llama "auto-organización" en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, en las comunidades relacionadas con la cibernética e informática [42]. La primera aparición del término parece estar en un artículo del inglés W. Ross Ashby en 1947 [45].

Los dominios principales de investigación, donde se estudió la auto-organización después de su introducción, fueron la física, la computación y la teoría de sistemas. En las ciencias físicas la auto-organización fue extensivamente aplicada, desde la década de 1970, en la formación de patrones, la ruptura espontánea de simetría y los fenómenos de cooperación. Dentro de la Ciencia de la Computación, las aplicaciones principales han sido para el aprendizaje; la adaptación, y para la computación distribuida o emergente [42].

En la década de 1980, la auto-organización se convirtió en una de las ideas, modelos y técnicas agrupada como "ciencias de la complejidad". Esto ha tenido éxito ya que la idea de auto-organización se utiliza actualmente en una amplia gama de disciplinas. Una de esas disciplinas son los sistemas multiagente. Los sistemas multiagente se utilizan para modelar sistemas auto-organizados. La cooperación y la formación de grupos en los sistemas multiagente hacen que el sistema sea más organizado, y esto es realizado de manera autónoma por los agentes. Una serie de aplicaciones auto-organizativas son realizadas en redes, robótica y la auto-organización de un vocabulario entre los agentes.

Según [42], la auto-organización es un proceso dinámico y adaptable donde los sistemas adquieren y mantienen la estructura de sí mismos, sin control externo. La "estructura" puede ser una estructura espacial, temporal o funcional. "No hay control externo" se refiere a la ausencia de dirección, la manipulación, interferencia, presiones o la participación desde fuera del sistema. Sus características son [42]:

- **Aumento del Orden.** En esencia, la organización puede ser vista como un aumento en el orden del comportamiento del sistema que permite al sistema adquirir una estructura espacial, temporal o

funcional. No todos los sistemas que tienen un aumento en el orden necesitan ser auto-organizativos. La autonomía completa del comportamiento es también necesitado.

- **Autonomía.** La segunda característica importante de la auto-organización es la ausencia de control externo. Un sistema debe organizarse sin interferencia del exterior. Para poder decir si un determinado sistema es auto-organizativo, primero debemos definir claramente los límites del sistema. Tenemos que separar el interior del exterior.
- **Adaptabilidad con respecto a los Cambios.** En los sistemas auto-organizativos, se espera que hagan frente a las perturbaciones y cambios manteniendo su organización autónomamente. En otras palabras, un comportamiento auto-generado y adaptable es necesitado y que tome en cuenta las experiencias del pasado puede ser útil también. Esta adaptación implica la necesidad de que el sistema sea capaz de exhibir una gran variedad de comportamientos. Además, se espera que el sistema sea robusto en cuanto a los cambios que surjan, es decir, que siga funcionando a pesar de los cambios en el entorno.
- **Dinamismo.** Una propiedad esencial de la auto-organización es que se trata de un proceso. Con el tiempo hay un aumento en orden, es decir, una dinámica hacia más orden. En relación a la adaptabilidad requerida en un contexto en rápida evolución, un comportamiento auto-organizado necesita ser dinámico. Los cambios afectan a la estructura organizada. A fin de mantener esa estructura, es necesario que haya una dinámica constante que se encargue de estos cambios.

En cuanto a las similitudes y diferencias entre ambos conceptos, tenemos según [42], que debido a que la emergencia y auto-organización enfatizan aspectos muy diferentes del comportamiento del sistema, hay pocas similitudes. La principal similitud es que la emergencia y auto-organización son procesos dinámicos que surgen con el tiempo. Ambos también son robustos. Sin embargo, la emergencia es robusta con respecto a que la falla de una sola parte no resultará en una falla general de la propiedad emergente. La auto-organización es robusta con respecto a la adaptabilidad al cambio y a su capacidad para aumentar el orden. En cuanto a las diferencias, las propiedades que son específicas para la emergencia, pero no es necesario para la auto-organización, son la novedad radical, el efecto micro-macro, flexibilidad con respecto a las entidades, y el control descentralizado. Cuando una de estas propiedades no está presente no tenemos ninguna emergencia. Por otro lado, en el caso de la auto-organización, las propiedades esenciales para que exista son el incremento en orden, sin control externo y adaptabilidad. La

adaptabilidad se refiere a la necesidad de alcanzar un equilibrio entre la selección de un comportamiento específico y la consideración de una gran variedad de comportamientos.

La combinación de la auto-organización y la emergencia en un sistema impone la pregunta sobre cómo ambos fenómenos deben estar vinculados entre sí. Para responder a esto, hay varios puntos de vista posibles [42]. Un **primer punto de vista** considera la auto-organización como una causa, es decir, las propiedades emergentes en sistemas complejos son el resultado de un proceso de auto-organización, posiblemente en combinación con presiones selectivas hacia un comportamiento emergente determinado. Así, las interacciones entre las entidades individuales son la auto-organización. La auto-organización se encuentra en el nivel micro del proceso emergente. Un **segundo punto de vista** considera la auto-organización como un efecto, es decir, la emergencia resulta en auto-organización. Por lo tanto, la auto-organización es una propiedad emergente. Este punto de vista se explica como resultado de una característica de la auto-organización, es decir, la necesidad de un aumento en orden. En un sistema emergente, las dinámicas a nivel micro son a menudo muy complicadas y desordenadas. Esto significa que un aumento del orden sólo puede ocurrir en el nivel global, es decir, las propiedades emergentes llegan a ser más y más organizadas [42].

Ahora bien, veamos algunas definiciones y aspectos sobre auto-organización y emergencia en las áreas de inteligencia colectiva y ciencias de la computación, así tenemos lo siguiente:

En el área de la inteligencia colectiva, según [34], la auto-organización en este tipo de sistemas, es un proceso en el que el patrón (arreglo organizado particular de objetos en espacio o tiempo) en el nivel global de un sistema emerge solamente de las interacciones numerosas entre los componentes de nivel inferior del sistema. En este caso, combinan ambos fenómenos en uno sólo, y consideran la auto-organización como un efecto (segundo punto de vista descrito anteriormente), es decir, la emergencia resulta en auto-organización. Por lo tanto, la auto-organización es una propiedad emergente. Por ello, la auto-organización en esta área también la podemos definir como la emergencia espontánea de una organización a nivel del sistema, a partir de las interacciones locales entre las sub-unidades que conforman el sistema, sin codificar explícitamente a nivel local la estructura producida [30]. Los procesos de auto-organización están basados en un conjunto de elementos y mecanismos dinámicos que aseguran la aparición de la estructura y su estabilización en el tiempo [30].

En ciencias de la computación, se consideran ambos fenómenos separadamente como lo expuesto en [42] pero con la idea de combinarlos a nivel de aplicación. De esta manera según [32], la auto-organización puede ser definida como un proceso en el que nivel interno de organización de un sistema se incrementa automáticamente sin ser guiado o dirigido por un control externo. Según [1, 4], la auto-organización se refiere al proceso en el que la estructura interna de un sistema u organización aparece autónomamente sin un control explícito o restricciones desde fuera del sistema. En otras palabras, la organización resulta de las restricciones o mecanismos internos, debido a las interacciones locales entre sus componentes. Las dinámicas del sistema modifican también su entorno, y las modificaciones del entorno influyen en el sistema, sin alterar los mecanismos internos que conducen a la organización. El sistema evoluciona dinámicamente en tiempo y/o espacio, este puede mantener una forma estable o puede mostrar fenómenos transitorios. De hecho, de esas interacciones, las propiedades emergentes aparecen superando las propiedades de todas las sub-unidades individuales del sistema [1]. La emergencia se refiere al hecho que una estructura, sin explícitamente estar representada en un nivel bajo, aparece en un nivel más alto [4]. Sin un control, un comportamiento colectivo complejo surge de interacciones individuales locales simples. Adicionalmente, la emergencia es usualmente relacionada a la noción de crear nuevas propiedades [4]. Las propiedades de un sistema que no están presentes en el nivel más bajo, sino que son producto de las interacciones de los elementos son llamadas emergentes [46]. Las propiedades emergentes no pueden ser predichas antes que ellas hayan sido observadas. Las propiedades emergentes son a posteriori por esa razón [18].

Finalmente, una combinación de emergencia y auto-organización es un enfoque prometedor para el diseño e implementación de sistemas a gran escala, específicamente para los SMA [42]. En tales sistemas, la complejidad es enorme, lo que hace inviable imponer una estructura a priori: el sistema necesita auto-organizarse. Además, la enorme cantidad de entidades individuales impone la necesidad de la emergencia. Para la escalabilidad no se puede poner un plan completo para la estructura global en una sola entidad; tenemos que mantener a los individuos más bien simples y dejar que el comportamiento complejo se auto-organice como un comportamiento emergente de las interacciones entre estas entidades simples.

2.3.1. Auto-Organización y Emergencia en los SMA

Según [47], existen diferentes mecanismos para implementar un SMA y generar auto-organización y emergencia como una combinación de

ambos fenómenos. Conocer estos mecanismos resulta interesante para comprender más adelante la amplitud de la arquitectura genérica propuesta en este trabajo, ya que nuestra arquitectura multiagente permite combinar e integrar estos mecanismos en el diseño a proponer, aprovechando las ventajas que ofrece cada uno, y dependiendo del sistema real a modelar. Ahora bien, estos mecanismos pueden ser divididos en cinco clases, dependiendo si los mecanismos en que están basados pueden ser naturalmente, socialmente o no naturalmente inspirados:

- I. Mecanismos Basados en Interacciones Directas.** El enfoque propuesto en [48] consiste en utilizar principios básicos como localización y difusión (Broadcast), junto con interacciones y cálculos locales hechos por los agentes, con el objetivo de proveer un estado global coherente. Los mecanismos usados se enfocan en cambiar los aspectos estructurales de la organización de agentes, tales como la ubicación topológica de los agentes y la comunicación entre ellos. Tales mecanismos han sido empleados en las áreas de auto-ensamblaje y auto-localización distribuida, donde la formación de patrones espaciales regulares en objetos móviles es requerido.
- II. Mecanismos Basados en Estigmergia.** Los mecanismos de auto-organización basados en estigmergia buscan obtener comportamientos complejos resultantes de las interacciones *indirectas* entre los agentes. Esas interacciones se deben a cambios en el entorno. Este mecanismo ha sido utilizado en control de manufactura [49], manejo de cadenas de suministros [50], manejo de seguridad en redes [51], y coordinación de vehículos no tripulados [52].
- III. Mecanismos Basados en Refuerzo.** En algunos enfoques la auto-organización está basada en las capacidades de los agentes para modificar de manera dinámica su comportamiento de acuerdo con algún refuerzo. Se utilizan los siguientes principios: *las recompensas incrementan el comportamiento del agente y los castigos disminuyen tal comportamiento*. La consecuencia es que un agente individual puede adaptar sus capacidades y especializarse en roles. En esos enfoques, la auto-organización está basada en las capacidades adaptativas de los agentes individuales [53, 54].
- IV. Mecanismos Basados en Cooperación.** El marco de trabajo OSD (“*Organization Self-Design*”) utiliza las ideas básicas de composición y descomposición de agentes. La descomposición involucra la división de un agente en dos, y puede ser desarrollado para responder a las demandas primordiales del entorno. La composición une dos agentes, y puede ser útil cuando la comunicación general entre los dos agentes es demasiado alta. El

sistema trata de ser cooperativo con su entorno al crear un agente, o al unir dos de ellos, para mejorar el tiempo de respuesta. La cooperación es usada en la teoría para SMA adaptativos [55] (“*AMAS Theory*”, en inglés), donde el comportamiento colectivo deseado emerge, y se espera pueda ocurrir como un resultado de la cooperación [56]. De esta manera, la auto-organización es fundada sobre la capacidad que poseen los agentes para ser localmente “cooperativos”. Las capacidades de cooperación no implican que los agentes sean siempre útiles o altruistas ya que ellos son capaces de reconocer y manejar las fallas de cooperación llamadas situaciones no cooperativas. El manejo local de estas situaciones no cooperativas maximiza la flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema ante estas situaciones no esperadas.

- V. Mecanismos Basados en una Arquitectura Genérica.** Una clase particular de los mecanismos de auto-organización está basado en arquitecturas de referencia genéricas o metamodelos de la organización de los agentes que son instanciados, y luego modificados de forma dinámica de acuerdo con las necesidades de la aplicación particular. Algunos ejemplos de este mecanismo son las arquitecturas de mediador propuestas por Maturana y Norrie [57] y la arquitectura PROSA [58] que están basadas en el modelo de jerarquía holónica. Cuando los agentes están organizados de acuerdo a la metáfora holónica participan en la formación de holones con estructuras holónicas⁹. La auto-organización consiste entonces en alterar la jerarquía holónica siguiendo las perturbaciones del entorno y utilizando una técnica de toma de decisión conocida como razonamiento difuso-evolutivo [59]. Por otra parte, en los enfoques basados en meta-modelos y arquitecturas reflexivas, la organización de la arquitectura del sistema actual se describe como una configuración particular de un meta-modelo genérico de la arquitectura que proporciona los componentes arquitectónicos, sus características y también un conjunto asociado de restricciones arquitectónicas que definen cómo y cuándo volver a configurar de forma segura la arquitectura de software. Las modificaciones del meta-modelo de la arquitectura resultan en modificaciones de la arquitectura de software en sí misma, y la arquitectura es por tanto, reflexiva. Tales modificaciones dinámicas puede tener lugar de forma automática, como es el caso de [60] o después de la intervención del usuario como se hace en [61]. La técnica común para representar la arquitectura como un meta-modelo es representarla como un grafo de configuración dirigido.

⁹ El modelo de jerarquía holónica involucra patrones estructurales que forman jerarquías anidadas de estructuras auto-replicativas llamadas holarquías [62].

2.4. Computación Emocional

La computación emocional o afectiva [63] es una disciplina de la Inteligencia Artificial que intenta desarrollar métodos computacionales orientados a reconocer emociones humanas y generar emociones sintéticas. La fundadora de esta línea de trabajo es Rosalind Picard, investigadora del M.I.T. (“*Massachusetts Institute of Technology*”), quién publicó el libro “*Affective Computing*” [64] en el año 1997. El objetivo de la computación emocional es proporcionar aparatos que integren la capacidad de sentir emociones. ¿Para qué necesita una computadora sentir emociones en términos humanos? según Picard [65] *las emociones son fundamentales para la experiencia humana. Tienen influencia en la cognición, la percepción y todas las tareas diarias como el aprendizaje, la comunicación, e incluso en el proceso racional de toma de decisiones. Sin embargo, los tecnólogos han ignorado completamente las emociones y provocado frecuentemente experiencias frustrantes en el usuario, en parte debido a que el afecto ha sido incomprendido y es difícil de cuantificar.* Es difícil definir el término “emoción”, y algunas veces saber cómo describirlas. Picard define el término como *el conjunto de relaciones entre incentivos externos, pensamientos, y cambios en los sentimientos internos.*

Como aclara dicha autora, las emociones son una parte muy importante de nuestras decisiones (aún de las que parecen más “racionales”). Como prueba de esto, Picard expone casos en donde, personas que sufrieron lesiones en regiones del cerebro asociadas a las emociones, sufrían consecuentemente cierta incapacidad frente a la toma de decisiones y determinados razonamientos lógicos. Por otro lado, la conciencia es también un prerrequisito para muchas emociones humanas como la pena y la culpa, si tú no tienes conciencia no hay razón para estar apenado por algo [66]. En los seres humanos, las emociones, y más generalmente, la afección, parecen entonces estar profundamente entrelazada con la cognición. Por ejemplo, la afección negativa puede predisponer las estrategias de resolución de problemas en los seres humanos hacia el procesamiento “*bottom-up*” o local (procesamiento más sistemático, que va de lo individual a lo colectivo), mientras los afectos positivos pueden conducir a enfoques “*top-down*” o global (procesamiento más aproximativo, que va de lo colectivo a lo individual) [67]. Las emociones también parecen jugar un rol importante en los contextos sociales [68], que van desde los estados emocionales de señalización (como el dolor) hasta las expresiones faciales y gestos para las percepciones de los estados afectivos que causa la aprobación o desaprobación de las acciones de uno mismo o de los otros.

Debido a las investigaciones en neurobiología y psicología, tenemos mejor conocimiento de que son y como actúan las emociones en nuestro cerebro. En las últimas décadas se han desarrollado diversos trabajos tales como [69, 70, 71, 72], entre muchos otros, que apoyan a través de sus estudios y aportes la incorporación de las emociones en muchos procesos importantes: *percepción, toma*

de decisiones, creatividad, comprensión empática, memoria, como también en la interacción social [65]. La computación afectiva podría permitir, por ejemplo, detectar cambios del estado de ánimo según ciertos parámetros (por ejemplo, la forma de mover el ratón: si es rápida y en círculos, o lenta y relajada, podría permitir saber si usted está pasando un mal rato). Todas estas acciones podrían informarle al computador que usted está pasando una experiencia desagradable y tratar de hacer un entorno de trabajo menos tedioso y más intuitivo, como ofrecerle ayuda personalizada, o automáticamente reproducir una música suave o un juego divertido. También podría identificarse (por medio de la webcam) características del rostro que permitan a la computadora darse cuenta del estado de ánimo, o un sensor de presión y temperatura instalado discretamente en el ratón medir su ritmo cardíaco, en búsqueda de posibles señales biológicas que denoten un cambio de ánimo. De esa manera, la computadora se amoldaría al humano, como ser racional y emocional, en lugar de que éste se tuviera que amoldar a la computadora.

Existen dos sub-áreas de las que se ocupa la Computación Afectiva [63]:

- I. **El reconocimiento de emociones (y de expresiones emotivas) humanas por parte de una computadora.** El objetivo es captar aquellos signos relacionados con la expresión de emociones y lograr interpretar estados emocionales en función de dichos signos. Este es un tema muy complejo en el que es difícil obtener precisión. De hecho, no existe una terminología universalmente consensuada a la hora de referirse a estos fenómenos.
- II. **La simulación (o generación) de estados y expresiones emocionales con computadoras.** Aquí se intenta que las computadoras puedan simular procesos emocionales en base a ciertos modelos; se puede reflexionar respecto a si una computadora puede realmente tener emociones, pero, esta disciplina sólo intenta simular dichos procesos de forma tal que resulten verosímiles, dejando de lado estas controversias.

Si bien el fin último es desarrollar ambas líneas para lograr la mejor interacción humano-computadora posible, estas subáreas pueden ser abordadas de forma aislada.

2.4.1. Hacia la Captación de las Expresiones Emocionales

Cuando hablamos de *emoción*, un aspecto fundamental son las características distintivas de las emociones comparadas con otros estados psicológicos que pueden tener un elemento afectivo, pero que no pueden ser considerados como emociones en un sentido completo. Esta diferenciación entre los estados afectivos a nivel artificial, dependerá del modelo emocional que se plantee o utilice para su representación. Los diferentes *estados afectivos* pueden ser

clasificados de acuerdo a [73] en:

- **Emociones:** Ira, tristeza, gozo, temor, vergüenza, orgullo, euforia y desesperación.
- **Humores:** alegre, abatido, irritable, apático, deprimido y optimista.
- **Preferencias/Actitudes:** simpático, cariñoso, odioso, valeroso, deseoso.

Las personas expresan sus emociones a través de su cuerpo, rostro, voz, postura, pero también se pueden observar variaciones de signos como el ritmo cardíaco, la presión arterial y otros, como señal de ciertos estados emocionales. Se puede plantear una organización de las formas en que las emociones son expresadas o alteran al cuerpo, distinguiendo aquellas que pueden ser percibidas por otra persona de aquellas que requieren algún instrumental para su observación. Piccard [64] plantea la siguiente clasificación según eso.

Percibidas por otros: *expresiones faciales, entonación de voz, gestos, movimiento, postura, dilatación de pupila.*

Difícil de percibir por otros: *respiración, ritmo cardíaco, temperatura, transpiración, potencial de acción muscular, presión sanguínea.*

2.4.2. Rol de las Emociones en los Agentes Artificiales

Con respecto al rol de las emociones en los agentes artificiales, algunos modelos se enfocan sobre el efecto de los estados motivacionales, tales como el dolor o el hambre [74], para tratar las emociones como motivaciones y acciones. Otros modelos examinan la influencia de las expectativas o esperanzas sobre las emociones, para reproducir y estudiar las emociones que pueden surgir de los deseos futuros (a largo y corto plazo) del agente [75]. Otros modelos se enfocan sobre el proceso de activación de eventos bajo ciertas emociones; esos modelos son llamados modelos de evaluación de eventos (“*event appraisal models*”, en inglés) [76]. Finalmente, existen otros modelos llamados dimensionales, que diferencian las emociones en función de su posición en un espacio afectivo caracterizado por una serie de dimensiones. Generalmente, son espacios bidimensionales [65, 77] que consideran una dimensión de excitación y otra de control. A pesar que ninguno de esos modelos presenta una visión completa, porque cada uno estudia un aspecto muy particular o específico, ellos sugieren que las emociones son estados mentales seleccionados sobre la base de una coincidencia (“*mapping*”, en inglés) entre una variedad de condiciones ambientales (eventos) y condiciones internas (expectativas y estados motivacionales, entre otros).

Basado en los roles funcionales de las emociones propuestos por los investigadores de la emoción para los sistemas naturales, es posible asignar roles funcionales similares en los sistemas artificiales. Específicamente, podemos

mencionar algunos roles potenciales para las emociones en los agentes artificiales [68]:

- a. **Selección de Acciones.** Que hacer próximamente en base al estado emocional actual.
- b. **Adaptación.** Cambios en el comportamiento a corto y largo plazo debido a los estados emocionales.
- c. **Regulación Social.** Comunicación o intercambio de información con otros vía expresiones emocionales.
- d. **Integración Sensorial.** Filtrado de datos en función del estado de las emociones y el entorno.
- e. **Mecanismos de Alarma.** Reacciones, como reflejos rápidos, en situaciones críticas que interrumpen otros procesos.
- f. **Motivación.** Creando motivos como parte de un mecanismo de imitación-emoción.
- g. **Manejo de Metas.** Creación de nuevas metas o repriorización de las existentes.

En inteligencia artificial, entre las aplicaciones más significativas con respecto a las emociones tenemos las siguientes:

- I. **Con respecto a los Modelos Motivacionales tenemos al Modelo Cathexis [78].** Simula estados motivacionales y emocionales usando una arquitectura multiagente. El modelo captura varios aspectos del proceso emocional, a nivel de los neurotransmisores, expresiones faciales, gestos corporales, creencias, deseos y memoria, entre otros. Está orientado al control de robots autónomos en entornos reales. Básicamente, su arquitectura tiene tres subsistemas: *un sistema de motivación* para representar el impulso que estimula al agente a la acción; el *sistema de generación de emociones* para representar distintas familias de estados afectivos relacionados, y *un sistema de comportamiento* para inhibir o motivar comportamientos y determinar el comportamiento a ser ejecutado.
- II. **Con respecto a los Modelos de Evaluación de Eventos tenemos al Modelo OCC [76].** Este modelo especifica 22 categorías de emociones, pero Ortony en [79] admite que el modelo podría resultar complejo para representar personajes verosímiles, y sugiere utilizar solo 5 categorías positivas (*alegría, esperanza, alivio, orgullo, gratitud y amor*) y 5 categorías negativas (*angustia, miedo, decepción, remordimiento, ira y odio*). Las emociones están basadas en reacciones ponderadas, y están divididas en tres tipos de evaluaciones subjetivas [80]: La evaluación de la satisfacción de los eventos con respecto a las metas de los agentes; la evaluación de la

aprobación de las acciones de un agente con respecto a los estándares de comportamiento, y la evaluación del gusto o desagrado de los objetos (incluyendo agentes) con respecto a la actitud del agente. Entre las aplicaciones que podemos mencionar tenemos:

- **CyberCafe de Rousseau [81].** Es un modelo que incluye rasgos de personalidad para observar su influencia en otros procesos como humores y comportamientos, considerando los humores como una combinación de estados motivacionales y emocionales. Este trabajo incorpora el concepto de actores sintéticos donde un actor sintético puede ser absolutamente autónomo o gobernado por el usuario (en este caso es llamado “avatar”). Uno de los aportes más interesantes es la taxonomía de rasgos de personalidad que realiza para incorporarlo a su modelo.
- **Flame [82]** El modelo está enmarcado en el contexto de los agentes sintéticos, en este caso, produce emociones y simula el proceso de inteligencia emocional a través de reglas difusas. En otras palabras, explora la capacidad de la lógica difusa en el modelado de procesos emocionales. La evaluación de eventos es realizada a través de reglas difusas para inferir sobre la conveniencia de los eventos, su impacto sobre las metas y la importancia de las metas. Las relaciones entre las emociones, las expectativas y la conveniencia de un evento están basadas en el modelo de Ortony [76]. Para implementar las reglas utilizan varios algoritmos inductivos de aprendizaje que les permite adaptarse dinámicamente a los usuarios y al entorno. Es utilizado para simular respuestas emocionales en una mascota.
- **Agentes Emocionales [68].** Se modela las emociones artificiales a través de un enfoque simbólico, sistemas de reglas que las generan. Se construyen dos agentes que se simulan y comparan: uno apoyado por emociones artificiales y otro sin emociones, para resolver un problema benchmark “*Problema del Cuidado del Orfanato*”. Cada agente cuida del orfanato mientras tiene otras metas también, además, controla sus emociones y aprende a modificar su comportamiento usando sus emociones, en caso de tenerlas. Como resultado se obtiene que el agente con un modelo para las emociones se comporta mejor a nivel funcional (flujo y control de información) que el agente sin emociones. Además, muestran como las emociones artificiales pueden ser utilizadas para influir de diferentes maneras el proceso de toma de decisiones.

III. Con respecto a los Modelos Dimensionales tenemos a la mayoría de los sistemas desarrollados por Picard. Estos sistemas están centrados principalmente en el reconocimiento de la emoción [65], la

generación de expresiones faciales y gestos emocionales [64]; existen otros trabajos [83, 84] que aplican la emoción a la enseñanza. Además, podemos mencionar el sistema AlphaWolf [84], donde se propone una arquitectura híbrida que combina un modelo motivacional con uno dimensional.

CAPÍTULO III

MASOES

A continuación se describe la arquitectura multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados llamada MASOES (por sus siglas en inglés, “*Multiagent Architecture for Self-Organizing and Emergent Systems*”), propuesta en este trabajo [86]. MASOES es una herramienta para el diseño no formal de sistemas, que produzcan un estado de la comunidad de agentes donde las acciones de los agentes mutuamente se adaptan en una forma coherente a través de los comportamientos que emergen de las interacciones locales entre ellos y de los cambios que se dan en el entorno. Además, se propone una metodología para modelar sistemas reales usando MASOES, a fin de estudiar las propiedades auto-organizativas y emergentes del sistema modelado.

En MASOES, cada agente puede cambiar su comportamiento dinámicamente, guiado por su estado emocional, para satisfacer dinámicamente los objetivos del sistema a través de la auto-organización de sus actividades. Para ello, se propone también en este capítulo un modelo afectivo [87, 88] que permite a MASOES lograr un compromiso entre el comportamiento individual y colectivo en la sociedad de agentes. Esta capacidad del modelo afectivo para caracterizar las interacciones sociales, lo diferencia de otros modelos emocionales que se centran normalmente en el estudio de la relación cognición-emoción

3.1. Aspectos Generales Acerca de MASOES

En la figura 1 podemos ver como el proceso de aprendizaje y la adquisición de conocimiento se lleva a cabo en la arquitectura: un agente incrementa su conocimiento a través de un proceso de aprendizaje individual, éste interactúa (socializa) con su entorno y con otros agentes usando información local, entonces, a través de un mecanismo “*Bottom-Up*” (que va de lo individual a lo colectivo), el conocimiento explícito colectivo comienza a emerger. Para esto será necesario un proceso de retroalimentación “*Top-Down*” (que va de lo colectivo a lo individual), que promueva el aprendizaje individual (o internalización) de este conocimiento colectivo.

En la figura 2 podemos ver las fases involucradas en el proceso circular causa-efecto de la gestión general del conocimiento que refleja el proceso de creación, conversión, integración y difusión del conocimiento. Esas 3 fases son las siguientes:

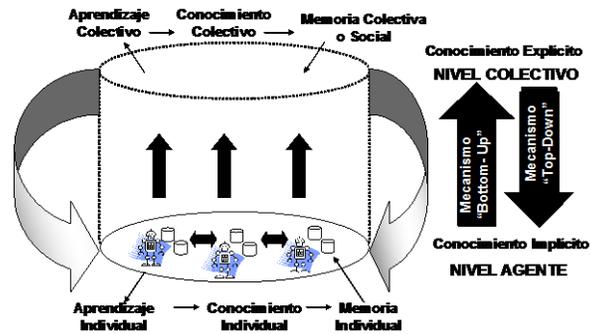


Figura 1. Tipos de Conocimiento y Aprendizaje en MASOES

a. Socialización

La primera fase involucra el proceso de compartir experiencias a través de las interacciones locales. Esta fase requiere la conversión del conocimiento implícito a conocimiento explícito que pueda ser transferible, en otras palabras, un conocimiento que pueda ser comunicado a los otros.

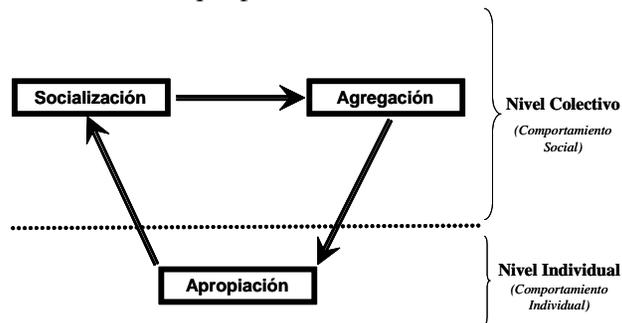


Figura 2. Fases involucradas en la Gestión General del Conocimiento en MASOES

b. Agregación

Es el proceso para crear conocimiento explícito mas confiable a partir del filtrado, fusión, clasificación y ampliación del conocimiento explícito que viene de diversas fuentes, a través del intercambio de puntos de vista, reuniones, conversaciones y correos, entre otros. Esta fase produce un conocimiento explícito mucho mas refinado que facilita su comunicación, difusión y almacenamiento en la base de conocimiento colectiva.

c. Apropiación

Esta última fase consiste en la traducción del conocimiento explícito en conocimiento implícito, y para esta generación del conocimiento implícito individual será requerido un proceso de aprendizaje individual.

3.2. Propiedades de la Arquitectura

- **Genérica.** El diseño de la arquitectura es presentado de una manera general sin los mecanismos específicos requeridos para el aprendizaje y el razonamiento, ya que estos dependerán del problema en particular bajo consideración.
- **Híbrida.** Es una arquitectura que quiere producir diferentes tipos de comportamiento (reactivo, cognitivo e imitativo) a nivel individual y colectivo.
- **Social.** Esta propiedad es inherente a un SMA, ya que hay una sociedad de agentes interactuando y socializando; en otras palabras, intercambiando experiencias cooperativamente en pro de un objetivo común.
- **Emocional.** El manejo de ciertas emociones es incorporado para mejorar el proceso de toma de decisión individual, y así, tener un comportamiento mucho más conveniente de acuerdo a la experiencia adquirida, la situación actual, y el estado emocional del agente en un momento determinado.

3.3. Descripción de la Arquitectura propuesta

Uno de los objetivos de esta arquitectura es definir un modelo multiagente que permita caracterizar un sistema emergente y auto-organizado, para ello, la arquitectura propuesta se divide en dos niveles: *individual* y *colectivo* (ver figura 3). La emergencia cognitiva colectiva es obtenida a través de tres diferentes tipos de interacción:

- **Interacción Local.** Es el dinamismo e influencia (*interdependencia*) estrictamente entre agentes (directa, a través de alguna forma de comunicación), o entre agentes y el entorno (indirecta, usando un campo de acción que permite la delimitación de un área común siguiendo un mismo conjunto de reglas).
- **Interacción Grupal.** Es originada por el dinamismo de las interacciones locales para favorecer la creación de redes sociales o grupos estructurados de acuerdo a un objetivo colectivo, apoyando la gestión del conocimiento de una manera comunitaria y colaborativa.
- **Interacción General.** Es el resultado de la interacción de la comunidad de agentes involucrados en el sistema conforme a los objetivos comunes.

Ahora bien, con respecto a la emergencia cognitiva individual, la idea es producir una emergencia cognitiva imitando la forma en que los seres humanos van de un comportamiento inconsciente a un comportamiento consciente; en otras palabras, la forma en la que la conciencia aparece como un fenómeno

emergente en los seres humanos (y es visto así, porque todavía no se puede comprender o explicar la conciencia observando solamente las neuronas y sus interacciones) [89]. Así, se divide los comportamientos realizados por el agente en 3 diferentes niveles, estableciendo una jerarquía de Comportamientos: Comportamiento Inconsciente o reactivo, Comportamiento Emocional, orientado por las emociones, y el Comportamiento Consciente, que se activan o inhiben en función de sus objetivos. De ahí que las emociones serán usadas como un mecanismo indirecto en el proceso de toma de decisiones para evaluar si el comportamiento reactivo, cognitivo o imitativo es más conveniente o no para una situación dada de acuerdo a los intereses individuales y colectivos.

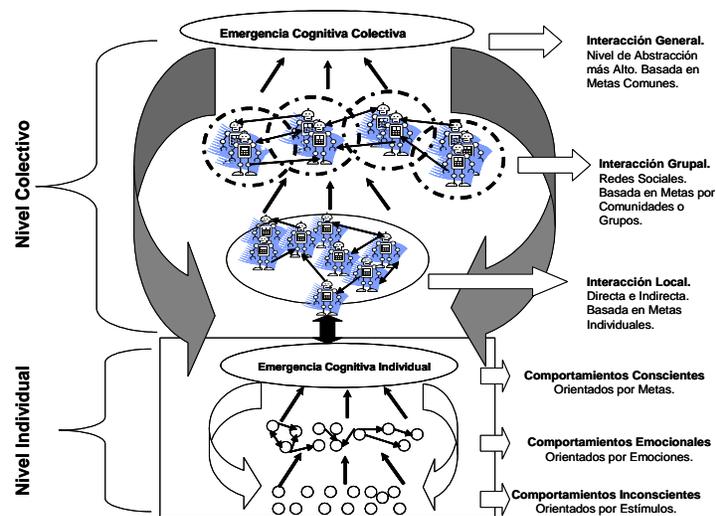


Figura 3. Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados

3.3.1. Componentes de la Arquitectura a Nivel Colectivo o Social

En esta sección presentamos los componentes de la arquitectura a nivel colectivo, junto con las relaciones e interacciones presentes en el sistema multiagente (ver figura 4).

Para generar un comportamiento emergente, es necesario **un conjunto de reglas** que especifiquen las interacciones entre los agentes usando solamente información local. **El entorno** es un elemento importante para las interacciones indirectas entre los agentes y para la recolección de la información generada por la sociedad de agentes. Para este propósito, hay un área llamada **Campo de Acción y/o una Base de Conocimiento Colectivo** definidas en el sistema. El campo de acción es delimitada por los agentes, a través de marcas dejadas en el entorno, generalmente para coordinar sus comportamientos. En general, existen dos tipos de coordinación entre agentes: *coordinación por comunicación directa y coordinación dentro de campos de acción* (comunicación indirecta). Con respecto a la **Base de Conocimiento Colectivo**, es la memoria social o colectiva a la que

todos los agentes tienen acceso. Cabe señalar, que el campo de acción también puede ser usado como memoria colectiva.

También, la interacción entre los componentes en un sistema auto-organizado según [34], la cual podría generar una **retroalimentación positiva** para promover la creación de estructuras y cambios en el sistema, y una **retroalimentación negativa** para compensar la retroalimentación positiva y ayudar a estabilizar el patrón de comportamiento colectivo. Esta caracterización de los fenómenos a nivel colectivo es conocida como enfoque “Top-down” [90].

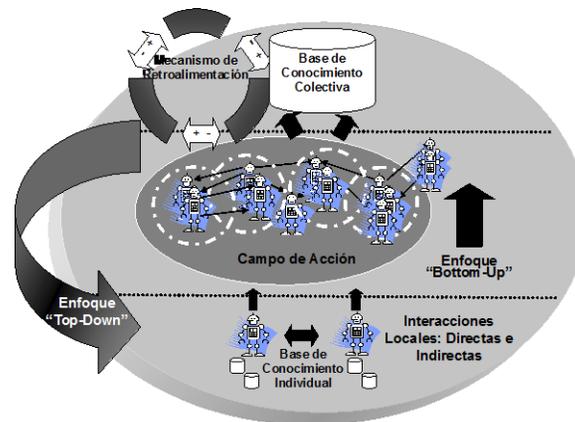


Figura 4. Componentes de MASOES a Nivel Colectivo

3.3.2. Componentes de la Arquitectura a Nivel Individual

En esta sección vamos a describir algunos componentes internos a cada agente y como se interrelacionan para producir la emergencia cognitiva individual, y así tener una estructura flexible que dé a cada agente la posibilidad de auto-organizarse como producto de sus capacidades. Esta caracterización a nivel individual es conocida como enfoque “Bottom-Up” [90], y consiste en la caracterización de los comportamientos reactivos, cognitivos, emocionales y sociales de cada tipo de agente en el sistema.

La arquitectura a nivel individual tiene 4 componentes: (ver figura 5): **Reactivo** (procesos reactivos o comportamientos inconscientes); **Cognitivo** (procesos deliberativos o comportamientos conscientes); **Conductual** (procesos emocionales y de cambio de comportamiento o comportamientos orientados por emociones) y **Social** (procesos sociales o comportamiento social). Para explotar la diversidad y favorecer la aparición de la emergencia cognitiva colectiva, cada agente puede tener un comportamiento híbrido: reactivo, emocional-reactivo, y cognitivo-reactivo, entre otros. A continuación describiremos cada componente y sub-componente de la arquitectura a nivel individual.

- a. **Componente Conductual.** Favorece la adaptación de cada agente con su entorno ya que crea un modelo interno del mundo exterior que regula su comportamiento de una manera consciente y emocional. Cada proceso de toma de decisiones en el agente estará basado en sus objetivos individuales y colectivos, su estado emocional, y el conocimiento adquirido de manera individual y colectiva. Los tipos de comportamiento a considerar son imitar, reaccionar y razonar, los cuales están enlazados a los componentes social, reactivo y cognitivo, respectivamente (ver figura 5). Entre los elementos que lo conforman está el *Configurador Emocional* encargado de manipular las emociones del agente. En este caso, las emociones son consideradas como señales y evaluaciones que informan, modifican y reciben retroalimentación de los procesos reactivos, cognitivos y sociales (de otros agentes), es en este sub-componente donde estará el modelo afectivo. También está el *Manejador de Comportamiento o Conductual*, que se encarga de activar, inhibir y priorizar algunos comportamientos en el agente basado en el estado emocional actual, las metas del agente, su situación social (situación de sus vecinos más cercanos), y el entorno en general. Además, maneja todos los mecanismos responsables del cambio dinámico de comportamiento, ya que su objetivo principal es determinar y sugerir un único tipo de comportamiento cada vez para evitar conflictos en tiempo de ejecución. El conocimiento asociado con la gestión de las emociones, comportamientos y experiencias emocionales pasadas, es almacenado en la *Base de Conocimiento Conductual*. El rol de las emociones es determinar el comportamiento del agente según su estado emocional, para ello se asocian las clases de emociones a considerar con los tipos de comportamiento que puede presentar el agente.

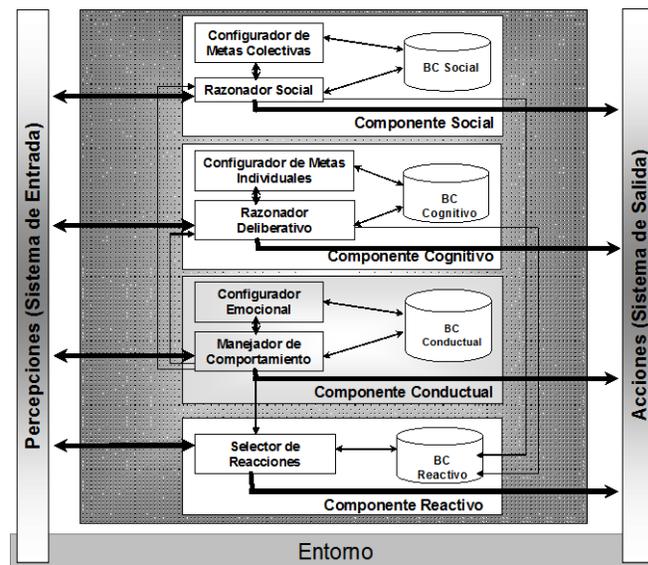


Figura 5. Componentes de MASOES a Nivel Individual

- b. **Componente Reactivo.** Encargado de producir el comportamiento reactivo del agente. Las reacciones son reglas asociadas a los estados emocionales ya que, se quiere tener algunas reglas activas y otras no, de acuerdo al estado emocional del agente y a la actividad que desarrolla en un momento determinado. Para ello tiene un *Selector de Reacciones* que selecciona entre las diferentes rutinas de comportamiento existentes, es decir, las que serán ejecutadas por el componente reactivo de acuerdo con el estado emocional del agente. Además, posee una *BC Reactivo* que es la base de conocimiento reactivo para almacenar el conjunto de reglas gestionadas por el componente reactivo.
- c. **Componente Cognitivo.** Es el responsable de producir el comportamiento cognitivo a través de diversos mecanismos cognitivos (aprendizaje y razonamiento), y procesos de toma de decisión (intencional o deliberativa¹⁰, entre otras). Posee un *Configurador de Metas Individuales* para la configuración de los objetivos individuales y de las prioridades del agente; un *Deliberador* como responsable de los mecanismos cognitivos (aprendizaje, razonamiento) y de la toma de decisión intencional o deliberativa, entre otras; y una *BC Cognitivo* para almacenar un tipo de conocimiento mucho más complejo que el de la base de conocimiento reactiva, ya que en este caso se refiere, por ejemplo, al almacenamiento del conocimiento procedural, declarativo o semántico y episódico [91].
- d. **Componente Social.** Debe promover conciencia en los agentes sobre el trabajo y la experiencia de los otros agentes. Específicamente, aprovecha la experiencia de los otros (aprendizaje social), es decir, evita el aprendizaje de cosas que ya han aprendido sus vecinos. Este componente conecta el aprendizaje colectivo colaborativo con el aprendizaje individual. Para ello tiene un *Configurador de Metas Colectivas* para la configuración de los objetivos colectivos y de las prioridades de los agentes. También tiene una *BC Social* para almacenar, entre otras cosas, el conocimiento sobre las decisiones tomadas por sus vecinos, es decir los agentes más cercanos. Finalmente, posee un *Razonador Social* para seleccionar que acción debe ser imitada y de cual agente, basado en las metas colectivas y la utilidad obtenida en casos anteriores. La idea principal es que cada agente pueda aprender del colectivo.
- e. **Otros Elementos Generales.** Tiene un *Sistema de Entrada* que provee a los agentes de información sobre el mundo donde viven. Este sistema pasa las percepciones recibidas de manera paralela al componente reactivo, conductual, cognitivo y social. Todos los componentes interactúan recíprocamente con esa entrada, pero es el componente conductual el que debe establecer cual componente tiene la prioridad más alta para responder. Posee también un *conjunto de Acciones*, que son las reglas de condición-acción (si... entonces) usadas en un proceso deliberativo (ellas reflejan el comportamiento reactivo y/o cognitivo). Finalmente, tiene un *Sistema de*

¹⁰ Esto significa que las decisiones son tomadas vía razonamiento lógico [92].

Salida para elegir la acción del componente indicado por el manejador conductual, en el caso que existan varias respuestas.

3.4. Metodología para el Modelado de Sistemas Emergentes y Auto-Organizados a través de MASOES

Para modelar un sistema real usando MASOES, es necesario describir los elementos involucrados, así como los procesos y mecanismos a nivel individual y colectivo. Para esto se propone una metodología que consiste en cuatro pasos: *análisis, diseño, integración y comprobación*. Estos pasos son descritos a continuación:

I) Fase de Análisis: Las características básicas del sistema modelado tales como: agentes, tareas y niveles de interacción son descritos.

- I.1. Identificar y describir los tipos de agentes, así como las tareas que esos agentes asumen en el sistema modelado.
- I.2. Describir los niveles de interacción en la sociedad de agentes del sistema modelado, incluyendo:
 - a) Interacción local.
 - b) Interacción grupal
 - c) Interacción global.

II) Fase de Diseño: En esta etapa se diseña tanto el nivel individual como colectivo del sistema modelado.

II.1. Nivel individual

- a) Describir y representar los componentes individuales del sistema según MASOES: *reactivo, cognitivo, social y conductual*, que deben ser considerados en el sistema modelado.
- b) Asociar un comportamiento o un conjunto de comportamientos (reactivo, cognitivo o imitativo) a cada tipo de agente definido en el sistema modelado.

II.2. Nivel colectivo

- a) Describir los componentes colectivos del sistema, esto incluye:
 - Conjunto de reglas de interacción.
 - Campo de acción.
 - Bases de conocimiento.
 - Objetivos colectivos.
- b) Describir los procesos colectivos, incluyendo:
 - Formación de redes sociales.
 - Mecanismos de realimentación.

III) Fase de Integración: En esta etapa, el conocimiento individual y colectivo de la sociedad de agentes es integrado. Esta integración es modelada instanciando para el sistema real las fases de gestión del conocimiento

socialización, agregación y apropiación (descritas en la sección 3.1). Esta etapa es fundamental, puesto que el manejo del conocimiento en MASOES permite visualizar la sinergia entre el conocimiento individual y colectivo, lo cual conferirá las capacidades adaptativas al sistema y la emergencia de algunas propiedades tales como: *nuevas políticas y normas colectivas, cooperación entre agentes, y la creación de grupos o comunidades* como producto final de la emergencia y la autorganización en el sistema.

IV) Fase de Comprobación: El modelo del sistema real basado en MASOES debe ser verificado. Esto es, para los casos donde se conoce que el sistema posee propiedades emergentes o auto-organizativas, es necesario verificar si los modelos basados en MASOES pueden determinar sus propiedades del mismo modo observado en los sistemas reales. Esto es realizado a través de un método de verificación propuesto en este trabajo para MASOES (ver siguiente capítulo). Esta herramienta permite el estudio del comportamiento del sistema real modelado a través de MASOES, cuando se producen eventos que lo afectan, por ejemplo, *la eliminación de algún componente o mecanismo o la modificación del comportamiento a nivel individual y colectivo*. Así, esta herramienta permite determinar lo que sucede con las propiedades emergentes y auto-organizativas del sistema cuando dicho sistema o el entorno del sistema sufre cambios. Finalmente, esta herramienta también permite estudiar los sistemas reales con un comportamiento desconocido, con el objetivo de determinar sus capacidades emergente y auto-organizativa.

3.5. Modelo Emocional Para MASOES

El modelo afectivo propuesto considera un conjunto de emociones positivas y negativas generadas desde un nivel individual o colectivo, para de esta manera promover un comportamiento individual (Reactivo, Cognitivo) o colectivo (Imitativo) en los agentes y así, aumentar su grado de satisfacción y por consecuencia, el nivel de auto-organización y emergencia general en el sistema. Este modelo afectivo está representado por un espacio bidimensional, donde el eje x representa el nivel de Activación, Excitación o Relajación del agente (mide el grado de activación fisiológica y psicológica del agente en el intervalo $[-1, 1]$), y el eje y representa el nivel de satisfacción, agrado o desagrado, también en el intervalo $[-1, 1]$ (ver figura 6). En esta sección describimos las fases involucradas en el procesamiento emocional del modelo afectivo propuesto, y los sub-componentes del componente conductual comprometidos.

Fase I (Configurador Emocional): Clasificación de las emociones. En el modelo afectivo propuesto se consideran emociones positivas y negativas generadas desde un nivel individual o colectivo, a fin de contribuir a la

generación de un comportamiento emergente y auto-organizado en el sistema a partir de la interacción local de los agentes. Los tipos de emociones consideradas, y el espacio afectivo definido para MASOES, son mostrados en la figura 6. El espacio afectivo ha sido dividido en 4 cuadrantes, donde el cuadrante I (alegría, felicidad) y III (tristeza, depresión) representan las emociones positivas y negativas dirigidas por la obtención de metas o logros personales (nivel individual); y los cuadrantes II (admiración, compasión) y IV (rechazo-aversión, ira-odio) representan las emociones positivas y negativas de tono claramente social o interpersonal, dirigidas por las acciones de los otros agentes o cambios en el entorno (nivel colectivo).

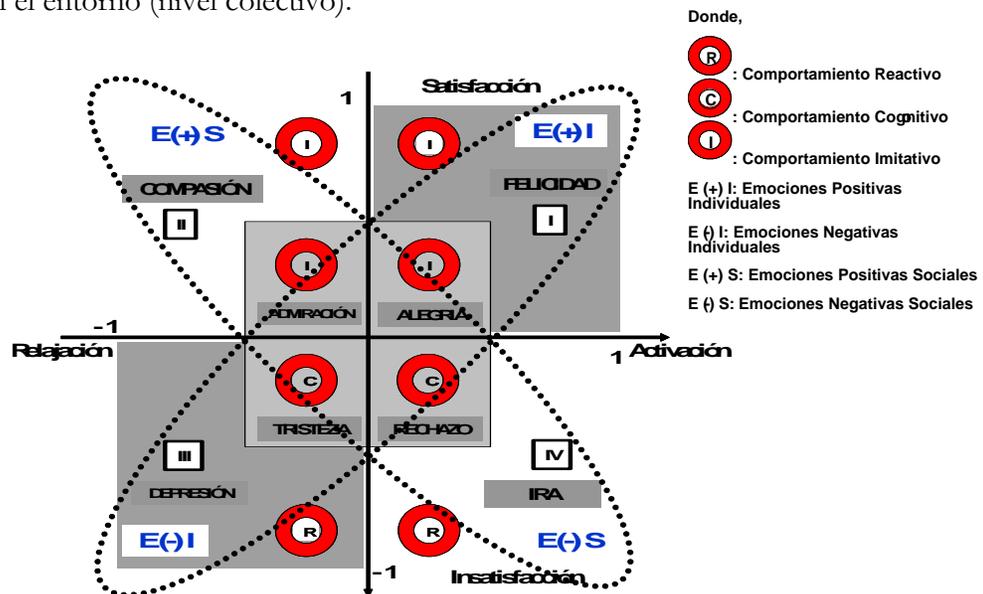


Figura 6. Modelo Afectivo para MASOES

Fase II (Manejador de Comportamiento): Asociación de las emociones al tipo de comportamiento. Para esta asociación, se le asigna a cada estado emocional del modelo afectivo propuesto uno de los 3 comportamientos considerados: Imitativo, Cognitivo y Reactivo, de acuerdo a las reglas que se establecen (ver tabla 4). Para establecer estas reglas, se considera lo planteado en [67, 93, 94]: las emociones negativas pueden predisponer las estrategias de resolución de problemas en los seres humanos hacia un procesamiento local que va de lo individual a lo colectivo (procesamiento más sistemático), mientras que las emociones positivas pueden conducir a enfoques globales que van de lo colectivo a lo individual (procesamiento más aproximativo).

Por otra parte, según MASOES cada agente puede interactuar local o grupalmente. De esta manera, si se trata de una emoción positiva el agente asumirá un comportamiento imitativo, para llevar a cabo una acción colectiva

(que va del conocimiento colectivo al conocimiento individual) que le permita interactuar grupalmente según los objetivos colectivos establecidos. En caso de una emoción negativa, el agente asumirá un comportamiento reactivo o cognitivo, para llevar a cabo una acción individual (que va del conocimiento individual al conocimiento colectivo) que le permita interactuar localmente según los objetivos del agente (ver figura 7).

Tabla 4. Comportamientos manejados por el agente de acuerdo a su estado emocional

EMOCIÓN	TIPO DE EMOCIÓN	COMPORTAMIENTO ASOCIADO
Felicidad	Positivo	Imitación
Alegría	Positivo	Imitación
Compasión	Positivo	Imitación
Admiración	Positivo	Imitación
Tristeza	Ligeramente Negativo	Cognitivo
Depresión	Altamente Negativo	Reactivo
Rechazo	Ligeramente Negativo	Cognitivo
Ira	Altamente Negativo	Reactivo



Figura 7. Estados emocionales positivos y negativos con su comportamiento asociado

Así, para asociar los estados emocionales positivos y negativos a un comportamiento determinado, se plantean las siguientes reglas:

Regla 1: Si <Estado_Emocional> es Positivo entonces <Prioridad_Comportamiento_Imitativo>

Regla2: Sino Si <Estado_Emocional> es Ligeramente Negativo entonces <Prioridad_Comportamiento_Cognitivo>

Regla3: Sino Si <Estado_Emocional> es Altamente Negativo entonces <Prioridad_Comportamiento_Reactivo>

Según el modelo afectivo que estamos planteando en este trabajo, las emociones positivas (tales como: la *alegría*, la *felicidad*, la *compasión* y la *admiración*) conducen a un comportamiento imitativo con la idea de reproducir lo que nos hace sentir bien a nosotros y al colectivo (regla 1), mientras que las emociones negativas (tales como: la *tristeza* y *rechazo*) nos motivan a un comportamiento cognitivo que nos lleva a reflexionar sobre la situación actual considerando los objetivos individuales y/o colectivos (regla 2), o nos induce a un comportamiento reactivo hacia otros en estados altamente negativo como la *ira* y *depresión*, para sólo responder de forma inmediata a la situación actual (regla 3).

Fase III (Configurador Emocional): Determinación de la emoción actual.

1. Evaluación de un evento, acción u objeto para determinar el grado de satisfacción y activación, y luego, el estado emocional afectado. Para esta evaluación se requiere información del mundo, tal como implicaciones de los eventos para los agentes, los gustos o preferencias de los agentes con respecto a objetos u otros agentes, entre otras cosas. La intensidad de la emoción afectada viene dada por el grado de satisfacción y activación del agente, luego de la evaluación realizada. Es necesario utilizar variables para cuantificar el grado de satisfacción y activación del agente.
2. Modificación del actual estado emocional, si es necesario. Esta transición de un estado a otro debe ser coherente y coordinada.

Fase IV (Manejador de Comportamiento): Determinación del tipo de comportamiento.

Se modifica el comportamiento actual si es necesario, de acuerdo al estado emocional actual y la tabla 4, como una acción resultante de la emoción detectada en la fase III. De esta manera, las emociones son la expresión dinámica y fluctuante del estado afectivo del individuo, y así, permiten cambiar dinámicamente el tipo de comportamiento del agente de acuerdo a su situación actual.

CAPÍTULO IV

UN MÉTODO DE VERIFICACIÓN PARA MASOES

En este capítulo se propone un método para estudiar los modelos de sistemas reales realizado con MASOES [95], con el fin de determinar sus propiedades auto-organizativas y emergentes. Previamente, se describen los aspectos teóricos de base del método propuesto, tales como: el paradigma de la sabiduría de las multitudes y los mapas cognitivos difusos.

4.1. Bases Teóricas del Método de Verificación para MASOES

En esta sección se describen los aspectos teóricos relacionados al paradigma de la sabiduría de las multitudes (PSM) y a los mapas cognitivos difusos (MCD), utilizados en la definición del método de verificación de propiedades propuesto para MASOES en este capítulo.

4.1.1. Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes

De acuerdo a este paradigma, la inteligencia colectiva (sabiduría global) emerge de los conocimientos de los individuos dentro de un grupo, tal que eventualmente cada individuo dispone de poca información. En la práctica, el concepto de inteligencia colectiva es el contrario de la llamada “opinión del experto”. Según afirma Surowiecki en [96], la inteligencia colectiva tiene más que ver con lo que el grupo desea como un todo, que con la evaluación de la opinión de un experto. De esta manera este autor afirma que los grupos, especialmente los numerosos, toman buenas decisiones, pudiendo ser conclusiones mejores que las de los expertos (o pocos miembros) [96]. Esto es mostrado a través de diversos ejemplos, donde se puede ver como el conocimiento agregado de un grupo diverso y grande es superior al de uno o pocos expertos. En [97] dan un ejemplo de ello desarrollando un modelo de los factores que determinan la calidad de contenido de Wikipedia basado en los principios del PSM. Los resultados obtenidos indican que incrementando la densidad y diversidad de los participantes en Wikipedia mejora la calidad de su contenido. Según Surowiecki, hay tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por la inteligencia colectiva [96]:

- I. Problemas Cognitivos:** Se refiere a problemas que siempre tienen una solución. Y si no existe una única solución, hay unas mejores que otras. Además, un problema cognitivo requiere mucho conocimiento que es difícil que este concentrado en un experto, especialmente en los problemas multidisciplinarios. Estos tipos de problemas producen una solución que “promedia” el proceso de pensamiento de las personas involucradas. Esta solución puede ser mucho más rápida, más confiable, y más objetiva que las deliberaciones de los expertos, o comités específicos. Estos problemas incluyen preguntas tales como: *¿Cuál será el mejor lugar para poner una piscina en la comunidad?*.
- II. Problemas de Coordinación:** En estos tipos de problemas los miembros de un grupo se ven en la necesidad de armonizar su comportamiento entre ellos. Estos problemas suponen tomar en cuenta lo que uno piensa, y lo que piensan y hacen los demás. Estos problemas incluyen preguntas tales como: *¿Cómo se encuentran entre sí vendedores y compradores para establecer un precio de mutuo acuerdo?, ¿Cómo conducir con cuidado, tomando en cuenta que los demás también lo están haciendo?*.
- III. Problemas de Cooperación:** Se refiere a como los grupos de personas pueden formar redes de confianza sin que un sistema central controle sus comportamientos o directamente fuercen un acatamiento. Las personas que buscan satisfacer su propio interés se ven en la necesidad de lidiar con los demás para obtener una solución que sea buena para todos. Este tipo de problemas puede parecer similar a los problemas de coordinación, la diferencia fundamental es que los involucrados deben asumir una perspectiva más amplia que el interés particular. Algunos problemas de cooperación son: *¿Cuántos impuestos sería justo que pagáramos en nuestra sociedad?, ¿Qué podemos hacer con la contaminación?*.

Nuestra arquitectura multiagente para sistemas auto-organizados y emergentes MASOES debe enfrentar estos tipos de problemas al tratar de modelar, por ejemplo, sistemas sociales. De ahí que utilicemos los principios que siguen a continuación, como fuente de inspiración para definir nuestros criterios de verificación en la sección 4.2.1. Los principios que establece el PSM para la emergencia de la inteligencia colectiva son los siguientes [96]:

- a. Diversidad de Opinión:** Los individuos deben poseer opiniones (o conocimientos sobre un tema) lo suficientemente diversas como para poder abarcar todo el espectro de posibles opiniones. Obviamente esto es imposible, así que la idea es tener un grupo de personas con el mayor rango de opiniones posibles. Mientras más diversidad halla en una multitud, más robusta será la inteligencia colectiva. Además, la diversidad facilita que cada persona diga exactamente lo que cree.

- b. Independencia de Opinión:** cada persona debe sentirse verdaderamente libre para expresar su opinión, tratando que esta última no sea tan influenciada por los demás. Es muy difícil mantener la independencia intelectual, pero es realmente importante para poder tomar buenas decisiones colectivas.
- c. Descentralización:** La descentralización supone que cada quien ponga a prueba su propio punto de vista, en vez de responder a directrices que vengan desde arriba. Es útil, también, que cada miembro del grupo actúe como pseudo-experto de un área (es conveniente que hayan varios pseudo-expertos en cada área, para aumentar la diversidad).
- d. Agregación:** debe haber un mecanismo que exprese, resuma, y convierta los aportes individuales (conocimiento individual) en aportes colectivos (conocimiento de grupo).

Surowiecki [96] estudia situaciones en las que la multitud produce un juicio muy malo, y argumenta que en ese tipo de situaciones la emergencia de la inteligencia colectiva falló porque (de una u otra manera) los miembros de la masa eran demasiado conscientes de las opiniones de los demás y empezaron a emularse unos a otros, más que a pensar por sí mismos. Las fallas que pueden existir incluyen:

- a. Demasiada Homogeneidad:** es necesario la diversidad dentro de la multitud para asegurar suficiente pluralidad o heterogeneidad en los procesos de pensamiento e información individual.
- b. Demasiada Centralización:** No debe existir una burocracia demasiado jerarquizada, ni cerrada a la sabiduría de los roles de bajo rango.
- c. Demasiada División:** Cuando se crean muchas dependencias entre los diversos departamentos o subgrupos, surgen tantas restricciones que dificultan que los grupos puedan escoger autónomamente el tema de su trabajo y la información que necesitan.
- d. Demasiada Imitación:** Cuando en la multitud comienzan a emularse unos a otros, esto puede conducir a resultados sociales frágiles, ya que dejan de pensar por sí mismos. Esto es común cuando las decisiones son visibles y hechas en secuencia, pudiendo producirse un efecto de “cascada de información” en la que sólo los primeros en tomar decisiones reflexionan antes de hacerlo: una vez que esto ha ocurrido el resto de agentes decisores se limita a copiar a aquellos a su alrededor.
- e. Demasiada Emotividad:** algunos factores emocionales, tales como un sentimiento de pertenencia, pueden conducir a presión de grupo, instinto de manada, y en casos extremos, histeria colectiva.

Estas posibles fallas son también consideradas en la definición del método de verificación para el modelado con MASOES, ya que la prueba de ellas en la instanciación de este método en un sistema particular permite verificar el comportamiento auto-organizado y emergente del sistema modelado.

En general, los principios que propone el PSM han sido considerados en [97, 98, 99, 100, 101, 102], para tomar ventaja de la llamada inteligencia colectiva.

4.1.2. Mapas Cognitivos Difusos

Los mapas cognitivos son una herramienta de representación del complejo proceso cognitivo a través de un diseño visual en forma de mapa. El científico político Axelrod [103] introdujo los mapas cognitivos como una herramienta para representar el conocimiento científico social. Los mapas cognitivos son grafos dirigidos, en donde sus arcos son conexiones causales entre los nodos (conceptos). En estos grafos, un arco con signo positivo, que va del nodo A al nodo B, significa que A incrementa causalmente a B. Por otro lado, si el arco tiene signo negativo de A hacia B, significa que A decrementa causalmente a B.

Los mapas cognitivos pueden ser representados de forma gráfica, donde los conceptos son conectados por flechas, o a través de una matriz de conexión en que la intercepción de cada par de conceptos indica la relación existente entre ellos (ver figura 8). En la matriz de conexión el i -ésimo renglón representa el peso de la conexión de los arcos que son dirigidos hacia fuera del concepto C_i , es decir, a quienes afecta C_i . La i -ésima columna lista los arcos dirigidos hacia C_i , es decir quienes afectan a C_i . Entonces:

$$w_{i,j} = M(C_i, C_j) \tag{1}$$

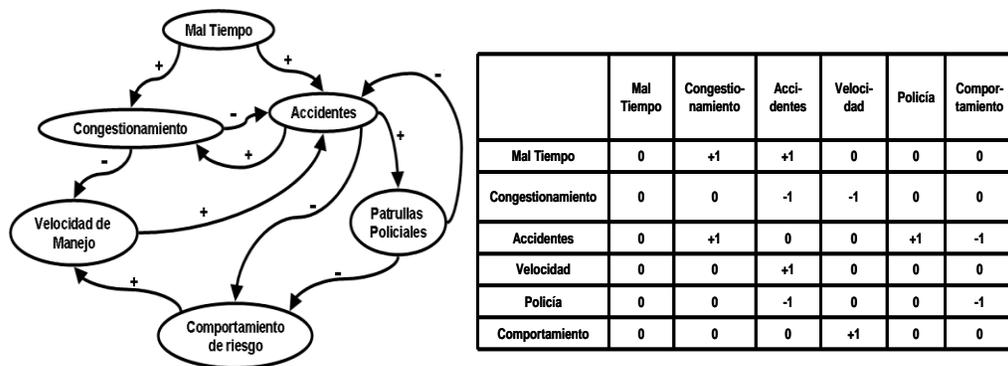


Figura 8. Distintas representaciones de un Mapa Cognitivo: Representación Gráfica y Matriz de Conexión

Donde M representa la función causal del arco que posee como concepto antecedente al concepto C_i y como concepto consecuente C_j , y $w_{i,j}$ será el peso de la relación entre esos dos conceptos. En general, el concepto C_i incrementa

causalmente a C_j si $w_{ij} > 0$, lo decreta causalmente si $w_{ij} < 0$, y no imparte causalidad si $w_{ij} = 0$.

Con respecto a los mapas cognitivos difusos (MCD), fueron desarrollados por Kosko [104] a mediados de la década de los 80, a partir de los Mapas Cognitivos de Axelrod. El análisis estructural de estos mapas permite deducir información sobre la importancia de los conceptos implicados en el problema. Los MCD fueron presentados inicialmente como mecanismos difusos, pudiendo los conceptos y relaciones ser representados como variables difusas (expresadas en términos lingüísticos). Por ejemplo, términos como “Casi Siempre”, “Siempre”, “Normalmente”, “Algunos”, son variables difusas que pueden ser utilizadas para describir las relaciones entre conceptos (ver figura 9). Dada su naturaleza iterativa, el sistema representado por un MCD evoluciona a lo largo del tiempo, y a semejanza del sistema real podrá o no converger a un estado o ciclo de estados.

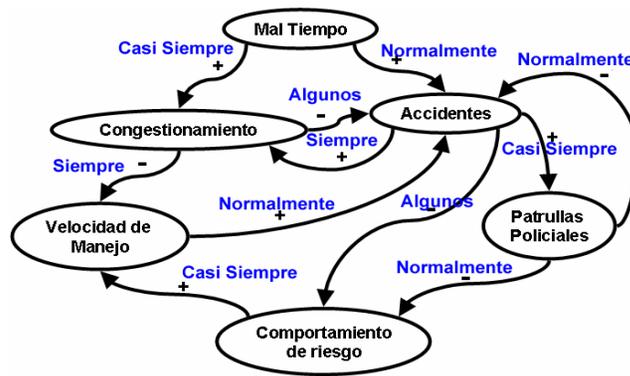


Figura 9. Representación gráfica de un MCD cualitativo

En un MCD el nivel de representación de cada concepto depende del nivel de sus antecedentes en la iteración anterior, y es calculado a través de una suma de productos normalizada, donde la relación entre un concepto y sus antecedentes es modelada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_m(i+1) = S \left[\sum_{k=1}^N w_{m,k} \cdot C_k(i) \right] \quad (2)$$

Donde $C_m(i+1)$ indica el valor del concepto en la siguiente iteración, N indica el número de conceptos, $w_{m,k}$ indica el valor de la relación causal entre el concepto C_k y el concepto C_m , y $S(y)$ es una función usada para normalizar el valor del concepto. La inicialización de cada concepto, $C_m(0)$, se lleva a cabo mediante el establecimiento de los valores específicos basados en las opiniones de expertos o en un escenario específico del cual queremos predecir las consecuencias a través del MCD.

El enfoque dinámico de los MCD ha sido llamado mapas cognitivos difusos dinámicos (MCDD) [105]. Ellos están basados en las dinámicas de las relaciones causales, es decir durante el tiempo de ejecución los valores de los arcos se adaptan a los cambios que surgen en el entorno. En este caso, son usadas algunas funciones de ajuste de los arcos adaptadas al sistema estudiado. La función de ajuste puede estar dada por un conjunto de reglas lógicas, un conjunto de reglas difusas, o una función matemática específica [106]. En [107, 108] se muestra el uso potencial de los MCDs para modelar el comportamiento de sistemas complejos cuando no es posible tener un modelo matemático exacto debido a su complejidad, y hacer frente a la necesidad de gestionar las incertidumbres e inexactitudes asociadas a problemas reales. Además se muestra como los MCDs, permiten utilizar e integrar la experiencia humana y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema complejo que se haya acumulado durante años en la estructura del MCD. Así, en [107] es presentado un sistema multiagente para modelar sistemas complejos basados en el enfoque de mapas cognitivos difusos dinámicos para la representación del conocimiento y el proceso de inferencia, y en [108] se presenta una descripción matemática de un MCD y una metodología para el desarrollo de MCDs en sistemas complejos. En general, los MCD han sido usados en diversas áreas, de ahí que en [109] se haya desarrollado en java una herramienta llamada FCM Designer que facilita su aplicación en cualquier ámbito, ya que permite crear y ejecutar visualmente un MCD o un MCDD. Esta herramienta es utilizada más adelante en el método de verificación para MASOES.

4.2. Descripción del Método de Verificación para MASOES

En esta sección se describe un método para la evaluación de modelos de sistemas reales realizados con MASOES, a fin de evaluar su capacidad emergente y auto-organizativa. Así, para la verificación del modelado realizado con MASOES vamos a tener dos tipos de conceptos:

I. Conceptos Arquitectónicos: son 12 conceptos asociados a los componentes a nivel individual y colectivo propuestos en MASOES, tales como: agentes, interacciones directas e indirectas, mecanismos de aprendizaje, de retroalimentación y de agregación, entre otros.

II. Conceptos ligados a las propiedades emergentes y auto-organizadas: son 7 conceptos asociados a los criterios de verificación que se espera garanticen la emergencia y auto-organización en un sistema complejo modelado con MASOES: densidad, diversidad, independencia, síntesis/agregación, emotividad, auto-organización y emergencia. Son conceptos que una vez instanciados en una aplicación deberían asegurar la existencia de ciertos fenómenos emergentes auto-organizativos, tales como: calidad del contenido, formación de grupos, generación de reglas, entre otros.

4.2.1. Definición de los Criterios de Verificación

En este caso, vamos a suponer que la emergencia y auto-organización en un sistema complejo podrían surgir de los conceptos ligados a las propiedades emergentes y auto-organizadas, tales como: densidad, diversidad, independencia, agregación y emotividad. Estos conceptos serán los criterios de verificación a utilizar (se definen en la tabla 6). Cabe señalar que estos criterios de verificación se basan en los principios establecidos en el PSM para la emergencia de la inteligencia colectiva, y medirán cada una de las fases establecidas en MASOES para la gestión de conocimiento (ver tabla 5).

Tabla 5. Asociación de las fases para la gestión de conocimiento propuestas en MASOES y los criterios de verificación definidos

FASE DE MASOES	DESCRIPCIÓN	NIVEL EN LA ARQUITECTURA	CRITERIO DE VERIFICACION ASOCIADO
SOCIALIZACIÓN	Involucra el proceso de compartimiento de experiencias a través de las interacciones locales. Esta fase requiere la conversión del conocimiento implícito a conocimiento explícito que pueda ser transferible, en otras palabras, a un conocimiento que pueda ser comunicado a los otros.	Colectivo	Densidad Diversidad
AGREGACIÓN	Es el proceso para crear conocimiento explícito mas confiable a partir del filtrado, fusión, clasificación y ampliación del conocimiento explícito que viene de diversas fuentes. Esto se da a través del intercambio de puntos de vista, reuniones, conversaciones y correos, entre otros. Esta fase produce un conocimiento explícito mucho más refinado que facilita su comunicación, difusión y almacenamiento en la base de conocimiento colectiva.	Colectivo	Síntesis
APROPIACIÓN	Consiste en la incorporación del conocimiento explícito en el conocimiento implícito de cada agente. Para esto, se requiere de un proceso de aprendizaje individual.	Individual	Independencia Emotividad

De acuerdo a la tabla 5 podemos ver como el **criterio de densidad y diversidad** acerca de la cantidad de participantes e interacciones en el sistema puede ser asociado a la **fase de socialización**, donde los N agentes (de igual o diferentes tipos) deben interactuar con el fin de compartir experiencias. La homogeneidad/heterogeneidad del agente puede ser vista desde el punto de

vista de las diversas habilidades de cada agente (diferentes tipos de comportamientos a manejar) para realizar cada tarea. Por otro lado, los **criterios sobre la independencia y emotividad** pueden ser asociados a la **fase de apropiación**, ya que dependen de la estructura interna de cada agente. Así, la dependencia/independencia se relaciona con el conocimiento individual adquirido a través de los mecanismos de aprendizaje que posee, que le permitan auto-gestionarse y actuar de manera autónoma en la resolución de problemas, y la emotividad le permite a los agentes cambiar dinámica y emocionalmente su comportamiento guiado a través del estado emocional que posea el agente en un momento determinado. Finalmente, el **criterio de síntesis**, y su correcto funcionamiento, es asociado a la **fase de agregación** donde la existencia o no de un mecanismo de agregación se hace necesario para la depuración y filtrado del conocimiento generado a nivel colectivo.

4.2.2. Mapas Cognitivos Difusos Propuestos

Los MCD propuestos (ver figuras 10, 11, y 12) para la verificación de MASOES establecen las relaciones establecidas entre los conceptos arquitectónicos (componentes del nivel individual y colectivo de MASOES) y los vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas; de esta manera, se tiene un MCD para cada nivel de abstracción considerado: **Nivel I** (propiedades emergentes y auto-organizadas, representando los criterios de verificación para MASOES), **Nivel II** (conceptos arquitectónicos del nivel colectivo de MASOES) y **Nivel III** (conceptos arquitectónicos del nivel individual de MASOES). La definición de los conceptos involucrados en cada nivel es presentado en las tablas 6, 7 y 8, respectivamente.

Tabla 6. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MCD del nivel I

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Densidad	Mide el grado de complejidad existente en la sociedad de agentes. Medido a través de la cantidad de agentes y el número de interacciones directas e indirectas: Alta, Media y Baja Densidad. La complejidad de un sistema se incrementa con el número de sus elementos, el número de interacciones entre ellos, las complejidades de los elementos, y las complejidades de las interacciones. Hay que considerar que resolver un problema con pocos elementos es económico, pero un sistema así es muy frágil. La redundancia es una manera de favorecer la robustez del sistema, aunque demasiada redundancia puede reducir la velocidad de adaptación e incrementar los costos para mantener el sistema. Es necesario buscar un equilibrio.
Diversidad	Mide el grado de homogeneidad o heterogeneidad de la sociedad de agentes. Medido por la cantidad de agentes de cada tipo de agente definido en el sistema: Alta, Media y Baja Heterogeneidad. Un sistema homogéneo es más fácil de controlar y comprender. Un sistema heterogéneo será capaz de enfrentarse a más complejidad, y además, será capaz de adaptarse más rápidamente a cambios repentinos. La heterogeneidad acelera la velocidad de exploración, adaptación y evolución, ya que diferentes soluciones pueden ser pensadas en paralelo. Ahora bien, en un sistema homogéneo (o sociedades homogéneas) hay menos conflictos porque todos los elementos persiguen las mismas metas pero es

	menos flexible a cambios.
Síntesis	Mide el grado de agregación en el sistema. Medido por la calidad del mecanismo de agregación en relación a la calidad del conocimiento colectivo generado, los mecanismos de retroalimentación empleados en el sistema, y el grado de demarcación del campo de acción que favorece la formación de grupos y la coordinación de las actividades a nivel colectivo. Puede ser: Mala, Regular y Buena Calidad.
Independencia	Mide el grado de autonomía y apropiación de los agentes. Los agentes deben ser capaces de emitir sus opiniones de manera independiente, es decir, sin la influencia y manipulación de los otros. Es medido por la calidad del mecanismo de aprendizaje empleado por el agente, y en función de las decisiones que tomen sin imitar o consultar a los demás, basados en sus comportamientos cognitivo y reactivo, y en el uso de las emociones individuales más que sociales. Puede ser: Alta, Media y Baja Dependencia.
Emotividad	Mide el grado de emotividad en el agente. El estado emocional del agente es determinado a través del modelo afectivo en función del grado de satisfacción de acuerdo a los éxitos y fracasos que el agente tenga en el logro de sus metas, de su actitud (positiva, negativa y neutral), y grado de activación/relajación (grado de compromiso fisiológico o psicológico del agente con una emoción dada). Además, el estado emocional del agente permite priorizar el tipo de comportamiento que tendrá en un momento determinado. Puede ser: Alta, Media y Baja Emotividad.
Auto-Organización	Mide el grado de adaptabilidad en el sistema. La adaptación (aprendizaje, evolución) permite al sistema cambiar su comportamiento para enfrentarse al cambio [110]. De ahí que la auto-organización sea un proceso adaptativo y dinámico donde los sistemas adquieren y mantienen ellos mismos su estructura, sin control externo [42] (para mas detalle, ver sección 2.3). Es medida a través del grado de satisfacción del sistema, la anticipación y la robustez. La idea de satisfacción del sistema es cuantificada a través del grado de satisfacción de cada agente, ya que los agentes tienden a repetir las acciones que aumentan su grado de satisfacción según sus objetivos individuales, y a evitar las acciones que lo reducen. La maximización del grado de satisfacción de cada agente en relación a sus objetivos incrementará el grado de satisfacción del sistema, promoviendo su auto-organización. La anticipación (Cognición) [111] permite al sistema predecir un cambio para enfrentarlo y ajustar su comportamiento de acuerdo a esto. Esto es un caso especial de adaptación donde el sistema no requiere pasar por una situación antes de responder a esta. La robustez [112, 113] permite al sistema continuar funcionando a pesar de las perturbaciones. Esto puede ser alcanzado con modularidad, robustez distribuida o redundancia. La idea es combinar los 3 enfoques para tener sistemas auto-organizados exitosos, ya que así pueden mantener su integridad ante los cambios, o ante un entorno impredecible o inesperado.
Emergencia	Mide el grado de evolución del sistema a través de la posibilidad de la aparición de alguna(s) propiedad(es) emergente(s) (para mas detalle, ver sección 2.3). Algunas cosas que pueden emerger tienen que ver con patrones a nivel temporal y espacial, tales como la calidad del conocimiento colectivo generado, nuevas políticas y normas colectivas, la cooperación entre los agentes, y el número de grupos o comunidades creadas, entre otros. Puede ser: Alta, Media y Baja Emergencia.

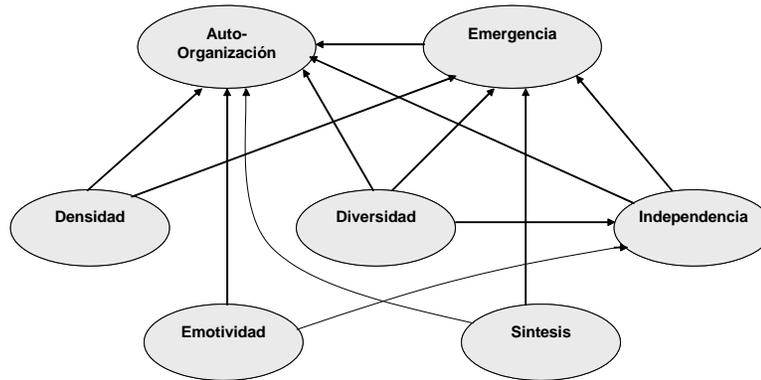


Figura 10. MCD del Nivel I para la verificación de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (criterios de verificación)

Tabla 7. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II

CONCEPTO	DESCRIPCION
Nro. de Agente	Se refiere a la cantidad de agentes en el sistema. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja Densidad. Estos valores son determinados dependiendo de la aplicación.
Tipo Comportamiento Agente	Se refiere a los diferentes tipos de comportamiento que pueden tener los agentes. Pueden ser: Reactivos, Cognitivos e Imitativos. Esto medirá la homogeneidad/ heterogeneidad de los agentes en el sistema. Estos valores dependen de la aplicación.
Interacción Directa	Se refiere a la cantidad de interacciones entre los agentes del sistema. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja Densidad. Estas interacciones producen una retroalimentación que regula el sistema.
Interacción Indirecta	Se refiere a la cantidad de interacciones entre los agentes del sistema a través del entorno. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja Densidad. Estas interacciones producen una retroalimentación que regula el sistema.
Mec. Retroalim. +	Es un mecanismo de reforzamiento que afecta la agregación, contribuye al comportamiento imitativo o social, y actúa localmente [112, 34]. Se refiere a que tan correctamente funciona este mecanismo. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja Calidad.
Mec. Retroalim. -	Es un mecanismo para estabilizar los procesos y autorregularlos, evitando las fluctuaciones indeseables. Conduce a un comportamiento adaptativo y emergente, favorece la robustez ante nuevas situaciones y actúa globalmente [114, 34]. Se refiere a que tan correctamente funciona este mecanismo. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja Calidad.
Mecanismo de Agregación	<p>Representa la calidad del mecanismo encargado de obtener la información pertinente de cada individuo y combinarla de manera que pueda hacerla útil al colectivo [115]. El mecanismo de agregación depende de la aplicación, en otras palabras, del sistema de inteligencia colectiva que se intente modelar. Por ejemplo, hay una variedad de mecanismos de agregación basados en la web: Sistemas de Recomendación (<i>Filtrado colaborativo para comparar el comportamiento de los miembros</i>), Sistemas de Votación (<i>Democracia directa para determinar la opinión colectiva</i>), Hipertexto Adaptativo (Aprendizaje de reglas de asociación, usa las huellas de los usuarios para dinámicamente organizar los enlaces entre las páginas web) y Folksonomías (<i>Usadas en servicios web para permitir a los usuarios etiquetar artefactos con metadatos descriptivos</i>), entre otros. Puede ser medido como: Alta, Media y Baja calidad de los mecanismos de agregación.</p> <p>Otro mecanismo de agregación descentralizado y distribuido que permite la coordinación y comunicación indirecta son los campos de acción en los sistemas estémérgicos. Normalmente estos mecanismos son inspirados biológicamente [116], como es el caso de las feromonas en las colonias de hormigas [117, 34] que forrajean para encontrar comida a través de caminos de feromonas. De esta manera, un grupo de agentes son coordinados por el almacenamiento de feromonas sintéticas (datos que se evaporan a través del tiempo)</p>

en el entorno, que al encontrarlas reaccionan en función de la cantidad encontrada.

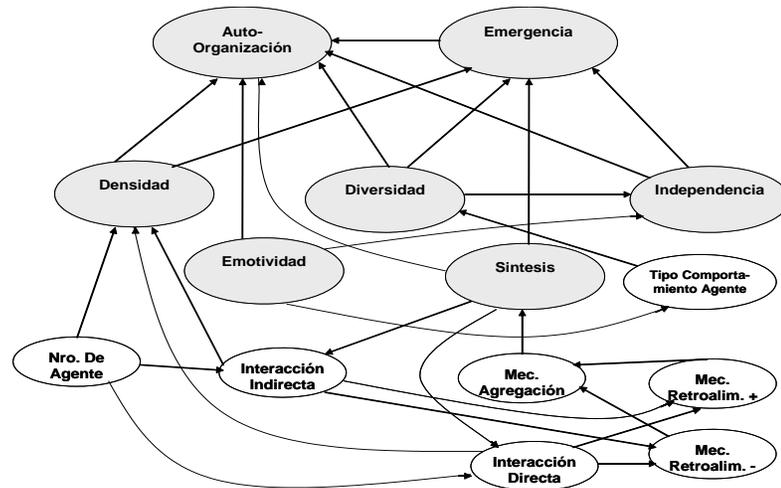


Figura 11. MCD del nivel II para verificar los conceptos arquitectónicos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas del nivel I

Tabla 8. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Componente Reactivo	Encargado de producir el comportamiento reactivo del agente. Las reacciones son reglas asociadas a los estados emocionales, ya que se quiere tener algunas reglas activas y otras no, de acuerdo al estado emocional del agente y a la actividad que desarrolla en un momento determinado. Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Cognitivo	Es el responsable de producir el comportamiento cognitivo a través de los mecanismos cognitivos (aprendizaje, razonamiento) que posea el agente, de los mecanismos de toma de decisión intencional o deliberativa que tiene, entre otros. Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Conductual	Favorece la adaptación de cada agente con su entorno, ya que crea un modelo interno del mundo (manejo de conocimiento explícito) que regula su comportamiento de una manera consciente y emocional. Cada proceso de toma de decisiones en el agente estará basado en sus objetivos individuales y colectivos, su estado emocional, y el conocimiento adquirido de manera individual y colectiva. De esta manera decide qué tipo de comportamiento es recomendable en un momento dado. Los tipos de comportamiento a considerar son imitar, reaccionar y razonar, los cuales están enlazados a un estado emocional positivo o negativo de acuerdo al modelo afectivo propuesto para MASOES. Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Social	Es el encargado de promover conciencia en los agentes sobre el trabajo y la experiencia de los otros agentes. Específicamente, aprovecha la experiencia de los otros (aprendizaje social), es decir, evita el aprendizaje de cosas que ya han aprendido sus vecinos. Este componente conecta el aprendizaje colectivo colaborativo con el aprendizaje individual. Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Tipo de Emoción	Se refiere al tipo de emoción que tenga el agente en un momento dado. Puede ser medido como: Positivas, Ligeramente y Altamente Negativas, de acuerdo al modelo afectivo propuesto para MASOES.

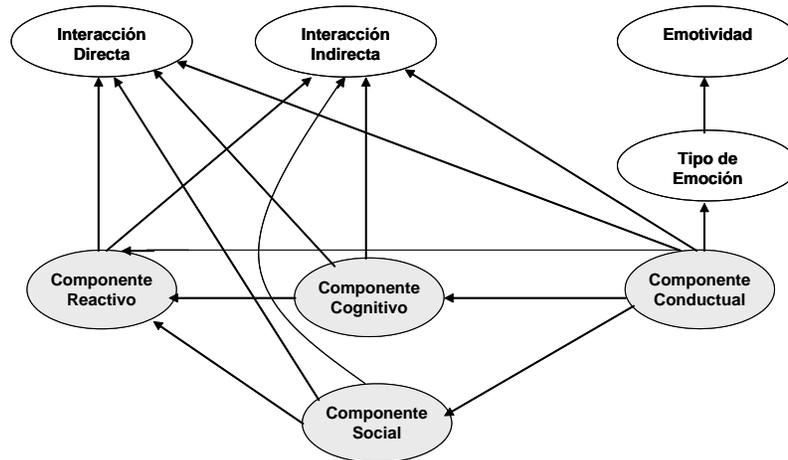


Figura 12. MCD del Nivel III para verificar los conceptos arquitectónicos del nivel II y III

4.2.3. Metodología para usar el Método de Verificación para MASOES

De acuerdo con [105], existen tres maneras de establecer relaciones causales entre los conceptos en esta fase: a) **Basados en la Opinión de Expertos** (cada experto ofrece su MCD de acuerdo a su experiencia), a través de b) **Mapas Cognitivos Difusos Aumentados** (varios MCDs se combinan para formar un nuevo MCD), c) **Basados en Datos Históricos** (los datos de funcionamiento del sistema se utilizan como patrón de entrada). En este trabajo la opción “a” es utilizada. Por esta razón, en esta fase un peso a cada relación para cada mapa propuesto es asignado por los expertos de acuerdo a [106]. Para la asignación de los pesos se utiliza una escala del 1 al 10, donde 1 representa que el concepto antecedente influye poco sobre el concepto consecuente, mientras que un peso de 10 indica que el concepto consecuente es más sensible a los cambios del concepto antecedente. Además, el signo negativo indica que la relación causal es negativa, en otras palabras, que los conceptos involucrados se afectan negativamente. Las relaciones son establecidas usando una función de ajuste basada en las reglas definidas más abajo y los valores que se muestran en la tabla 9. Además, asumimos que el estado de los conceptos en un sistema modelado se puede encontrar en tres zonas: alta, media o baja. Así,

- Se dice que un concepto tiene un *estado alto* (entre $2/3$ y 1) cuando funciona correctamente y contribuye de manera importante con el funcionamiento del sistema modelado.
- Se dice que un concepto tiene un *estado medio* (entre $1/3$ y $2/3$) cuando su funcionamiento debe ser validado y/o contribuye de manera no tan importante con el funcionamiento del sistema.

- Se dice que un concepto tiene un *estado bajo* (entre 0 y 1/3) cuando no funciona y/o no contribuye con el funcionamiento del sistema.

Vemos así que si el concepto no es importante tendrá un valor que tenderá a cero, lo que significa que no contribuye en nada en el sistema (por consiguiente, supervisar su comportamiento no nos interesa. Por otra parte, para el cálculo final del peso de las relaciones, se utiliza la siguiente fórmula a fin de normalizar los valores:

$$P_{i,j} = \frac{1}{\sum_{K=1}^N W_{k,j}} \times w_{ij} \tag{3}$$

Donde W_{ij} es el peso asociado por el experto a la relación entre los conceptos C_i y C_j , $P_{i,j}$ es el peso final asociado a dicha relación, y N es el número de conceptos. Los valores de las relaciones se obtienen por la siguiente tabla:

Tabla 9. Valores posibles para las relaciones

VALOR	VARIABLE LINGÜÍSTICA
1.00	Completa ⁺
0.75	Alta ⁺
0.50	Media ⁺
0.25	Baja ⁺
0.00	Nula
-0.25	Baja ⁻
-0.50	Media ⁻
-0.75	Alta ⁻
-1.00	Completa ⁻

De acuerdo a los tres estados considerados y los posibles valores planteados en la tabla 9, se podrían construir las siguientes reglas según [109]. Así, nuestra función de ajuste es definida a través de este conjunto de reglas difusas:

- Si el concepto antecedente es **Alto** y el consecuente es **Alto** entonces la relación es **Completa⁺** (1.0).
- Si el concepto antecedente es **Alto** y el consecuente es **Medio** entonces la relación es **Alta⁺** (0.75).
- Si el concepto antecedente es **Alto** y el consecuente es **Bajo** entonces la relación es **Baja⁺** (0.25).
- Si el concepto antecedente es **Medio** y el consecuente es **Alto** entonces la relación es **Alta⁺** (0.75).

- Si el concepto antecedente es **Medio** y el consecuente es **Medio** entonces la relación es **Media⁻** (-0.5).
- Si el concepto antecedente es **Medio** y el consecuente es **Bajo** entonces la relación es **Alta⁻** (-0.75).
- Si el concepto antecedente es **Bajo** y el consecuente es **Alto** entonces la relación es **Alta⁻** (-0.75).
- Si el concepto antecedente es **Bajo** y el consecuente es **Medio** entonces la relación es **Media⁻** (-0.5).
- Si el concepto antecedente es **Bajo** y el consecuente es **Bajo** entonces la relación es **Completa⁻** (-1.0).

Estas reglas se utilizan para calcular todas las relaciones entre los distintos conceptos. Así, todas las relaciones se calculan bajo las mismas reglas, pero cada una de ellas tendría un peso asociado por los expertos, que puede variar de relación en relación. Por ejemplo, si se toma la relación entre el Concepto 1 y el Concepto 2, y se supone que el Concepto 2 tiene un estado Alto y el Concepto 1 tiene un estado Medio, entonces la relación resultante obtenida por las reglas tendrá un valor de alta⁺ (es decir 0.75). Este valor es multiplicado por el peso de la relación, si asumimos que el peso de esta relación es de 0.5, entonces el resultado final de la relación será de 0.375 [109].

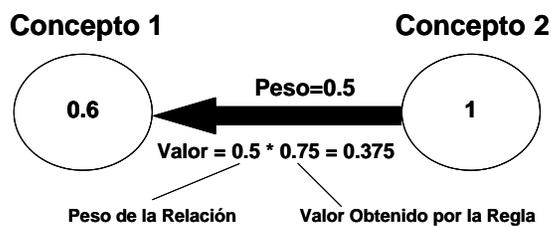


Figura 13. Ejemplo para establecer las relaciones entre los distintos conceptos dinámicamente

II. Fase de Ejecución

De acuerdo a los MCD propuestos y la función de ajuste basada en las reglas difusas ya descritas en la sección anterior, para establecer la dinámica de las relaciones causales entre los diferentes conceptos, el algoritmo de ejecución es el siguiente:

1. Obtener los estados iniciales para todos los conceptos (por los expertos), según el sistema a modelar y el escenario a evaluar ($C_0 = [c_0, c_1, \dots, c_n]$).
2. Mientras el sistema no converja a un estado estable (*estado que representa el momento en que los valores de los conceptos no cambian más y el sistema se estabiliza*):
 - a. Obtener los valores de las relaciones causales a través de $w_{i,j} = df_{i,j}(C^{t-1})$, Donde $df_{i,j}$ es la función de ajuste para la relación $w_{i,j}$.

- b. Obtener los estados actuales a través de $c_j^t = \sum_{i=0}^n (w_{i,j} \cdot c_i^{t-1})$.

III. Fase de Análisis e Interpretación de los Resultados

Este algoritmo es hecho a través de una herramienta llamada FCM Designer, herramienta creada en Java para crear y ejecutar visualmente un MCD o un MCDD (más detalles en [109]). Así, el MCD genérico es diseñado e integrado con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos del sistema real modelado (ver figura 14).

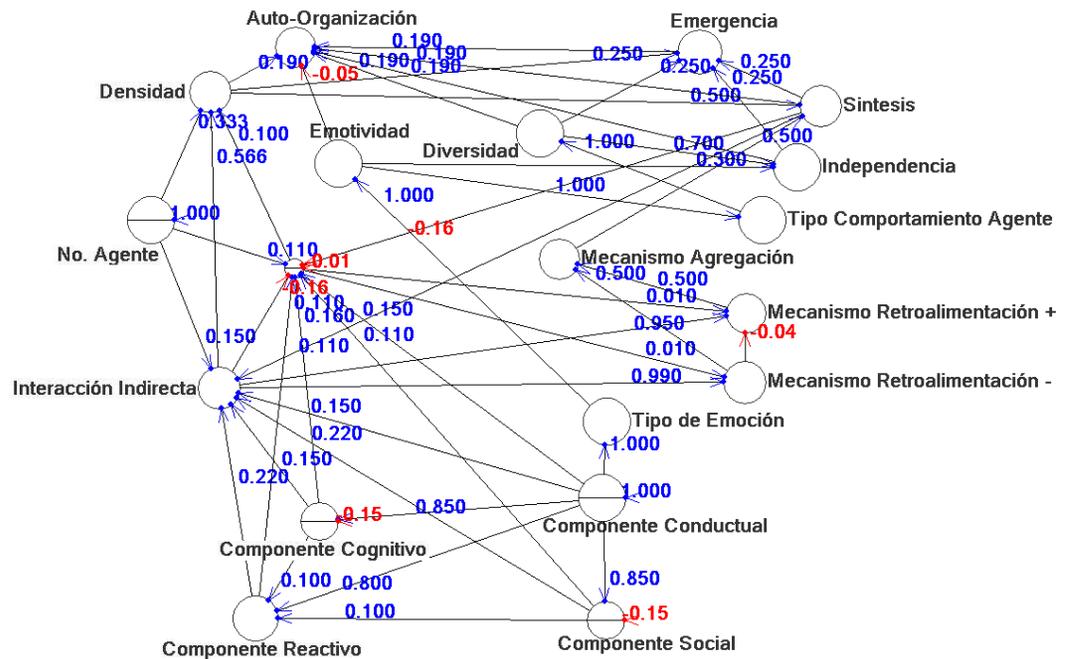


Figura 14. MCD integrado con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos

En resumen, la instanciación del método de verificación para un sistema modelado con MASOES consiste en definir los escenarios posibles, y luego, inicializar los conceptos de acuerdo a las características y funcionamiento del sistema a estudiar en un escenario dado (paso I del algoritmo). Posteriormente, según el paso II del algoritmo, tendríamos un MCD del sistema modelado que debemos hacer iterar con el FCM Designer, hasta que el sistema se estabilice. Finalmente, hacemos el análisis e interpretación de los resultados.

CAPÍTULO V

CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan casos de estudio, a fin de verificar la utilidad de MASOES. En particular, se instancian diversos sistemas con MASOES: Wikipedia [118, 95], desarrollo de software libre (en específico, la comunidad del kernel de linux) [118, 95], y el comportamiento colectivo de los peatones [119, 120]. El caso de estudio sobre el comportamiento colectivo de los peatones utiliza los resultados obtenidos en un estudio experimental [121, 122] sobre los desplazamientos colectivos de peatones, realizado en el Centro de Investigaciones sobre la Cognición Animal (CRCA-*Université Paul Sabatier*, France), como parte del trabajo doctoral. Cada caso de estudio es modelado a través de MASOES, luego se diseñan algunos escenarios, se aplica el método de verificación del capítulo anterior, y finalmente, se analizan los resultados obtenidos.

5.1. Wikipedia

Wikipedia es una enciclopedia de contenido libre que todos pueden editar. Esta enciclopedia es el resultado de un trabajo colectivo, donde cada artículo es el producto de múltiples contribuciones, que son mejoras y extensiones de un borrador inicial. En este caso de estudio, caracterizaremos a través de MASOES los componentes y procesos involucrados a nivel individual y colectivo en Wikipedia. Esto nos permitirá verificar si se comporta como un sistema emergente y auto-organizado. Adicionalmente, a partir de este modelado de Wikipedia con MASOES, se analiza y verifica el modelo afectivo propuesto en este trabajo para MASOES.

5.1.1. Modelado de Wikipedia con MASOES

En esta sección, Wikipedia es descrita a través de MASOES, siguiendo la metodología propuesta en la sección 3.4.

D) Fase de análisis:

I.1. Agentes y Tareas en Wikipedia

Modelar Wikipedia a través de MASOES, implica considerar los actores de Wikipedia como agentes que cumplen diversos roles y tareas de manera individual o colectiva. Específicamente, desde el punto de vista de los “privilegios de sistema” hay siete tipos de actores en Wikipedia con una jerarquía definida: *anónimo*, *de software* (“bot”), *registrado*, *burócrata*, *operador del sistema* (“Sysop”), *administrador* (“Steward”) y *desarrollador*. Los

wikipedistas (agentes) interactúan en un espacio común (entorno Web) usando el mismo editor y obedeciendo el mismo conjunto de reglas (ver tabla 10).

I.2. Niveles de Interacción

Hay tres niveles de interacción a considerar en Wikipedia:

- **Local.** Los wikipedistas interactúan unos con otros, contribuyendo con su conocimiento y habilidades. Cada agente actúa en concordancia con la información local que tiene y de acuerdo con sus objetivos. Esas interacciones locales pueden ser indirectas a través del artículo, páginas de discusiones, portales y carteleras; y directas a través del correo electrónico, canales de chat (IRC, "*Internet Relay Chat*", en inglés), entre otros.
- **Grupal.** En este nivel, los wikipedistas interactúan recíprocamente según las normas y los objetivos de la comunidad a la que ellos pertenecen, es decir, los wikipedistas de la comunidad en inglés siguen las normas y los objetivos de Wikipedia en inglés. Este grupo es variable, no predefinido, y es mantenido por sus propios miembros. Además, los wikipedistas se agrupan a sí mismos dentro de la comunidad por tópicos o áreas de interés, o en comités para resolver problemas específicos.
- **General.** Representa el nivel de interacción más alto, donde las interacciones se dan entre las comunidades multilingüe existentes (inglés, francés, español y portugués, entre otras) y con otros proyectos de la Fundación Wikimedia, tales como: Wikibooks, Wiktionary y Wikiversity, entre otros. Los proyectos de la fundación son coordinados a fin de alcanzar sus objetivos generales. Así, a través de esta interacción las comunidades y proyectos existentes podrían ser capaces, por ejemplo, de imitar las políticas y acciones que han sido exitosas en alguna de ellas.

Tabla 10. Actores con algunas de sus Tareas en Wikipedia

ACTOR	DESCRIPCION	ALGUNAS TAREAS
Desarrollador	Es un agente implicado en el mantenimiento de los servidores y/o el desarrollo del software de Wikipedia. Además, ellos conceden los privilegios del sistema a los administradores y burócratas.	Crear portales sobre tópicos específicos. Desarrollar código para mejorar MediaWiki. Hacer páginas de documentación o tutoriales. Crear plantillas y algoritmos. Mantener los Servidores. Conceder privilegios a administradores y burócratas. Bloquear y desbloquear IP's. Participar en la votación por candidatos a artículos sobresalientes, país de la semana y administrador.
Administrador (“Steward”, en inglés)	Estos agentes poseen las mismas responsabilidades que los agentes burócratas, y son, además, capaces de cambiar el rol de cualquier agente dado. Además, ellos son los últimos árbitros en cualquier conflicto de	Nombrar y eliminar a otros administradores, operadores del sistema y burócratas. Arbitrar en conflictos serios, sobre la gestión de contenido en Wikipedia.

	Wikipedia.	
Burócrata	Es una clase especial de administrador que es capaz de nombrar o eliminar a otros administradores y burócratas. La existencia de los burócratas es para aliviar las tareas de los desarrolladores.	Nombrar y eliminar a otros burócratas y operadores del sistema.
Operador del Sistema (Sysop, ("System Operator", en inglés)	Es un wikipedista que puede acceder a algunas funciones restringidas del software de Wikipedia. Casi todos los poderes de estos administradores son completamente reversibles por cualquier otro sysop (incluyendo la supresión y bloqueo de las direcciones IP) u operador del sistema.	Borrar páginas e imágenes. Ver y recuperar páginas borradas e imágenes. Bloquear y desbloquear IP de usuarios anónimos. Bloquear y desbloquear a usuarios registrados. Proteger o bloquear una página así como las funciones inversas. Editar en páginas protegidas o bloqueadas. Revertir páginas rápidamente. Editar el espacio de nombres de MediaWiki. Mediar conflictos. Cerrar debates para borrado. Combatir el vandalismo. Participar en la votación por candidatos a artículos sobresalientes, país de la semana y operadores del sistema.
Usuario Registrado	Es un agente que ha creado su nombre de usuario con su contraseña. Puede tener una lista con sus contribuciones. También puede tener una página con información personal, facilitar un correo electrónico de contacto, y tener "una página de discusión" desde donde otros usuarios pueden comentarle cosas o establecer diálogos. Las contribuciones de un usuario registrado son identificadas con su apodo ("nickname", en inglés) en el archivo histórico de artículos.	Adquirir experiencia en el empleo de técnicas para la sintaxis y edición de artículos. Mantener su página personal. Interactuar recíprocamente con otros usuarios a través de su página de discusión. Personalizar los aspectos de apariencia de la Wikipedia y el ambiente de edición de artículos. Vigilar ciertos artículos (incorporados a su propia lista de seguimiento) para comprobar los cambios introducidos en ellos y participar cuando él lo considere necesario. Transferir un artículo (necesario para fusionar páginas). Editar página de discusión o artículo. Solicitar borrado de artículo. Combatir el vandalismo. Demostrar su buena fe, haciendo contribuciones útiles durante un tiempo. Participar en la votación por candidatos a artículos sobresalientes, país de la semana y operadores del sistema. Verificar derechos de autor.
Usuario "Bot"	Estos agentes son como "robots de software" que funcionan tanto autónomamente como manualmente para hacer tareas repetitivas. Además, son usuarios que han sido creados por cualquier usuario registrado o administrativo en	Actualizar y mejorar las páginas por tópicos para reducir los enlaces redundantes. Creación de nuevas páginas basadas en información ya desarrollada, y revisión de ortografía.

	Wikipedia.	
Usuario Anónimo	Estos agentes no se han registrado en el sistema con un nombre de usuario y una contraseña. Pueden editar casi cualquier artículo o página de discusión pero no tiene algunas funcionalidades. Sus intervenciones son identificadas en el archivo histórico del artículo por su IP de acceso.	Adquirir experiencia en el empleo de técnicas para la sintaxis y edición de artículos. Editar página de discusión o artículo. Solicitar borrado de artículo. Combatir vandalismo. Verificar Derechos de autor.

II) Fase de diseño:

II.1. Componentes y Procesos de Wikipedia a Nivel Individual

De acuerdo con las tareas desarrolladas por los wikipedistas, es conveniente que los agentes desarrollen los tres tipos de comportamiento propuestos en MASOES (reactivo, cognitivo e imitativo), y que lo puedan cambiar dinámicamente según su estado emocional, como sucede en la realidad. Para ello, cada agente wikipedista tendrá los cuatro componentes individuales de MASOES (ver tabla 11), es decir, los tres componentes asociados a los tres tipos de comportamiento ya mencionados, más el componente conductual, encargado de gestionar todo lo referentes al cambio dinámico de comportamiento en el agente.

Tabla 11. Componentes individuales de MASOES en Wikipedia

COMPONENTES INDIVIDUALES EN MASOES	REPRESENTACIÓN EN WIKIPEDIA
Conductual	Los agentes en Wikipedia activan su comportamiento dependiendo de la situación que ellos enfrentan y del estado emocional que tengan en un momento dado. El estado emocional (el cual mide el grado de motivación y compromiso de cada wikipedista) permitirá al componente conductual llevar a cabo el cambio de comportamiento del agente dinámicamente. Un ejemplo de esto es una guerra de edición (definida por Wikipedia como 3 ediciones de texto por un usuario particular en un artículo dado dentro de 24 horas, entre las ediciones de otros usuarios) lo cual podría provocar un conflicto entre ellos, y así, diferentes tipos de emociones y comportamientos pueden surgir: un estado emocional altamente negativo, si el problema lleva a una discusión verbal (un comportamiento reactivo asociado); un estado emocional ligeramente negativo, si el agente prefiere la evasión (un comportamiento cognitivo asociado), y finalmente, un estado emocional positivo, si el agente intenta la reconciliación (un comportamiento imitativo asociado).
Reactivo	Existen mecanismos de supervisión en Wikipedia para asegurar que una página, o un conjunto de ellas, mantengan su calidad. Una persona que desea mantener esas páginas será notificada en caso de cambios, permitiéndole reaccionar en caso de vandalismo. Tendrá un comportamiento reactivo debido a un estado emocional negativo, tal como la ira, de acuerdo con del modelo afectivo de MASOES. Igualmente, cuando un wikipedista comete un error, tal como violación de derechos de autor, y es castigado por la comunidad, un comportamiento reactivo puede surgir guiado por un estado

	emocional negativo como la depresión.
Cognitivo	Es representado por el mecanismo cognitivo de cada agente y sus objetivos individuales. Cuando se producen cambios en el contenido publicado, el wikipedista hace uso de su conocimiento y experiencia para editar, evaluar, discutir y mejorar el contenido.
Social	Almacena el conocimiento importante sobre tutoriales, objetivos, acciones y resultados de las actividades colectivas. Aparte de esto, almacenará por medio de un conjunto de reglas el conocimiento necesario para manejar las ediciones, los portales, y la creación de artículos, en otras palabras, el conocimiento sobre cómo usar la tecnología Wiki, entre otras. Por ejemplo, las normas que son establecidas por la comunidad para luchar contra el vandalismo, para evitar conflictos, y para usar las páginas de discusión. De esta manera, los wikipedistas intentarán no violar los estándares de la comunidad como están descritos en las políticas y términos, persuadir a aquellos que estén incurriendo en faltas, y colaborar en el proceso de aprendizaje de nuevos colaboradores que intentan imitar a los wikipedistas más experimentados.

II.2. Componentes y Procesos de Wikipedia a Nivel Colectivo

Los componentes y procesos colectivos involucrados en Wikipedia pueden ser vistos en las tablas 12 y 13, respectivamente. En el caso de los procesos colectivos se describirá el proceso de formación de redes sociales, y algunos mecanismos utilizados en Wikipedia para este propósito.

Tabla 12. Componentes Colectivos de MASOES en Wikipedia

COMPONENTE COLECTIVO EN MASOES	REPRESENTACION EN WIKIPEDIA
Conjunto de Reglas	Este conjunto de reglas está formado por todas aquellas reglas establecidas colectivamente, tales como: reglas para la edición de artículos (por ejemplo, no borrar material útil, uso de las páginas de discusión, etc.), reglas para la interacción social entre Wikipedistas (por ejemplo, uso de las Wikietiquetas), entre otras. De acuerdo con [123], en el año 2007 Wikipedia contaba con 20 reglas generales (entre ellas, las que se refieren a la edición de artículos, paginas de discusión, etc.), 21 reglas acerca de cómo trabajar con otros, y 42 políticas (desarrolladas por la comunidad para describir las mejores prácticas, clarificar principios, resolver conflictos, entre otros).
Campo de Acción	El campo de acción es conformado por las páginas de la comunidad donde cada miembro participa, contribuye y comparte su conocimiento con el resto.
Base de Conocimiento Colectivo	Aquí se encuentra el contenido de los artículos generados por el colectivo, así como el conjunto de reglas comunes o colectivas para la edición, comunicación, promoción y administración.
Objetivo Colectivo	Generar contenido confiable, abierto, libre y verificable en un idioma específico (inglés, español y francés, entre otros), según las normas y políticas del proyecto.

Tabla 13. Procesos Colectivos de MASOES en Wikipedia.

PROCESO COLECTIVO EN MASOES	REPRESENTACION EN WIKIPEDIA
<p>Formación de Redes Sociales</p>	<p>Según [124], se considera una <i>red social</i> como un sistema abierto y horizontal que agrupa un conjunto de personas que se identifican con las mismas necesidades y problemáticas, y que además, surge de una intensa interacción social para maximizar los recursos y contribuir a la resolución de problemas. La interacción social en Wikipedia se da de manera espontánea, autónoma, y se formaliza en redes sociales a través de la creación de comunidades (<i>grupos de Wikipedistas por idioma</i>) y comités (<i>pequeños grupos de Wikipedistas basados en objetivos colectivos, creados para cumplir tareas específicas dentro de una comunidad determinada</i>), con el fin de establecer intereses y fines comunes. Esta formación se da día a día porque los Wikipedistas están conscientes de que son ellos quienes organizan la dinámica de funcionamiento, quienes deciden sobre que se va a trabajar, y quienes evalúan los resultados generados. En este sentido, las redes sociales en Wikipedia son auto-organizativas, se auto-diagnostican y auto-evalúan. En Wikipedia, las redes sociales son representadas por las Comunidades y Comités, para permitir a los Wikipedistas actuar de manera agrupada para alcanzar sus objetivos colectivos, y contribuir con los objetivos generales del proyecto (por ejemplo, tener una enciclopedia multilingüe).</p>
<p>Mecanismos de Retroalimentación</p>	<p>Con respecto a la generación de contenido, hay mecanismos para promover su generación y depuración. Los mecanismos de retroalimentación involucrados en Wikipedia son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo de Aprendizaje Colaborativo: El conocimiento colectivo explícito es generado por las contribuciones realizadas por los miembros a través de un <i>mecanismo de aprendizaje colaborativo no dirigido</i> (sin instructor), es decir, bajo la responsabilidad de cada uno. De este modo, los Wikipedistas deciden que hacer, aprender, discutir, aceptar o rechazar, pero siguiendo un conjunto de normas establecidas por ellos a través del editor, portales y páginas de discusión • Mecanismo para la Difusión y Obtención de la Calidad: Mecanismo para la agregación, filtrado y depuración de las contribuciones (por ejemplo, revisiones, mejoras, discusiones, eliminaciones y publicación de las contribuciones sobresalientes). • Mecanismo de Recompensa: Mecanismo para motivar y premiar las contribuciones sobresalientes de los Wikipedistas (por ejemplo el reconocimiento por contribuciones sobresalientes). • Mecanismo de Castigo: Mecanismo para castigar la desobediencia a las reglas establecidas (por ejemplo, el bloqueo de páginas, expulsión o bloqueo de miembros, entre otros).

III) Fase de integración:

III.1. Fases para el manejo del conocimiento en Wikipedia

La siguiente tabla presenta las tres fases de MASOES para la gestión del conocimiento (*socialización, agregación y apropiación*) en Wikipedia.

Tabla 14. Wikipedia a través de las fases de gestión general del conocimiento

FASE	REPRESENTACION EN WIKIPEDIA
<p>Socialización</p>	<p>Los wikipedistas deben hacer explícito su conocimiento al resto de su comunidad a través de la creación, modificación y eliminación de artículos, entre otras contribuciones. Cuando un wikipedista decide compartir su conocimiento, participa en la edición de artículos a través del editor de Wikipedia y según las normas establecidas para cada caso. El software de Wikipedia facilita el almacenamiento de las contribuciones o el contenido, la dirección IP o los nombres de la persona que lo hizo, y otros datos adicionales como: fecha, hora y versión. Además, esto permite a cada wikipedista editar siguiendo una estructura predefinida (plantilla), que facilita la transformación del conocimiento implícito a formas estructuradas y transferibles. Para aumentar la seguridad en la actuación de sus miembros, Wikipedia tiene un espacio llamado “Zona de Pruebas”, donde los principiantes de Wikipedia (usuarios anónimos o registrados) tienen la posibilidad de practicar sin causar ningún daño.</p>
<p>Agregación</p>	<p>Involucra procesos colectivos para la revisión, depuración, eliminación y publicación de las contribuciones. Cada acción o participación de los wikipedistas genera reacciones en los otros miembros. Así, la creación de un artículo, por ejemplo, causa que otros miembros lo lean, lo revisen, lo acepten o lo rechacen. Cuando los artículos son revisados puede suceder que el artículo sea: nominado a artículo sobresaliente, borrado, ampliado, entre otras cosas. Las revisiones colectivas apoyan: la clasificación de artículos por área, la conexión a otros artículos relacionados, la solicitud de impresión de los mejores artículos en WikiPress, la generación de una nueva política o categoría, la entrega de premios a los mejores autores, y el aumento de la reputación de algún wikipedista dentro del proyecto.</p>
<p>Apropiación</p>	<p>Los wikipedistas debe registrarse en una comunidad, leer artículos, y aprender sobre las políticas, cómo usar el editor de Wikipedia, y cómo interactuar o comunicarse con los otros miembros a través de los recursos de Wikipedia (por ejemplo: páginas wikis, correo y chat, entre otros). Este aprendizaje ocurre por ensayo y error, es decir, mientras más práctica más habilidades o capacidades adquieren, lo que estimula la participación de los wikipedistas debido a que adquieren más seguridad para participar.</p>

Por medio de la representación de las fases de análisis, diseño e integración en Wikipedia, puede afirmarse de acuerdo con MASOES que el sistema modelado cuenta con los componentes y procesos claves, tanto a nivel individual como colectivo, para generar un comportamiento emergente y auto-organizativo a nivel macro. En las siguientes secciones se presenta la fase de comprobación del comportamiento emergente y auto-organizativo del sistema modelado, en este caso a través del método de verificación propuesto para MASOES.

IV) Fase de Comprobación:

En la sección 5.1.1, la Wikipedia en inglés fue modelada a través de MASOES, y en esta sección, este modelo es verificado mediante el método de verificación propuesto en la sección 4.2. Para ello, los conceptos arquitectónicos y los enlazados a las propiedades emergentes y auto-organizados son instanciados en las tablas 15, 16 y 17, a partir del modelado realizado para la Wikipedia en inglés. Estos conceptos forman parte del MCD inicial para Wikipedia (ver figura 15), que será utilizado en los escenarios diseñados para estudiar la auto-organización y emergencia en esta enciclopedia.

Tabla 15. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MDC del nivel I para Wikipedia

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Densidad	En Wikipedia, cada artículo es producto de múltiples contribuciones de una gran masa crítica de participantes, que garantizan la calidad del contenido generado. El nivel de participación de cada uno de los agentes esta dado por el número de contribuciones realizadas, estos pueden ser: no participativo, ocasional o intensivo.
Diversidad	La diversidad en Wikipedia se observa en los diferentes agentes que participan, tanto en la creación, revisión y mantenimiento del contenido (<i>usuarios anónimos, de software (bots) y registrados</i>), como en la gestión de la plataforma que soporta a Wikipedia (<i>burócratas, administradores y desarrolladores</i>). En Wikipedia puede participar cualquier persona experta o no, lo que garantiza una gran diversidad de ideas y opiniones.
Síntesis	La formación de redes sociales en Wikipedia, sus normas y reglas (para la edición e interacción social), y el contenido logrado con altos niveles de calidad, es el resultado de un proceso de agregación y depuración colectivo generado a partir de la participación intensa de un gran número de agentes, y del uso de la tecnología wiki ¹¹ como mecanismo de agregación [125, 126].
Independencia	Cada wikipedista que participa en el proceso de generación de contenido en Wikipedia, se integra inicialmente de acuerdo a sus conocimientos, capacidades, objetivos, e intereses particulares. Luego, después de un proceso de aprendizaje, el wikipedista puede tomar decisiones de manera autónoma. Los autores son libres de modificar cualquier artículo, procurando siempre que sus opiniones sean independientes de la influencia de los otros wikipedistas, evitando así manipulaciones.
Emotividad	Es medida por el grado de satisfacción de los wikipedistas de acuerdo a la actividad realizada, y es influida por los reconocimientos o sanciones obtenidas por sus contribuciones. Por ejemplo, cuando un Usuario Registrado propone y desarrolla un contenido recibiendo reconocimientos por la calidad del aporte realizado, éste podría experimentar un alto grado de satisfacción que se traduciría en alegría o felicidad, lo que lo moverá a tener un comportamiento repetitivo (dar mas aportes) de acuerdo al modelo afectivo de MASOES. Sin embargo, el rechazo del aporte realizado puede causar en el Usuario Registrado un grado de satisfacción bajo, provocándole depresión o ira, y activando un comportamiento reactivo según el modelo afectivo de MASOES.

¹¹ El término wiki, derivado del hawaiano *wiki wiki* (rápido), hace referencia a la tecnología que permite que múltiples usuarios puedan crear y modificar páginas web de manera conjunta, permitiendo así el desarrollo de proyectos colaborativos alojados en servidores públicos [127].

<p>Auto-Organización</p>	<p>Wikipedia posee la capacidad de auto-organizarse, siendo posible que un gran grupo de personas logren de forma colectiva y descentralizada, a través del seguimiento de reglas bien definidas y una herramienta sencilla (la tecnología wiki), la creación de una enciclopedia abierta con contenidos de una calidad comparable a la lograda por organizaciones centralizadas y rígidamente controladas, como por ejemplo la Enciclopedia Británica [128]. Esto es posible, gracias a la supervisión constante del contenido. En este caso, MASOES debería confirmar que existe auto-organización y permitir estudiarla</p>
<p>Emergencia</p>	<p>La Wikipedia es posible gracias al esfuerzo colectivo de colaboradores en todo el mundo, que de forma voluntaria han contribuido con la redacción de miles de artículos que pueden ser modificados por cualquier persona con acceso a Internet. Esto ha dado paso a la generación de normas, estándares y políticas, que permiten decidir qué información debe o no incluirse, contribuyendo así con la calidad del contenido. También ha sido posible la formación de comunidades y grupos por idioma y área de interés (Wikiproyectos), donde los miembros de cada uno de estos grupos se organizan de acuerdo a sus habilidades, especializándose en diversas tareas y asumiendo diferentes roles. Con MASOES deberíamos poder confirmar y analizar esta propiedad.</p>

Tabla 16. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II para Wikipedia

<p>CONCEPTO</p>	<p>DESCRIPCIÓN</p>
<p>Número de Agente</p>	<p>El número de agentes que intervienen en la elaboración de un artículo depende de la complejidad del tema planteado. Así, la participación en los foros de discusión sobre un tema y la edición del mismo estará limitada a los especialistas en el tema planteado, lo que puede significar niveles muy diferentes de participación. Por ejemplo, existen temas, como el aborto, muy controversiales, que dan pie al incremento significativo del nivel de participaciones. La participación en Wikipedia también es diferente para cada comunidad por idioma, pero en general, la versión en inglés es la que tiene más usuarios. La participación en Wikipedia no es directamente proporcional a la población existente en cada idioma. Por ejemplo, la Wikipedia en español, aun y cuando existe una gran población de hispanohablantes, ocupa el octavo lugar en cuanto a artículos publicados, por debajo de la comunidad Italiana o la Polaca, que con poblaciones mucho menores ocupan posiciones más altas (ver tabla 18).</p>
<p>Tipo de Comportamiento Agente</p>	<p>Los wikipedistas experimentan diversos tipos de comportamientos en función de las tareas desarrolladas y el rol desempeñado, lo que permite encontrar comportamientos reactivos, cognitivos e imitativos. Por ejemplo, cuando un wikipedista hace uso de mecanismos de monitoreo del contenido para garantizar la calidad de las ediciones recibe notificaciones de modificación que, en primer lugar, debe revisar haciendo uso de sus conocimientos (comportamiento cognitivo); si el contenido agregado contribuye con el tema planteado el wikipedista reaccionará positivamente y asumirá un comportamiento imitativo, tratando de aprovechar la experiencia del otro; si por el contrario, el contenido no contribuye con el tema propuesto y se genera una guerra de ediciones u otro conflicto el wikipedista reaccionará negativamente, asumiendo un comportamiento reactivo.</p>
<p>Interacción Directa</p>	<p>La interacción directa en Wikipedia es poco común con respecto a las interacciones indirectas. Se presenta cuando surgen conflictos sobre el contenido y edición de un artículo. Por ejemplo, en una guerra de edición puede ocurrir este tipo de interacción directa, para intentar lograr un consenso entre los involucrados. Algunas</p>

	herramientas usadas para establecer este tipo de interacciones son el correo electrónico y los chats, entre otros.
Interacción Indirecta	Son las interacciones más comunes dentro de Wikipedia, y se establecen a través del conocimiento generado, entre quién lo produce y quién lo corrige, complementa o usa, para satisfacer sus propias necesidades de información. Este concepto puede ser medido por el número de ediciones realizadas a través de las páginas de discusión, las pizarras, las listas de observación (“ <i>watch lists</i> ”, en inglés), las páginas de los usuarios, entre otras.
Mecanismo Retroalimentación Positiva	Los mecanismos de retroalimentación positiva promueven la creación de estructuras y cambios en la Wikipedia. Dichos mecanismo pueden ser: mecanismo de aprendizaje colaborativo, promovido por los editores al agregar nuevos artículos y/o hacer correcciones y contribuciones sobre los existentes; mecanismos para obtener la calidad y difusión, para incentivar la participación en los artículos (usar referencias, usar enlaces externos, respetar los derechos de autor, incluir información verificable, entre otros); mecanismos de recompensa para premiar artículos destacados, promover participantes a nuevos roles, reconocer a los wikipedistas con más artículos y contribuciones, etc.
Mecanismo Retroalimentación Negativa	La aplicación de normas de comportamiento y participación dentro de Wikipedia evidencia la búsqueda de equilibrio en el sistema, ejemplo de ello son los mecanismos de castigo y sanciones utilizados, tales como el bloqueo de wikipedistas y/o páginas por vandalismo. Por otro parte, están las reversiones, que se refiere a una situación en la que un usuario cambia un artículo a la versión previamente escrita, perdiéndose los cambios que se han hecho antes.
Mecanismo de Agregación	Wikipedia usa una herramienta llamada wiki que permite a cualquiera editar un documento por medio de un sistema de texto estructurado. Todos los tipos de página existentes son agregados a través de esta herramienta. Además, permite llevar un control de versiones de documentos, de modo que generalmente están accesibles todas sus versiones con su respectivo historial. También se pueden comparar con facilidad (Diff), y tienen mecanismos de búsqueda por nombre de página y por palabra contenida, entre otras. Toda página en Wikipedia tiene asociado un foro de comentarios que se pega al final del documento, y que el autor original, o alguien que asuma el rol de editor, puede emplearlos para reformar el texto original.

Tabla 17. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III para Wikipedia

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Componente Reactivo	Representa las reacciones generadas a partir de estímulos dejados por otros miembros de la Wikipedia. Por ejemplo, ante una elección de nuevos bibliotecarios, un wikipedista intensivo que no reciba el apoyo suficiente en votos podría experimentar un estado de frustración al no lograr quedar electo.
Componente Cognitivo	En Wikipedia es posible lograr un buen nivel de aprendizaje a través del trabajo colaborativo, generado a partir del esfuerzo individual de un gran número de agentes, que siguiendo metas comunes del grupo de trabajo, hacen posible el logro de artículos de alta calidad. Sin embargo, el grado de experticia de los wikipedistas no es condición esencial al incorporarse al proyecto, pues un usuario no experto contribuye significativamente en la generación de conocimiento de alta calidad según el Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes en el que se basa Wikipedia [96].
Componente	Las decisiones tomadas por cada wikipedista determinan el tipo de comportamiento asumido ante una situación dada. Así, un administrador puede experimentar distintos comportamientos de acuerdo al rol asumido en determinado momento. En caso de

Conductual	mediar en un conflicto deberá, en primer lugar, reflexionar sobre quién tiene la razón haciendo uso de sus capacidades cognitivas, para asumir luego, de acuerdo a sus decisiones, un comportamiento reactivo al bloquear direcciones IP o usuarios, o en otro caso, asumir un comportamiento imitativo para ver que han hecho otros en casos similares.
Componente Social	El seguimiento de reglas y políticas dentro de un grupo de trabajo colaborativo como Wikipedia, resulta indispensable para el manejo de las interacciones sociales dadas dentro de las comunidades y grupos formados. El comportamiento imitativo o social en los wikipedistas se hace necesario para aprovechar la experiencia de los otros y para interactuar entre ellos, entre otras cosas.
Tipo de Emoción	Las emociones que experimente un agente en un momento dado dentro de la Wikipedia están determinadas por las decisiones tomadas por el agente, o la comunidad, ante una situación dada. De acuerdo a los pilares fundamentales de Wikipedia [125], y por ser un sistema colaborativo, debe darse prioridad a las emociones positivas que favorezcan la acción colectiva y el altruismo entre los diferentes participantes.

5.1.2 Escenarios y Resultados Aplicados en la Wikipedia en Inglés y Español

Para el desarrollo de los diversos escenarios utilizaremos el análisis realizado en [129] acerca de las diez primeras Wikipedias a nivel mundial, del que se extrae la información mostrada en las tablas 18 y 19 para la Wikipedia en inglés y en español hasta diciembre 2007. Así, para ambas Wikipedias vemos que existen un conjunto de páginas que representan los mecanismos de agregación y coordinación. Específicamente, en la tabla 18 se muestran las estadísticas generales para ambas Wikipedias, y en la tabla 19, se presenta la proporción existente de los tipos de páginas existentes, donde es posible visualizar, los tres tipos de páginas más significativos en ambas Wikipedias: las páginas de artículos (“*main pages*”, en inglés), de discusión de artículos (“*talk pages*”, en inglés), y de discusión de usuarios (“*talk user pages*”, en inglés).

Escenario 1: Wikipedia en Idioma Inglés. Es la primera Wikipedia, la más desarrollada, la más visitada, y la que posee más artículos y usuarios registrados [129, 130], como puede ser visto en la tabla 18, de ahí que la instanciación de esta Wikipedia representa el caso ideal, es decir, casi todos los conceptos se cumplen a cabalidad. Por tal razón, la inicialización de los conceptos arquitectónicos del método de verificación para MASOES se hace con un estado alto (ver figura 15). Hay dos excepciones: las interacciones directas son inicializadas en un valor bajo (0.25) ya que no ocurren con la misma frecuencia que las interacciones indirectas, y el comportamiento social en un valor medio (0.5) ya que predomina un comportamiento más individual que social entre los participantes de esta Wikipedia, según [131]. Con respecto a los conceptos asociados a las propiedades auto-organizativas y emergentes, son inicializados en cero para ver qué valores alcanzan al estabilizarse el sistema.

Tabla 18. Estadísticas Generales para las dos Wikipedias

TOTAL	ARTÍCULOS	PÁGINAS DE DISCUSIÓN DE ARTÍCULOS	USUARIOS REGISTRADOS	NRO. DE EDICIONES
Inglés	2.183.496	1.764.252	1.824.439	167.464.014
Español	338.792	73.562	132.239	14.198.257

Tabla 19. Proporción de número total de páginas para las dos Wikipedias

Total	A %	B %	C %	D %	E %	F %	G %	H %	I %	J %	K %	L %	M %	N %	O %	P %
Inglés	40	1	3	24	2	0	11	0	0	0	0	0	1	0	2	0
Español	60	7	3	20	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0

Donde,

- A: Páginas de Artículos.
- B: Páginas de Discusión de Artículos.
- C: Páginas de Usuarios.
- D: Páginas de Discusión de Usuarios.
- E: Páginas de Wikipedia.
- F: Páginas de Discusión de Wikipedia.
- G: Páginas de Imágenes.
- H: Páginas de Discusión de Imágenes.

- I: Páginas de MediaWiki.
- J: Páginas de Discusión de MediaWiki.
- K: Páginas de Plantillas (“Template”).
- L: Páginas de Discusión de Plantillas.
- M: Páginas de Ayuda.
- N: Páginas de Discusión de Ayuda.
- O: Páginas de Categoría.
- P: Páginas de Discusión de Categoría.

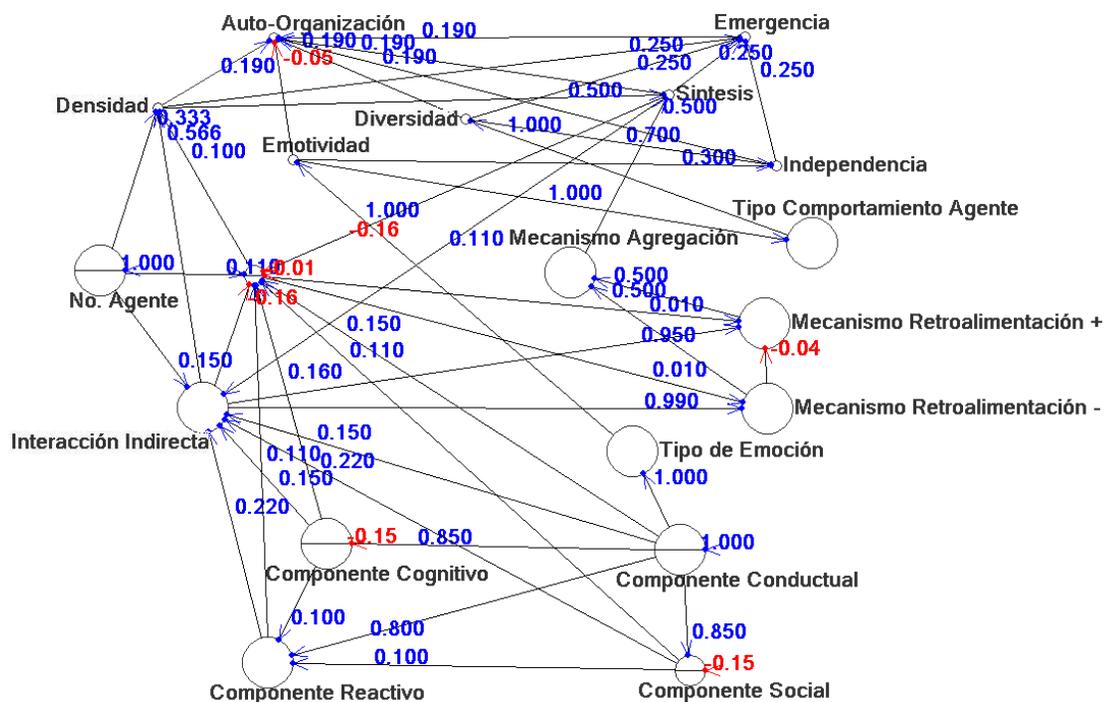


Figura 15. MCD Inicial para Wikipedia en Inglés

Según los resultados obtenidos al estabilizarse el MCD instanciado para la Wikipedia en inglés (ver figura 16), el sistema alcanza un nivel de auto-organización de 82% y de emergencia de 93%. Cabe señalar que el número de interacciones directas está en un estado bajo (0.29), las interacciones indirectas (0.87), el componente reactivo (0.95), cognitivo (0.74) y social (0.74) en un estado alto, pero con mayor valor el componente reactivo. Estos resultados coinciden con el estudio cultural realizado en [131], y los resultados obtenidos en [129] (ver tabla 19), donde se indica que en la Wikipedia en inglés se prioriza el comportamiento individual más que el social¹². También, la calidad de los mecanismos de retroalimentación negativa (0.87) es mayor a los de retroalimentación positiva (0.79), esto también coincide con el estudio cultural realizado en [131] y los resultados obtenidos en [129] (ver tabla 19), donde se indica que en la Wikipedia en inglés se realizan más acciones correctivas y de borrado (retroalimentación negativa) que acciones de adición o generación de contenidos (retroalimentación positiva), esto explica la alta calidad de los contenidos generados. Esto puede ser visto en los resultados de la tabla 19, ya que los usuarios registrados de la Wikipedia en inglés se dedican menos a la generación o adición de contenidos (40%) (páginas de artículos) que a las acciones correctivas, de borrado o discusión (60%) (suma de las otras páginas).

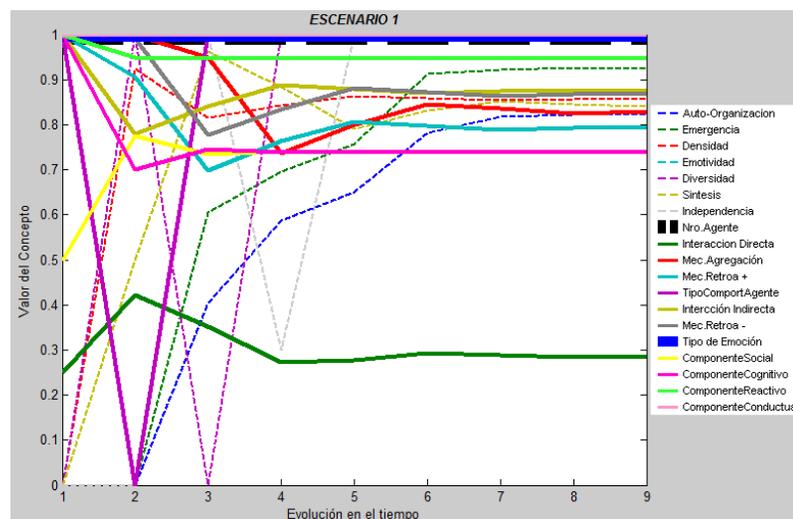


Figura 16. Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés

Escenario 2: Wikipedia en Idioma Español. Para la inicialización de los conceptos arquitectónicos del método de verificación para MASOES utilizamos también la información de las tablas 18 y 19, y los resultados obtenidos para la Wikipedia en inglés (caso ideal, escenario 1). Así, los conceptos son inicializados de la siguiente manera: el número de agentes (0.072) se ajusta en relación al número de usuarios registrados en la Wikipedia en español (132.239) versus los que hay en la Wikipedia en inglés (1.824.439)

¹² En este sentido, los individuos hacen hincapié en el "yo", y la identidad individual prevalece sobre el "nosotros" de la identidad del grupo [131].

(ver tabla 18), el número de interacciones indirectas (0.085) en relación al número de contribuciones o ediciones en la Wikipedia en español (14.198.257), y el número de interacciones directas (0.02) en relación al número de usuarios registrados en la Wikipedia en español en proporción al número de agentes (1.824.439) y del número de interacciones directas (0.285) en la Wikipedia en inglés (ver figura 17). Los demás conceptos arquitectónicos se asumen que funcionan a cabalidad, y por ello, son inicializados en un estado alto. Con respecto a los conceptos asociados a las propiedades auto-organizativas y emergentes, son inicializados en cero para ver qué valores alcanzan al estabilizarse el sistema.

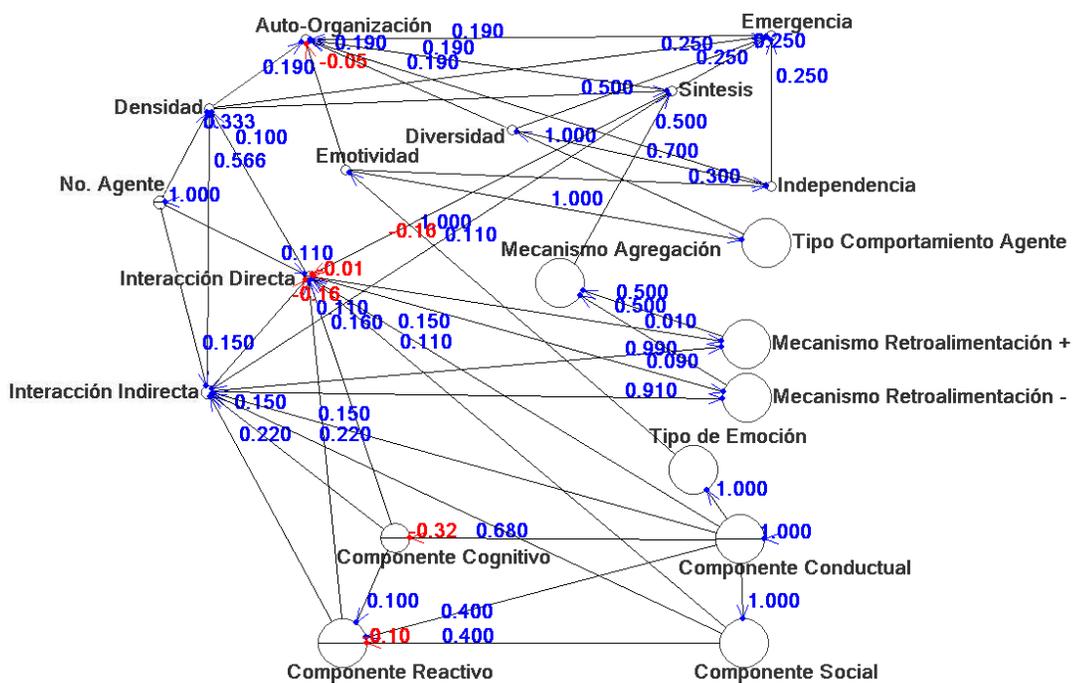


Figura 17. MCD Inicial para Wikipedia en Español

En este caso, es interesante ver que para alcanzar un nivel medio de auto-organización (65%) y un nivel alto de emergencia (75%) es necesario que se incrementen de 0.02 a 0.23 las interacciones directas, y de 0.085 a 0.69 las indirectas (ver figura 18). También, como venimos asumiendo que el número de interacciones indirectas reflejan el número de contribuciones o ediciones, al crecer el número de contribuciones se incrementa el nivel de densidad en el sistema (0.44), a pesar de que el número de agentes es muy bajo (0.072) con respecto a la Wikipedia en inglés (1.0). Cabe señalar que el número de interacciones directas está en un estado bajo, y los componentes social (1.0) y reactivo (0.77) están en un estado alto, y mayor al componente cognitivo que está en un estado medio (0.51). Esto coincide con el estudio cultural realizado en [131], y los resultados obtenidos en [129] (ver tabla 19), donde se indica que en la Wikipedia en español se

prioriza el comportamiento social más que el individual¹³. Además, la calidad de los mecanismos de retroalimentación positiva (0.68) es mayor a los de retroalimentación negativa (0.65) (ver figura 17), contrario a lo que sucede en la Wikipedia en inglés. En otras palabras, se realizan más acciones de adición o generación de contenidos que acciones correctivas y de borrado, como es indicado por los conceptos asociados a los mecanismos de retroalimentación, y también, por el estudio cultural realizado en [131] y los resultados obtenidos en [129] (ver tabla 19). Los resultados de la tabla 19 muestran que los usuarios registrados de la Wikipedia en español se dedican más a la generación o adición de contenidos (60%) (páginas de artículos) (retroalimentación positiva) que a las acciones correctivas, de borrado o discusión (retroalimentación negativa) (40%) (suma de las otras páginas).

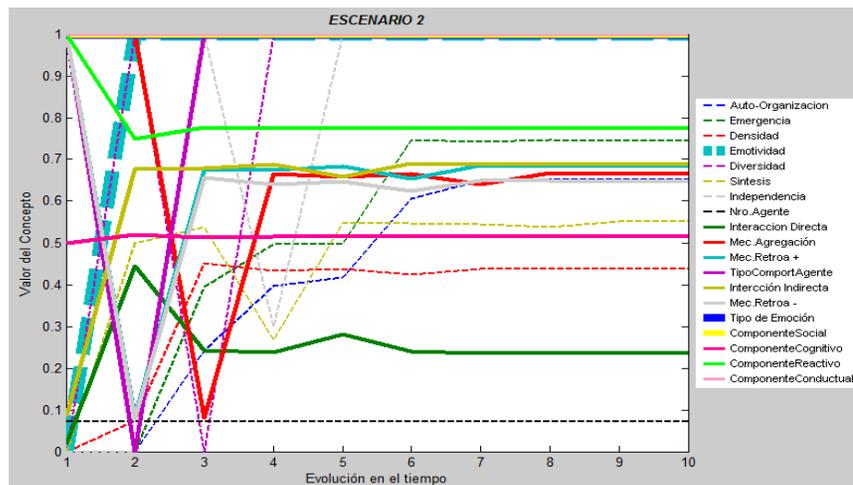


Figura 18. Resultados obtenidos para Wikipedia en Español

Escenario 3: Impacto de las páginas de discusión. Es reflejado en [97, 130] que las páginas de discusión contribuyen a la calidad de los artículos, y son claves como mecanismo de coordinación, descentralizando las actividades para lograr acuerdos y consensos (reducir fricciones y evitar conflictos). Dichas actividades tienen costos, propios de las acciones de coordinación y resolución de conflictos (procedimientos y tareas de mantenimiento (reversiones, anti-vandalismo, etc.), etc.). Todo lo anterior se refleja en el MCD a través del concepto relativo a los mecanismos de agregación. Por otro lado, según [130] el *trabajo directo* es definido como el trabajo en el sistema sobre páginas que conducen directamente al contenido de un nuevo artículo (*páginas de artículos*), y el *trabajo indirecto* es definido como el trabajo en el sistema sobre páginas que no conducen directamente al contenido de un nuevo artículo (*páginas de discusión, usuarios, de discusión de usuarios, entre otras*). Veamos el impacto de las páginas de discusión en

¹³ En este sentido, el orden social está basado en la comunidad, y el grupo protege a sus miembros a cambio de lealtad. Normalmente, se evitan los conflictos y enfrentamientos, ya que la armonía y el consenso dentro de un grupo son importantes [131].

diferentes Wikipedias, para determinar el nivel de auto-organización y emergencia alcanzado en relación a los resultados presentados en la tabla 19. Según la proporción de los tipos de páginas que allí se muestran nos indica la proporción del trabajo directo e indirecto en cada Wikipedia.

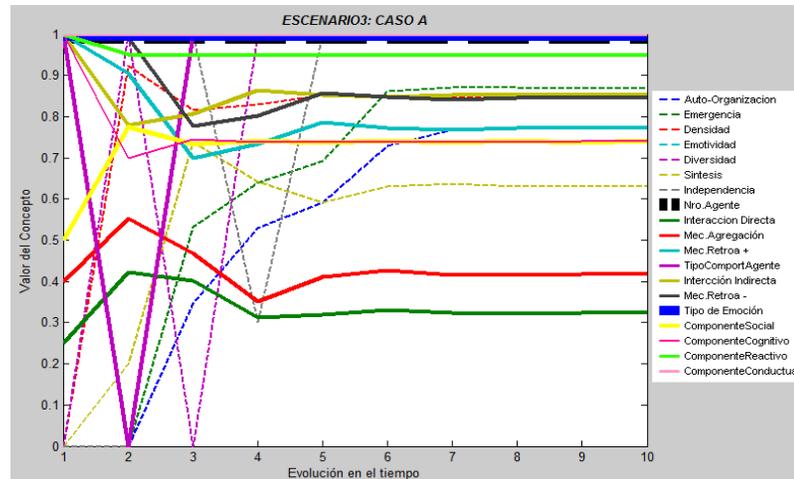


Figura 19. Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés sin páginas de discusión

Según lo mencionado anteriormente, los tipos de página están divididos en: principales (páginas de artículos, trabajo directo) y de discusión (otras páginas, trabajo indirecto). Veamos el impacto cuando se suprime las páginas de discusión como parte de los mecanismos de agregación en la Wikipedia en inglés. En la figura 19 podemos ver los resultados obtenidos, en este caso, el concepto asociado a los mecanismos de agregación se inicializa en 0.40 según la proporción encontrada para las páginas principales en esta Wikipedia (ver tabla 19). Así, se obtiene aún un nivel alto en los conceptos relacionados a la auto-organización 77% y emergencia 87%, pero podemos constatar que se ven afectados porque bajan con respecto al caso 1 (ver figura 16), lográndose estabilizar el sistema ya que sube el número de interacciones directas (de 0.25 a 0.32), a pesar de que baja el nivel de síntesis o agregación (de 0.84 a 0.63). Esto puede deberse a que sin las páginas de discusión para coordinar de manera indirecta los conflictos o problemas, deban interactuar de manera directa para coordinar sus actividades. Además, esto explica también que baje la auto-organización y emergencia, ya que sin las páginas de discusión, es decir, sin la realización de lo que hemos definido como trabajo indirecto, disminuiría la calidad del contenido generado.

En la figura 20 podemos ver los resultados obtenidos en la Wikipedia en Español cuando se suprime las páginas de discusión como parte de los mecanismos de agregación. En este caso, el concepto asociado a los mecanismos de agregación se inicializa en 0.60, según la proporción encontrada para las páginas principales en esta Wikipedia (ver tabla 19). Así, se obtiene un nivel medio de auto-organización (de 0.65 a 0.64) y un nivel alto en el concepto relacionado a la emergencia (de 0.75 a 0.74). Estos

conceptos casi no se ven afectados porque bajan muy poco con respecto al caso 2 (ver figura 18). Se logra estabilizar el sistema ya que baja poco el nivel de síntesis o agregación (de 0.55 a 0.52), manteniéndose igual el número de interacciones directas e indirectas. En otras palabras, este poco impacto de las páginas de discusión podría deberse al hecho que la comunidad de Wikipedia en español se dedica más a la elaboración de páginas principales (60%) que de discusión (40%).

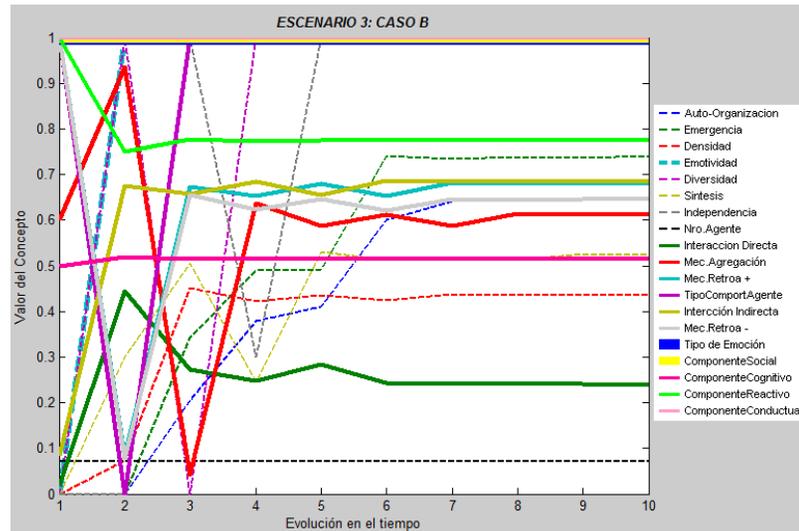


Figura 20. Resultados obtenidos para Wikipedia en Español sin páginas de discusión

Finalmente, con respecto a los casos 1 y 2, podemos decir que modelan el comportamiento de las comunidades de Wikipedia en inglés y español, respectivamente, según los datos obtenidos de investigaciones recientes. A través de la instanciación con MASOES se puede constatar que ambas presentan un comportamiento emergente y auto-organizado. Estos MCDs generados podrían utilizarse para estudiar ciertos aspectos puntuales, como es mostrado en el escenario 3. Con respecto al escenario 3, podemos ver por los resultados obtenidos que al fallar el mecanismo de agregación, específicamente al suprimirse las páginas de discusión, dio como resultado que los conceptos más sensibles afectados en la Wikipedia en inglés fueron los de interacciones directas, síntesis, auto-organización y emergencia, revelándonos, por un lado, la importancia de las páginas de discusión para la calidad de los procesos de agregación y síntesis que se llevan a cabo en esta comunidad, y por otro lado, su importancia para la obtención de contenidos de calidad y para la coordinación de actividades (ver valores finales de los conceptos de auto-organización y emergencia). En el caso de la Wikipedia en español, podemos decir que los wikipedistas al no usar mucho las páginas de discusión para coordinar su trabajo de manera indirecta (ver tabla 19), lo hacen de manera directa a través del código generado en las páginas principales, lo cual no reduce la calidad de los procesos de síntesis, de auto-organización y de emergencia en el sistema.

5.1.3. Escenarios y Resultados para el Análisis y Verificación del Modelo Emocional propuesto para MASOES

Según [132], con la interacción afectiva los participantes en una red colaborativa son capaces de expresar su empatía hacia los otros participantes, incrementando sus niveles de confianza y proximidad entre los miembros. Aún y cuando la principal premisa que manejan las comunidades de Wikipedia es cero emociones en las ediciones para asegurar la neutralidad de los artículos [125], la existencia de guerras de edición en páginas controversiales como el aborto, contradice esta premisa y confirma que el manejo de emociones en Wikipedia juega un rol importante para regular la interacción social y afectiva entre los participantes, lo que permite generar un alto grado de auto-organización y emergencia en el sistema. Esto es constatado a través de los siguientes escenarios desarrollados con el modelo afectivo para MASOES.

El MCD propuesto para la Wikipedia en inglés plantea las relaciones causales establecidas entre los conceptos arquitectónicos y los vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas para la verificación del modelado de Wikipedia a través de MASOES (ver figura 21). Ahora bien, para comprobar el modelo afectivo se incorpora a este MCD los conceptos vinculados al componente conductual y al modelo afectivo propuesto en la sección 3.5: *el manejador conductual, el configurador emocional, y el grado de satisfacción y activación de los agentes*. El MCD ampliado con estos conceptos es mostrado en la figura 22. A través de estos conceptos será posible evaluar como la diversidad de comportamientos y el manejo emocional puede influir en el nivel de auto-organización y emergencia en Wikipedia, y determinar si el modelo afectivo propuesto juega un rol fundamental para definir y cambiar el comportamiento de los agentes que lo componen.

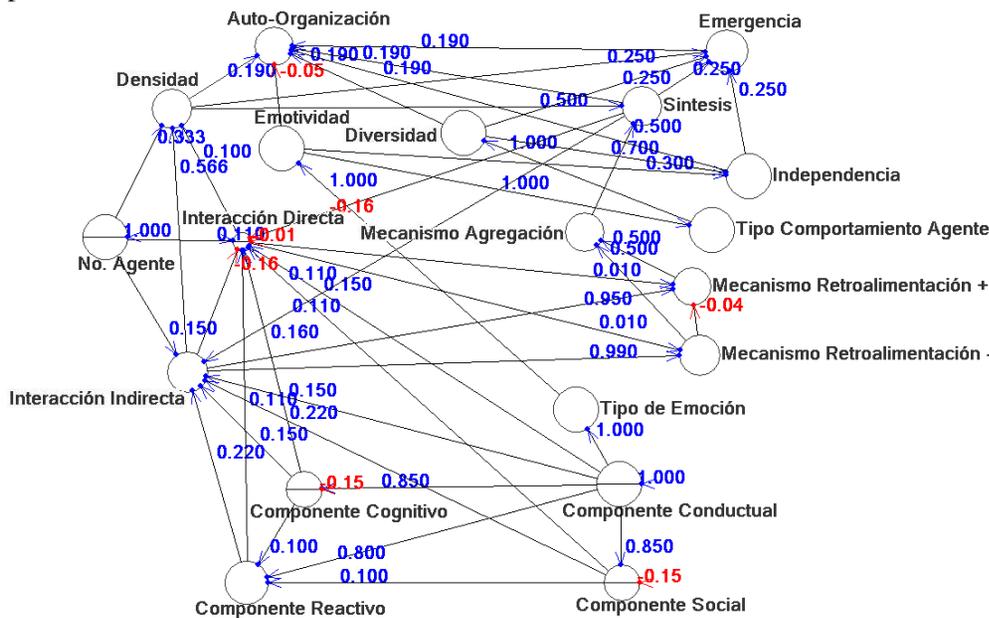


Figura 21. MCD para Wikipedia en Inglés

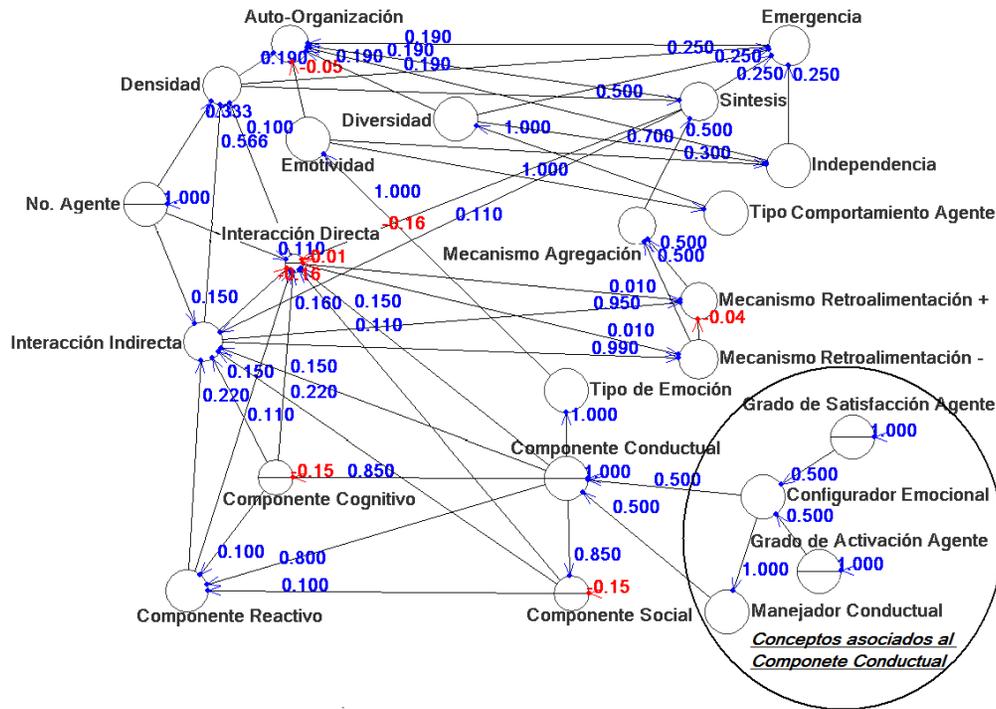


Figura 22. MCD extendido para estudiar el modelo afectivo en Wikipedia

Caso de Estudio: Regulación Social y Emocional en Wikipedia

En este caso de estudio se utiliza el modelado de Wikipedia realizado a través de MASOES (ver sección 5.1.1) y el método de verificación propuesto para MASOES en la sección 4.2. La idea es estudiar el nivel de auto-organización y emergencia en Wikipedia a través del MCD extendido de la figura 22. Los conceptos que se anexan para representar los sub-componentes del componente conductual y las dimensiones de nuestro espacio afectivo se muestran en la tabla 20. Estos conceptos nos permiten hacer un zoom sobre el componente conductual, debido a que el modelo afectivo de cada agente es gestionado a través del *configurador emocional*, y el cambio de comportamiento del agente de acuerdo a su estado emocional es realizado a través del *manejador conductual*. Por tanto, ambos sub-componentes del componente conductual son requeridos (los otros dos conceptos, grado de activación y de satisfacción, completan el modelo afectivo). Esto nos permitirá regular y estudiar el comportamiento social y emocional de los agentes. Para esto, se analiza el efecto del grado de satisfacción y activación (que son las dimensiones del espacio afectivo bidimensional propuesto) en los agentes para determinar el tipo de emoción, y luego, el tipo de comportamiento según las fases III y IV del modelo emocional propuesto (ver sección 3.3). Además, se verá como el tipo de emoción que manifiesten los agentes influye en el cambio de comportamiento de los agentes e interacción entre ellos.

Tabla 20. Conceptos Anexados que representan los Sub-componentes del Componente Conductual y las Dimensiones del Espacio Afectivo

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Configurador Emocional	Este concepto mide que tan correctamente funciona este sub-componente del componente conductual: Alta, Media y Baja Calidad.
Manejador Conductual	Este concepto mide que tan correctamente funciona este sub-componente del componente conductual: Alta, Media y Baja Calidad.
Grado de Satisfacción del Agente	Este concepto mide el grado de satisfacción del agente: Alto, Medio y Bajo grado de satisfacción.
Grado de Activación del Agente	Este concepto mide el grado de activación o excitación del agente: Alto, Medio y Bajo grado de activación.

Veamos ahora varios escenarios posibles que podrían ocurrir a nivel de Wikipedia, y como el modelo afectivo de MASOES los modelaría.

Escenario 1: Grado de Satisfacción Alto y Activación (Alto, Medio y Bajo). Para este escenario, supongamos por ejemplo que un Usuario Registrado propone y desarrolla un contenido recibiendo reconocimientos por la calidad del aporte realizado. Este usuario podría experimentar un alto grado de satisfacción y activación, que se traduciría en emociones positivas individuales, lo que conllevaría a un comportamiento imitativo, de acuerdo al modelo afectivo de MASOES. En este escenario, el usuario trataría de repetir o imitar aquello que le permita seguir obteniendo un alto grado de reconocimiento y de satisfacción. Según los resultados obtenidos (ver figura 23), casi todos los conceptos involucrados están en un estado alto (mayor a 0.66), esto significa que funcionan correctamente y contribuyen de manera importante con el funcionamiento de Wikipedia. Sólo el concepto relativo a las interacciones directas permanece bajo (0.29), debido a que los participantes de Wikipedia interactúan más de manera indirecta (0.87) que directa a través de la tecnología Wiki. Así, podemos ver que esos conceptos permiten que se genere un tipo de emoción positiva individual, que conlleva a un alto grado de emotividad, diversidad, y a un alto grado de auto-organización y emergencia (82% y 92 % hacia el final, respectivamente).

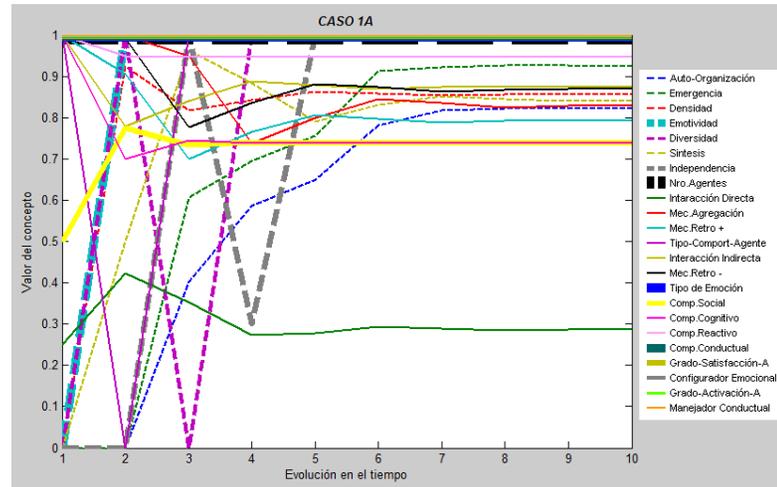


Figura 23. Resultados obtenidos en el Caso de Grado de Satisfacción y Activación Alto

De acuerdo a los resultados obtenidos, es conveniente mantener un grado de satisfacción alto en los agentes. Pero el grado de activación no es muy significativo ya que de todas maneras se obtiene un nivel de auto-organización y emergencia por encima del 70 % y 79 % hacia el final, respectivamente (ver figura 24). También, en el caso de un Grado de Activación Bajo (ver figura 25) se obtiene un nivel de auto-organización y emergencia por encima del 60 % y 67 % hacia el final, respectivamente. Esto se debe a que según el espacio afectivo definido (ver figura 6), al permanecer alto el grado de satisfacción del agente y variar el grado de activación, se siguen promoviendo las emociones positivas, bien sean individuales o sociales (I y II cuadrante del espacio afectivo bidimensional). En otras palabras, a pesar de variar el grado de activación y producir emociones menos o más intensas (pasando de la alegría a la felicidad, de la admiración a la compasión, o viceversa), son emociones positivas generadas por nuestro modelo afectivo que contribuyen con un mayor nivel de auto-organización y emergencia, y reducen la fricción o aparición de conflictos entre los participantes. Eso se corrobora en los resultados experimentales mostrados aquí.

Escenario 2: Grado de Satisfacción y Activación Bajo. En este Escenario, supongamos por ejemplo que un Usuario Registrado propone y desarrolla un contenido recibiendo rechazo por el aporte realizado. De esta manera, el Usuario Registrado puede presentar un grado de satisfacción y activación bajo o medio (Escenario 2 y 3 respectivamente), provocándole emociones negativas y activando un comportamiento reactivo o cognitivo, de acuerdo al modelo afectivo de MASOES. Según los resultados obtenidos para este Escenario, todos los conceptos involucrados a los procesos individuales y emocionales están en un estado bajo al final (menor a 0.33, por ejemplo, ver los conceptos de diversidad e independencia en la figura 26). Esto significa que no funcionan correctamente y no contribuyen de manera importante con el funcionamiento de Wikipedia. Por otro lado, los conceptos vinculados a los procesos colectivos están en un estado medio al final (menor a 0.66, ver los conceptos de agregación,

retroalimentación e interacción indirecta en la figura 26). Esto se debe al alto número de agentes y a que el grado de satisfacción y activación influyen de manera directa sobre la calidad de los procesos individuales, más que sobre la calidad de los procesos colectivos. Específicamente, podemos ver que se apoya un tipo de emoción altamente negativa (tipo de emoción igual a 0.30), que conlleva a un grado de emotividad bajo (0.30), a un tipo de comportamiento reactivo, y a un grado de auto-organización y emergencia medio (39% y 42%, respectivamente), generado principalmente por los conceptos que están en estado medio (densidad, síntesis, mecanismo de agregación, y retroalimentación positiva y negativa), y por el número de agentes que se mantiene en un estado alto para la Wikipedia en inglés (1.0).

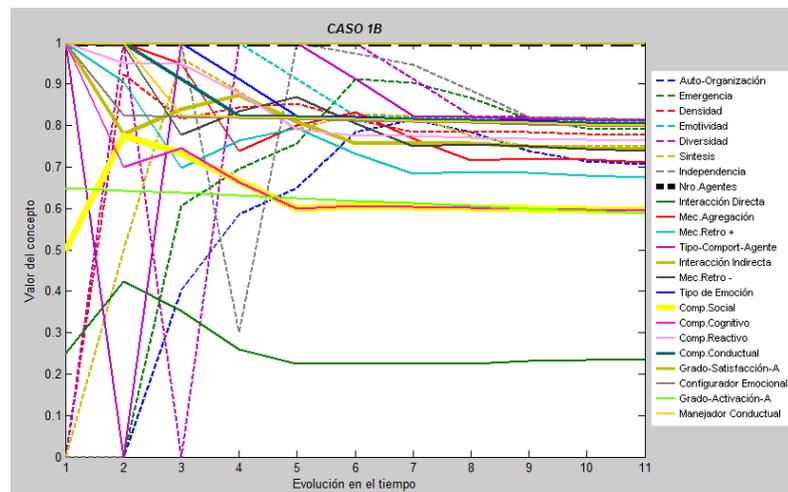


Figura 24. Resultados obtenidos en el Caso de Grado de Satisfacción Alto y Activación Medio

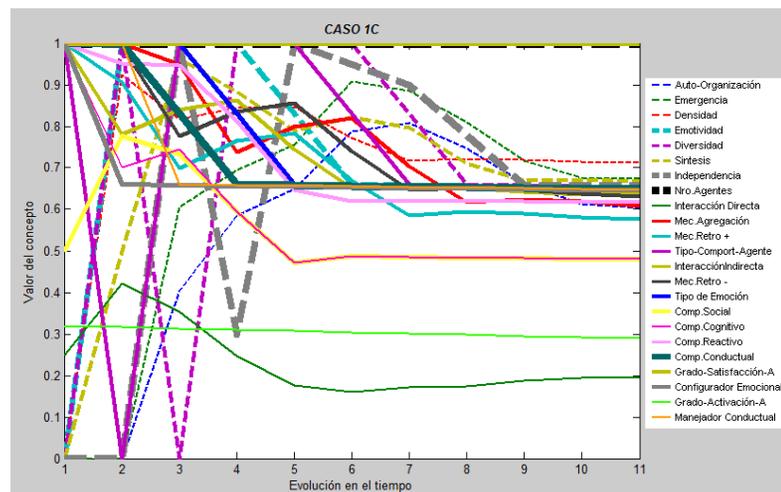


Figura 25. Resultados obtenidos en el Caso de Satisfacción Alto y Grado de Activación Bajo

Escenario 3: Grado de Satisfacción y Activación Medio. Según los resultados obtenidos para este escenario, todos los conceptos involucrados están en un estado medio (menor a 0.66) (ver figura 27), esto significa que el funcionamiento de Wikipedia se ve afectado proporcionalmente por el grado de satisfacción y activación en la sociedad de agentes. Sólo el número de interacciones directas está en un nivel bajo (0.18), indicando que no contribuye de manera importante con el funcionamiento de Wikipedia, como es visto en escenarios anteriores. Específicamente, podemos ver en este escenario que se genera un tipo de emoción (0.61) ligeramente negativa, que conlleva a un grado de emotividad medio (0.62), a un tipo de comportamiento cognitivo, y a un grado de auto-organización y emergencia medio hacia el final (59% y 65%, respectivamente).

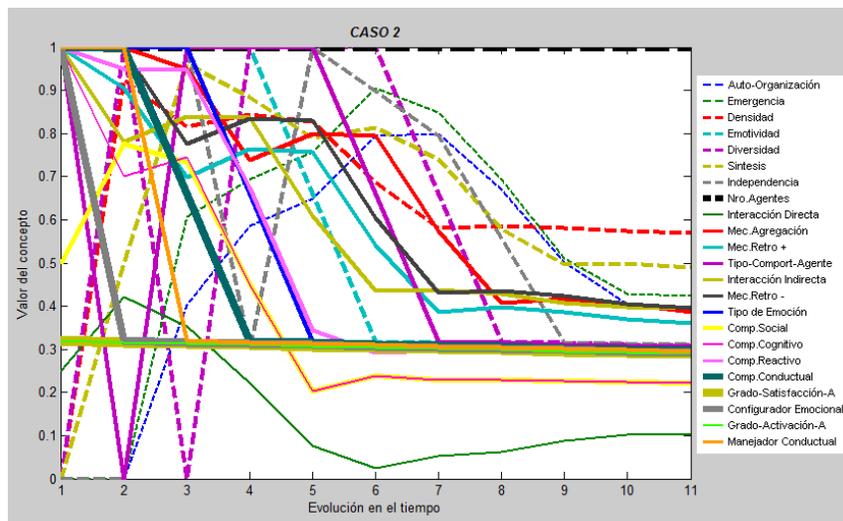


Figura 26. Resultados obtenidos en el Escenario 2: Grado de Satisfacción y Activación bajo

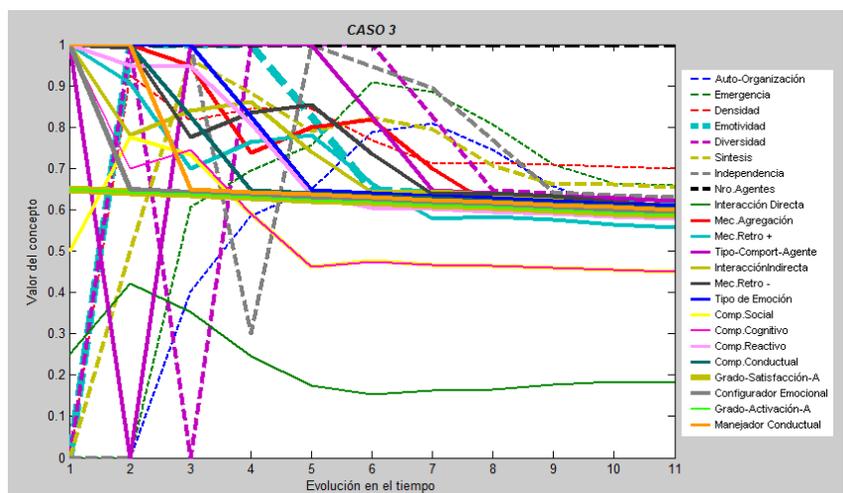


Figura 27. Resultados obtenidos en el Escenario 3: Grado de Satisfacción y Activación Medio

Como muestran los resultados obtenidos, es necesario mantener un grado de satisfacción alto en los agentes para obtener un nivel alto de auto-organización y emergencia en el sistema. Esto significa también, reducir el grado de fricción o conflicto entre los agentes. Los niveles de auto-organización y emergencia en el escenario 2 y 3 tienen valores medios al final debido a que los procesos colectivos se mantienen funcionando en un nivel medio, independientemente de si el grado de satisfacción y activación están en un estado bajo o medio. Es decir, ellos no se ven afectados, permitiendo que el sistema medianamente se auto-organice.

A pesar que el modelo afectivo permite al agente cambiar dinámicamente su comportamiento, guiado por el estado emocional resultante de su grado de satisfacción y activación (ejes del espacio afectivo) en un momento determinado, y adaptarse así a los cambios que surjan; según los resultados obtenidos es conveniente en el caso de Wikipedia en inglés, promover un grado de satisfacción alto en los agentes para generar un nivel alto de auto-organización y emergencia guiado por emociones positivas individuales y sociales que den prioridad a un comportamiento imitativo, más que cognitivo y reactivo (es lo que determina nuestro modelo afectivo). Estos resultados son confirmados en el trabajo realizado por [132] sobre la interacción afectiva en redes colaborativas, donde ellos encuentran que las emociones positivas juegan un rol fundamental en la creatividad de los individuos, pueden controlar su motivación para alcanzar sus metas, y mejorar su capacidad para resolver problemas.

En general, el modelo afectivo propuesto para MASOES permite la generación de emociones positivas o negativas en los agentes, que los lleva a tener un comportamiento u otro (cambio dinámico de comportamiento), promoviendo así su adaptación al entorno. Este proceso de adaptación se refiere al proceso por el que un individuo modifica sus patrones de comportamiento para ajustarse a las normas y cambios que ocurren en el medio social en el que se desenvuelve. Este cambio dinámico de comportamiento en MASOES, se da al fluctuar el grado de satisfacción y activación del agente (ejes del modelo afectivo), como hemos visto en los escenarios planteados, ya que determinan la emoción del agente, y está a su vez, su tipo de comportamiento.

5.2. Desarrollo del Software Libre

Son muchas las comunidades que actualmente trabajan en torno a proyectos de Software libre (SL), sin embargo, sólo algunas, por su éxito y evolución, han llegado a ser modelos al referirse al Desarrollo del Software Libre (DSL). Entre estas se puede mencionar: el Desarrollo del Kernel de Linux (encargada del desarrollo del núcleo del sistema operativo Linux, www.kernel.org); KDE y GNOME (entornos de trabajo de usuario final, www.kde.org, www.gnome.org); Apache (servidor web de mayor implantación en la actualidad, www.apache.org); Mozilla (navegador web y multiplataforma de desarrollo de otras aplicaciones web, www.mozilla.org), y finalmente, OpenOffice (un grupo de aplicaciones libres para un entorno de escritorio de oficina, www.openoffice.org). Ahora bien, la Comunidad de Desarrollo del Kernel de Linux (CDKL) es la más usada por

investigadores en diversas disciplinas para ejemplificar procesos y comportamientos de las comunidades de SL, por poseer mayor estabilidad, calidad, madurez y organización, entre otras características [133]. Por estas razones ha sido seleccionada también en este trabajo para ser instanciada a través de MASOES. La CDKL ha sido también utilizada en investigaciones realizadas que van desde modelos de desarrollo [134, 135, 136], mecanismos de coordinación [137], gestión de proyectos libres [138], hasta incluso factores motivacionales que influyen en los desarrolladores [139].

5.2.1. Modelado con MASOES

En esta sección vamos a caracterizar de acuerdo a MASOES, los niveles individual y colectivo de los componentes y procesos involucrados en el DSL basado en comunidades que usan el estilo bazar¹⁴, específicamente, en la CDKL. Esto nos permitirá conocer si el DSL posee los componentes y procesos claves para comportarse como un sistema auto-organizado y emergente, de manera tal que sea posible determinar si la calidad del software desarrollado es el resultado del esfuerzo colectivo realizado por las comunidades de software libre [9].

I) Fase de Análisis:

I.1. Los Agentes y sus Tareas en el DSL

Toda comunidad de Software Libre es iniciada por una persona o un grupo reducido de desarrolladores, quienes ponen a disposición del público en la Red el código fuente de su aplicación o librería. Normalmente, la persona que inicia la comunidad comienza a erigirse de facto como *Líder del Proyecto*. Los desarrolladores de SL y los usuarios son representados por diferentes agentes que interactúan y poseen un comportamiento reactivo, cognitivo e imitativo cuando actúan en la comunidad. Cuando un producto software tiene una versión, es evaluado por diferentes usuarios/programadores; esta evaluación le permite evolucionar (por ejemplo, incluir nuevas mejoras), haciéndolo más atractivo para otros usuarios de Internet. Además de las actividades de programación o uso, existen otras actividades que son no menos importantes en el desarrollo del software; entre ellas se encuentran las contribuciones de documentación, traducción y administración. La siguiente tabla presenta cada tipo de agente que participa en la CDKL, su descripción y algunas tareas que desempeña.

¹⁴ En la metodología de desarrollo de software estilo bazar, el código está disponible para los usuarios, con la finalidad que ellos también puedan detectar errores, aportar soluciones e ir construyendo el programa de manera colaborativa. No existe un único “propietario” del programa (persona o empresa); distribuyen las responsabilidades y tareas todo lo posible. En consecuencia, se libera con frecuencia una versión para poder obtener una mayor cantidad de correcciones, logrando reducir el tiempo entre una versión y otra, y generando versiones más estables [9].

Tabla 21. Agentes y Tareas Involucradas en la CDKL

AGENTE	DESCRIPCIÓN	TAREAS DESEMPEÑADAS
Líder de Proyecto	Desarrollador del Núcleo y responsable de la coordinación de las actividades y funcionalidades que puedan ser agregadas al software. Además, el supervisa el equipo cambiante y discontinuo de desarrolladores.	Agrupar coherentemente las funcionalidades que deben desarrollarse para la liberación de una nueva versión del proyecto. Coordinar y colaborar en priorizar las fallas que deben ser atendidas. Ser la voz que representa a la comunidad. Finalmente, aceptar la incorporación de código en la próxima versión a ser liberada. Notificar la liberación de versiones oficiales.
Mantenedor o Administrador	Es un desarrollador con altos privilegios, ya que tiene permisos de lectura y escritura en los repositorios fuentes del proyecto. Ejerce un liderazgo emergente, que surge de las labores diarias dentro de la comunidad. Este tipo de usuario es visto como un recurso ordinario coordinado por el líder del proyecto.	Participar regularmente en el desarrollo de nuevas funcionalidades y soluciones de fallas complejas. Participar en las decisiones de diseño arquitectónico que se llevan a cabo sobre el proyecto. Decidir la orientación a seguir en los desarrollos, en colaboración con otros desarrolladores. Responder preguntas técnicas en los foros. Atender errores críticos que tenga el software. Coordinar el desarrollo de uno o más módulos o subsistemas del Kernel. Conceder permisos de escritura y/o lectura a los desarrolladores sobre los repositorios.
Desarrollador	Usuario con conocimiento técnico sobre el proyecto y que participa voluntaria y parcialmente en la solución de fallas o agregación de nuevas funcionalidades.	Determinar nuevas características (prestaciones) o fallas de software que puede atender. Resolver problemas básicos en el código. Enviar sus propuestas de solución para que las evalúe el equipo de desarrolladores del núcleo.
Notificador de Errores	Usuario que por su experiencia de uso con el software detecta los errores y los notifica a la comunidad para su solución. También deja registro en la comunidad de la necesidad de nuevas funcionalidades del software.	Detectar errores. Justificar la necesidad de nuevas funcionalidades. Registrar y caracterizar los errores, así como también depurar la lista de errores disponible en el sistema de gestión de errores.
Usuario	Internauta que por necesidad, curiosidad o simple deseo de participar en la comunidad, descarga el código (fuente o binario) del proyecto y comienza a usarlo en sus actividades regulares.	Descargar el código fuente o binario del software. Estudiar la documentación del mismo. Usar el producto para la satisfacción de sus necesidades. En cualquier momento puede convertirse en un Notificador de Errores o Desarrollador.

I.2. Niveles de Interacción

Las comunidades de Software Libre, a diferencia de los equipos tradicionales de desarrollo de software, pocas veces se encuentran físicamente en una misma ubicación geográfica, lo cual supone un desafío para la metodología de desarrollo. A pesar de esto, podemos decir que hay diferentes niveles de interacción entre ellos:

- **Local.** Las interacciones locales entre los agentes se pueden dar de dos maneras: Directa, a través de correos electrónicos, por mensajería instantánea, entre otros. Indirectamente, cuando esta interacción se hace a través del código fuente, entre quien escribió una porción del mismo y quien lo interpreta para su aprendizaje o para la resolución de un error existente. Para estas interacciones indirectas se emplea la documentación existente sobre las instrucciones de instalación, alguna historia sobre la evolución pasada y futura del programa, autoría y condiciones de copia, entre otras. Otro tipo de comunicación indirecta es por el mecanismo de preguntas y respuestas en blogs, foros y listas de correo.
- **Grupal.** El concepto de modularidad en el diseño del Software Libre promueve el agrupamiento de los desarrolladores por subsistema o módulo del proyecto, lo que permite también la especialización de las tareas de los desarrolladores (por ejemplo, *en el diseño e implementación de la interfaz gráfica de usuario, en las estructuras de datos, en la documentación, o en funcionalidades* tales como: manejo de memoria, procesamiento y almacenamiento, entre otras funciones).
- **General.** Las interacciones globales pueden llevarse a cabo cuando se envían mensajes a la lista de correo del proyecto (en el caso de la CDKL, LKML (“*Linux Kernel Mailing List*”, linux-kernel@vger.kernel.org)), con información sobre la mayoría de los anuncios, discusiones y debates que se presentan durante el desarrollo. Otro medio de interacción es la publicación de contenidos en la web dirigidos a todos los miembros de la comunidad (nuevas versiones en www.kernel.org, preguntas abiertas en foros o publicaciones, en blogs). Por último, es posible encontrar interacciones a través del uso de un sistema de control de versiones que permite distribuir, revisar y controlar los aportes realizados por toda la comunidad al código (<http://www.kernel.org>).

II) Fase de Diseño:

II.1. Componentes y Procesos en el DSL a Nivel Individual

Los componentes reactivo, cognitivo, social y conductual de MASOES a nivel individual para la CDKL son mostrados en la siguiente tabla. En general, en la CDKL, de acuerdo con las tareas desempeñadas por los agentes, es conveniente que los agentes manejen los tres tipos de comportamientos sugeridos por MASOES (es decir, reactivo, cognitivo, e imitativo), y que puedan cambiarlo dinámicamente de acuerdo con su estado emocional en cierto momento.

Tabla 22. Componentes Individuales de MASOES en la CDKL

COMPONENTES INDIVIDUALES EN MASOES	REPRESENTACIÓN EN LA CDKL
Conductual	<p>Los agentes dentro de la CDKL presentan un tipo de comportamiento u otro dependiendo de la situación que estén afrontando y del estado emocional que podrían tener en un momento dado. El estado emocional permitirá al componente conductual desarrollar cambios de comportamiento dinámicamente en el agente, y medir el grado de motivación y compromiso de cada agente en el proyecto. Hay situaciones que ilustran mejor esto, por ejemplo, la presencia de discusiones en las listas de correo, algunos con tonos elevados, provocan la activación de un estado emocional negativo en aquellos involucrados, quienes podrían ejecutar comportamientos cognitivos o reactivos de acuerdo con la intensidad de la emoción. Otro ejemplo es la inclusión de un desarrollador dentro de los créditos de una versión de software, debido a la alta cantidad y calidad de sus contribuciones, resultará en la activación de un estado emocional positivo en el desarrollador que podría generar un comportamiento imitativo con el objetivo de reproducir las acciones que han llevado a ese elevado grado de satisfacción.</p>
Reactivo	<p>El rechazo de las contribuciones puede causar depresión e iniciar un comportamiento reactivo de acuerdo con el modelo afectivo de MASOES. En la CDKL, la reputación juega un rol esencial para los desarrolladores. Esa reputación es lograda porque ellos contribuyen en el módulo en el cual participan, así pueden lograr reconocimiento de sus pares y así ser promovidos dentro de la comunidad. Eso es un ejemplo de comportamiento reactivo.</p>
Cognitivo	<p>El componente cognitivo permite realizar el proceso de apropiación del conocimiento colectivo de la comunidad. Es representado por el mecanismo de aprendizaje de cada agente y sus objetivos individuales. Un agente hace uso de sus conocimientos individuales en la CDKL cuando se presenta un error en el código y evalúa la manera de resolverlo, o al tomar decisiones sobre el diseño arquitectónico y funcional del producto de software, que requieren de un proceso de evaluación y selección de la mejor alternativa. Estos son ejemplos de comportamientos cognitivos.</p>
Social	<p>El componente social le permite observar las actuaciones, aciertos y errores de los otros miembros de la comunidad, y aprender de ellos para tratar de imitar sus comportamientos y aprovechar sus experiencias. Por ejemplo, el anuncio de una nueva versión del kernel activa en los notificadoros de errores la necesidad de probar el código y enviar a los desarrolladores los errores encontrados. Por otra parte, los agentes evitan los comportamientos conflictivos como auto-promoverse dentro de un grupo, o asumir el liderazgo de un módulo, sin presentar antes aportes que evidencien su conocimiento y capacidad para adoptar un liderazgo</p>

II.2. Componentes y Procesos en el DSL a Nivel Colectivo

Los componentes y procesos involucrados son descritos a través de MASOES en las tablas 23 y 24.

Tabla 23. Componentes Colectivos de MASOES en la CDKL

COMPONENTES COLECTIVOS EN MASOES	REPRESENTACION EN LA CDKL
<p>Conjunto de Reglas</p>	<p>Los miembros de la CDKL tienen unas normas de comportamiento que surgen de las interacciones habituales en la comunidad. Existen normas para el envío de correos a las listas, notificación de errores, envío de modificaciones al código, entre otros. Por ejemplo: Antes de hacer una pregunta técnica por correo, en un grupo de noticias o en el foro de un sitio web, es preciso hacer lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Intentar encontrar una respuesta leyendo el manual, leyendo la lista de preguntas frecuentes (FAQ, “<i>Frequently Ask Question</i>”, en inglés), buscando en la web, o preguntándole a un amigo con más experiencia. ○ Elegir el foro con cuidado, evitando publicar una pregunta en un foro en el que se encuentre fuera de lugar, o publicar una pregunta muy elemental en un foro en el que se esperan preguntas técnicas avanzadas (o viceversa), o publicar el mensaje al mismo tiempo en grupos de noticias muy diferentes. ○ Escribir de manera clara, respetando la ortografía y la gramática. ○ Enviar las preguntas en formatos que sean fáciles de entender. ○ Usar títulos específicos y con sentido. ○ Describir los síntomas del problema o error con cuidado y claramente, así como el entorno en el que ocurre. También, el Código debe estar bien documentado y completo. <p>Enviar aportes en diffs (comando que permite listar las diferencias entre dos archivos).</p>
<p>Campo de Acción</p>	<p>El código desarrollado en la CDKL es el área de mayor agregación en el entorno, donde los agentes, a través de sus interacciones, afectan el entorno y viceversa, para estimular su participación en el proyecto.</p>
<p>Base de Conocimiento Colectivo</p>	<p>Está conformada por los repositorios de código, los archivos de la lista de correos y de los foros, la documentación existente, la lista de preguntas frecuentes, entre otros.</p>
<p>Objetivo Colectivo</p>	<p>Lograr exitosamente el desarrollo de software, con un alto nivel de calidad y funcionamiento en código abierto, siguiendo una metodología descentralizada, distribuida y auto-organizada, bajo sus propias normas, que rigen la generación de código y la participación colectiva e individual.</p>

Tabla 24. Procesos Colectivos de MASOES en la CDKL

PROCESOS COLECTIVOS EN MASOES	REPRESENTACIÓN EN LA CDKL
<p>Formación de Redes Sociales</p>	<p>La interacción social en el desarrollo del Software Libre se da de manera espontánea, autónoma, a través de la creación de comunidades (grupos de desarrolladores y usuarios de un producto de software específico), con el fin de establecer intereses y fines comunes. Esta formación se inicia con la publicación de un producto, y luego, a medida que es mejorado capta el interés de nuevas personas que requieren cubrir una necesidad, por curiosidad o disposición a participar en la comunidad. Los participantes en la CDKL están agrupados de acuerdo con las funcionalidades del kernel, tales como: dispositivos de entrada/salida, conexión de redes, almacenamiento y</p>

	<p>memoria, entre otras.</p>
<p>Mecanismos de Retroalimentación</p>	<p>La generación de código involucra una serie de mecanismos para su producción, aprendizaje, difusión y documentación. Así mismo, involucra una serie de mecanismos de recompensa y castigo, con el fin de influir en el comportamiento de cada agente involucrado. En la CDKL estos mecanismos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos para la Producción de Contribuciones: La forma de producir contribuciones al código es creando mejoras al software a partir de las necesidades expresadas por los usuarios (nuevas funcionalidades, errores encontrados), o por la detección y corrección de errores, o por la aparición en el mercado de nuevo hardware que requiere de los controladores correspondientes en código abierto. Otra manera de contribuir es a través de la documentación del código generado. • Mecanismo de Aprendizaje Colaborativo: El mecanismo de aprendizaje se da a través de código auto-explicativo, la documentación para la configuración y uso del software, y las listas de correo como medio de interacción de toda la comunidad. El objetivo de las listas de correo en la CDKL es compartir información de forma constante sobre soluciones a problemas consultados a través de estas, que permiten finalmente, compartir el conocimiento y lograr el aprendizaje a partir de la colaboración de los miembros. Actualmente, la principal lista de la CDKL (kernel@vger.kernel.org) mantiene un archivo que es posible encontrar en el sitio lkml.org. Aunque la discusión general del desarrollo del kernel de Linux tiene lugar en la LKML, existen docenas de otras populares listas de correo que cubren cada una de las funcionalidades de Linux. • Mecanismo para la Difusión del Código: El código es liberado a través del repositorio central del kernel de Linux, que se mantiene en kernel.org, y de listas de correo, para ser revisado y corregido por los desarrolladores y usuarios. Del repositorio central del kernel de Linux cualquiera puede descargar libremente el código de Linux. Algunos desarrolladores, sin embargo, no descargan los archivos fuente desde kernel.org, en su lugar usan la herramienta llamada Git (<i>“Global Information Tracker”</i>, en inglés), que es un sistema distribuido para el control de revisiones del código del kernel de Linux). Así mismo, existe un Sistema Notificador de Errores donde se clasifican estos según su importancia y dependencia. También es posible monitorear si han sido resueltos o no. • Mecanismo para la Obtención de la Calidad: La evaluación de la calidad de las contribuciones de software está determinada por una serie de factores relacionados con la propia dinámica del desarrollo del software libre, tales como el uso de herramientas colaborativas distribuidas, los sistemas de control de versiones, las listas de correo, entre otras, que permiten la participación y evaluación de toda la comunidad sobre aportes realizados. Otra forma de evaluación de la calidad viene dada por los procesos de unión y depuración del código que requiere una revisión detallada. Finalmente, la documentación existente permite evaluar y mejorar el software ya creado. En la CDKL la calidad se deriva de la colaboración voluntaria de un alto número de personas que contribuyen de forma paralela, reportando y resolviendo errores del código, o aportando nuevas funcionalidades. La aceptación o no de las contribuciones que resuelven errores o aportan nuevas funcionalidades, va a depender del buen funcionamiento de las mismas, así como del uso de un número reducido de líneas, una buena documentación, y de la aceptación de

	<p>pares (“<i>signoffs</i>”, en inglés) que firmen calificando como bueno el código propuesto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo de Recompensa: Dentro de las motivaciones para participar en la CDKL están: aprender y desarrollar nuevas habilidades, compartir conocimientos, ganar prestigio a través de la fundación de un proyecto exitoso, hacer trabajo tedioso que normalmente no muchos quieren hacer (como escribir documentación o agregando una característica innovadora), entre otras. De esta manera, los participantes que contribuyen de modo destacado en tareas de programación, documentación, traducción o administración, son reconocidos para promover su participación y la del resto de la comunidad. El reconocimiento se hace a través de una serie de métricas que miden el grado de participación de cada agente en el proyecto, tales como: <ul style="list-style-type: none"> -Desarrolladores con mayor número de archivos modificados (es posible determinar este número a través los registros llamados “<i>changelog</i>”, en inglés, encargados de guardar los cambios realizados sobre el software, fechas de modificación, comentarios, y autores de los mismos). -Desarrolladores con mayor número de líneas cambiadas. -Desarrolladores que han eliminado más líneas de código. -Desarrolladores con mayor número de signoffs (parches firmados por cada desarrollador). ○ Mecanismo de Castigo: El usuario puede ser sometido al escarnio público, o ser ignorado y rechazado por los demás integrantes de la comunidad, entre otras cosas, con la intención de castigar la desobediencia a las reglas establecidas y minimizar la aparición de estos comportamientos sancionados por la comunidad.
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

III) Fase de Integración:

III.1. Fases para la Gestión del Conocimiento en MASOES

La arquitectura MASOES contempla un proceso de tres fases para la gestión del conocimiento: *Socialización, Agregación y Apropriación*. La siguiente tabla muestra como se representan estas fases en las Comunidades de Software Libre, específicamente en la CDKL.

Tabla 25. Desarrollo del Software Libre a través de las Fases de Gestión del Conocimiento

FASE	REPRESENTACIÓN EN LA CDKL
Socialización	<p>En esta fase se presenta un proceso de conversión del conocimiento implícito a un conocimiento explícito fácilmente comunicable, proveniente de las mismas interacciones básicas de los agentes, como la notificación de errores existentes, o la solicitud explícita de nuevas funcionalidades o controladores de dispositivos por nuevo hardware disponible, en el caso del kernel de Linux. Importante resultan los aportes de código fuente auto-explicativo (comportamiento promovido por la importancia de la calidad y la elegancia del diseño en el Software Libre), que viene a ser la representación del conocimiento individual sobre un problema en particular, es decir, que es la propuesta de solución que tiene un miembro de la comunidad y que pondrá disponible a la comunidad en el repositorio de control de versiones del código fuente. La incorporación de ese conocimiento (soluciones, errores y necesidades,) a través de las</p>

	herramientas disponibles en el entorno de la comunidad, son el principal mecanismo de socialización para estimular la generación e intercambio de conocimiento.
Agregación	La depuración del conocimiento explícito generado en la fase de Socialización, viene a darse por la implantación de soluciones genéricas o patrones de diseño. Las buenas prácticas de programación observadas, promueven la optimización del código, generando rutinas genéricas que facilitan su re-utilización por los demás miembros (componentes), y consolidan el aprendizaje colectivo sobre cómo atacar ciertos y determinados problemas recurrentes. Además, estos patrones de diseño terminan por convertirse en parte de la documentación o de las normas y estándares.
Apropiación	El proceso de apropiación ocurre por el mecanismo de aprendizaje individual, por ejemplo, cuando un usuario descarga y entiende el código fuente del proyecto y luego es capaz de modificarlo, según sus propios criterios y estilo. En otras palabras, ha incorporado a su base de conocimiento individual el conocimiento colectivo generado por la Comunidad.

Así como en el caso de Wikipedia, con la representación de las fases de análisis, diseño e integración en el DSL, específicamente en la CDKL, es posible afirmar que el sistema modelado cuenta con los componentes y procesos claves, tanto a nivel individual como colectivo, para mostrar un comportamiento auto-organizativo y emergente a nivel macro de acuerdo con MASOES. En la siguiente sección se presenta la fase de comprobación y estudio sobre este modelo realizado para la CDKL.

En particular, los dos casos de estudio presentados hasta ahora: Wikipedia y el DSL presentan algunas similitudes, tales como: diferentes tipos de agentes con especialización de tareas entre ellos, toma de decisiones basadas en mecanismos como meritocracia, normas de comportamiento establecidas por los mismos participantes del proyecto, características de estigmergía usada para el seguimiento temporal de los datos y atraer la atención de los participantes. Estas características estigméricas, según [134, 140, 141], se refiere a que en ambos sistemas se imita el comportamiento de las sociedades de insectos. En otras palabras, hay un elevado número de agentes (y de interacciones indirectas) que estimulan a los demás a participar a través del trabajo realizado, por lo tanto, estos agentes se limitan a reaccionar e imitar las acciones del grupo. Esas similitudes probablemente aparecen por el hecho que ambos sistemas pueden ser vistos como arquitecturas participativas y colaborativas que se apoyan en Internet como plataforma de producción. Algunas de las diferencias entre los dos sistemas son: la jerarquía establecida entre diferentes participantes, y los mecanismos de agregación, difusión y aprendizaje usados.

IV) Fase de Comprobación:

En las fases anteriores, la CDKL se modeló a través de MASOES, ahora este modelo es verificado mediante el método de verificación propuesto en la sección 4.2. Para ello, los

conceptos arquitectónicos y los enlazados a las propiedades emergentes y auto-organizados son instanciados en las tablas 26, 27 y 28, a partir del modelado realizado para la CDKL. Estos conceptos forman parte del MCD inicial para la CDKL (ver figura 28), que será utilizado en los escenarios diseñados para estudiar la auto-organización y emergencia en esta comunidad.

Tabla 26. Definición de Conceptos Vinculados a las Propiedades Emergentes y Auto-Organizadas (Criterios de Verificación) Involucrados en el MCD del Nivel I para la CDKL

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Densidad	En el desarrollo de un proyecto de SL al estilo bazar (modelo utilizado por la CDKL), el nivel de participación, interacción y complejidad es alta, permitiendo garantizar la creación de productos de software de alta calidad en poco tiempo.
Diversidad	La diversidad de funciones en la CDKL se puede ver en los diferentes tipos de agentes existentes en un proyecto de software libre, tales como: líder del proyecto, mantenedor o administrador, desarrollador, notificador de errores y usuario. Normalmente, la cantidad de agentes de cada uno de estos tipos es diferente y determinante sobre el desarrollo, por ejemplo, para el caso de la CDKL existe solo un líder del proyecto, un grupo pequeño de mantenedores (uno por cada módulo del proyecto), y un gran número de desarrolladores (quienes son los principales contribuyentes en el desarrollo y evolución del Kernel de Linux). El número de notificadores de errores es significativo, sin embargo, su participación en el proceso de desarrollo es baja.
Síntesis	El proceso de síntesis en la CDKL se realiza principalmente, en el código generado colectivamente, ya que los desarrolladores centran sus esfuerzos en la depuración, prueba y difusión de los aportes individuales o grupales, para producir un código mucho más estable y con mayor calidad, como producto de este esfuerzo colectivo. Además, este proceso puede observarse en las normas para el envío de código de la CDKL, establecidas en la documentación para los iniciados y en las preguntas frecuentes. En ellas se establece como se van generando patrones de diseño y prácticas generales, que terminan por convertirse en parte de la documentación o de las normas y estándares a evaluar cuando se realiza una verificación de código. Tales recomendaciones terminan por ser agrupadas en la documentación disponible para la comunidad.
Independencia	Las contribuciones que se realizan al código en la CDKL, normalmente son individuales. Cuando un participante se incorpora al proyecto, dedica tiempo inicialmente en aprender sobre esta comunidad, específicamente en cómo se llevan a cabo las actividades que le interesan dependiendo de sus objetivos e intereses. Ahora bien, cuando el participante ya es experto, como por ejemplo un desarrollador, demuestra sus conocimientos y habilidades de forma independiente a través del código generado, lo que le garantiza un bajo grado de dependencia.
Emotividad	La emotividad de los desarrolladores del software libre es medida por el grado de satisfacción de los desarrolladores de acuerdo a las actividades realizadas. Normalmente, el prestigio dentro de la comunidad es uno de los motivadores para la participación, así como también el deseo de aprender, adquirir y compartir experiencias y habilidades con los otros integrantes de la comunidad. Por ejemplo, en la CDKL un desarrollador que sea promovido a Mantenedor de un Módulo del Kernel podría tener un alto grado de satisfacción que se traduciría en alegría o felicidad, causando en el desarrollador un comportamiento imitativo,

	de acuerdo al modelo afectivo de MASOES. Por el contrario, un rechazo o críticas negativas de un aporte (por ejemplo, nuevo código), probablemente inhiba la participación del desarrollador, ya que su grado de satisfacción sería bajo, causándole tristeza o depresión (dándole prioridad a un comportamiento reactivo según el modelo afectivo de MASOES).
Auto-Organización	Las comunidades de SL poseen la capacidad de auto-organizarse, ya que es posible que una gran masa de desarrolladores logren obtener de forma voluntaria y colectiva, sin una autoridad centralizada, la creación de software de calidad, generado a partir de interacciones producidas a través de Internet, haciendo uso del correo electrónico, los repositorios de código, entre otras herramientas de comunicación e interacción grupal. Este concepto permite, entonces, que la CDKL pueda adaptarse a los nuevos retos que se van planteando, como el surgimiento de nuevas necesidades del software en desarrollo. Esto es manejado modularmente, tal que cada parte de Linux esta subdividida en módulos de acuerdo a una funcionalidad. Esto le da robustez al sistema, es decir, al elevar el grado de modularidad es posible mejorar los tiempos de respuesta ante los cambios imprevistos, o anticiparse a los cambios previstos del sistema. Por ejemplo, la aparición de un nuevo hardware crea la necesidad de auto-organizarse en los diversos participantes de los módulos afectados, para desarrollar el respectivo controlador. Este cambio no afectará a todo el Sistema, pero si le permitirá adaptarse ante el nuevo requerimiento.
Emergencia	Cuando la CDKL se inició no hubo un plan bien definido de trabajo, ni un calendario establecido para el desarrollo, ni actividades ni roles pre-establecidos. Por el contrario, solo existió un uso elevado del Internet que facilitó diversas formas de interacción, que a través del tiempo promovieron la emergencia de algunas estructuras para el desarrollo rápido y con calidad del código libre. Algunas de estas estructuras son la aparición de roles, la coordinación de equipos de trabajo, algunos patrones específicos de colaboración e interacción, las normas de etiqueta para regular el comportamiento de los miembros. Así mismo, se han generado nuevas funcionalidades del código desarrollado, que dan paso al surgimiento de nuevos módulos de desarrollo, incluso a nuevos proyectos. Por último, es posible ver cómo ha emergido a nivel colectivo código de alta calidad y funcionalidad como resultado de las interacciones locales entre los agentes, en otras palabras, de los aportes individuales de los miembros de la CDKL.

Tabla 27. Definición de los Conceptos Arquitectónicos Involucrados en el MCD del Nivel II para la CDKL

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Nro. de Agente	El Número de agentes fluctúa dinámicamente y va a depender de la fase en la que se encuentre el proyecto, es decir, si el proyecto está en la fase inicial la densidad de agentes va ser baja, porque normalmente el proyecto es iniciado por un solo participante que será el líder del proyecto. Si el proyecto avanza, una vez publicado el proyecto y aceptado, se encontrará en la fase intermedia o de transición, donde la densidad será media; por último, una vez que el proyecto se consolida y gana popularidad tiene una densidad alta de participantes o agentes, como es el caso de la CDKL.
	Los agentes que participan en el desarrollo de Software Libre demuestran un comportamiento reactivo cuando responden a los estímulos dejados por otros

<p>Tipo de Comportamiento Agente</p>	<p>agentes, que denotan las necesidades existentes en la comunidad. Por ejemplo, en la CDKL cuando se notifica un error, los agentes desarrolladores toman el código y proponen una solución al error planteado. Al mismo tiempo, es posible notar un comportamiento imitativo pues, varios desarrolladores individualmente toman el código y lo evalúan paralelamente. Finalmente, los agentes mantenedores tienen mayormente comportamientos cognitivos, ya que deben realizar tomas de decisiones complejas, como por ejemplo cuando deben evaluar y seleccionar entre varias soluciones propuestas para una falla en particular.</p>
<p>Interacción Directa</p>	<p>En la CDKL las interacciones directas son vistas dentro de las listas de correo, donde dos desarrolladores podrían comunicarse, por ejemplo, para llegar a un acuerdo sobre los aporte dados a un código de forma paralela por dos de ellos. También es posible encontrar interacciones directas entre el agente mantenedor y el agente desarrollador al momento de rechazar o aceptar un aporte realizado por el agente desarrollador, en este caso el aumento de interacciones será alta si el/o los desarrolladores realizan buenas contribuciones. Existe otro tipo de interacción donde los desarrolladores conversan en tiempo real, sin embargo, no suele ser un mecanismo práctico porque con desarrolladores distribuidos por todo el mundo no es fácil encontrar una hora apropiada para todos. No obstante, hay varios proyectos que hacen uso de herramientas de charla textual, ya sea regularmente o en congresos virtuales con fechas acotadas. La herramienta más usada son los canales IRC (<i>“Internet Relay Chat”</i>, en inglés), que normalmente comunica a las personas por medio de canales temáticos establecidos por medio de una serie de servidores colaboradores (para el caso de la CDKL, generalmente es bajo el número de interacciones a través de este medio).</p>
<p>Interacción Indirecta</p>	<p>Las interacciones indirectas son las más frecuentes dentro de la CDKL, pues se establece generalmente a través del código fuente entre quienes lo desarrollan y quienes lo interpretan para usarlo, probarlo o modificarlo, siguiendo la documentación existente sobre el código.</p>
<p>Mecanismo Retroalimentación Positiva</p>	<p>Promueven la creación de estructuras y cambios en la CDKL, entre estos están: los mecanismos para promover la participación, aprendizaje, calidad, difusión y recompensa.</p>
<p>Mecanismo Retroalimentación Negativa</p>	<p>La aplicación de normas de comportamiento y participación dentro de las comunidades de SL, evidencian la necesidad de equilibrar el sistema. Para ello, existen mecanismos de castigo y sanciones empleadas para evitar la repetición de errores comunes, malos comportamientos y actitudes. Otros mecanismos de retroalimentación negativa son el filtrado y depuración en el código y documentación, la capacidad de olvido en el proceso de aprendizaje, entre otros.</p>
<p>Mecanismo de Agregación</p>	<p>Entre los mecanismos de agregación empleados en la CDKL está el Sistema Controlador de Versiones (SCV) y los repositorios para el almacenamiento de los datos. El objetivo del SCV es administrar el código fuente y su evolución, y presentar al usuario esa información de forma útil y práctica. Allí es posible llevar un historial de cambios realizados sobre el software, fechas de modificación y autores de los mismos (<i>“changeset”</i>, en inglés), lo que va a permitir, en primera instancia, revisar el código y aprender de lo que otros hicieron. Además, va a facilitar la búsqueda y resolución de errores. En general, el código final generado es el resultado del esfuerzo colectivo y la participación individual. Otro mecanismo de agregación son las listas de correo.</p>

Tabla 28. Definición de los Conceptos Arquitectónicos Involucrados en el MCD del Nivel III para la CDKL

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Componente Reactivo	Este componente representa las reacciones (respuestas) ante los estímulos dejados por los otros miembros de la CDKL. Por ejemplo, las reacciones ante el código creado o modificado por los otros.
Componente Cognitivo	En la CDKL los procesos cognitivos generalmente son altos, debido al nivel de aprendizaje y razonamiento requerido por algunos agentes en el desarrollo de sus actividades u objetivos individuales. Por ejemplo, para el caso de los desarrolladores, quienes hacen uso de sus conocimientos en la creación del código. Del mismo modo, los mantenedores requieren cierta experiencia y conocimientos para decidir sobre el código aprobado o reprobado, es decir, para su proceso de toma de decisiones.
Componente Conductual	Cada agente que participa en la CDKL va a manejar un comportamiento asociado a sus funciones. Por ejemplo, un desarrollador al resolver un problema básico del código asumirá más tarde un comportamiento u otro (imitativo, reactivo o cognitivo), dependiendo de si su propuesta de solución es aceptada o rechazada.
Componente Social	En el DSL, al igual que en la CDKL, la reputación social juega un papel importante para los desarrolladores. En este sentido, cada agente busca imitar las buenas prácticas o acciones que realizan los otros agentes, como lo es por ejemplo presentar continuos y buenos aportes al módulo en el que participa el agente, lo que le permite ganar reconocimiento de sus pares, y por ende, ser promovido dentro de la misma comunidad. Por otra parte, los agentes evitan los comportamientos conflictivos como auto-promoverse dentro de un grupo, o asumir el liderazgo de un módulo, sin presentar antes aportes que evidencien su conocimiento y capacidad para adoptar un liderazgo.
Tipo de Emoción	La emoción que experimente un agente en un momento dado (alegría, felicidad, compasión, admiración, tristeza, depresión, rechazo, ira) dentro de la CDKL determina un comportamiento en el agente ante una situación dada o ante otros agentes. Generalmente, el comportamiento asumido es imitación.

5.2.2. Escenarios y Resultados Aplicados en la CDKL

Escenario 1: Caso Inicial para el Desarrollo del Software Libre. Para este escenario, asumimos que casi todos los conceptos arquitectónicos trabajan correctamente y se inicializan en un estado alto (1.0). Por lo tanto, estos conceptos contribuirán de manera importante a la auto-organización y la emergencia. Hay tres excepciones de acuerdo a nuestro modelo en esta inicialización de los conceptos arquitectónicos: las interacciones directas se inicializan en un nivel bajo (0.5), ya que no ocurren con la misma frecuencia que la interacciones indirectas, el tipo de emoción y de mecanismo de retroalimentación negativa se inicializan en (0.75), porque suponemos que no hay un comportamiento totalmente emocional en los participantes de la CDKL de acuerdo a las normas establecidas para su interacción, y suponemos también, como en el caso de estudio referente a la Wikipedia en inglés y español (5.1.2), que ellos trabajan más en la generación de contenidos (retroalimentación positiva) que en la corrección, eliminación y acciones de discusión (retroalimentación negativa), para ver como influyen estos

conceptos en la calidad del contenido. Con respecto a los conceptos asociados a la auto-organización y propiedades emergentes (ver tabla 26), se inicializan en cero, con el fin de ver cuáles son los valores alcanzados cuando el sistema se estabilice (ver figura 28).

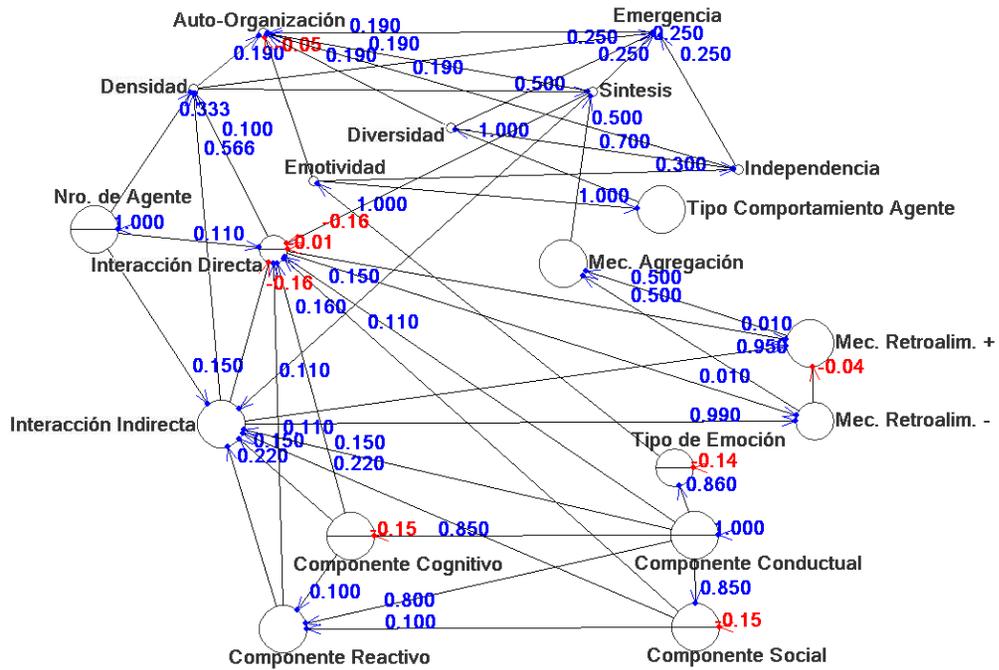


Figura 28. Escenario 1: MCD para la CDKL

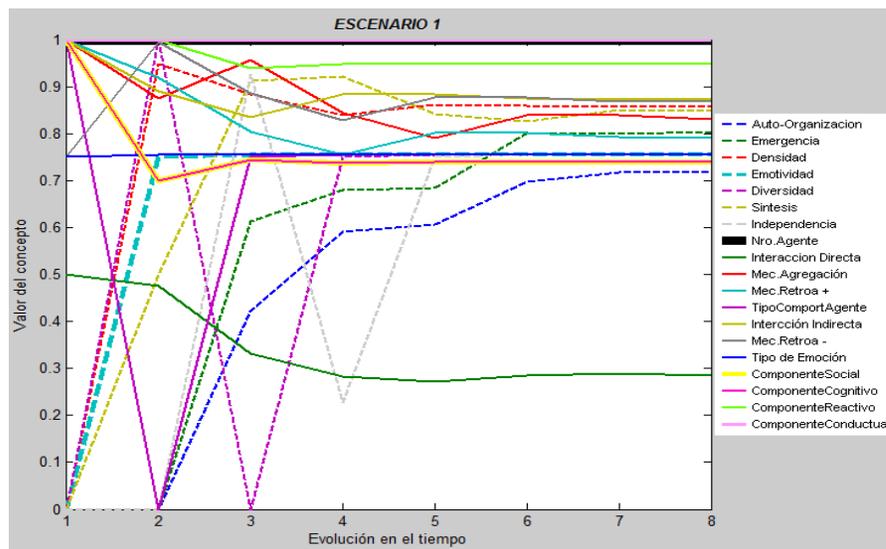


Figura 29. Resultados Obtenidos para el Escenario 1 de la CDKL

De acuerdo a los resultados obtenidos (ver figura 29), podemos ver que los primeros conceptos en incrementarse son densidad, diversidad, síntesis y emotividad, lo que indica que crece el número de interacciones o participaciones con gran diversidad en la comunidad, y al mismo tiempo, un proceso de agregación o síntesis que favorece la generación de nuevas estructuras a partir de estas participaciones colectivas. Además, el nivel de independencia se incrementa hasta estabilizarse en 0.75, indicando que en un primer momento los agentes no son autónomos para participar sino que esto ocurre a medida que adquieren más habilidades que les permiten más desenvolvimiento y participación. Particularmente, se refleja como la independencia (autonomía) es afectada por el grado de emotividad (75%) para la CDKL, ya que el estado emocional del agente determina el tipo de comportamiento que asumirá el agente en un momento dado.

En general, es posible ver cómo la mayoría de los conceptos que afectan directa e indirectamente la auto-organización y la emergencia alcanzan rápidamente valores altos (cerca de 1), lo que significa que estos conceptos contribuyen de manera importante con el funcionamiento del sistema modelado. Podemos destacar que el concepto de interacción directa sólo logra estabilizarse en un valor bajo (aproximadamente 0.29), lo que significa que no contribuye significativamente a la auto-organización y la emergencia del modelo para la CDKL, y que también los participantes de la CDKL no interactúan principalmente en forma directa, sino de manera indirecta a través del código desarrollado, como se ha establecido inicialmente. Por último, también es posible señalar que los participantes de la CDKL trabajan más en la corrección, borrado y foros de discusión (retroalimentación negativa) (86%) que en la generación o la adición de contenidos (retroalimentación positiva) (79%), en oposición a lo que se supuso inicialmente. Esto podría significar que invierten mucho más tiempo en la obtención de calidad que cantidad de contenido.

Escenario 2: Afectando el Mecanismo de Agregación. En este caso veamos lo que pasaría si alguno de los mecanismos de agregación que posee la CDKL, tales como el Sistema Controlador de Versiones (SCV) o las listas de correo, no funcionan correctamente. En este caso, el valor inicial del concepto que se refiere al mecanismo de agregación se inicializará en 0.25, que representa una disminución en su rendimiento de aproximadamente un 70% con respecto a su valor ideal (0.83) para la CDKL establecida en el escenario 1.

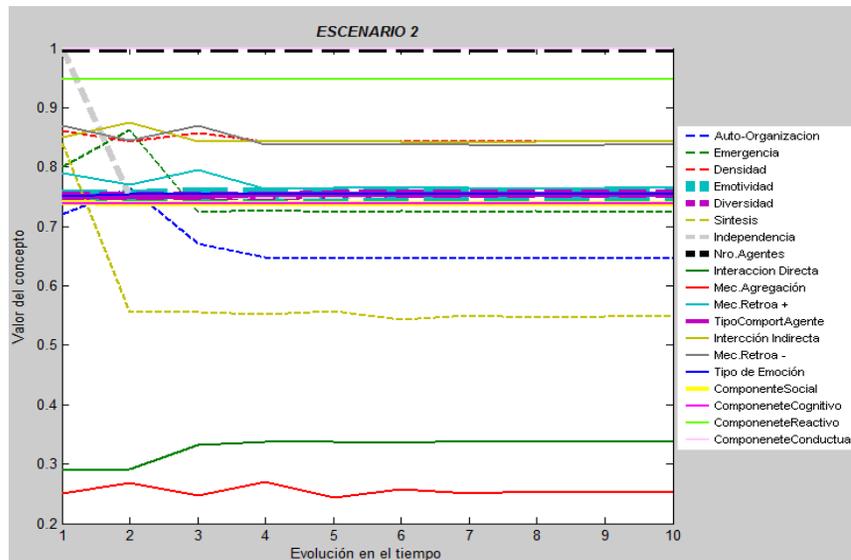


Figura 30. Resultados Obtenidos para el escenario 2: Afectando el Mecanismo de Agregación

Según los resultados obtenidos (ver figura 30), algunos de los mecanismos de agregación empleados en la CDKL se ven afectados. Así, el proceso de agregación es afectado negativamente en un 36%, debido a la variación del concepto del proceso de síntesis de 0.84 a 0.54. Por lo tanto, este concepto también depende del correcto funcionamiento de los diferentes mecanismos de agregación. A pesar de los problemas existentes con el proceso de agregación, el nivel de auto-organización y emergencia decrece en aproximadamente un 10% y 9%, respectivamente, con respecto a los valores ideales (0.72 y 0.80, respectivamente) establecidos en el escenario 1 para la CDKL. Esto indica que a pesar de que el proceso de agregación es un mecanismo clave para la emergencia de los sistemas emergentes y auto-organizados, este no influye drásticamente en la CDKL, ya que el número de interacciones directas (por ejemplo, a través de correos) se incrementa en 17%¹⁵, siendo estabilizado en 0.34, superior al valor ideal en la CDKL de 0.29. Esto podría significar la necesidad de más comunicación directa debido al mal funcionamiento del Sistema Controlador de Versiones (SCV) o de las listas de correo, que son los principales mecanismos de agregación. También, podemos ver una pequeña disminución en los mecanismos de retroalimentación negativa y positiva, ya que la calidad del contenido y rendimiento de los desarrolladores se ven afectados por el problema existente en el mecanismo de agregación. Por último, podemos ver que los conceptos asociados a la auto-organización (0.64) y la emergencia (0.72) tienen unos valores que no son los máximos, pero que no son tan malos (estado medio y alto, respectivamente) para la CDKL, los cuales se mantienen en esos niveles si los mecanismos de agregación de datos trabajan por lo menos al 50% de su capacidad.

¹⁵ En este caso suponemos que el valor ideal es 0.29, que representa el 100%, a partir de allí hacemos una regla de tres para determinar el incremento.

Escenario 3: Desarrollo del Software Libre según Estilo Catedral. Este escenario representa el DSL según el estilo Catedral, es decir, como un sistema cerrado, donde las actividades son planificadas y realizadas siguiendo el paradigma top-down usado comúnmente en el modo tradicional de desarrollo de software propietario [142]. En el estilo Catedral, el proceso de desarrollo es realizado por un restringido grupo de desarrolladores expertos. Así, un requerimiento funcional es claramente especificado antes de hacer modificaciones, la adaptación y mejora de las tareas son asignadas a equipos especificados, y la evolución de la tarea es finalizada una vez que el sistema pasa la prueba de control de calidad [140, 142], sin que se liberen versiones temporales para ser probadas por otros actores externos al proyecto.

Si modelamos el trabajo de la CDKL de acuerdo al estilo Catedral utilizando MASOES, los valores de algunos conceptos claves se disminuirán a fin de mostrar el estilo Catedral. En particular, se debe inicializar en cero los 7 conceptos asociados a las propiedades emergentes y auto-organizativas, para representar inicialmente la ausencia de estas propiedades dentro del escenario propuesto, y ver cómo evolucionan en el tiempo sus valores hasta la estabilización del sistema, para finalmente analizar el grado de auto-organización y emergencia alcanzado. Adicionalmente, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones para la inicialización del resto de los conceptos:

a. Es necesario plantear la existencia de un grupo reducido de participantes, es decir; que implica por una parte la disminución del concepto llamado Nro. de Agentes, y por otra, la disminución de la interacciones indirectas y directas. Así, se inicializan los conceptos involucrados de la siguiente manera, número de agentes: 0.1 (este valor representa el 10% de los programadores, que son más de 1000 en el estilo bazar CDKL según el informe publicado por la Fundación Linux (Linux Foundation 2010)); interacciones directas e indirectas: 0.5, porque se supone que se comunican directa e indirectamente en la misma proporción, ya que se trata de un grupo con una densidad baja de participantes.

b. Al considerar que la CDKL desarrolla Software Libre según el estilo Catedral, significa que se ejerce dentro de la comunidad un fuerte liderazgo capaz de centralizar la toma de decisiones, predefinir las actividades a desarrollar, y concentrar el poder en sólo unos pocos. Así, se promueve el comportamiento individual y no social, a pesar de tener el código abierto, ya que los individuos se comprometen principalmente con el cumplimiento de las actividades ya predefinidas. Asimismo, según Raymond [9] los desarrolladores en un modelo catedral están sometidos a mucha tensión o estrés (emociones negativas), debido a que deben desarrollar nuevo código y al mismo tiempo, depurar los programas generados. Con el fin de mostrar el resultado de esta centralización a través de MASOES, se disminuye la calidad del componente conductual (0.25) para limitar la capacidad adaptativa de cada individuo (restringiéndose el cambio dinámico de comportamiento), la calidad del componente social se ve disminuida (0.5), y también el tipo de emoción (0.1), para reflejar un grado de satisfacción bajo guiado por emociones tales como: depresión, tristeza, rechazo e ira, que promovería el tipo de

comportamiento cognitivo y reactivo (1.0), pero no el imitativo, según el modelo emocional de MASOES.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este escenario, es posible notar que todos los conceptos se estabilizan en un estado bajo y medio (ver figura 31). En particular, es significativo ver que los conceptos asociados a las propiedades emergentes y auto-organizadas están en un estado bajo, lo que significa que este modelo no se comporta como un sistema auto-organizado y emergente, de acuerdo a MASOES. En este sentido, se comprueba que los conceptos afectados en sus valores iniciales (número de agentes, interacción directa e indirecta, el tipo de emoción del agente, y los componentes conductual y social) son claves para promover un comportamiento emergente y auto-organizado en el DSL según MASOES. Con valores iniciales bajos, producto del modelo de desarrollo Catedral aplicado en la comunidad, como es lógico, no es posible el surgimiento de algunas estructuras sociales para el desarrollo rápido y con calidad del código libre. Algunas de estas estructuras son la aparición de roles, la coordinación de equipos de trabajo, las normas de etiqueta para regular el comportamiento de los miembros, entre otras [143].

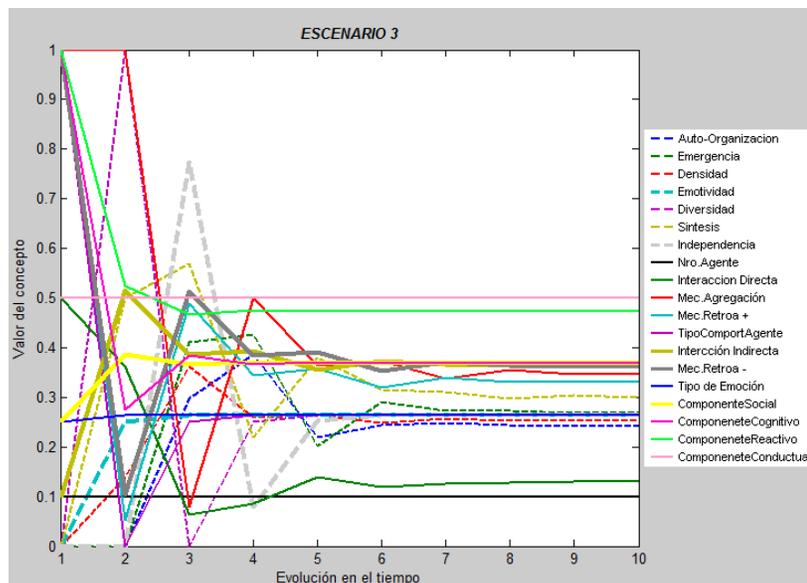


Figura 31. Resultados Obtenidos para el escenario 3: DSL según Estilo Catedral

Por otro lado, al final de la simulación es posible ver que el valor de las interacciones indirectas alcanza un valor mayor (0.36), que las interacciones directas (0.12), esto podría reflejar que la comunicación es principalmente de la forma indirecta a través del código, pero las interacciones indirectas son mucho más reducidas que en el estilo bazar (1.0), porque el trabajo es desarrollado en un entorno más aislado y cerrado, mostrando también, la importancia de una alta densidad de participantes que incrementa el número de interacciones indirectas como en el estilo bazar. Además, considerando que el número

de agentes en el equipo de desarrollo estilo catedral es muy reducido, es lógico notar la baja diversidad resultante (0.26), lo que implica que el equipo de desarrollo tenderá a ser muy homogéneo a nivel de decisiones, así como en tipos de comportamiento. Del mismo modo, el nivel de independencia (0.26) es bajo debido a la existencia de un líder de proyecto que centraliza el proceso de toma de decisiones. Con respecto al tipo de emoción (0.26), indica que se mantiene en un grado de satisfacción individual bajo, quizás por el hecho que al ser un grupo reducido que trabaja de manera aislada no se trata a los usuarios como colaboradores autónomos, no se promueven estrategias para la inserción de nuevos participantes y para incrementar su motivación, entre otras cosas.

5.3. Comportamiento Colectivo de los Peatones

En este caso de estudio caracterizaremos los componentes y procesos involucrados a nivel individual y colectivo en el comportamiento colectivo de los peatones. Específicamente, instanciamos el modelo de fuerza social (MFS) para la dinámica de los peatones [144] usando MASOES. Posteriormente, esto nos permitirá evaluar si el MFS se comporta como un sistema auto-organizado y emergente de acuerdo al modelado generado por MASOES, como es evidenciado en diferentes artículos [144, 145], utilizando el método de verificación presentado en la sección 4.2. Para esto haremos, en primer lugar, una descripción matemática del MFS que nos ayudará al modelado través de MASOES. El MFS es un modelo microscópico, donde los fenómenos colectivos surgen de las interacciones complejas entre muchos peatones. Además, se considera que cada peatón está sujeto a diversas fuerzas, y que la dinámica entre éstas sigue las ecuaciones de movimiento que a continuación se describen.

5.3.1. Descripción Matemática del Modelo de Fuerza Social (MFS)

A continuación, los principales efectos de acuerdo al MFS [144] que determinan el movimiento de un peatón α :

(i) Fuerza Impulsora. El Peatón quiere llegar a un determinado destino, con vector de posición \vec{r}_α^0 lo más cómodo posible. Por lo tanto, el peatón normalmente toma el camino más corto posible. Su dirección deseada $\vec{e}_\alpha(t)$ de movimiento será:

$$\vec{e}_\alpha(t) := \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|}, \quad (4)$$

Donde $\vec{r}_\alpha(t)$ denota la posición actual del peatón α en el tiempo t . Además, el peatón en cada tiempo t se dirige a $\vec{r}_\alpha^k(t)$ que representa el vector posición del k -ésimo punto más cercano a α . Si el movimiento de un peatón no se altera, él/ella caminará hacia la dirección deseada $\vec{e}_\alpha(t)$ con una cierta *velocidad deseada* v_α^0 . Una desviación de la *velocidad actual* $\vec{v}_\alpha(t)$ de la *velocidad deseada* $\vec{v}_\alpha^0(t) := v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha(t)$ debido a los procesos de desaceleración

o evitación necesarios, tiende a aproximarse $\vec{v}_\alpha^0(t)$ nuevamente dentro de un cierto tiempo de relajación τ_α . Esto puede ser descrito por el siguiente término para la aceleración:

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) := \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha). \quad (5)$$

(ii) Efectos Repulsivos. El movimiento de un peatón α es influenciado por los otros peatones. En particular, el peatón mantiene una cierta distancia de los otros peatones, que depende de la densidad de peatones y la velocidad deseada v_α^0 . Esto da lugar a efectos de repulsión con respecto a los demás peatones β , que pueden ser representados por cantidades vectoriales¹⁶:

$$\vec{F}_{\alpha\beta}^0(\vec{r}_{\alpha\beta}) := -\nabla_{\vec{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta} [b(\vec{r}_{\alpha\beta})] \quad (6)$$

Donde $V_{\alpha\beta}$ es el **potencial repulsivo** que se considera como una función monótona decreciente de b con líneas equipotenciales, que tiene la forma de una elipse dirigida hacia la dirección del movimiento que tiene como semieje menor a b (eje de las ordenadas), y define la distancia o espacio entre el peatón α y los otros peatones β , donde $\vec{r}_{\alpha\beta}$ es la anchura del paso del peatón β . En este caso se asume que el peatón al dar cada paso respeta la “esfera privada” de los otros peatones.

Un peatón también se mantiene a una cierta distancia de las fronteras de los edificios, muros, calles y obstáculos, entre otros. Por lo tanto, un borde B provoca un *efecto repulsivo* que puede ser descrito por:

$$\vec{F}_{\alpha B}^0(\vec{r}_{\alpha B}) := -\nabla_{\vec{r}_{\alpha B}} U_{\alpha B} (\|\vec{r}_{\alpha B}\|) \quad (7)$$

Donde $U_{\alpha B}$ es un **potencial repulsivo** y monótono decreciente que depende de $U_{\alpha B}(\|\vec{r}_{\alpha B}\|)$. Donde \vec{r}_B^α indica la ubicación del borde B que es el más cercano al peatón α .

(iii) Efectos de Atracción. Los peatones son a veces atraídos por otras personas (por ejemplo, amigos, artistas callejeros, etc.) u objetos (por ejemplo, vidrieras de exhibición, etc.). Estos *efectos de atracción* son representados por $\vec{F}^{\alpha i}$ que es la fuerza de atracción del peatón α con respecto al i -ésimo atractor de posición \vec{r}_i , pueden ser modelados por los potenciales atractivos, monótonos crecientes $W_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t)$, en forma similar a los efectos repulsivos:

¹⁶ El símbolo $-\nabla$ indica que los gradientes son negativos, ya que la función que lo acompaña es decreciente (tanto en las fuerzas de repulsión como de atracción). Además, el signo negativo garantiza que el valor obtenido para la fuerza respectiva será positivo.

$$\vec{F}_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t) := -\nabla_{\vec{r}_{\alpha i}} W_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t) \quad (8)$$

Donde $W_{\alpha i}$ es el **potencial atractivo** que depende del tiempo, ya que la *atracción* $\|\vec{F}_{\alpha i}\|$ es normalmente decreciente con el tiempo t , debido a que el interés va disminuyendo.

Podemos ahora fijar la ecuación para la motivación total de un peatón ($\vec{F}_{\alpha}(t)$). Según [144], esa motivación total en el MFS es igual a: *Fuerza impulsora* + *Fuerza repulsiva con respecto a los otros peatones* + *Fuerza repulsiva con respecto a los bordes o fronteras* + *Fuerza de atracción*. Tomando la formalización de dichas fuerzas definidas en las ecuaciones 5, 6, 7 y 8, tenemos que $\vec{F}_{\alpha}(t)$ es:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\alpha}(t) := & \vec{F}_{\alpha}^0(\vec{v}_{\alpha}, \nu_{\alpha}^0 \vec{e}_{\alpha}) + \sum_{\beta} \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) \\ & + \sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) + \sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t) \end{aligned} \quad (9)$$

La dinámica del MFS genérico es ahora definido por:

$$\frac{d\vec{w}_{\alpha}}{dt} := \vec{F}_{\alpha}(t) + \text{fluctuaciones.} \quad (10)$$

Donde $\vec{w}_{\alpha}(t)$ es la velocidad preferida. Aquí agregamos un *término de fluctuación* que tenga en cuenta las variaciones aleatorias del comportamiento. Esta fluctuación es una distribución Gaussiana perpendicular al vector que señala la dirección deseada.

5.3.2. Modelado del Comportamiento Colectivo de los Peatones con MASOES

En esta sección, el MFS es descrito utilizando MASOES, siguiendo la metodología propuesta en la sección 3.4.

I) Etapa de Análisis:

I.1 Los Agentes y sus Tareas en el MFS

El modelado de MFS a través de MASOES significa considerar a los peatones como agentes con un alto grado de homogeneidad, es decir, con una gran cantidad de peatones con un comportamiento similar. Los peatones interactúan en un espacio común, la calle (medio ambiente), y cada peatón obedece al mismo conjunto de reglas o fuerzas definidas en [144] y descritas en la sección 5.3.1, con el fin de alcanzar su objetivo (destino).

I.2 Niveles de interacción:

Existen tres niveles de interacción en el MFS:

- **Local.** Los peatones interactúan cuando cada peatón debe seleccionar la dirección y la velocidad en relación con otros peatones, obstáculos, etc., para producir su movimiento local. Igualmente, cada peatón actúa de acuerdo con la información local y su objetivo, evitando los bordes y los otros peatones.
- **Grupal.** En este nivel, los peatones deben interactuar siguiendo los efectos de atracción y repulsión, que son responsables de la formación de grupos de peatones (comportamiento de agrupamiento, “*joining behavior*”, en inglés).
- **General.** Representa el nivel de interacción más alto, donde las interacciones se realizan entre flujos de peatones existentes (movimiento de la multitud, “*crowd motion*”, en inglés).

II) Etapa de Diseño:

II.1. Los componentes y Procesos del MFS a Nivel Individual

De acuerdo con el MFS, los peatones deben ser definidos sin emociones, porque no son consideradas en el MFS. Adicionalmente, es conveniente que los agentes desarrollen sólo dos de los tres tipos de comportamiento propuestos por MASOES: reactivo e imitativo, de acuerdo con las ecuaciones del MFS. Así, cada agente tendrá tres componentes individuales: el componente reactivo, social y conductual en MASOES, sin el componente cognitivo (ver tabla 29).

Tabla 29. Componentes individuales de MASOES en el MFS

COMPONENTE INDIVIDUAL EN MASOES	REPRESENTACION EN EL MFS
Conductual	Los peatones en el MFS activan su comportamiento en función de la situación que se enfrentan en un momento dado. Las ecuaciones del MFS describen las diferentes fuerzas (atracción y repulsión) que permitirán al componente conductual llevar a cabo de forma dinámica los cambios de comportamiento del agente: comportamiento reactivo o imitativo.
Reactivo	Los peatones muestran un comportamiento reactivo en caso de evitar una colisión con otros peatones u obstáculos, y para mantener un comportamiento de segregación en caso de caminar en grupo o cuando son atraídos por algo o alguna persona
Cognitivo	No es representado por el MFS para la dinámica de los peatones.
Social	Cada peatón requiere un espacio para el siguiente paso, y para esto, toma en cuenta los otros peatones (los más cercanos). Por lo tanto, el comportamiento de cada peatón depende de la posición y la velocidad de los otros peatones y el entorno, para ajustar su velocidad.

II.2. Componentes y Procesos del MFS a Nivel Colectivo

Los componentes y los procesos que intervienen se pueden ver en las tablas 30 y 31, respectivamente.

Tabla 30. Componentes Colectivos de MASOES en el MFS

COMPONENTE COLECTIVO EN MASOES	REPRESENTACION EN EL MFS
Conjunto de Reglas	Este conjunto de normas está compuesto por todas las ecuaciones del MFS.
Campo de Acción	Es gracias al conjunto de interacciones directas e indirectas que los peatones delimitan su campo de acción. Este campo de acción está formado por las trayectorias realizadas por los peatones en las aceras, y en general en los espacios públicos por donde circulen.
Base de Conocimiento Colectivo	No hay una base de conocimiento colectivo en el MFS.
Objetivo Colectivo	No hay un objetivo colectivo en el MFS.

Tabla 31. Procesos Colectivos de MASOES en el MFS

PROCESO COLECTIVO EN MASOES	REPRESENTACION EN EL MFS
Formación de Redes Sociales	La interacción social para la resolución de problemas en el MFS no se lleva a cabo, ya que cada peatón tiene sólo sus objetivos sin un objetivo común o colectivo. Así, MFS no considera la idea de redes sociales como es concebida en MASOES
Mecanismos de Retroalimentación	Con respecto a la generación de flujos, existen mecanismos para la generación de trayectorias de los peatones. Los mecanismos de retroalimentación que intervienen en el MFS son los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> • Proceso de aceleración guiado por la velocidad real y la velocidad deseada. • Procesos de desaceleración y evitación de obstáculos, tales como los efectos de repulsión y atracción.

III) Fase de Integración:

III.1. Fases para la Gestión General de Conocimiento en el MFS

En la siguiente tabla, las tres fases de nuestra arquitectura para la gestión del conocimiento: *socialización, agregación y apropiación*, son instanciadas para el MFS.

Tabla 32. El MFS a través de las Fases de Gestión de Conocimiento.

FASE	REPRESENTACION EN EL MFS
Socialización	Los peatones hacen explícito su conocimiento a los demás con la creación, modificación y eliminación de su trayectoria, a través de los pasos que dan.
Agregación	El proceso de agregación se lleva a cabo a través de los campos potenciales formado por las distintas fuerzas de todos los peatones que interactúan en el entorno (la calle). Así, la agregación de los movimientos de los peatones forma diferentes trayectorias que se traducen en flujos a nivel macro.
	Los peatones pueden interactuar o comunicarse con otros peatones, directa o

Apropiación	indirectamente, pero el MFS considera a los peatones como elementos irreflexivos. Por esto, los peatones según este modelo no tienen un mecanismo explícito de aprendizaje. Ahora bien, hay un aprendizaje vía refuerzo, como en el caso de las colonias de hormigas, ya que los peatones pueden seguir o no a otros peatones (efectos de atracción o repulsión).
--------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A pesar del hecho que no hay ni un objetivo colectivo, ni una base de conocimiento colectivo, ni un comportamiento emocional o cognitivo, de acuerdo con la instanciación de las fases de análisis, diseño e integración en el MFS, se puede afirmar según MASOES, que el sistema modelado tiene algunos componentes y procesos claves, a nivel individual y colectivo, a fin de generar un comportamiento emergente y auto-organizado a nivel macro, como un sistema estigmérgico, con un comportamiento reactivo e imitativo guiado por estímulos y respuestas, en un entorno con un campo de acción como mecanismo de agregación. Además, el sistema de modelado tiene una alta densidad de peatones y comportamientos basados en las interacciones locales. La etapa de comprobación del comportamiento emergente y auto-organizado del sistema modelado se realiza en la siguiente sección.

IV) Fase de Comprobación:

En las fases anteriores, el MFS se modeló a través de MASOES, ahora este modelo es verificado mediante el método de verificación propuesto en la sección 4.2. Para ello, los conceptos arquitectónicos y los enlazados a las propiedades emergentes y auto-organizados son instanciados en las tablas 33, 34 y 35, a partir del modelado realizado para el MFS. Estos conceptos forman parte del MCD inicial para el MFS (ver figura 32) que será utilizado en los escenarios diseñados para estudiar la auto-organización y emergencia en el comportamiento colectivo de los peatones.

Tabla 33. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MDC del nivel I para el MFS

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Densidad	Mide el grado de complejidad dentro de la sociedad de agentes. Se mide a través del número de agentes e interacciones directas e indirectas. En el MFS es necesaria una alta densidad de peatones para que aparezcan los efectos auto-organizativos y emergentes [145].
Diversidad	Mide la homogeneidad o heterogeneidad de la sociedad de agentes. Para el MFS hay un alto número de agentes definidos del mismo tipo dentro del sistema, es decir, hay una alta homogeneidad.
Agregación	Mide el grado de agregación en el sistema, medida por la calidad del mecanismo de agregación. En el caso del MFS, es medido por el grado de delimitación del campo de acción (zona peatonal de mayor tránsito), que favorece la coordinación de las maniobras de evitación y pasos de todos los peatones.
Independencia	Mide el grado de autonomía y apropiación de los agentes en cuanto a la toma de decisiones. Los agentes en el MFS no tienen ningún mecanismo de aprendizaje que le permita evaluar alternativas y efectuar un proceso de toma de decisión.
	Mide el grado de emotividad en el agente. Con respecto al MFS, el uso de

Emotividad	emociones no es considerado en el modelado matemático.
Auto-Organización	Mide el grado de adaptabilidad del sistema. De ahí que los patrones espacio-temporales (fenómenos auto-organizativos) que podrían emerger son el resultado de un proceso de auto-organización entre los peatones, y no de fuerzas externas o acciones deliberativas [27, 145].
Emergencia	Mide el grado de evolución del sistema a través de la posibilidad de la aparición de propiedades emergentes. Algunas de las cosas que pudieran emerger en las multitudes de peatones son los patrones espacio-temporales, tales como: la creación de carriles (grupos) de peatones que caminan en la misma dirección, el cambio oscilatorio de la dirección de los que caminan por pasos estrechos (por ejemplo, puertas). En otras palabras, los patrones conductuales son los agrupamientos, los carriles y las colas que se forman.

Tabla 34. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCDdel nivel II para el MFS

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Nro. Agente	Se refiere al número de peatones en el sistema.
Tipo Comportamiento Agente	Se refiere a los diferentes tipos de comportamiento que los agentes podrían tener. En el MFS, hay agentes homogéneos en el sistema con un comportamiento reactivo e imitativo.
Interacción Directa	Se refiere al número de interacciones entre los peatones en el sistema, por ejemplo, las que ocurren a través de las colisiones y de la comunicación oral.
Interacción Indirecta	Se refiere al número de interacciones entre los peatones en el sistema a través del entorno, por ejemplo, las trayectorias generadas en la calle a través de sus pasos.
Mecanismo Retroalimentación +	En caso del MFS está representado a través de la fuerza de aceleración, que es un mecanismo de refuerzo que afecta el proceso de agregación, contribuyendo a un comportamiento social o imitativo y actuando a nivel local [114, 34].
Mecanismo Retroalimentación -	En caso del MFS está representado a través del proceso de desaceleración, que es un mecanismo para estabilizar los procesos y auto-regularlos, evitando las fluctuaciones indeseables.
Mecanismo de Agregación	En el MFS, como en los sistemas estigmérgicos, es un mecanismo de agregación descentralizado y distribuido que permite la coordinación y la comunicación indirecta a través de los campos de acción o campos potenciales.

Tabla 35. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCDdel Nivel III para el MFS

CONCEPTO	DESCRIPCION
Componente Reactivo	Representa la calidad de este componente para producir el comportamiento reactivo del peatón. Las reacciones son reglas asociadas a caminar, evitar colisiones con otros peatones y obstáculos y los efectos de atracción.
Componente Cognitivo	Representa la calidad de este componente para producir un comportamiento cognitivo a través de los mecanismos cognitivos (de aprendizaje, razonamiento) del peatón, y también de la toma de decisiones intencional o deliberativa, entre otros. En el MFS, este componente no está representado.
Componente Conductual	Representa la calidad de este componente para favorecer la adaptación de cada peatón con su entorno, ya que crea un modelo interno del mundo (manejo de conocimiento explícito) que regula su comportamiento. En el MFS, el peatón

	tiene su proceso de toma de decisiones basado en sus objetivos individuales, y no a través de un estado emocional.
Componente Social	Representa la calidad de este componente para promover la conciencia en los peatones acerca de la posición y la velocidad de los otros peatones.
Tipo de Emoción	Se refiere al tipo de emoción que un agente podría tener en un momento dado. En el MFS, las emociones no son consideradas en el modelado de los peatones.

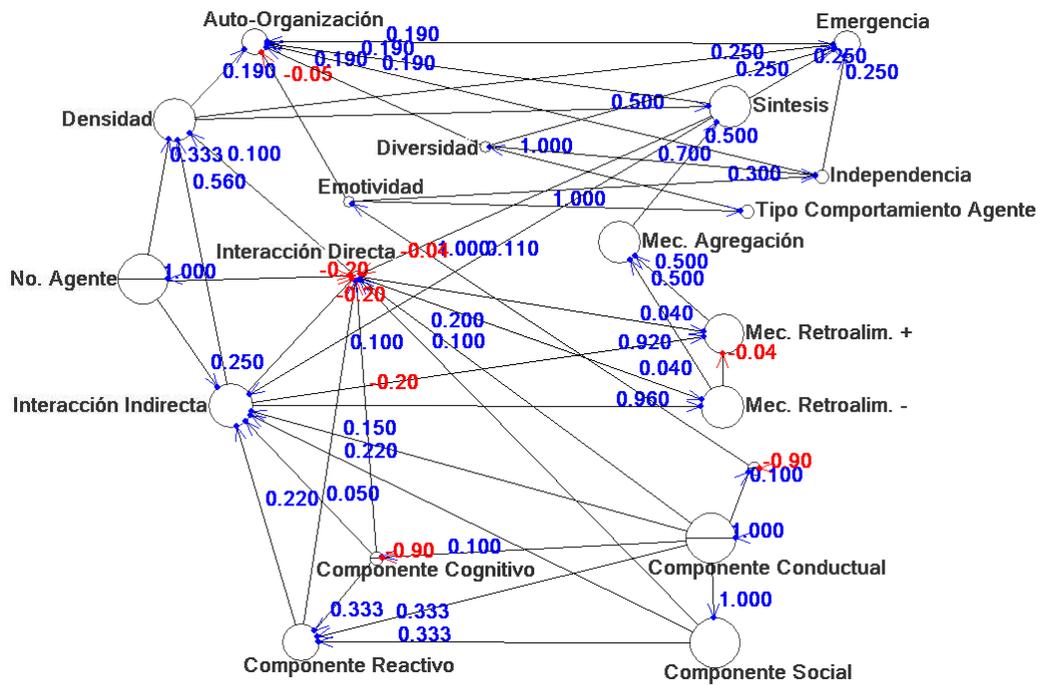


Figura 32. Escenario 1: MCD Inicial para el MFS

5.3.3. Escenarios y Resultados Aplicados al MFS

Escenario 1: El Modelo de Fuerza Social a través de MASOES. Para la instanciación del MFS a través MASOES, los valores iniciales de los conceptos arquitectónicos fueron determinados de acuerdo con los valores utilizados para los parámetros claves en las simulaciones que se han realizado recientemente con este modelo [145, 146] usando las ecuaciones presentadas en la sección 5.3.1. Según estas simulaciones, debe haber una alta densidad de peatones y de interacciones indirectas, ya que los peatones se comunican mas indirectamente siguiendo los pasos de los otros que directamente [147]. Por esta razón, los conceptos nro. agentes e interacciones indirectas son inicializados en 1, y el número de interacciones directas en 0.25. Los otros conceptos del método de verificación que representan la calidad de los mecanismos involucrados se asumen que trabajan correctamente, por esta razón, estos conceptos se inicializan en 1. Finalmente, los valores de los conceptos asociados a las propiedades emergentes y auto-organizativas se inicializan en cero, con el fin de determinar qué valores alcanzan cuando

el sistema se estabilice. Igualmente, los conceptos tipo de emoción y componente cognitivo se inicializan en cero, ya que no hay un manejo emocional ni cognitivo en los peatones según el MFS (ver figura 32).

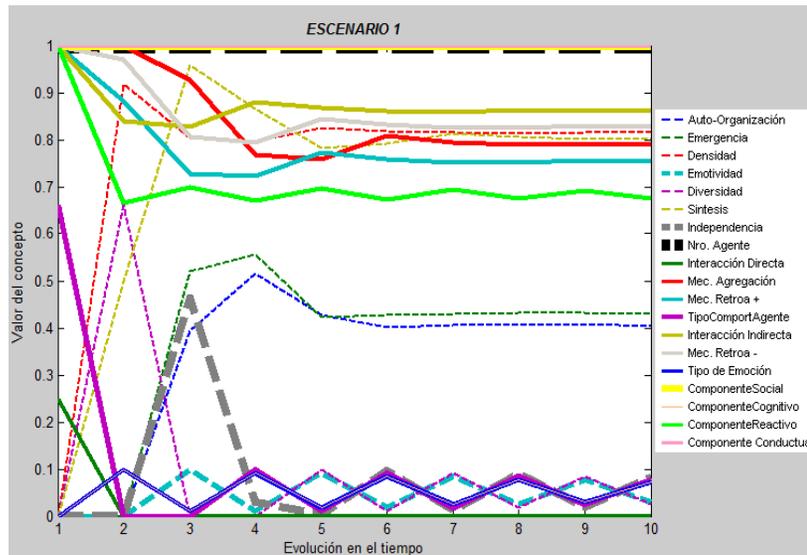


Figura 33. Resultados Obtenidos para el Escenario 1: El MFS a través de MASOES

De acuerdo con los resultados obtenidos para este escenario (ver figura 33), se alcanzó un nivel medio de auto-organización (41%) y emergencia (43%). De esta manera, usando el MFS es posible ver cierta auto-organización y emergencia en el fenómeno de los peatones que pudieran ser mejorados, como es mostrado en el escenario 2. Los conceptos de emotividad, tipo de comportamiento agente, diversidad e independencia finalizaron en valores cercanos a cero, ya que los peatones no tienen emociones, ni comportamiento cognitivo, ni diversidad (alta homogeneidad), ni independencia (autonomía). La calidad del componente social (1.0) es superior a la calidad del componente reactivo (0.69), esto podría ser debido a que cada peatón tiene un comportamiento imitativo más que reactivo hacia el final, lo que indica que cada peatón ha adaptado su comportamiento al entorno y a los otros peatones cuando el sistema se estabiliza. Según [147], este comportamiento imitativo aparece al sistema auto-organizarse (aunque nuestro ejemplo tímidamente lo pone de manifiesto, al tener el concepto de auto-organización un valor medio).

Por otro lado, la densidad alcanza (0.82) hacia al final ya que las interacciones indirectas disminuyeron de 1 a 0.86, pero continúan más altos que las interacciones directas (cero). El descenso en el número de interacciones directas es explicado a través del efecto de segregación de la formación de carriles [145]. Esto conduce normalmente al final a un flujo peatonal más eficaz, ya que las maniobras de evitación de colisiones con los otros peatones que consumen mucho tiempo y producen interacciones directas son menos frecuentes, es decir, se reduce el número de encuentros con los peatones en movimiento opuesto. El leve descenso del número de interacciones indirectas se puede deber a que

predomina un comportamiento imitativo entre los peatones, más que reactivo, al final. Esto hace que las trayectorias de los peatones sean más específicas, reduciendo el número de desviaciones de ellas en el entorno. El concepto “tipo de comportamiento agente” en cero explica la alta homogeneidad existente en los peatones según el MFS. Además, todos los otros conceptos alcanzan un estado alto indicando que funcionan correctamente y contribuyen significativamente al nivel de auto-organización y emergencia obtenido.

Escenario 2: Impacto del Comportamiento Emocional y la Heterogeneidad en el MFS. Es conocido que las influencias culturales y la composición de las multitudes de peatones en cuanto a edad, sexo y motivo del viaje puede importar para el comportamiento emergente y auto-organizado de acuerdo con [145]. Además, en [148, 149, 121] es mostrado con los estudios experimentales realizados, que la heterogeneidad es un factor clave para el modelado del comportamiento colectivo de los peatones.

Para reflejar esta heterogeneidad en la instanciación del MFS a través del método de verificación para MASOES, es necesario que los agentes puedan tener diferentes tipos de comportamientos (reactivo, cognitivo e imitativo), que cambien dinámicamente por el estado emocional actual del agente, según el modelo afectivo propuesto para MASOES [87]. Para esto, inicializaremos los conceptos arquitectónicos tipo de emoción y componente cognitivo en 1 en el MCD obtenido para el MFS (ver figura 32). Así, vamos a ver el impacto de la heterogeneidad y el uso de las emociones en el nivel de auto-organización y emergencia.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el escenario 2 (ver figura 34), un alto nivel de auto-organización (84%) y emergencia (95%) es alcanzado al final. Igualmente, todos los demás conceptos también alcanzan un alto nivel 86% al final. El nivel alto de auto-organización y emergencia se obtiene por el uso de las emociones y la gestión de los diferentes tipos de comportamiento en los peatones, así, permiten tener una alta diversidad e independencia en el sistema, dos criterios claves según [96], para obtener mayor auto-organización y emergencia en el sistema. Además, al considerar a los peatones como agentes que tienen una diversidad de comportamientos y emociones, pueden modelarse otros fenómenos auto-organizados y emergentes de manera más real, tales como: situaciones de pánico o evacuación. Esto podría conllevar a una interacción social más real entre los peatones, que podría permitir la formación de grupos de peatones de diversos tamaños (grupos de amigos, parejas o familias), factor clave a ser considerado en el modelado del comportamiento de los peatones según los resultados obtenidos en [121]. Nuestros resultados son apoyados por lo sugerido en [150], donde es indicado que si los modelos consideran a los peatones como agentes que tienen una diversidad de comportamientos, emociones (con capacidades de visión y cognición), todo esto permitirá representar reglas de comportamiento más complejas y una heterogeneidad conductual que favorece un comportamiento social más real, difícil de representar con modelos físicos tan homogéneos como el MFS. Finalmente, esto

permitirá reproducir patrones de comportamiento colectivos como: agrupamientos, carriles y colas de peatones de forma más real que los modelos físicos, para la dinámica de peatones que generan la auto-organización y la emergencia en el sistema.

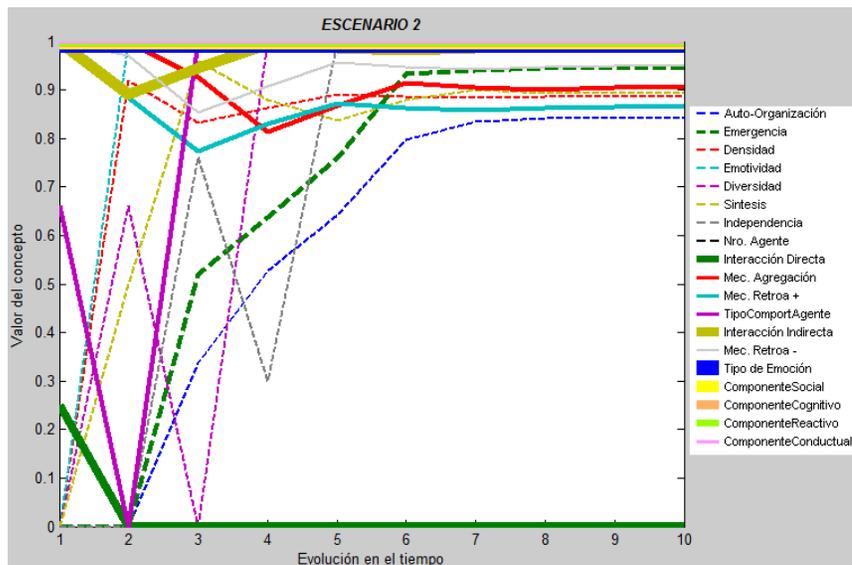


Figura 34. Resultados Obtenidos para el Escenario 2: Impacto del Comportamiento Emocional y la Heterogeneidad en el MFS

Con este caso de estudio, podemos decir que el MCD generado a través de MASOES para el MFS puede ser usado para crear otros escenarios, y poder así analizar los diferentes componentes claves del MFS y las interrelaciones entre ellos, a fin de modificar el MFS para obtener un comportamiento individual y colectivo más real, entre otras cosas.

5.3.4. Posibles Extensiones al Método de Verificación para MASOES

A continuación describimos dos posibles extensiones al Método de verificación de MASOES: un enfoque cualitativo y otro cuantitativo, de manera que la instanciación del MFS permita realizar otros tipos de experimentos.

1. Enfoque Cualitativo. *Para explorar la calibración e influencia de algunos parámetros claves en el modelo matemático del MFS.* En este caso es necesario hacer una extensión del MCD inicial para el MFS (ver figura 32) para introducir algunos conceptos asociados a los parámetros claves del MFS para la dinámica de los peatones (ver figura 35). Los conceptos agregados para los parámetros del MFS son asociados al componente conductual de MASOES, ya que el MFS es un modelo microscópico, es decir, es un modelo basado en el comportamiento individual de los peatones para reproducir algunos fenómenos auto-organizativos. La idea es tener la posibilidad de analizar como los conceptos definidos en la tabla 36, para los parámetros claves del MFS definidos en las diferentes ecuaciones descritas en la 5.3.1, pueden afectar el comportamiento individual

de los peatones, así como también, a los otros conceptos a nivel colectivo y en el nivel de auto-organización y emergencia del sistema.

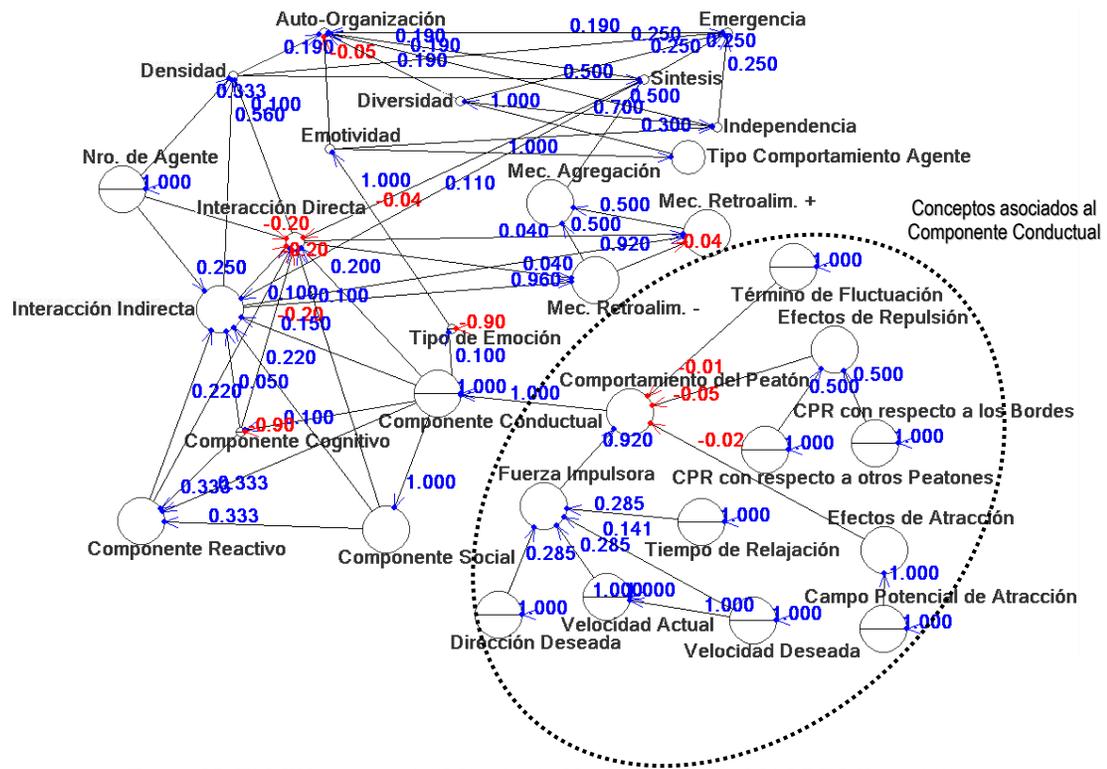


Figura 35. El MFS a través del Método de Verificación para MASOES Extendido

Tabla 36. Definición de Algunos Conceptos Involucrados en la Extensión (Enfoque Cualitativo) del MCD Inicial para el MFS

CONCEPTO	DESCRIPCION
Comportamiento del Peatón	Es el movimiento de los peatones, que puede ser descrito por medio de tres componentes diferentes de la aceleración: la fuerza impulsora, los efectos repulsivos y de atracción.
Fuerza Impulsora	Es la fuerza de aceleración, es decir, que es el comportamiento de aceleración, lo que refleja el deseo o motivación del peatón para moverse en una dirección determinada a una cierta velocidad. Esta motivación evoca la producción física de una fuerza de aceleración o desaceleración, como una reacción a la información percibida que el peatón obtiene acerca de su entorno.
Efectos Repulsivos	Es la fuerza de repulsión, que describe los efectos de las interacciones con otros peatones, o la reacción a las fronteras, tales como paredes u obstáculos en las calles. En otras palabras, describe las maniobras de evitación de los peatones.
CPR con respecto a los otros Peatones	Representa el campo potencial de repulsión (CPR) con respecto a los otros peatones, es decir, cada peatón respeta el "ámbito privado" de otros peatones para mantener una cierta distancia que depende de la densidad de peatones y la velocidad deseada. Así, estos efectos territoriales son modelados por potenciales

	repulsivos.
Efectos de Atracción	Representa la tendencia de los grupos sociales (amigos, familia) para avanzar juntos (comportamiento de unión), y la influencia de varias atracciones o lugares de interés tales como: vidrieras de tiendas y músicos, entre otros (es decir, los peatones algunas veces son atraídos por otras personas u objetos).
CPR con respecto a los Bordes	Representa el campo potencial de repulsión (FPR) con respecto a las fronteras descritas por un potencial repulsivo, monótono decreciente, que involucra la ubicación real del peatón y la ubicación más cercana del borde.
Campo Potencial de Atracción	Describe los potenciales de interacción atractiva.
Velocidad Deseada	Es la velocidad preferida de los peatones.
Tiempo de Relajación	Representa el tiempo de relajación de la adaptación de la velocidad.
Velocidad Real	Es la velocidad existente en el momento presente, además, esta velocidad está limitada por la velocidad máxima aceptable de un peatón.
Dirección Deseada	Es la dirección de su próximo destino a la que el peatón quiere llegar de la manera más cómoda posible.
Término de Fluctuación	Este término tiene en cuenta las variaciones aleatorias de comportamiento, que pueden surgir, por ejemplo, cuando dos o más alternativas de comportamiento son equivalentes, o por desviaciones accidentales o deliberadas de las reglas habituales de movimiento (por ejemplo, si la utilidad de pasar un obstáculo por la derecha o izquierda es la misma).

2. Enfoque Cuantitativo. *Para comparar cuantitativamente con los resultados obtenidos en simulaciones ya realizadas en trabajos previos.* En este caso, algunos de los conceptos del método de verificación de MASOES son asociados a las variables que componen las ecuaciones o parámetros claves del MFS planteados en sección 5.3.1, la escogencia de cada parámetro o ecuación puede ser comprendida al revisar las definiciones para cada uno de estos conceptos instanciados a través de MASOES para el MFS (ver tablas 34 y 35). Este enfoque es inspirado en una de las propuestas hechas en [109], en donde se establece que las relaciones entre los conceptos vienen dadas por las relaciones establecidas entre ellas en el modelo matemático del sistema que se quiere modelar. Así tenemos:

Tabla 37. Representación de los Conceptos del Método de Verificación para MASOES de acuerdo con el Enfoque Cuantitativo para el MFS

CONCEPTO	PARÁMETRO O ECUACIÓN	JUSTIFICACION
Componente Reactivo	Ecuación 6, 7 y 8	Esas ecuaciones representan las fuerzas repulsivas y atractivas que el peatón debe ejercer al caminar, al evitar obstáculos o colisiones con otros peatones y al atraerlo, alguna tienda u objeto. Todos esos elementos caracterizan ese componente

Componente Social	Ecuación 5	Esa ecuación representa la fuerza impulsora, la cual toma en cuenta, la posición y la velocidad de los peatones en su vecindad. Todo eso caracteriza este componente
Componente Conductual	Ecuación 10	Es el componente responsable de manejar el cambio de comportamiento en el agente (entre reactivo e imitativo), por tanto, el MFS total (definido por la ecuación 10) es quien lo caracteriza.
Nro. Agente	Número de Peatones	
Interacción Directa	Número de Colisiones y Distracciones	
Interacción Indirecta	Número de Trayectorias	
Mecanismo de Retroalimentación +	Comportamiento Acelerativo (“Acceleration Behavior”, en inglés)	El Promedio de Aceleración está definido por la ecuación: $\bar{a} \equiv \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$ Donde $\Delta v = v_f - v_i$ es el cambio de la velocidad en el intervalo de tiempo $\Delta t = t_f - t_i$.
Mecanismo de Retroalimentación -	Comportamiento Desacelerativo (“Desacceleration Behavior”, en inglés)	El Promedio de Desaceleración está definido por la misma ecuación para calcular la aceleración promedio, sólo que el valor será negativo, significando que la aceleración va en la dirección opuesta a la velocidad, entonces el peatón está desacelerando.
Mecanismo de Agregación	Campo Potencial Repulsivo con respecto a los otros Peatones: $V_{\alpha\beta}(b)$ Campo Potencial Repulsivo con respecto a los bordes: $U_{\alpha B}(\ \vec{r}_{\alpha B}\)$ Campo Potencial Atractivo: $W_{\alpha i}(\ \vec{r}_{\alpha i}\ , t)$	Son los diferentes elementos que el modelo usa para caracterizar el campo de acción donde se da dicho mecanismo.

De esta manera, se pueden usar los valores utilizados en las simulaciones ya realizadas en la inicialización de los conceptos, y analizar los resultados estadísticos obtenidos en dichas simulaciones conjuntamente con las propiedades emergentes y auto-organizadas que MASOES pueda constatar, en los escenarios de estudios considerados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo se ha desarrollado en plena concordancia con los objetivos planteados para esta investigación. En este sentido, se ha investigado los aspectos teóricos relacionados a la auto-organización y emergencia en las áreas de Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) e Inteligencia Colectiva. Se han estudiado las arquitecturas, modelos y marcos de referencia (“framework”) de sistemas multiagente emergentes y auto-organizados desarrollados hasta el momento. Además, se ha definido una arquitectura multiagente, llamada MASOES, que permite modelar un sistema emergente y auto-organizado. Por otro lado, se ha especificado una metodología de uso de MASOES para describir un sistema emergente y auto-organizado. Finalmente, se desarrolló un método de verificación de las propiedades emergentes y auto-organizadas para MASOES, y se aplicó en diversos casos de estudio y en diferentes contextos, para comprobar su utilidad en modelar y estudiar un sistema emergente y auto-organizado.

Específicamente, MASOES ha sido definida como una arquitectura multiagente para el diseño, modelado y estudio de sistemas emergentes y auto-organizados. Esta arquitectura describe los elementos, relaciones y mecanismos, a nivel individual y colectivo, que determinan los fenómenos de emergencia y auto-organización en un sistema, sin modelar matemáticamente el mismo. MASOES considera tanto los aspectos macroscópicos como microscópicos de un sistema. Básicamente, MASOES es una arquitectura genérica compuesta por una sociedad de agentes que trabajan de una manera descentralizada, con diferentes tipos de comportamientos: reactivo, imitativo y cognitivo. Ella puede modelar sistemas sociales donde los agentes homogéneos o heterogéneos pueden tener comportamientos complejos. Más aún, MASOES, a través de su modelo afectivo, permite modelar también en cada agente cambios dinámicos de comportamiento, guiados por su estado emocional. Todo esto muestra a MASOES como una interesante herramienta para el modelado de sistemas con o sin propiedades emergentes conocidas, y estudiar el comportamiento emergente y auto-organizado del sistema modelado.

Con el propósito de mostrar su utilidad, generalidad y flexibilidad en diversos contextos se ha modelado en este trabajo a través de MASOES dos sistemas colaborativos: Wikipedia y el desarrollo del software libre, así como el comportamiento colectivo de los peatones. Estos sistemas son estudiados en la literatura debido a su capacidad de generar

comportamientos emergentes como: *formación de comunidades, división de tareas, definición de reglas colectivas, generación de contenidos de alta calidad, formación de flujos de peatones, entre otros*. Así como también, por su capacidad para auto-adaptarse a los cambios que ocurren en el entorno de manera dinámica, sin control externo, de acuerdo a sus propias habilidades. Estos casos de estudio son realizados según la metodología propuesta para modelar sistemas reales usando MASOES.

Ahora bien, el modelado de sistemas reales a través de MASOES requiere de un método de verificación a fin de comprobar las propiedades emergentes y auto-organizadas en el sistema modelado de acuerdo al comportamiento real del sistema. La construcción de un modelo formal para comprobar si dichas propiedades existen en un sistema de interacción complejo no es factible de acuerdo con [151], ya que es difícil de hacer pruebas en estos sistemas de forma directa, dado sus niveles de incertidumbre y complejidad. En [151] es demostrado que no se pueden modelar todos los comportamientos posibles en un modelo de interacción, ya que probar la correctitud del comportamiento macroscópico del sistema es realmente difícil, y hacerlo formalmente, más aún. La opción para hacer esto, sin una prueba formal, es a través de un método empírico que verifique el comportamiento macroscópico del sistema. Por esto, en este trabajo se propone un método de verificación no formal para MASOES basado en el Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes (PSM) y los Mapas Cognitivos Difusos (MCD), donde se examinan los componentes, las relaciones y criterios propuestos en MASOES con el fin de estudiar el comportamiento del sistema real modelado, y determinar sus capacidades emergente y auto-organizada. Dicho método muestra la adaptabilidad de MASOES para estudiar diferentes escenarios, o casos hipotéticos, del sistema real modelado, creados para analizar su comportamiento emergente y auto-organizado. Los resultados obtenidos en estos escenarios para los casos de estudio considerado en esta tesis, fueron comparados con trabajos previos relacionados al funcionamiento real de dichos sistemas, lo que también nos permitió analizar la calidad del método de verificación para constatar dichas propiedades.

En resumen, MASOES propone, por un lado, una metodología para el modelado multiagente de sistemas emergentes y auto-organizados; y por otra parte, el modelado con MCDs del modelado multiagente ya realizado del sistema real, para luego efectuar el proceso de verificación y/o validación del comportamiento emergente y auto-organizado del sistema modelado. Estos dos modelados se complementan mutuamente, permitiendo hacer pruebas de los componentes, las relaciones y los mecanismos establecidos en el modelo multiagente, a través del meta modelo basado en MCDs, para comprobar la capacidad emergente y auto-organizada del sistema modelado. Esto representa una alternativa novedosa para estudiar, probar, verificar o validar la auto-organización y la emergencia en sistemas complejos, lo cual es normalmente difícil de hacer en este tipo de sistemas. Los MCDs permiten modelar el comportamiento de sistemas complejos, cuando no es posible tener un modelo matemático exacto debido a su complejidad, o a las incertidumbres e inexactitudes asociadas al mismo. Para esto, la experiencia humana y

el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema complejo son integrados en la estructura del MCD.

Con respecto al modelado de Wikipedia y de DSL con MASOES, tenemos que ambos sistemas tienen los componentes y los mecanismos necesarios para generar un comportamiento emergente y auto-organizado. En particular, tanto Wikipedia como la CDKL tienen características estigmérgicas [134, 140, 141], que son similares al comportamiento de las sociedades de insectos. Estas características estigmérgicas están presentes en ambos sistemas, ya que tienen un elevado número de agentes (e interacciones indirectas) que estimulan a los otros a participar a través del trabajo que llevan a cabo. Estas características pueden ser modeladas con MASOES sin problema alguno.

Otro aspecto de interés en MASOES, es la posibilidad de considerar el estado emocional del agente para gestionar el cambio dinámico de su comportamiento, lo que representa una diferencia importante en el modelado de este tipo de sistemas, en comparación con otros enfoques [16, 17, 18, 19, 152]. Más aún, la importancia de nuestro modelo emocional radica en el hecho de que no existen modelos emocionales para estudiar y comprender cómo modelar y simular procesos auto-organizados y emergentes en un entorno multiagente, para así, tener la posibilidad de estudiar también algunos aspectos de la interacción social multiagente (influencia de las emociones y acciones individuales y colectivas en el comportamiento de cada agente). En otras palabras, incorporar emociones a los agentes, especialmente en entornos poco predecibles y complejos, como en donde se desenvuelven los sistemas emergentes y auto-organizados, favorecería la adaptación (cambios en el comportamiento a corto y largo plazo) y la regulación social y emocional (cierto equilibrio social, ya que las emociones refuerzan o relajan un comportamiento expresado), como es visto en los escenarios desarrollados. Esto es una ventaja con respecto a los sistemas multiagente que no poseen un modelo afectivo, ya que estos muestran algunas debilidades en el tiempo de convergencia para generar auto-organización y emergencia, por la falta de diversidad y flexibilidad en los agentes participantes para adaptar sus comportamientos y ajustarse a situaciones complejas, y por la carencia de interacción afectiva como sucede en los sistemas reales.

Con respecto al modelado del comportamiento colectivo de los peatones, se realiza con la idea de probar el método de verificación en un sistema formalmente modelado, con un modelo matemático muy conocido y usado, como es el MFS, para describir cómo los peatones se auto-organizan en contraflujos en un corredor. Según los resultados obtenidos, en el modelado con MASOES del MFS es posible ver cierta auto-organización y emergencia en el fenómeno de los peatones que pudieran ser mejorados. En este sentido, se recomienda la heterogeneidad (es decir, la diversidad) en el comportamiento individual y colectivo de los peatones para aumentar el nivel de auto-organización y emergencia en el sistema. De esta manera, podríamos modelar situaciones más realistas donde los agentes puedan ser capaces de cambiar dinámicamente su

comportamiento, o modelar otros fenómenos auto-organizados en el desplazamiento colectivo de los peatones, tales como: situaciones de pánico o de evacuación, fenómenos que requieren el uso de modelos conductuales (donde las emociones juegan un rol fundamental) para representar el comportamiento real de los seres humanos en las dinámicas de los peatones.

Por otra parte, para complementar el estudio de los sistemas emergentes y auto-organizados se ha estudiado el flujo de grupos de peatones a nivel experimental, cuyos resultados son utilizados en el caso de estudio referente al comportamiento colectivo de los peatones para instanciar el MCD. Este estudio experimental fue realizado en el Centro de Investigaciones sobre la Cognición Animal (CRCA-Université Paul Sabatier (UPS), Francia), gracias al apoyo financiero del Programa Alban para realizar estudios doctorales en cotutela Venezuela-Francia. En ese estudio se han utilizado métodos y herramientas de la etología para llevar a cabo los experimentos y analizar los datos. Así, con la ayuda de estas herramientas ha sido posible cuantificar los comportamientos individuales de los peatones en relación con las características del entorno, la importancia del flujo, y la información disponible a los sujetos (instrucciones, la información dispersa en el entorno). Nuestras observaciones se han realizado en ambientes naturales, a partir de las cuales se está elaborando un modelo matemático del fenómeno. Ese nuevo modelo matemático describirá los fenómenos de los peatones de una manera más realista, explicando los mecanismos que los controlan a través de reglas conductuales, y no como una simple combinación de un conjunto de fuerzas como en MFS [144]. Además, se le incorporará un campo de visión a los peatones para que seleccionen de acuerdo a los espacios libres disponibles, el más cercano a su destino de acuerdo a la dirección de desplazamiento escogido por el peatón, como lo hacemos realmente los seres humanos, de acuerdo a los experimentos controlados que se han realizado.

Como trabajo futuro, en el método de verificación se podría considerar otras teorías como forma de buscar sabiduría de las masas, diferente a la del Paradigma de la Sabiduría de las multitudes. De esta manera, se podrían establecer otros criterios de verificación. Esto sería útil para hacer comparaciones con nuestro trabajo actual, ya que no se encontraron otros trabajos relacionados con respecto a verificar la existencia de propiedades emergentes y auto-organizadas en un sistema, parecido a la manera en como lo hace nuestro método de verificación. Por otra parte, es importante señalar también que el método de verificación propuesto en este trabajo es susceptible a mejora; por ejemplo, es posible optimizar el proceso de calibración del peso de las relaciones de los MCDs genéricos a través de un aprendizaje evolutivo de las reglas difusas planteadas. En este trabajo, el proceso de calibración se realizó de forma manual (por ensayo y error), y sería aconsejable hacerlo a través de un mecanismo de optimización del modelo del MCD. Igualmente, vimos que se puede obtener provecho adicional del modelado del comportamiento colectivo de los peatones a través de MASOES, si se extiende el método de verificación con algunas de las propuestas planteadas en la sección 5.3.4 de este trabajo, a fin de hacer estudios detallados del sistema real.

Como otro trabajo futuro, sería interesante adaptar MASOES a sistemas con propiedades de criticidad auto-organizada [153], ya que la teoría de la criticidad auto-organizada originalmente empleada en el estudio de la auto-organización y emergencia de sistemas físicos, se utiliza y adapta al estudio de la auto-organización y emergencia de los sistemas sociales según [154]. En ese sentido, los sistemas críticamente auto-organizados presentan propiedades tales como: *difusión, meta-estabilidad, interacción entre múltiples entes y apertura al entorno (E/S), entre otras* [153, 154], que podrían ser verificadas a través del método de verificación propuesto para MASOES, a través de los criterios de verificación que se establezcan para tal fin. Así, dependiendo de los resultados que se obtengan, se generaría conocimiento con respecto a si el sistema modelado con MASOES podría o no tener un comportamiento emergente y críticamente auto-organizado a nivel macro. Usando datos reales en el método de verificación de MASOES, también se podrían validar otras propiedades de los sistemas críticamente auto-organizados, tales como *la existencia de avalanchas de cambio (en particular, siguiendo la ley de la potencia y el comportamiento fractal en tiempo y en espacio)*, que es clave para este tipo de sistemas. Como última propuesta para trabajo futuro, se propone la automatización de la metodología de uso de MASOES, y la generación automática de los MCDs necesarios para llevar a cabo el proceso de verificación, esto promovería el uso potencial de MASOES para modelar y estudiar sistemas emergentes y auto-organizados.

Finalmente, se recomienda el uso de MASOES en el área de simulación social multiagente, sobretodo para casos de comparación de modelos o estudios enfocados a entender tendencias emergentes en relación a: *normas, colaboración, cooperación, tráfico peatonal o vehicular*, entre otras. MASOES sería útil para estudiar sistemas sociales dada la fortaleza que le daría al estudio las pruebas (a través de escenarios hipotéticos que se diseñen para tal fin) y las verificaciones/validaciones que se pueden realizar con él.

REFERENCIAS

- [1] Di Marzo, G., Foukia N., Hassas S., Karageorgos A., Kouadri S., Rana O., Ulieru M., Valckenaers P. & Van C. "Self-Organisation: paradigms and applications". *Lecture Notes in Computer Science: Engineering Self-Organizing Systems*, vol. 24, pp. 1-19, 2004.
- [2] Gabbai, J., Yin, H., Wright, W. & Allison, N., "Self-Organization, Emergence and Multi-Agent Systems". *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN&B '05)*, Wang, S., et al., Ed, pp.1824-1863, China, 2005.
- [3] Sudeikat, J. & Renz, W. "Toward Requirements Engineering for Self - Organizing Multi-Agent Systems". *Proceedings First International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, pp. 299– 302, USA, 2007.
- [4] Julho Y. & Nunes L. "Simulating Life as a Self-Organizing and Emergent Phenomenon". *Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2007)*, pp. 895-900, Brasil, 2007.
- [5] WordReference.com. Disponible: <http://www.wordreference.com/definicion/ubicuo>. [Consulta: 2011, Enero 17].
- [6] Wikipedia.org. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Computaci%C3%B3n_ubicua. [Consulta: 2011, Enero 17].
- [7] Coulouris, G., Dollimore J. & Kindberg T. (2001). *Distributed Systems, Concepts and Design. 3era. Edition, Addison-Wesley*.
- [8] Wikipedia.org. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado. [Consulta: 2011, Abril 19].
- [9] Raymond, E. (2001). *The Cathedral & the Bazaar. Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary. Revised Ed. O'Reilly Media*.
- [10] O'reilly, T. (2003). *Open Source Paradigm Shift*. Disponible: <http://tim.oreilly.com/archives/ParadigmShift.pdf>. [Consulta: 2010, Febrero 19].
- [11] Valckenaers, P., Kollingbaum, M., Van Brussel, H., Bochmann, O. & Zamfirescu C. "The Design of Multi-Agent Coordination and Control Systems using Stigmergy". *Proceedings of the IWES'01 International Workshop on Emergent Synthesis*, pp.1-9, Slovenia, 2001.
- [12] Hadel, K., Valckenaers P, Zamfirescu C., Van Brussel H., Germaín B., Hoelvoet, T. & Steegmans E. "Self-Organising in Multi-Agent Coordination and Control using Stigmergy". *Lecture Notes in Computer Science*, vol.2977, pp. 105-123, Germany, 2004.

- [13] Izquierdo, E. "Collective Intelligence in Multi-Agent Robotics: Stigmergy, Self-Organization and Evolution". Reporte Técnico, *University of Sussex*, Inglaterra, 2004.
- [14] Cicirello, V. & Smith, S. "Insect societies and manufacturing". *Proceedings of International Joint Conferences on Artificial Intelligence (IJCAI-01)*, pp.328-336, USA, 2001.
- [15] Vaughan, R., Stoy, K., Sukhatme, S. & Mataric, M. "Blazing a trail: insect-inspired resource transportation by a robot team". *Proceedings 5th International Symposium Distributed Robotic Systems*, pp.111-120, USA, 2000.
- [16] Zambonelli, F. & Omicini, A. "Challenges and Research Directions in Agent-Oriented Software Engineering". *Proceedings Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 253-283, Italy, 2004.
- [17] Bernon, C., Gleizes M., Peyruqueou, S. & Picard G. "Adelfe: A methodology for adaptive multi-agent systems engineering". *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2577, pp. 156-169, 2003.
- [18] Gershenson, C. "Towards a General Methodology for Designing Self-Organizing Systems". *Bogg, J. and R. Geyer (eds.) Complexity, Science and Society*. Radcliffe Publishing, Oxford, 2007.
- [19] Wolf, T. & Holvoet, T. "Towards a Methodology for Engineering Self-Organising Emergent Systems". *Proceedings International Conference on Self-Organizing and Adaptation of Multi-Agent and Grid Systems (SOAS)*, pp. 18-34, 2005.
- [20] Grasse, P. "La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. La theorie de la stigmergie: essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs". *Insectes Sociaux*, vol. 6, pp. 41-81, 1959.
- [21] Universidad Pontificia Comillas de Madrid. "Sistemas Multiagente". 2003. Disponible: <http://www.iit.upco.es/~gustavop/sma.htm>. [Consulta: 2008, Noviembre 15].
- [22] Weiss, G. (1999). *Multiagent Systems. Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, Cambridge, USA.
- [23] Rich, E., & Knight, K. (1994). *Artificial Intelligence*. Traducción española: Inteligencia Artificial. Segunda Edición. McGraw-Hill.
- [24] Aguilar, J., Cerrada, M., & Hidrobo, F. "MASINA: A Methodology to Specify Multiagent Systems". *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4496, pp. 92-101, 2007.
- [25] Palma, J. & Marín, R. (2008). *Inteligencia Artificial, Técnicas, Métodos y Aplicaciones*. McGrawHill, España.
- [26] "FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification". *Foundation for Intelligent Physical Agents*, 2001. Disponible: <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/>. [Consulta: 2011, Abril 19].
- [27] Schweitzer, F. (2003). *Brownian Agents and Active Particles Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, ISBN 3-540-43938-2.
- [28] Russell, S. & Norvig, P. (2003). *Inteligencia Artificial — Un Enfoque Moderno*. (2ª ed.), Prentice Hall Hispanoamericana.
- [29] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press.

- [30] Garnier, S., Gautrais, J. & Theraulaz, G. “The biological principles of Swarm Intelligence”. *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 3-31, 2007.
- [31] Garnier, S. “Décisions Collectives dans des Systèmes d’Intelligence en Essaim”. Tesis Doctoral, Université de Toulouse, 2008.
- [32] Mamei, M., Menezes, R., Tolksdorf, R. & Zambonelli, F. “Case Studies for Self-organization in Computer Science”. *Journal of Systems Architecture*, vol. 52, no. 6, pp. 443-460, 2006.
- [33] Beni, G. & Wang, J. “Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems”. *Proceedings of 3rd International IEEE Symposium on Intelligent Control*, pp. 57-62, USA, 1988.
- [34] Camazine, S., Deneubourg, J., Franks, N., Sneyd, J., Theraulaz, G. & Bonabeau, E. (2001). *Self-Organisation in Biological Systems*, Princeton University Press, USA.
- [35] Parunak, H. & Brueckner, S. “Engineering Swarming Systems”. *F. Bergenti, M.P. Gleizes, and F. Zambonelli, editors, Methodologies and Software Engineering for Agent Systems, Multiagent Systems, Artificial Societies and Simulated Organizations*, vol.11, pp. 341–376. Springer, 2004.
- [36] Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems, An introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley.
- [37] Dorigo, M. & Socha, K. (2007). *An Introduction to Ant Colony Optimization*. T. F. Gonzalez (Ed.), Book Chapter in *Approximation Algorithms and Metaheuristics*, CRC Press.
- [38] Dorigo, M., Maniezzo, V. & Coloni, A. “Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, vol.26, no.1, pp.29-41, 1996.
- [39] Dorigo, M. & Gambardella, L. “Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol.1, no.1, pp.53-66, 1997.
- [40] Stutzle, T. & Hoos, H. “MAX-MIN Ant System”. *Future Generation Computer Systems*, vol.16, no.8, pp.889-914, 2000.
- [41] García, T. “Evolución, desarrollo y auto-organización, un estudio sobre los principios filosóficos de la evo-devo”. *Tesis doctoral presentada en Donosita*, San Sebastián, 2005.
- [42] Wolf, T. & Holvoet, T. “Emergence and Self-Organisation: a statement of similarities and differences”. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol.3464, pp.96-110, SpringerVerlag, 2004.
- [43] Solé, R. & Goodwin B. (2000). *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. New York: Basic Books.
- [44] Nicolis, G. & Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. JohnWiley & Sons, New York, USA. ISBN 0-471-02401-5.
- [45] Ashby, W. (1962). *Principles of the Self-Organizing System*. Principles of Self-Organization, H. Von Foerster & G. W. Zopf (eds.), New York: Pergamon Press.
- [46] Anderson (1972), P. “More is different”. *Science*, vol.177, pp. 393–396.
- [47] Di Marzo, G., Gleizes, M. & Karageorgos A. “Self-Organisation and Emergence in MAS: An overview”. *Informatica*, vol.30, pp.45–54, 2006.
- [48] Zambonelli, F., Gleizes, M., Tolksdorf, R. & Mamei, M. “Spray computers: frontiers of selforganisation for pervasive computing”. *Proceedings of Second International Workshop on Theory and Practice of Open Computational Systems (TAPOCS 2004) in 13th IEEE International*

- Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE'04)*, pp. 397–402, USA, 2004.
- [49] Karuna, H., Valckenaers, P., Saint-Germain B., Verstraete, P., Zamfirescu, C. & Van Brussels H. “Emergent forecasting using a stigmergy approach in manufacturing coordination and control”. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, S. Brueckner et al. (Eds.), vol. 3464, pp. 210–226. 2005.
- [50] Reitbauer, A., Battino A., Karageorgos A., Mehandjiev N., Valckenaers P & Saint Germain B. “The Mabe Middleware: extending multiagent systems to enable open business collaboration”. *Proceedings 6th IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services (BASYS'04)*, pp. 1-6, Austria, 2004.
- [51] Foukia, N. “IDReAM: Intrusion detection and response executed with agent mobility”. *Proceedings International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'05)*, pp. 264–270, Holland, 2005.
- [52] Parunak V., Purcell M., & O'Connell, R. “Digital pheromones for coordination of unmanned vehicles”. *Proceedings of the Workshop on Environments for Multi-agent Systems*, pp.246-263, USA, 2004.
- [53] Maes, P. (1994) *Modeling adaptive autonomous agents*. C.G. et al. Langton, editor, Artificial Life, vol. 1, cap. 1–2, pp. 135–162. MIT Press.
- [54] De Wolf, T. & Holvoet, T. “Adaptive behaviour based on evolving thresholds with feedback”. *Proceedings of the Symposium on Adaptive Agents and Multiagent Systems*, pp. 91–96, 2003.
- [55] Gleizes, M., Camps, V. & Glize, P. “A theory of emergent computation based on cooperative selforganisation for adaptive artificial systems”. *Proceedings of Fourth European Congress of Systems Science*, pp.1-12, España, 1999.
- [56] Capera, D., Georgé, J., Gleizes, M., & Glize, P. “Emergence of organisations, emergence of functions”. *Proceedings of AISB03 Symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 103–108, UK, 2003.
- [57] Maturana, F. & Norrie, D. “Multi-agent mediator architecture for distributed manufacturing”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol.7, pp.257–270, Holland, 1996.
- [58] Bongaerts, L. “Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems”. *Ph.D. Thesis: Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium*, 1998.
- [59] Ulieru, M. “Emergence of holonic enterprises from multi-agent systems: a fuzzy evolutionary approach”. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications - Soft Computing Agents*, vol.83, pp.187-215. IOS Press-Frontiers in AI and Applications Series, the Netherlands, 2002.
- [60] Dowling, J. & Cahill, V. “The K-Component Architecture Meta-Model for Self-Adaptive Software”. *Proceedings of Reflection 2001. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2192, pp. 81- 88. 2001.
- [61] Razavi, V. Perrot, J. & Guelfi, N. “Adaptive modeling: an approach and a method for implementing adaptive agents”. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, I. T. Ishida, L. Gasser, H. Nakashima (Eds). vol. 3446, pp. 136-148. 2005.
- [62] Koestler, A. (1990). *The Ghost in the Machine*. Reprint edition, Penguin, East Rutherford, NJ, USA.

- [63] Causa, E., & Sosa, A. “La Computación Afectiva y el Arte Interactivo”. *Publicado en Proyecto Biopus*, 2007. Disponible: [http://www.biopus.com.ar/textos/Computacion Afectiva Y Arte Interactivo-Emiliano Causa-Andrea Sosa.pdf](http://www.biopus.com.ar/textos/Computacion_Afectiva_Y_Arte_Interactivo-Emiliano_Causa-Andrea_Sosa.pdf). [Consulta: 2011, Abril 19].
- [64] Picard, R. (1997). *Affective Computing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [65] Picard, R. “Affective computing: challenges”. *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 59, pp. 55-64, 2003.
- [66] Dautenhahn, K. “The art of designing socially intelligent agents”. *Applied Artificial Intelligence*, vol.12, no.7-8, pp.573-619, 1998.
- [67] Nemani, S. & Allan, V. “Agents and the algebra of emotion”. *Proceedings of AAMAS 2003'Second international joint conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp.1076-1077, Australia, 2003.
- [68] Khulood, M. & Raed, Z. “Emotional agents: A modeling and an application”. *Information and Software Technology*, vol. 49, no. 7, pp. 695-716, 2007.
- [69] Ledoux, J. (1996). *Emotional Brain*. Editorial: Simon & Schuster, New York.
- [70] Damasio A. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*. Gosset/Putnam Press, New York.
- [71] Isen, A. (2000). *Positive Affect and Decision Making*. Handbook of Emotions, Eds., M. Lewis and J. Haviland. Guilford, New York, 2000.
- [72] Salovey, P. & Mayer, J. “Emotional Intelligence”. *Imagination, Cognition and Personality*, vol. 9, no. 3, pp. 185-211, 1990.
- [73] Scheutz, M. “Useful roles of emotions in artificial agents: a case study from artificial life”. *Proceedings of 19th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI'04*, American Association of Artificial Intelligence Press, pp. 42-47, USA, 2004.
- [74] Bolles, R. & Fanselow, M. “A perceptual defensive recuperative model of fear and pain”. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, pp. 291-301, 1980.
- [75] Price D. & Barrell J. “A quantitative-experiential analysis of human emotions”. *Motivation and Emotion*, Netherlands, vol. 9, no. 1, pp.19-38, 1985.
- [76] Ortony, A., Clore G. & Collins A. (1988). *The Cognitive Structure of Emotions*. Cambridge University Press, 1988.
- [77] Russell J., Weiss A. & Mendelsohn G.: “Affect grid: A single item scale of pleasure and arousal”. *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 57, no. 3, pp. 493-502, 1989.
- [78] Revelle, W. “Personality processes”. *Annual Review of Psychology*. vol. 46, pp. 295.328, 1995.
- [79] Ortony, A. (2003). *On Making Believable Emotional Agents Believable*. R. P. Trappl, P. (Ed.), Emotions in humans and artifacts. Cambridge, MIT Press.
- [80] Meyer, G. “Emotional Agents: How Personalities Change Behaviour”. *Technical Report of Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, University of Twente*, 2004.
- [81] Riso, D. & Hudson, R. (1996). *Personality Types*. Houghton Mifflin: New York.
- [82] Roseman, I., Spindel M. & Jose P. “Appraisals of emotion-eliciting events: testing a theory of discrete emotions”. *Personality and Social Psychology*, vol. 59 (5), pp. 899.915, 1990.

- [83] Kapoor, A., Mota, S., & Picard, R. "Towards a learning companion that recognizes affect". *Proceedings of Emotional and Intelligent II: the Tanglet Knot of Social Cognition, American Association of Artificial Intelligence (AAAI) Fall Symposium*, pp.503, USA, 2001.
- [84] Kort, B., Reilly, R. & Picard, R. "An affective model of interplay between emotions and learning". *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*, pp.43-46, USA, 2001.
- [85] Tomlinson B., Downie M., Berlin M., Gray J., Lyons D., Cochran J. & Blumberg B. "Leashing the AlphaWolves: mixing user direction with autonomous emotion in a pack of semi-autonomous virtual characters". *Proceedings of 2002 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pp. 7-14, USA, 2002.
- [86] Perozo, N., Aguilar, J. & Terán, O. "Proposal for a Multiagent Architecture for Self-Organizing Systems (MASOES)". *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5075, pp.434-439, 2008.
- [87] Perozo, N., Aguilar, J. & Terán, O. "Un Modelo Afectivo para una Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados (MASOES)". *Enviado para Publicación a la Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, Venezuela, 2010.
- [88] Perozo, N., Aguilar, J. & Terán, O. "Un Modelo Emocional para MASOES". *VI Seminario Nacional de Modelos y Modelados*, San Cristóbal, Venezuela, 2009.
- [89] Di Marzo G., Gleizes M. & Karageorgos A. "Self-organisation and Emergence in MAS: an overview". *Journal of Informatica*, vol. 30, no. 1, pp.45-54, 2006.
- [90] Sun R. (2005). *Cognition and Multiagent Interaction, From Cognitive Modeling to Social Simulation*. Edited by Ron Sun, Rensselaer Polytechnic Institute, Cambridge University Press.
- [91] Lehman J., Laird J. & Rosenbloom P. "A Gentle Introduction to SOAR, an architecture for human cognition: 2006 Update". *Technical Report of University of Michigan*, 2006.
- [92] Consorcio Dammad. "Diseño y Aplicación de Modelos Multiagente para la Ayuda a la Decisión". *Universidad Rey Juan Carlos*, España, 2005. Disponible: http://books.google.com/books?id=D9sXTQGhID0C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. [Consulta: 2011, Abril 23].
- [93] Fromm, J. "Types and Forms of Emergence", 2005. Disponible: <http://arxiv.org/ftp/nlin/papers/0506/0506028.pdf>. [Consulta: 2009, Junio 2].
- [94] Si, M., Marsella, S & Pynadath, D. "Modeling appraisal in theory of mind reasoning". *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 14-31, 2010.
- [95] Perozo, N., Aguilar, J., Terán, O. & Molina, H. "A Verification Method for MASOES". *Enviado para publicación a IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2011.
- [96] Surowiecki, J. (2005). *Wisdom of Crowds*. Random House, USA.
- [97] Arazy, O., Morgan W. & Patterson R. "Wisdom of the Crowds: Decentralized Knowledge Construction in Wikipedia". *Proceedings of 16th Annual Workshop on Information Technologies & Systems (WITS)*, 2006. Disponible: <http://ssrn.com/abstract=1025624>. [Consulta: 2011, Marzo 25].
- [98] Wagner, C., Zhao, S. & Schneider, C. "The Wisdom of Reluctant Crowds". *Proceedings of IEEE International Conference on System Sciences*, Hawaii, 2010.

- [99] Kostakos, V. "Is the Crowd's Wisdom Biased? A Quantitative Analysis of Three Online Communities". *Proceedings of IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*, p.p. 251-255, Canada, 2009.
- [100] Wagner, C. & Vinaimont, T. "Evaluating the Wisdom of Crowds". *Proceedings of Issues in Information Systems*, vol. XI, no. 1, p.p.724, 2010.
- [101] Shiratsuchi, k., Yoshii, S. & Furukawa, M. "Finding Unknown Interests Utilizing the Wisdom of Crowds in a Social Bookmark Service". *Proceedings of IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology Workshops*, pp. 421, Hong Kong, 2006.
- [102] Daly, E. "Harnessing Wisdom of the Crowds Dynamics for Time-Dependent Reputation and Ranking". *Proceedings of IEEE International Conference on Advances in Social Network Analysis and Mining*, p.p. 267, Greece, 2009.
- [103] Axelrod, R. (1997). *Structure of Decision: the Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton University Press, USA.
- [104] Kosko, B. "Fuzzy Cognitive Maps". *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 24, pp. 65-75, 1986.
- [105] Aguilar, J. "Adaptive Random Fuzzy Cognitive Maps". *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2527, pp. 402-410, 2002.
- [106] Aguilar, J. "A Survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers". *International Journal of Computational Cognition, Yang's Scientific Research Institute*, vol. 3, no. 2, pp. 27-33, 2005.
- [107] Gadallah, A. & Hefny, H. "A novel multiagent system based on dynamic fuzzy cognitive map approach". *Proceedings of 10th International Conference on IEEE Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'2010)*, pp. 254, Egypt, 2010.
- [108] Stylios, C. & Groumpos, P. "Modeling Complex Systems Using Fuzzy Cognitive Maps". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 34 issue: 1, p.p. 255, 2003.
- [109] Aguilar J. & Contreras J. "The FCM Designer Tool". In *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications*, Ed. *Glikas Mixalis, Springer*, pp. 71-88, 2010.
- [110] Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Helix books. Addison-Wesley.
- [111] Rosen, R. (1985). *Anticipatory Systems: Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*. Pergamon Press.
- [112] Von Neumann, J. (1956). *Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components*. Automata Studies, C. Shannon and J. McCarthy, Eds. Princeton University Press, USA, 1956.
- [113] Jen, E. (2005). *Robust Design: A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies*. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity, Oxford University Press.
- [114] Ramos, V., Fernandez C., & Rosa A. "Social Cognitive Maps, Swarm Collective Perception and Distributed Search on Dynamic Landscapes". *Reporte Técnico*, 2007. Disponible: <http://www.chemoton.org/Ramos07aAITBPA-63.pdf>. [Consulta: 2010, Marzo 25].
- [115] Watkins, J. "Prediction Markets as an Aggregation Mechanism for Collective Intelligence". *The 4th UCLA Lake Arrowhead Conference on Human Complex Systems*, pp.1-

- 10, USA, 2007. Disponible: <http://repositories.cdlib.org/hcs/WorkingPapers2/JHW2007>. [Consulta: 2011, Marzo 25].
- [116] Sudeikat, J. & Renz, W. "Mesoscopic Modeling of Emergent Behavior – A Self-Organizing Deliberative Minority Game". *Proceedings of the Third International Workshop on Engineering Self-Organising Applications (ESOA'05)*, pp.167-181, The Netherlands, 2005.
- [117] Brueckner, S. "Return From the Ant - Synthetic Ecosystems for Manufacturing Control". PhD thesis, *Humboldt-Universität*, Berlin. 2000.
- [118] Perozo, N., Aguilar, J., Terán, O. & Molina, H. "Self-organization and Emergence phenomena in Wikipedia and Free Software Development using MASOES". *Enviado para publicación a Journal of Cybernetics and Systems*, (2011).
- [119] Perozo, N., Aguilar, J. & Terán, O. "Social Force Model for Pedestrian Dynamics through MASOES Verification Method". *Enviado para publicación a KES International Journal*, 2011.
- [120] Perozo, N., Aguilar, J. & Terán, O. "The Verification Method of MASOES Applied to the Social Force Model for Pedestrian Dynamics". *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, man-machine systems and cybernetics (CIMMACS '10)*, pp. 83-90, Venezuela, 2010.
- [121] Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D. & Theraulaz, G. "The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and its Impact on Crowd Dynamics". *PLoS ONE*, vol.5, no.4, e10047, 2010.
- [122] Perozo, N., Moussaïd, M., Garnier, S. & Theraulaz, G. "Experimental Study of Pedestrian Collective Displacements". *Proceedings of 3rd International Conference Alþan, Portugal*, 2009. Disponible: <http://www.programalban.com/porto2009/?show=textos&lang=en>. [Consulta: 2011, Junio 17].
- [123] Goldspink, C. "Normative self-regulation in the emergence of global network institutions: the case of Wikipedia". *Proceedings of Australia and New Zealand Systems Conference (ANZSYS)*, pp.1-12, New Zealand, 2007.
- [124] Rizo, M. "Redes. Una aproximación al Concepto". *Universidad Autónoma de la Ciudad de México. CONACULTA, UNESCO*, 2003. Disponible: <http://www.cecaargentina.com.ar/documentosinteres/redes.pdf>. [Consulta: 2009, Marzo 25].
- [125] Wikipedia Foundation. "Los cinco Pilares". Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Los_cinco_pilares. [Consulta: 2009, Mayo 25].
- [126] Vitell, S. Nwachukwu S. & Barnes J. "The Effects of Culture on Ethical Decision-Making: An Application of Hofstede's Typology". *Journal of Business Ethics*, vol. 12, pp. 753-760, 1993.
- [127] Wikipedia Foundation. "Wiki". Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Wiki>. [Consulta: 2010, Noviembre 9].
- [128] Giles, J. "Special Report Internet encyclopaedias go head to head". *Nature*, vol.438, pp.900-901, 2005.
- [129] Ortega, F. "Wikipedia: A Quantitative Analysis". *PhD Tesis, Universidad Rey Juan Carlos, España*, 2009. Disponible: <http://libresoft.es/Members/jfelipe/thesis-wkp-quantanalysis>. [Consulta: 2010, Febrero 19].

- [130] Kittur, A., Suh, B., Pendleton, B. & Chi, E. "He says, She says: Conflict and Coordination in Wikipedia". *Proceedings of the ACM Conference on Human-factors in Computing Systems*, pp.453-462, China, 2007.
- [131] Pfeil, U., Zaphiris P. & Ang C. "Cultural Differences in Collaborative Authoring of Wikipedia". *Journal of Computer-Mediated Communication*, Vol. 12, Nro.1, 2006. Disponible: <http://jcmc.indiana.edu/vol12/issue1/pfeil.html>.
- [132] Luneski, A. & Moore, R. "Affective Computing and Collaborative Networks: Towards Emotion-Aware Interaction". *Proceedings of IFIP International Federation for Information Processing, vol. 283, Pervasive Collaborative Networks*, Luis M. Camarinha-Matos, Willy Picard; (Boston: Springer), pp. 315-322, 2008.
- [133] Gonzalez, S., Seoane, J. & Robles G. "Introducción al software libre". *Grupo de Sistemas y Comunicaciones, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, 2003. ISBN: 84-9788-028-5, Disponible: <http://curso-sobre.berlios.de/introsobre/1.0/libre.pdf>. [Consulta: 2009, Mayo 8].
- [134] Robles G., Merelo, J. & Gonzalez-Barahona, J. "Self-organized development in libre software: a model based on the stigmergy concept". *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Process Simulation and Modeling (ProSim 2005) (ICSE2005)*, pp.1-6, USA, 2005.
- [135] Godfrey, M. & Qiang, T. "Evolution in open source software: a case study". *Proceedings of the International Conference on Software Maintenance*, pp.131-142, USA, 2005.
- [136] Senabre, E. "La colaboración en el desarrollo del software libre". *Archivos del Observatorio para la cibersociedad*. Disponible: <http://www.cibersociedad.net/archivo/articulo.php?art=202>. [Consulta: 2009, Mayo 8].
- [137] Iannacci, F. "Coordination Processes in Open Source Software Development: The Linux Case Study". *Emergence: Complexity and Organization*, vol.7, no.2, pp. 21-31, 2005.
- [138] Ehrenkrantz, J. "Release management within open source projects". *Proceedings of the 3rd Workshop on Open Source Software Engineering at the 25th International Conference on Software Engineering*, pp.1-5, USA, 2003.
- [139] Hertel G., Niedner, S. & Herrmann, S. "Motivation of software developers in open source projects: an Internet-based survey of contributors to the Linux Kernel". *Elsevier Research Policy* vol. 32, pp. 1159-1177, 2003.
- [140] Xiaohui, C., Beaver, J., Pullum, L., Treadwell, J. & Potok, T. "A Stigmergy Approach for Open Source Software Developer Community Simulation". *Proceedings of International Conference on IEEE Computational Science and Engineering*, pp.602-609, Canada, 2009.
- [141] Ricci, A., Omicini, A., Virola, M., Gardelli, L. & Oliva, E. "Cognitive Stigmergy: Towards a Framework Based on Agents and Artifacts". *Lecture Notes in Computer Science* vol.4389, pp. 124-140, 2007.
- [142] Yu, L. "Self-organization process in open-source software: An empirical study". *Elsevier, Information and Software Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 361-374, 2008.
- [143] Vidal, M. "Cooperación sin mando: una introducción al software libre". *Biblioweb de Sindominio (copyleft) (Telemática)*. Disponible: <http://biblioweb.sindominio.net/telematica/softlibre/sl.pdf>. [Consulta: 2009, Mayo 15].
- [144] Helbing D. & Molnar P. "Social Force Model for Pedestrian Dynamics". *Physical Review E*, vol.51, pp. 4282-4286, 1995.

- [145] Helbing D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. "Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions". *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp. 1-24, 2005.
- [146] Moussaïd M., Helbing D., Garnier S., Johansson A., Combe M. & Theraulaz G. "Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds". *The Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 276 no. 1668, pp.2755-2762, 2009.
- [147] Ball, P. (2009). *Flow: Nature's Patterns: A Tapestry in Three Parts*. Oxford University Press.
- [148] Daamen, W. & Hoogendoorn, S. "Experimental research of pedestrian walking behaviour". *Transportation Research Record*, vol.1828, pp. 22-30, 2003.
- [149] Daamen, W. & Hoogendoorn, S. "Controlled experiments to derive walking behaviour". *Eur. J. Transport Infrastructure Research*, vol. 3, no.1, pp. 39-59, 2003.
- [150] Bierlaire, M., Gianluca, A. & Mats, W. "Behavioral Dynamics for Pedestrians". *Proceedings of K. Axhausen (Ed.) Moving through the nets: The physical and social dimensions of travel*, pp. 10-15, Elsevier, Switzerland, 2003.
- [151] Wegner, P. "Why interaction is more powerful than algorithms". *ACM*, Vol.40, Nro.5, pp. 80-91, 1997.
- [152] Khosla, R. & Dillon, T. "Intelligent hybrid multi-agent architecture for engineering complex systems". *IEEE International Conference on Neural Networks*, vol.4 p.p. 2449 – 2454, 1997.
- [153] Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organised Criticality*. New York, NY: Copernicus Press..
- [154] Terán, O. "Review Essay of the Book: Per Bak (1996), How Nature Works: The Science of Self-Organised Criticality". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol.4, no.4, 2001.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, une architecture multi-agents pour systèmes émergents et auto-organisés (MASOES) est définie. Cette architecture permet la possibilité de modéliser une système émergent et auto-organisés à travers une société d'agents (homogène ou hétérogène), qui travaillent de manière décentralisée, avec différents types de comportement: réactive, imitative et cognitive. En outre, ils sont capables de modifier dynamiquement leur comportement en fonction de leur état émotionnel, de sorte que les agents peuvent s'adapter dynamiquement à leur environnement, en favorisant l'émergence de structures. Pour cela, un modèle à deux dimensions affectives avec des émotions positives et négatives est proposé. L'importance de ce modèle affectif, c'est qu'il y a pas des modèles émotionnels pour étudier et comprendre comment modéliser et simuler émergentes et auto-organisés des processus dans un environnement multi-agent et aussi, son utilité pour étudier certains aspects de l'interaction sociale multi-agent (influence des émotions dans les comportements individuels et collectifs des agents). D'autre part, une méthodologie pour faire la modélisation avec MASOES est spécifiée, elle explique comment décrire les éléments, relations et mécanismes au niveau individuel et collectif de la société d'agents, qui favorisent l'analyse de phénomène auto-organisateur et émergent sans modéliser le système mathématiquement. Il est également proposé une méthode de vérification pour MASOES basée sur le paradigme de la sagesse des foules et de cartes cognitives floues (CCFs), pour testé les spécifications de design et les critères de vérification établis, tels que: *la densité, la diversité, l'indépendance, l'émotivité, l'auto-organisation et émergence, entre autres*. Il montre également l'applicabilité de MASOES par des études de cas diverses dans différents contextes comme : *Wikipedia, développement de logiciel gratuit et comportement collectif des piétons par le modèle de forces sociales*. Finalement, les deux modèles proposés dans MASOES: le modèle multi-agent initiale et le modèle avec CCFs basé sur ce modèle multi-agent initiale se complètent mutuellement. Cela signifie qu'il est possible de tester le modèle multi-agent à travers le méta-modèle basé sur les CCFs. En outre, il représente une nouvelle alternative pour étudier, tester, vérifier ou valider l'auto-organisation et émergence dans les systèmes complexes et de tester le modèle multi-agent, car il est difficile de faire des tests dans ces systèmes pour le niveau d'incertitude et de complexité qu'ils traitent.

Mots-Clefs: *Systèmes Multi-agents, Auto-Organisation, Émergence, Informatique Affective, Systèmes Auto-Organisés, Cartes Cognitives Floues, Intelligence Collective.*

ABSTRACT

In this work a multi-agent architecture for self-organizing and emergent systems (MASOES) is defined. This architecture allows the possibility of modeling a self-organizing and emergent system through a society of agents (homogenous or heterogeneous), who work in a decentralized way, with different types of behavior: reactive, imitative or cognitive. Also they are able to dynamically change their behavior according to their emotional state, so that the agents can adapt dynamically to their environment, favoring the emergence of structures. For it, a two-dimensional affective model with positive and negative emotions is proposed. The importance of this affective model is that there are not emotional models for studying and understanding how to model and simulate emergent and self-organizing processes in a multi-agent environment and also, its usefulness to study some aspects of social interaction multi-agent (e.g. the influence of emotions in individual and collective behavior of agents). On the other hand, a methodology for modeling with MASOES is specified, it explains how to describe the elements, relations and mechanisms at individual and collective level of the society of agents, that favor the analysis of the self-organizing and emergent phenomenon without modeling the system mathematically. It is also proposed a verification method for MASOES based on the paradigm of wisdom of crowds and fuzzy cognitive maps (FCMs), for testing the design specifications and verification criteria established such as: *density, diversity, independence, emotiveness, self-organization and emergence, among others*. It also shows the applicability of MASOES for modeling diverse case studies (in a diversity of contexts) such as: *Wikipedia, Free Software Development and collective behavior of pedestrians through the Social Force Model*. Finally, the two models proposed in MASOES: the initial multi-agent model and the model with FCMs based on that initial multi-agent model complement each other. This means that it is possible to test the multi-agent model through the meta-model based on FCMs. Besides, it represents a novel alternative to study, test, verify or validate self-organization and emergence in complex systems and test the multi-agent model, since it is difficult to make tests in these systems directly, given the level of uncertainty and complexity they manage.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, une architecture multi-agents pour systèmes émergents et auto-organisés (MASOES) est définie. Cette architecture permet la possibilité de modéliser une système émergent et auto-organisés à travers une société d'agents (homogène ou hétérogène), qui travaillent de manière décentralisée, avec différents types de comportement: réactive, imitative et cognitive. En outre, ils sont capables de modifier dynamiquement leur comportement en fonction de leur état émotionnel, de sorte que les agents peuvent s'adapter dynamiquement à leur environnement, en favorisant l'émergence de structures. Pour cela, un modèle à deux dimensions affectives avec des émotions positives et négatives est proposé. L'importance de ce modèle affectif, c'est qu'il y a pas des modèles émotionnels pour étudier et comprendre comment modéliser et simuler émergentes et auto-organisés des processus dans un environnement multi-agent et aussi, son utilité pour étudier certains aspects de l'interaction sociale multi-agent (influence des émotions dans les comportements individuels et collectifs des agents). D'autre part, une méthodologie pour faire la modélisation avec MASOES est spécifiée, elle explique comment décrire les éléments, relations et mécanismes au niveau individuel et collectif de la société d'agents, qui favorisent l'analyse de phénomène auto-organisateur et émergent sans modéliser le système mathématiquement. Il est également proposé une méthode de vérification pour MASOES basée sur le paradigme de la sagesse des foules et de cartes cognitives floues (CCFs), pour testé les spécifications de design et les critères de vérification établis, tels que: *la densité, la diversité, l'indépendance, l'émotivité, l'auto-organisation et émergence, entre autres*. Il montre également l'applicabilité de MASOES par des études de cas diverses dans différents contextes comme : *Wikipedia, développement de logiciel gratuit et comportement collectif des piétons par le modèle de forces sociales*. Finalement, les deux modèles proposés dans MASOES: le modèle multi-agent initiale et le modèle avec CCFs basé sur ce modèle multi-agent initiale se complètent mutuellement. Cela signifie qu'il est possible de tester le modèle multi-agent à travers le méta-modèle basé sur les CCFs. En outre, il représente une nouvelle alternative pour étudier, tester, vérifier ou valider l'auto-organisation et émergence dans les systèmes complexes et de tester le modèle multi-agent, car il est difficile de faire des tests dans ces systèmes pour le niveau d'incertitude et de complexité qu'ils traitent.

Mots-Clefs: *Systèmes Multi-agents, Auto-Organisation, Émergence, Informatique Affective, Systèmes Auto-Organisés, Cartes Cognitives Floues, Intelligence Collective.*

ABSTRACT

In this work a multi-agent architecture for self-organizing and emergent systems (MASOES) is defined. This architecture allows the possibility of modeling a self-organizing and emergent system through a society of agents (homogenous or heterogeneous), who work in a decentralized way, with different types of behavior: reactive, imitative or cognitive. Also they are able to dynamically change their behavior according to their emotional state, so that the agents can adapt dynamically to their environment, favoring the emergence of structures. For it, a two-dimensional affective model with positive and negative emotions is proposed. The importance of this affective model is that there are not emotional models for studying and understanding how to model and simulate emergent and self-organizing processes in a multi-agent environment and also, its usefulness to study some aspects of social interaction multi-agent (e.g. the influence of emotions in individual and collective behavior of agents). On the other hand, a methodology for modeling with MASOES is specified, it explains how to describe the elements, relations and mechanisms at individual and collective level of the society of agents, that favor the analysis of the self-organizing and emergent phenomenon without modeling the system mathematically. It is also proposed a verification method for MASOES based on the paradigm of wisdom of crowds and fuzzy cognitive maps (FCMs), for testing the design specifications and verification criteria established such as: *density, diversity, independence, emotiveness, self-organization and emergence, among others*. It also shows the applicability of MASOES for modeling diverse case studies (in a diversity of contexts) such as: *Wikipedia, Free Software Development and collective behavior of pedestrians through the Social Force Model*. Finally, the two models proposed in MASOES: the initial multi-agent model and the model with FCMs based on that initial multi-agent model complement each other. This means that it is possible to test the multi-agent model through the meta-model based on FCMs. Besides, it represents a novel alternative to study, test, verify or validate self-organization and emergence in complex systems and test the multi-agent model, since it is difficult to make tests in these systems directly, given the level of uncertainty and complexity they manage.

KeyWords: *Multi-agent Systems, Self-Organization, Emergence, Affective Computing, Self-Organizing Systems, Fuzzy Cognitive Maps, Collective Intelligence.*

KeyWords: *Multi-agent Systems, Self-Organization, Emergence, Affective Computing, Self-Organizing Systems, Fuzzy Cognitive Maps, Collective Intelligence.*