

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

**MODELO DE AGENTES DE INTELIGENCIA COLECTIVA. UN
ESTUDIO DE LA EMERGENCIA DE LA COORDINACIÓN.**

Sergio Ortiz Paz

Abril, 2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

**MODELO DE AGENTES DE INTELIGENCIA COLECTIVA. UN
ESTUDIO DE LA EMERGENCIA DE LA COORDINACIÓN.**

Sergio Ortiz Paz

Proyecto de título presentado para optar al Título Profesional de *Ingeniero de Sistemas*.

Director: Víctor Andrés Bucheli Guerrero

Co-Director: Ángel De La Encarnación García Baños

Abril, 2019

Dedicatoria

El resultado del esfuerzo de este trabajo se lo dedico a mi familia que siempre me han inculcado y fomentado la ciencia, la cultura, el deporte y el arte; enfocándose siempre en la formación de una persona integral y con valores.

En especial a mi madre porque literalmente gracias a ella es que estudié esta carrera y me impulsó a seguir adelante en la adquisición de más conocimientos.

Agradecimientos

A mis directores Víctor Bucheli Guerrero y Ángel García Baños por presentarme una temática nueva para mí, como lo fueron las redes complejas y los sistemas complejos. Por asesorarme, guiarme y tenerme paciencia.

A mis profesores por las enseñanzas que dejaron en mí y a mis amigos por las tertulias y reuniones de estudio donde filosofábamos, compartíamos experiencias y retroalimentábamos nuestros conocimientos.

Resumen

El modelamiento basado en agentes es una técnica de modelado computacional de amplio espectro dado que permite modelar y simular sistemas objeto de estudio de muchas áreas del conocimiento. A través de este tipo de modelamiento se pueden representar explícitamente como son las interacciones entre actores (agentes) y el medio ambiente en que interactúan, lo que permite analizar características o procesos emergentes del sistema simulado bajo diferentes configuraciones del mismo.

En este tipo de modelos es posible simular fenómenos naturales y sociales, particularmente modelar sistemas complejos que se desarrollan en una línea de tiempo.

El objetivo de este documento es proponer el modelamiento de agentes y cómo reglas simples construyen en el tiempo redes complejas que permiten la coordinación de actividades. De esta forma se propone el estudio de redes complejas para entender la emergencia de estructuras que coordinan las acciones. El trabajo consiste en tomar un trabajo previo de inteligencia colectiva desarrollado por Suárez [1] y basados en el modelo propuesto estudiar la emergencia de la coordinación como resultado de las múltiples interacciones entre agentes que suceden en la simulación.

Para dicho objetivo, se propone un nuevo modelo implementando algunos mecanismos de integración entre agentes que permitan la consecución de algún tipo de estructura compleja de red que posibilite evidenciar el fenómeno de la coordinación.

Índice general

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introducción | 2 |
| 1.1 | Planteamiento del problema | 2 |
| 1.2 | Objetivos | 3 |
| 1.2.1 | Objetivo general | 3 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 3 |
| 1.3 | Alcance | 3 |
| 2 | Estado del arte | 4 |
| 2.1 | Emergencia de la sincronización en redes complejas de sistemas de interacción dinámica | 4 |
| 2.2 | Un modelo de simulación basado en agentes para analizar el desempeño de equipos en trabajos con una estructura estocástica | 5 |
| 2.3 | Modelado y simulación de atributos de redes complejas en la coordinación de grandes sistemas de múltiples agentes | 7 |
| 3 | Marco teórico | 10 |
| 3.1 | Sistemas complejos | 10 |
| 3.2 | Coordinación en sistemas complejos | 11 |
| 3.3 | Redes complejas | 11 |
| 3.3.1 | Definición | 11 |
| 3.3.2 | Tipos de modelos de redes | 11 |
| 3.4 | Ambiente | 13 |
| 3.5 | Agentes | 13 |
| 3.6 | Modelo basado en agentes | 13 |
| 4 | Análisis de la coordinación e integración sobre la red del modelo base | 15 |
| 4.1 | Revisión de literatura sobre coordinación en redes complejas | 15 |
| 4.2 | Descripción del modelo base | 15 |
| 4.3 | Definiciones propuestas | 16 |
| 4.3.1 | Integración | 16 |
| 4.3.2 | Coordinación | 16 |
| 4.4 | Análisis estructural de la coordinación e integración | 16 |
| 4.4.1 | Método | 16 |
| 4.4.2 | Análisis | 17 |
| 4.4.3 | Resultados | 18 |
| 4.4.4 | Conclusiones | 20 |
| 4.5 | Análisis dinámico de la coordinación | 20 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5.1 | Método | 20 |
| 4.5.2 | Análisis | 22 |
| 4.5.3 | Resultados | 22 |
| 4.5.4 | Conclusiones | 25 |
| 5 | Modelo propuesto | 27 |
| 5.1 | Descripción de los mecanismos de integración | 27 |
| 5.2 | Implementación de los mecanismos de integración en el modelo | 28 |
| 5.3 | Descripción del modelo | 28 |
| 6 | Pruebas y análisis de resultados | 34 |
| 6.1 | Criterio de comparación | 34 |
| 6.2 | Prueba 1 | 34 |
| 6.2.1 | Resultados | 35 |
| 6.3 | Prueba 2 | 41 |
| 6.3.1 | Resultados | 41 |
| 6.4 | Análisis de resultados | 42 |
| 7 | Conclusiones | 46 |
| 7.1 | Trabajo Futuro | 47 |
| | Bibliografía | 47 |

Índice de tablas

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabla 4.4.1 | Cantidades de ciclos de longitudes 3, 4 y 5 | 20 |
| Tabla 4.5.1 | Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 1 | 22 |
| Tabla 4.5.2 | Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 2 | 23 |
| Tabla 4.5.3 | Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 3 | 23 |
| Tabla 4.5.4 | Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 1 | 23 |
| Tabla 4.5.5 | Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 2 | 23 |
| Tabla 4.5.6 | Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 3 | 23 |
| Tabla 4.5.7 | Promedio general de tiempos de difusión completa en los tres tipos de redes | 23 |
| Tabla 4.5.8 | Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 1 | 24 |
| Tabla 4.5.9 | Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 2 | 24 |
| Tabla 4.5.10 | Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 3 | 24 |
| Tabla 4.5.11 | Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 1 | 24 |
| Tabla 4.5.12 | Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 2 | 25 |
| Tabla 4.5.13 | Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 3 | 25 |
| Tabla 4.5.14 | Promedio general del tamaño de adopción en los tres tipos de redes | 25 |
| Tabla 4.5.15 | Promedios de coeficiente de agrupamiento y longitud de camino promedio de los tipos de redes | 26 |
| Tabla 6.2.1 | Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 10 % del máximo de enlaces posibles | 35 |
| Tabla 6.2.2 | Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 20 % del máximo de enlaces posibles | 35 |
| Tabla 6.2.3 | Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 30 % del máximo de enlaces posibles | 35 |
| Tabla 6.2.4 | Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 40 % del máximo de enlaces posibles | 36 |
| Tabla 6.2.5 | Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 50 % del máximo de enlaces posibles | 36 |
| Tabla 6.2.6 | Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 200 nodos | 36 |
| Tabla 6.2.7 | Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles | 36 |
| Tabla 6.2.8 | Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles | 37 |
| Tabla 6.2.9 | Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles | 37 |

| | |
|---|----|
| Tabla 6.2.10 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles | 37 |
| Tabla 6.2.11 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles | 37 |
| Tabla 6.2.12 Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 300 nodos | 38 |
| Tabla 6.2.13 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles | 38 |
| Tabla 6.2.14 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles | 38 |
| Tabla 6.2.15 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles | 38 |
| Tabla 6.2.16 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles | 39 |
| Tabla 6.2.17 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles | 39 |
| Tabla 6.2.18 Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 400 nodos | 39 |
| Tabla 6.2.19 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles | 39 |
| Tabla 6.2.20 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles | 40 |
| Tabla 6.2.21 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles | 40 |
| Tabla 6.2.22 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles | 40 |
| Tabla 6.2.23 Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles | 40 |
| Tabla 6.2.24 Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 500 nodos | 41 |
| Tabla 6.3.1 Resultados de cantidades de ciclos promedios en las redes generadas a través del tiempo . | 41 |
| Tabla 6.3.2 Resultados de cantidades de ciclos en redes aleatorias | 42 |
| Tabla 6.4.1 razones de cantidad de ciclos en redes generadas por el modelo sobre redes aleatorias por porcentajes de completitud de enlaces | 43 |
| Tabla 6.4.2 Razones comparativas de las redes generadas por el modelo frente a aleatorias con 1000 nodos y limit-capacity: 5 | 45 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.2.1 Arquitectura del modelo propuesto | 6 |
| Figura 2.3.1 Algoritmo del proceso general de la decisión de comunicación de los agentes | 8 |
| Figura 4.4.1 Caracterización de nodos de la red | 18 |
| Figura 4.4.2 Componentes de red vs tiempo | 19 |
| Figura 4.4.3 Histograma de densidad de cliques en redes aleatorias | 19 |
| Figura 4.4.4 Histograma de densidad de cliques en redes del modelo | 19 |
| Figura 5.3.1 Interfaz gráfica del modelo | 29 |
| Figura 5.3.2 Diagrama de flujo del proceso de integración | 30 |
| Figura 5.3.3 Diagrama de flujo del proceso de deliberación | 31 |
| Figura 5.3.4 Ejemplo de integración en el tiempo 1 | 32 |
| Figura 5.3.5 Ejemplo de integración en el tiempo 2 | 32 |
| Figura 5.3.6 Monitores | 33 |
| Figura 5.3.7 Monitor que calcula total de enlaces para agentes conectados todos entre sí | 33 |
| Figura 6.4.1 Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud tres a través del tiempo | 44 |
| Figura 6.4.2 Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud cuatro a través del tiempo | 44 |
| Figura 6.4.3 Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud cinco a través del tiempo | 45 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Hoy en día debido al avance en la tecnología y la ciencia el mundo se ha convertido cada vez más interconectado y complejo que antes; haciendo por ejemplo, que seamos más conscientes sobre como los cambios en las lluvias en una parte del mundo pueden afectar drásticamente el clima en otras regiones, como una imprudente decisión financiera puede tener un impacto económico significativo para el resto del mundo o como el brote de una nueva enfermedad en China puede propagarse hacia el resto del mundo rápidamente [2]. Debido a que este tipo de sistemas no son simples sino que se componen de conjuntos de relaciones e interacciones múltiples las cuales denominaremos como interacciones complejas es que es importante tratar de comprenderlas; ya que son de gran impacto para la sociedad. Actualmente, muchos de estos sistemas de alta complejidad se pueden describir como redes complejas de interacciones. Por lo tanto, estudiar la coordinación como fenómeno emergente en las redes complejas puede ser muy relevante dada la ubicuidad de ellas en nuestro presente y muy probablemente futuro de las sociedades.

En las redes se presenta un tipo de coordinación de mayor complejidad sobre otros modos de coordinación como los de tipo jerárquico o descentralizados y esto es debido a la heterogeneidad y diferenciación de los actores o agentes participantes. Así pues, hace que las redes desarrollen un modo específico de coordinación con propiedades emergentes. Esta coordinación en las redes complejas se presenta mediante cuatro mecanismos de integración conocidos como: la confianza mutua, la traducción, la negociación y la deliberación o la racionalidad deliberativa [3]. Es de suma importancia como estos mecanismos antes descritos se relacionan entre sí, dado que esto permitiría develar cómo es la dinámica de operación de este tipo de redes.

En esencia el trabajo se enfoca en el análisis y modelamiento de redes; donde se estudian los mecanismos de integración antes descritos como forma de coordinación teniendo en cuenta la heterogeneidad o diferenciación presente entre los agentes participantes, es decir la coordinación de la inteligencia colectiva que emerge de la capacidad de un grupo de personas para colaborar en pro de conseguir objetivos en un contexto complejo.

¿En el modelo propuesto por Suárez [1] se evidencia la emergencia de coordinación a través de la estructuración de redes complejas? ¿Los mecanismos de integración son modelados explícitamente? y de no ser así, ¿Cuáles modificaciones son necesarias en el modelo para evidenciar la coordinación en la inteligencia colectiva?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo basado en agentes para comprender la coordinación e integración en la inteligencia colectiva.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar las características y reglas del modelo base propuesto por Suárez [1].
- Hacer una revisión de literatura y reproducción de modelos relacionados con los mecanismos de integración y coordinación.
- Proponer un modelo nuevo basándose y modificando el modelo Suárez [1] que contenga las características principales de coordinación e integración.
- Experimentar con los parámetros del modelo propuesto para comprender la emergencia en la inteligencia colectiva.
- Evaluar la emergencia de la coordinación en inteligencia colectiva.

1.3. Alcance

El proyecto busca contribuir al entendimiento de las dinámicas en redes complejas especialmente a la coordinación que se da en este tipo de sistemas. Se usa el enfoque de modelamiento basado en agentes para simular la red y sus interacciones. El modelo se implementa en el lenguaje de programación basado en agentes y ambiente de simulación NetLogo. Las limitaciones del modelo pueden estar sujetas a las propias del lenguaje, además, a la capacidad de cálculo o cómputo para simular configuraciones de redes muy grandes.

Capítulo 2

Estado del arte

A continuación, se exponen artículos de relevancia para la comprensión del estado del arte en el estudio de las redes complejas en especial lo relacionado a la coordinación como fenómeno emergente de estos sistemas.

2.1. Emergencia de la sincronización en redes complejas de sistemas de interacción dinámica

En [4] se estudia la emergencia de la sincronización como la transición de un estado incoherente a uno coherente en sistemas acoplados de interacción dinámicos basándose en el reconocido modelo de Kuramoto; el cual se ha convertido en un paradigma clásico para la emergencia de la sincronización en un conjunto de osciladores heterogéneos. El modelo matemático de Kuramoto considera N osciladores donde cada uno de los cuales son descritos por una fase θ_j y una frecuencia ω_j . Las frecuencias se asumen ser dibujadas aleatoriamente por una distribución de probabilidad $\Omega(\omega)$ independientemente de j y simétrica alrededor de un máximo local ubicado en $\omega = 0$. El acoplamiento sinusoidal es asumido a fin de que θ_j evolucione como $\dot{\theta}_j = \omega_j + k \sum_{m=1}^N \sin(\theta_m - \theta_j)$. Cuando N tiende a infinito, se tiene una constante k de fuerza de acoplamiento la cual cuando es menor que una constante de fuerza de acoplamiento crítica k_c , las fases de los osciladores son incoherentes; mientras que, si el valor de la constante k es mayor a k_c , entonces una fracción significativa de los osciladores empieza a oscilar con frecuencias comunes.

En [4] se realiza una revisión de los resultados obtenidos en dos estudios previos los cuales respectivamente simplifican el problema de manera que uno depende solamente en las dinámicas individuales de los nodos y el otro en la topología de la red misma. Luego, proponen una teoría sobre sistemas dinámicos generales acoplados en redes a través de un análisis más detallado de los estudios antes mencionados mediante relaciones de recurrencia y una extensión para colecciones de osciladores de tiempo continuo descrita a través de ecuaciones diferenciales ordinarias.

El sistemas de redes de mapas acoplados es definido como la relación de recurrencia siguiente

$$x_{n+1}^{(j)} = f(x_n^{(j)}, \mu_j) + \omega_n^j + kg(x_n^{(j)}) \sum_{m=1}^N A_{jm} [q(x_n^{(m)}) - \langle q(x) \rangle] \quad (2.1)$$

Donde j simplemente etiqueta cada uno de los N mapas; la función f determina la dinámica desacoplada de cada mapa individual con un vector de parámetros μ_j ; y por cada mapa j su vector de parámetros correspondiente es elegido aleatoria e independientemente de éste con una distribución de probabilidad $p(\mu)$. El término ω_n^j representa un ruido aleatorio de tal forma que su valor esperado es 0. El término de acoplamiento en la ecuación, define a k como una fuerza de acoplamiento global, las funciones g y q son suaves y acotadas. A es la matriz $N \times N$ de adyacencia entre mapas, con diagonal 0 (no se considera conexiones de mapas a sí mismos). El sistema es estudiado para el caso en el que se asume que todos los nodos tienen muchos vecinos, lo cual hace del estado incoherente aproximadamente también una solución del sistema, que es abordado mediante el análisis de su estabilidad lineal introduciendo perturbaciones infinitesimales en el sistema y asumiendo que estas crecen exponencialmente; conlleva a la linealización de la ecuación.

Según [4] los resultados muestran que, bajo condiciones muy generales, agrupaciones de sistemas dinámicos heterogéneos que interactúan en una red compleja pasan por una transición de incoherencia a coherencia en cuanto la fuerza de acoplamiento k sobrepasa un valor crítico $k_c = (\mu\lambda)^{-1}$, donde λ es el máximo valor propio de la matriz de adyacencia de la red y μ depende de las dinámicas individuales. Por lo tanto, la topología de la red y las dinámicas de los osciladores afectan independientemente a la fuerza de acoplamiento crítica. Además, evidencia la importancia que tiene el máximo valor propio de la matriz de adyacencia de la red para determinar la transición a un estado coherente, lo cual podría ser útil en el control de las dinámicas en redes.

Este artículo a pesar de no estudiar explícitamente el fenómeno de la coordinación, es relevante pues la sincronización de una red de osciladores muy probablemente es un fenómeno de la coordinación entre sus elementos, la cual está estrechamente relacionada a la distribución en que se acomodan en la red, es decir de su topología.

2.2. Un modelo de simulación basado en agentes para analizar el desempeño de equipos en trabajos con una estructura estocástica

En este artículo [5] se presenta un modelo basado en agentes para la simulación de procesos en equipos el cual es aplicado para el análisis y experimentación con equipos que ayude a determinar combinaciones en la composición de estos, características organizacionales y métodos de coordinación que permitan el mejor desempeño para cierto trabajo.

El modelo está especialmente enfocado en la coordinación de actividades del equipo como un proceso dominante que influye en la efectividad del mismo. Éste simula equipos compuestos de por lo menos dos o más personas con trabajos, tareas u objetivos bien definidos por completar. Los equipos funcionan de la siguiente forma: Las tareas son divididas entre sus miembros, cada miembro trabaja en sus tareas específicas, se comunican entre ellos y coordinan su trabajo hasta alcanzar su objetivo.

El modelamiento del trabajo general del equipo es definido por una red de actividades donde los nodos representan tareas las cuales son subdivisiones de todo el objetivo general del equipo, y las aristas o enlaces representan interdependencias entre tareas. Cada tarea se caracteriza por tener una duración, complejidad y prioridad. En la figura 2.2.1 [5] se puede observar la arquitectura de este modelo.

El modelamiento de los miembros de los equipos se define a través de funciones de coordinación, toma de decisiones y procesamiento de tareas. Además, también por propiedades como el nivel de sus habilidades, nivel de entrenamiento y experiencia.

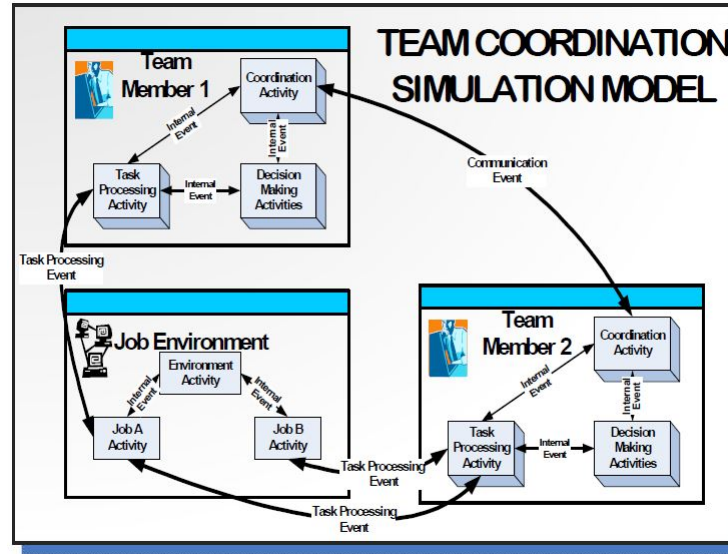


Figura 2.2.1: Arquitectura del modelo propuesto

El modelo funciona de la siguiente forma: cada agente empieza la simulación con un modelo mental definido, es decir, con una conceptualización de las destrezas y habilidades que posee. La prioridad de la tarea indica el orden recomendado en el cual las tareas deben ser completadas. La asignación de tarea podría cambiar durante la simulación debido a diferencias o retrasos durante la ejecución del trabajo.

Un agente comienza a procesar una tarea de su lista una vez que todas las tareas predecesoras sean completadas. La duración de una tarea es estocástica y es especificada como un número aleatorio triangular que representa la mínima duración posible, la duración esperada, y la máxima duración posible. La duración se modifica aún más basándose en el ajuste de habilidades entre el miembro del equipo que ejecuta la tarea y las habilidades requeridas por la tarea. Durante la ejecución, la tarea puede fallar a través de una probabilidad de fallo especificada para cada tarea, requiriendo algún tiempo adicional para ser completada.

Una vez la tarea es completada, el agente podría comunicar el resultado de las tareas al resto del equipo o solo a los miembros que podrían necesitarlo. Esta decisión es hecha estocásticamente. Si el agente decide enviar la notificación a cada compañero de equipo, aumentará la comunicación significativamente. Por otra parte, el agente podría cometer un error si decide enviar la notificación a compañeros de equipo con tareas sucesoras ya que su modelo mental podría ser erróneo o desactualizado.

Se dice que se cumplió el objetivo general del equipo cuando todas sus tareas alcanzan los estados de "tarea no requerida" o "tarea completada". Una tarea alcanza el estado "tarea no requerida" cuando el resultado de una interdependencia condicional determina que la tarea no es necesaria para completar un trabajo.

El modelo en [5] fue validado al reproducirlo en un comité de regatas para carreras de veleros, el cual es un equipo compuesto por cuatro miembros y su objetivo a simular se basa en la configuración del rumbo de la carrera. El resultado de 50 simulaciones fue comparado con datos reales obtenidos en seis carreras reales del comité, mostrando un tiempo de finalización promedio de 50.8 minutos y una carga de coordinación del 34.5 % que coinciden con los datos de la vida real que evaluó uno de los miembros del comité. Además, contrastaron lo que se conoce de dinámicas de equipo de la literatura existente en el modelo, al comprobar que cuando no se implementa y usa un plan de asignación de tareas los resultados de la simulación mostraron incrementos significativos en el tiempo de finalización y en la carga de coordinación.

2.3. Modelado y simulación de atributos de redes complejas en la coordinación de grandes sistemas de múltiples agentes

En [6] se propone un enfoque para modelar y simular la coordinación en sistemas de agentes múltiples haciendo énfasis en las interacciones entre agentes a través de la red para llevar a cabo acciones conjuntas en pro de un objetivo común.

El sistema multi-agente en [6] es representado como una red no dirigida, donde los nodos representan los agentes y sus aristas representan la comunicación directa que existe entre dos agentes.

La coordinación para sistemas de múltiples agentes se fundamenta en que un conjunto de agentes comparte un objetivo común, el cual está dividido en sub objetivos y cada uno de ellos tiene asociado una recompensa representada por un valor numérico cuando es completado. Para completar cada sub objetivo el equipo sigue planes por cada uno de ellos, cada plan está conformado por el sub objetivo a cumplir, las condiciones que se deben cumplir para alcanzar el sub objetivo, las tareas necesarias para satisfacer el sub objetivo y la recompensa por cumplir el sub objetivo. Cada tarea está representada por el sub objetivo que realiza, la capacidad de trabajo requerida, y los recursos necesarios para cumplir con el sub objetivo. Además, en cualquier momento una tarea puede ser asignada a lo máximo a un solo agente y los recursos que utilice no son compartidos. En general, la coordinación en este sistema se puede cuantificar como la maximización de las recompensas que el equipo obtiene, mientras se minimiza el costo de coordinación, que no es más que el volumen de comunicación en la red.

El modelo de coordinación propuesto en [6] representa la interacción entre agentes a través de la red, mediante diversos aspectos para coordinar las subtareas necesarias para alcanzar el objetivo común, como lo es el compartir información, asignación de tareas y el intercambio de recursos. Es definido entonces el conjunto de la coordinación multi-agente como la unión de los conjuntos del dominio de todos los posibles eventos, el conjunto de todas las actividades conjuntas potenciales disponibles y el conjunto de todos los recursos disponibles. La comunicación entre agentes es realizada a través de la creación de una estructura de datos llamada token, la cual tiene como finalidad viajar a través de la red de agentes en búsqueda del agente más competente para la realización de una tarea, el uso de un recurso o la obtención de información de tal forma que el sub objetivo sea alcanzado.

La estructura de un token la definen como $\Delta_j = \langle ID, tc, path, threshold \rangle$ donde ID es un identificador que hace que el token sea único evitando duplicaciones. tc es un elemento del conjunto de la coordinación, puede ser un evento, una tarea o un recurso. path registra la secuencia de agentes por donde el token ha pasado y threshold generaliza un umbral o indicio de la capacidad mínima requerida que debe tener un agente para aceptar el token. Cuando el token es aceptado por un agente, éste toma control de tc hasta liberarlo.

El proceso de decisión que ejecutan los agentes del modelo a través del uso de los tokens de comunicación es descrito de la siguiente manera: Inicialmente los agentes verifican si las tareas nuevas se ajustan a sus capacidades, si esto se cumple, entonces el agente integra la tarea en un token y lo adiciona a su lista de tokens a ser procesados. Luego, el agente recibe todos los tokens enviados por otros agentes.

El paso siguiente es procesar la lista de tokens, donde si un token representa una tarea, esta será aceptada por el agente únicamente si su capacidad para desarrollarla excede el umbral especificado en dicho token, de lo contrario el agente escoge uno de sus vecinos para pasárselo. En el caso de que sea un token de recursos y el agente lo requiera, también será decidido a través del umbral propio del token, dándole el control del recurso en caso de superar el umbral o de lo contrario se lo pasa a uno de sus vecinos. Cada vez que un token es pasado a otro agente o que se completa una tarea o ya no es necesario un recurso, este se elimina de la lista del agente que lo usó o lo tuvo. Este proceso se evidencia en el algoritmo presentado en la Figura 2.3.1 [6] de la toma de decisión de agentes.


```

(1) ApplicableTasks = [], OwnTasks = [], Holds = [], Tokens = [];
(2) while (true) do
(3)   for ( $\alpha \in \text{agent } a_i, \alpha \notin \text{ApplicableTasks}$ ) do
(4)     if (Applicable( $\alpha$ )) then
(5)       ApplicableTasks.append( $\alpha$ );
(6)       Tokens.append(CreateTokens( $\alpha$ ));
(7)     end if
(8)   Tokens.append(recvTokens());
(9)   end for
(10)  for ( $\Delta \in \text{Tokens}$ ) do
(11)    if ( $\Delta$  is TaskTokens( $\alpha$ )) then
(12)      if (GetCap( $\alpha$ ) >  $\Delta$ .threshold) then
(13)        if ( $\alpha \notin \text{OwnTasks}$ ) then
(14)          OwnTasks.append( $\alpha$ );
(15)        end if
(16)      else
(17)        SendToNeighbour( $\Delta$ );
(18)      end if
(19)    else if ( $\Delta$  is ResourceTokens( $r$ )) then
(20)       $\Delta$ .threshold +=  $\delta$ ;
(21)      if (GetNeed( $r$ ) >  $\Delta$ .threshold) then
(22)        if ( $r \notin \text{Holds}$ ) then
(23)          Holds.append( $r$ );
(24)        end if
(25)      else
(26)         $\Delta$ .threshold -=  $\delta$ ;
(27)        SendToNeighbour(Tokens);
(28)      end if
(29)    end if
(30)    CheckExecution(OwnTasks, Holds);
(31)  end for
(32)  for ( $\alpha \in \text{OwnTasks}$ ) do
(33)    if ( $\alpha$  is complete) then
(34)      OwnTask.remove( $\alpha$ );
(35)      for ( $r \in \text{ChkUnneed}(\text{OwnTask}, \text{Holds})$ ) do
(36)        Hold.remove( $r$ );
(37)        SendToNeighbour(CreateTokens( $r$ ));
(38)      end for
(39)    end if
(40)  end for
(41) end while

```

Figura 2.3.1: Algoritmo del proceso general de la decisión de comunicación de los agentes

La función encargada de pasar un token de un agente a su vecino, puede ser implementado para que sea aleatoriamente o de manera inteligente. En [6] hacen uso de los dos enfoques.

El modelo propuesto en [6], fue reproducido en cuatro dominios típicos de aplicación: búsqueda y rescate urbano, control de búsqueda de municiones en áreas extensas, RoboCup y estrategias de juego y planeación de equipos de muchos agentes. El experimento o simulación se hizo haciendo uso del algoritmo de paso de tokens de manera inteligente, probando cada dominio en las cuatro diferentes topologías (red aleatoria ER, red en grilla, red de mundo pequeño WS y red libre de escala AB) las cuales se desarrollaron en dos grupos experimentales. En el primero se hicieron fluctuaciones del tamaño del sistema multi-agente entre 50 y 500 con un promedio de 4 vecinos por agente, obteniendo como resultado que en la mayoría de los dominios con topologías de redes aleatorias ER y de mundo pequeño WS superaron a la de red de grilla. Y en algunos dominios la topología libre de escala puede superar a las otras tres topologías. Por otra parte, en dominios tales como RoboCup usar una estructura de red libre de escala mostró una generación mayor de nodos, pero un muy bajo nivel de las recompensas recibidas. Para el segundo grupo experimental fue establecido el sistema en un tamaño fijo de 100 agentes, pero con variaciones en el número promedio de vecinos de entre 2 a 10 por cada agente. Sus resultados mostraron que en promedio la mayoría de las topologías de red incrementan su rendimiento cuando mantienen un promedio de cuatro vecinos en lugar de un promedio de solo dos. A excepción de la estructura de red en grilla para la cual, al aumentar el número promedio de vecinos, aumenta su rendimiento, para el resto de topologías el efecto es inverso. Lo que encontraron fue que, en sistemas típicos de red, los efectos de topologías de pequeño mundo ayudan de manera uniforme a la coordinación

en redes, mientras que, un alto grado nodal propio de los efectos de una topología libre de escala podría reducir la distancia promedio de la red ayudando a mejorar el rendimiento, pero también puede dar lugar a la congestión de la red en los nodos centrales lo cual puede agravar la eficacia de la coordinación.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Sistemas complejos

No existe una definición estándar o formal que pueda describir lo que un sistema complejo es en un simple enunciado, por lo tanto, se recurre a definiciones de algunos autores y se enumeran algunas de sus características más importantes.

La definición propuesta en [7] dice que; "Los sistemas complejos están formados por un conjunto grande de componentes individuales que interactúan entre sí y que pueden modificar sus estados internos como producto de tales interacciones. Tales sistemas pueden ser estructuralmente simples, aunque tal simplicidad no impide que exhiban comportamientos dinámicos diversos y no triviales. Los sistemas complejos pueden situarse en regímenes críticos caracterizados por la presencia de fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles. Esta situación de criticalidad puede alcanzarse de manera espontánea y sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema; se habla entonces de un proceso auto organizado. El proceso de interacciones puede generar comportamientos colectivos y globales. Es decir, conductas que no están definidas en los elementos individuales, pero que emergen como un proceso colectivo y que no pueden ser reducidas ni explicadas tomando aisladamente los elementos constituyentes" (Octavio Miramontes).

"En un sentido general, el adjetivo "complejo" describe un sistema o componente que por diseño o función; o ambos, es difícil de comprender o de verificar. [...] la complejidad está determinada por factores tales como el número de componentes y el intrincado modo de comunicación entre ellos, el número y complejidad de las ramas condicionales, el grado de anidación, y los tipos de estructuras de datos" [8].

Por otra parte, "la teoría de la complejidad indica que un sistema complejo es una vasta población de unidades que pueden auto organizarse en uniones que generan patrones, almacenan información, y se acoplan para la toma de decisiones colectivas" [9].

A continuación, se recopilan las características más importantes y comunes a todos los sistemas complejos [10]:

1. Están compuestos de muchas partes que interaccionan entre sí.
2. Cada parte tiene su propia estructura interna y está encargada de llevar a cabo una función específica.
3. Lo que ocurre a una parte del sistema afecta de manera altamente no lineal a todo el sistema.
4. Presentan comportamientos emergentes, de tal manera que el todo no es la simple suma de sus partes.

3.2. Coordinación en sistemas complejos

El diccionario de la Real Academia Española (RAE) define coordinación como la acción y efecto de coordinar o coordinarse, es decir unir dos o más cosas de manera que formen una unidad o un conjunto armonioso, o también como dirigir y concertar varios elementos. Si bien esta definición provee un concepto general, en el ámbito de los sistemas complejos su comprensión va más enfocada hacia estructuras relacionales y de interacciones. Así pues, la coordinación en sistemas complejos constituye un proceso esencial e indispensable en el funcionamiento y emergencia de fenómenos colectivos; a través de múltiples interacciones no lineales entre sus agentes individuales o elementos constituyentes, los cuales obedecen reglas simples [11]. Es decir que la coordinación en sistemas complejos es la relación de interacciones entre agentes basadas en reglas simples que forman algún tipo de fenómeno colectivo.

3.3. Redes complejas

Dado que los sistemas complejos están presentes tanto en la naturaleza como en los sistemas artificiales, y debido a que las redes complejas pueden ser consideradas como esquemas de estos, pues aparecen en un amplio rango de escenarios; desde sistemas sociales y ecológicos hasta biológicos y tecnológicos [12], es de mucha importancia detallar su definición y sus características.

3.3.1. Definición

”Las redes complejas son conjuntos de muchos nodos conectados que interactúan de alguna forma. A los nodos de una red también se les llama vértices o elementos y los representaremos por los símbolos v_1, v_2, \dots, v_N , donde N es el número total de nodos en la red. Si un nodo v_i está conectado con otro nodo v_j , esta conexión se representa por una pareja ordenada (v_i, v_j) .” [10]

Matemáticamente una red se define a través de la teoría de grafos [10], [13] como: Un grafo simple es una pareja ordenada $G = (V, E)$, tal que G consiste de un conjunto no vacío de nodos $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, y un conjunto $E = \{(v_i, v_j)\} \subset V \times V$ de elementos distintos de V . Donde cada pareja ordenada (v_i, v_j) se llama conexión dirigida, enlace o arista del nodo v_i al nodo v_j . Se dice que un grafo o red es no dirigida si para cada arista $(v_i, v_j) \in E$ también existe la arista (v_j, v_i) . De lo contrario la red se denomina como dirigida.

3.3.2. Tipos de modelos de redes

Las definiciones anteriores describen de manera general a las redes complejas cuando es un grafo compuesto de muchos nodos y aristas, pero no se ajusta para describir detalladamente las características de las redes complejas que existen en el mundo real y como estas llegan a ser tan complejas. Es por eso que se han propuesto grafos aleatorios (Random Graphs) para solventar esta limitación en el estudio de redes. Los grafos aleatorios describen la complejidad a través de reglas locales o probabilísticas de cómo se conectan los nodos entre ellos [14].

Modelo Erdős-Rényi [12], [15]

El modelo más básico de una red aleatoria fue propuesto por Erdős y Rényi a finales de las décadas de los 50, el cual dice que se comienza considerando un conjunto grande de n nodos aislados y con una cierta probabilidad $p > 0$ (la misma siempre), de ser conectados dos nodos por una arista o enlace. El resultado es una red que puede ser expresada únicamente por el número de nodos y aristas la cual puede ser denotada como $G(n, m)$ donde m es el número de enlaces o aristas. Este modelo consiste en una red que crece a partir de n nodos conectados aleatoriamente a través de m aristas, excluyendo conexiones múltiples y ciclos.

Algunas propiedades de redes ER son:

- Número medio de aristas por nodo: $\bar{m} = \frac{n(n-1)p}{2}$.
- Grado medio nodal: $\bar{k} = (n-1)p$.
- Los grados siguen una distribución de Poisson de la forma: $p(k) = \frac{e^{-\bar{k}} \bar{k}^k}{k!}$.
- La longitud de camino promedio para n muy grande: $\bar{l}(n) = \frac{\ln(n) - \gamma}{\ln(np)} + \frac{1}{2}$. Donde $\gamma \approx 0,577$ es la constante Euler-Mascheroni.
- El coeficiente promedio de clustering: $\bar{C} = p = \delta(G)$.

Modelo Watts-Strogatz [12]

El modelo de red aleatoria propuesto en 1998 por Watts y Strogatz mejor conocido como redes de mundo pequeño del inglés (Small World) se basa en el concepto de que por cada par de personas en el mundo; estas se ubican en promedio únicamente a seis grados de separación. Es decir que puedes contactar a otra persona en cualquier lado del mundo tan solo a través de las amistades de tus amistades más cercanas en un promedio de 6 conexiones.

El modelo es construido a través de los siguientes pasos:

Sea n el número de nodos y k un número par.

1. Se sitúan todos los nodos en un círculo.
2. Se conecta cada nodo a sus $k/2$ vecinos más cercanos en el sentido de las manecillas del reloj, como también su otra mitad de vecinos cercanos ubicados en contra del sentido de las manecillas.
3. Con una probabilidad p se reconectan algunos de los enlaces en el grafo circulante obtenido anteriormente.

Para $k > 2$ la red se llena de triángulos, lo cual hace que tenga un alto coeficiente de clustering. El coeficiente promedio de clustering o agrupamiento para esta red está dado por: $\bar{C} = \frac{3(k-2)}{4(k-1)}$, lo cual significa que para valores grandes de k , $\bar{C} = 0,75$. La longitud del camino promedio entre nodos opuestos es muy grande hasta el segundo paso, es por eso que el tercer paso es muy importante, pues la reconexión permite que la longitud del camino promedio decrezca rápidamente, pero manteniendo un alto coeficiente de clustering. $\bar{l} = \frac{(n-1)(n+k-1)}{2kn}$.

”Los modelos de mundo pequeño, tienen sus raíces en las redes sociales no virtuales, donde la mayoría de la gente es amiga de sus vecinos físicos inmediatos, por ejemplo, los vecinos en la misma calle o compañeros en la misma oficina. Por otro lado, muchas personas tienen un par de amigos que están lejos, en la distancia, como amigos de otros países, que están representados por las conexiones de largo alcance creadas por el procedimiento de reconexión que hemos visto” [15].

Modelo Barabasi-Albert [15]

En los anteriores modelos existen limitaciones que inhiben la descripción de una característica muy importante presente en las redes del mundo real. Las redes planteadas inicialmente son estáticas es decir no presentan características de crecimiento nodal; pues, si bien los enlaces se pueden añadir o reconectar, el número de nodos nunca varía durante el proceso de formación. Para explicar y representar redes con crecimiento Barabasi y Albert propusieron el modelo que lleva sus apellidos, también conocido como modelo libre de escala (Scale-Free) el cual se fundamenta en la idea de que un nuevo nodo se conecta con mayor probabilidad a un nodo popular, es decir, al nodo que más conexiones presenta. A este fenómeno anterior lo denominaron con el nombre de enlace preferencial.

El mecanismo para la generación de este modelo se compone de la siguiente manera: inicialmente se tiene un número pequeño m_0 de nodos conectados aleatoriamente, por lo menos con grado 1 en cada uno de los nodos. Luego, en cada paso se agrega un nuevo nodo u con una probabilidad \prod_i de conectarse a un nodo i ya existente dependiendo del grado k_i de este, así: $\prod_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$.

Luego de t pasos sucesivos de adicionar nodos se obtiene una red libre de escala con $N = t + m_0$ nodos y mt aristas. Una propiedad de este modelo es que su distribución de grados no experimenta alteraciones a pesar del crecimiento o aumento de la escala de la red y esta sigue una ley de potencias con exponente -3, lo que quiere decir que la probabilidad $p(k) = k^{-3}$ de encontrar un nodo con k aristas es proporcional a k^{-3} . Además, su longitud del camino promedio es relativamente menor y el coeficiente de clustering es mucho mayor a los modelos anteriores de redes aleatorias cuando tienen el mismo número de nodos y el mismo grado medio.

3.4. Ambiente

Un ambiente en un modelo basado en agentes consiste en condiciones y hábitats que rodean a los agentes mientras estos se desenvuelven dentro de este. Es decir, es el escenario o paisaje donde viven los agentes; el cual puede afectar las decisiones de los agentes y viceversa. Existen varios tipos de ambientes, entre los cuales pueden ser geométricos, basados en red o extraídos de datos reales.

3.5. Agentes

Los agentes son objetos computacionales que representan las unidades básicas de un modelo basado en agentes y por lo general residen sobre un ambiente. Estos se definen a través de sus propiedades y acciones. Las propiedades de un agente describen el estado actual de este; por ejemplo, su posición, tamaño, color, etc. Mientras que sus acciones o también llamadas comportamientos son las formas mediante las cuales un agente puede modificar los estados del ambiente donde se desarrolla, de otros agentes o de él mismo.

3.6. Modelo basado en agentes

Un modelo basado en agentes es una representación computacional que permite simular muchos o sino la mayoría de fenómenos del mundo real, a través del modelado de agentes, de ambientes y de las descripciones de las interacciones agente-agente y agente-ambiente. Un modelo basado en agentes se distingue sobre otros tipos de modelos

porque en estos se pueden representar individuos heterogéneos, en contraste, por ejemplo, con la asunción de homogeneidad de los modelos basados en ecuaciones. Además, la relación entre los modelos basados en agentes y el mundo real es de mayor similitud, lo cual permite que sea comprendido por la mayoría de personas más fácilmente que otros tipos de modelamientos.

Capítulo 4

Análisis de la coordinación e integración sobre la red del modelo base

En este capítulo se describen dos enfoques encontrados en la literatura sobre estudios de coordinación en redes complejas. Además se propone una definición de coordinación e integración como base para el análisis de las redes generadas por el modelo propuesto en [1]. Se presenta un análisis estructural de la integración y la coordinación; es decir a través de propiedades de redes y un análisis dinámico de la coordinación basado en la difusión de información en la red reproduciendo métodos y modelos relacionados que permitieron comparar los resultados frente a redes aleatorias.

4.1. Revisión de literatura sobre coordinación en redes complejas

A pesar de la escasez de material y ambigüedad del término coordinación en redes, se pudo encontrar que en la literatura se ha abordado la coordinación en éstas estructuras a través de la teoría de juegos, por ejemplo en el trabajo propuesto en [16] analizan la coordinación implementando un juego de coordinación (Stag Hunt) donde cada nodo de la red juega una estrategia contra la de sus vecinos (estrategias que por lo general si coinciden tienen recompensas o ganancias mejores que las hacen dominantes a cualquier otra configuración de estrategias). En éste estudio probaron dicho juego de coordinación en tres tipos diferentes de redes: locales, aleatorias y de mundo pequeño; encontrando que en la última la tendencia hacia la estrategia de recompensa dominante se presenta de manera más frecuente que en las demás. Lo que pareciera indicar que las redes de mundo pequeño tienen una estructura que permite el surgimiento de la coordinación. Sin embargo en el análisis presentado en [17] estudian la coordinación también a través de juegos de coordinación sobre redes pero llegan a la conclusión de que la topología de la red no parece tener ningún efecto en propiciar la coordinación, pues en los casos de estudio obtuvieron resultados dimórficos no concluyentes.

4.2. Descripción del modelo base

El modelo propuesto en [1] se compone por un número definido de agentes (personas) y una cantidad fija de agentes (documentos) para edición, las personas se relacionan unas con otras dado un tiempo determinado de simulación.

Cada agente persona del modelo tiene una capacidad de edición k , la cual le permite colaborar en k documentos por tick o unidad de tiempo de la simulación. A su vez los agentes persona cada vez que editan hacen una votación por el documento editado permitiendo que a través del tiempo los documentos con mayores calificaciones sean seleccionados por otros agentes. Por lo tanto si existe un link entre dos o más agentes persona, significa que éstos han colaborado en un mismo documento. La red generada por el modelo base corresponde a una red con propiedades de mundo pequeño.

4.3. Definiciones propuestas

El análisis del modelo base se enmarca y fundamenta sobre la teoría de grafos y el análisis de redes las cuales proveen herramientas para observar, experimentar e interpretar medidas de red que permitan dar luz a uno de nuestros objetivos; que es la identificación de coordinación e integración en el modelo base. Por lo tanto, es imperativo especificar de antemano cuál es nuestra definición de coordinación e integración sobre redes. A continuación se definen dichos términos que formalizan el enfoque del trabajo de análisis de la red.

4.3.1. Integración

La integración será definida como la formación de grupos de intereses comunes; es decir que la integración se puede medir como la presencia de subgrafos completos o cliques en la red que denoten una forma de evidenciar el surgimiento de este mecanismo. Además también la formación de una componente de red única, por lo tanto que no hayan islas de nodos aisladas del resto de componentes y solo se cuente con una red única donde exista al menos una ruta entre cada par de nodos.

4.3.2. Coordinación

La coordinación en la red será definida como la capacidad de formar ciclos de realimentación o flujos de comunicación de tal forma que la mayoría de nodos puedan recibir información oportuna. Por lo tanto, la coordinación será entendida desde el punto de vista de que tan bien conectada está la red para concretar propósitos comunes.

4.4. Análisis estructural de la coordinación e integración

En base a las definiciones propuestas anteriormente, se plantea el análisis estructural de forma que se puedan medir o calcular propiedades de redes tales como número de cliques, ciclos y demás que sirvan como herramienta para evidenciar si la red generada por el modelo base muestra signos de coordinación e integración.

4.4.1. Método

Para el análisis se utilizó el software Wolfram Mathematica 11 como herramienta para cargar las redes generadas por el modelo base y explotar su lenguaje de programación y algunos de los métodos relevantes de análisis de redes que trae consigo. A continuación se describen los experimentos realizados.

Experimento 1: se cargó una red generada por el modelo base compuesta de 300 nodos, capacidad de edición igual a 3 y 3000 unidades de tiempo de simulación con el objetivo de observar la presencia de nodos hubs.

Experimento 2: se cargaron diez redes correspondientes a una simulación de 500 nodos, capacidad de edición 5 y variando el tiempo de la simulación desde 500 hasta 5000 en intervalos de 500 unidades de tiempo o ticks con el objetivo de observar la integración de la red.

Experimento 3: Se cargaron 20 redes generadas por el modelo base con las siguientes configuraciones: numero de nodos 1000, tiempo de simulación 10000 y capacidad de edición 5. Se calculó el promedio de conexiones para generar 100 redes aleatorias con las mismas características con el objetivo de observar la coordinación en la red.

4.4.2. Análisis

Para el análisis del experimento 1 se utilizó el enfoque de caracterización de nodos propuesto en [18] el cual a través de la identificación de comunidades en la red; permite clasificar los nodos de acuerdo a las relaciones que poseen con los nodos pertenecientes a su misma comunidad con los de comunidades externas. Los nodos se clasifican como nodos no hubs y nodos hubs. La siguiente es una tabla con las caracterizaciones de los nodos:

- Nodos no Hubs
 - (R1) ultraperiféricos: Tienen enlaces solamente con nodos de su misma comunidad
 - (R2) periféricos: Tienen al menos 60 % de enlaces con nodos de su misma comunidad
 - (R3) conectores: La mitad de sus enlaces son con nodos de su misma comunidad
 - (R4) sin parentesco: Tienen menos del 35 % de sus enlaces dentro de su misma comunidad
- Nodos Hubs
 - (R5) Provinciales: Tienen al menos 5/6 de sus enlaces con nodos de su comunidad
 - (R6) Conectores: Tienen enlaces al menos con la mitad de los nodos de su comunidad
 - (R7) Sin parentesco: Tienen menos de la mitad de sus enlaces dentro de su misma comunidad

El análisis de la integración y la coordinación en la red correspondientes a los experimentos 2 y 3 se ejecutaron como un estudio comparativo con redes aleatorias compartiendo las mismas dimensiones de número de nodos y número de enlaces. En el análisis del experimento 2 se midió la integración general del modelo en la formación de una sola componente, observando como varia la cantidad de componentes de red aisladas conforme el tiempo avanza. También se calculó la cantidad de subgrafos completos es decir de grupos de intereses comunes y como es la distribución de ellos en relación al tamaño de los grupos en ambas redes.

En el experimento 3 nos enfocamos en la definición propuesta de coordinación; por consiguiente el análisis busca determinar la conectividad como propiciador de la coordinación en la red y se enmarca en la idea de que ésta puede estar influenciada por la presencia de ciclos de refuerzo, como aparentemente se pronostica en [19] respecto a la red del sistema nervioso del gusano *C. Elegans*. En 2008, Bagrow [20, p. 119] argumenta que la distribución estadística de estos ciclos permiten definir la dinámica de los sistemas que se ejecutan sobre la red, debido a la realimentación. Pero que un problema es que la cantidad de ciclos, incluso en una red de tamaño moderado, es tan grande que descubrirlos es intratable computacionalmente. [...] En general, la densidad de los ciclos tiende a aumentar a medida que se incorporan más enlaces en una red, surgiendo ciclos más largos antes que los más cortos. Por lo tanto, la densidad de ciclos de diferentes longitudes puede usarse como un indicador de la conectividad entre cualquier subconjunto de nodos. En otras palabras, cuanto mayor es el número de ciclos cortos entre un subconjunto de nodos, más conectados están entre ellos. Basado en lo anterior el análisis se planteó e implementó de manera que se pudiera calcular el total de ciclos de longitudes 3, 4 y 5 en todas las redes cargadas mediante la aproximación

propuesta en [21, p. 294] para sacar el promedio de las cantidades de dichos ciclos para ser comparados con los encontrados de igual forma en redes aleatorias.

4.4.3. Resultados

Experimento 1: En la caracterización de los nodos de la red se identificaron cuatro comunidades las cuales permitieron la clasificación de los nodos de la siguiente forma: de los 300 nodos de la red 3 fueron clasificados como nodos no hubs ultra periféricos, 125 se clasificaron como nodos no hubs periféricos y 168 fueron clasificados como nodos no hubs conectores. Por último los 4 nodos restantes fueron caracterizados como nodos hubs conectores. (ver Figura 4.4.1)

Esto puede indicar que los 4 nodos hubs conectores pueden cumplir papeles importantes en la red pues estos debido a su caracterización podrían pasar mensajes más eficientemente, ya que podrían ser puentes de comunicación entre nodos de su comunidad y de otras comunidades convirtiéndolos en candidatos a coordinadores de la red. Además, al ser la mayoría de los nodos no hubs caracterizados como periféricos y conectores; ésto puede decirnos que la integración es mucho mayor entre ellos y hacia otros nodos de comunidades distintas.

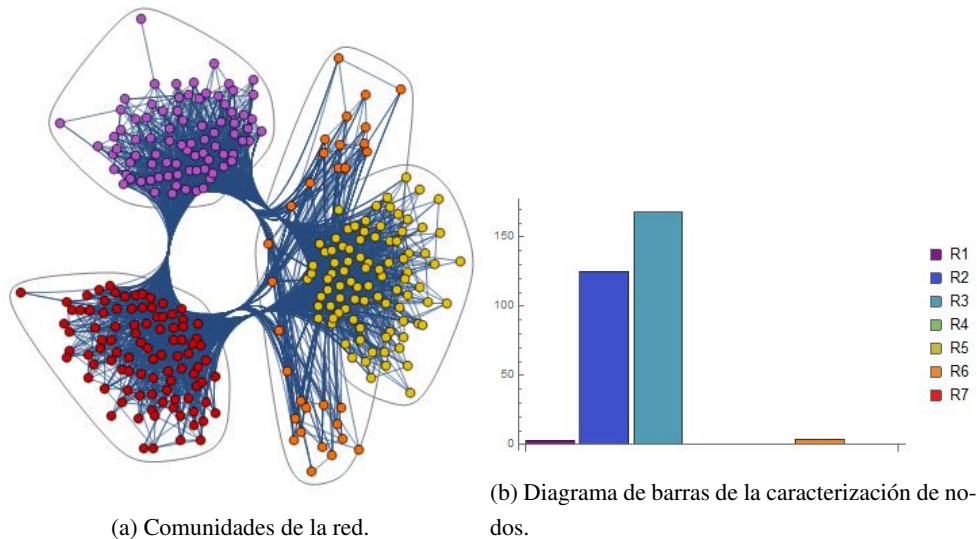


Figura 4.4.1: Caracterización de nodos de la red

Experimento 2: En la observación de la evolución de la red en el tiempo se comprobó que para etapas tempranas de la simulación la red aún no alcanza a integrar todos los nodos, pero conforme el tiempo aumenta los nodos confluyen hacia una única componente de red interconectada (ver Figura 4.4.2). En la Figura 4.4.2 la línea amarilla y azul representan el comportamiento de la red aleatoria y la del modelo respectivamente.

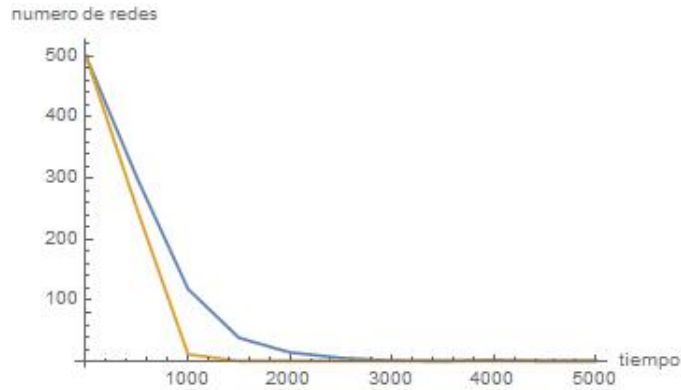


Figura 4.4.2: Componentes de red vs tiempo

En la observación comparativa de la red del modelo con las redes símiles aleatorias a través del tiempo se encontró que la red del modelo siempre supera en diversidad de tamaño de los grupos o cliques, como también en la densidad o cantidad total de cliques, pero solo a partir de un tiempo dado ya que al haber tanta diversidad en el tamaño de las agrupaciones; pues es evidente que las cantidades de los mismos deben ser repartidas entre todos los grupos haciendo que no crezcan tan rápido como en la red aleatoria. En las figuras 4.4.3 y 4.4.4 se pueden observar los histogramas de los cliques encontrados y sus densidades en diferentes tiempos de la simulación. El eje X representa el tamaño de los cliques y el eje Y representa la densidad o cantidad de cliques.

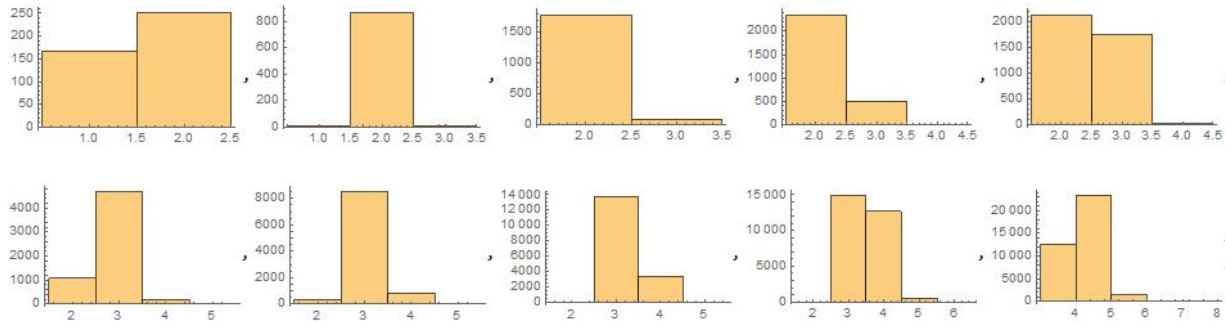


Figura 4.4.3: Histograma de densidad de cliques en redes aleatorias

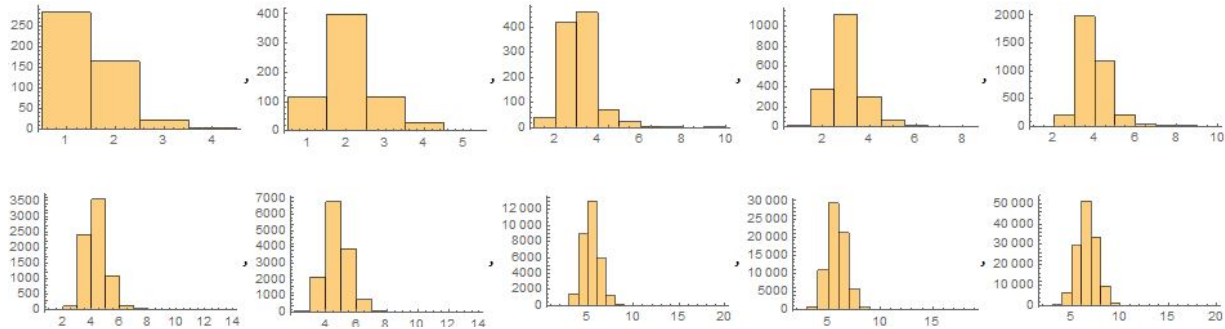


Figura 4.4.4: Histograma de densidad de cliques en redes del modelo

Experimento 3: El conteo de ciclos de longitud 3, 4 y 5 en la red generada por el modelo fue sustancialmente

superior en todas las configuraciones en comparación con las contabilizadas en la red aleatoria. A continuación la Tabla 4.4.1 muestra la densidad de los ciclos obtenidos:

| Red | Promedio de Cantidades | | |
|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|
| | Ciclos longitud 3 | Ciclos longitud 4 | Ciclos longitud 5 |
| Aleatoria | 610832 | 70490100 | 8667950000 |
| Modelo | 1377440 | 186821000 | 29164200000 |

Tabla 4.4.1: Cantidades de ciclos de longitudes 3, 4 y 5

De la tabla anterior obtuvimos las variaciones porcentuales de las cantidades de ciclos de longitudes 3, 4 y 5 en la red aleatoria respecto a las cantidades de la red generada por el modelo, siendo de 125.50 %, 165.03 % y 236.46 % respectivamente.

4.4.4. Conclusiones

La presencia de mecanismos de integración en la red del modelo bajo la definición propuesta es positiva. En comparación con la red aleatoria se evidencia mucha más variedad en el tamaño de los grupos y de la cantidad de los mismos. Además, parece seguir una distribución normal o Gaussiana; pues en los histogramas parece que en promedio la mayor proporción en cantidad de grupos pertenece a los grupos de tamaño promedio. Mientras que los grupos de tamaños inferiores y superiores tienden a ser muy escasos. Por otro lado, la formación de comunidades y la caracterización de los nodos parece evidenciar también la alta integración de la mayoría de sus nodos dentro y fuera de sus comunidades.

Respecto a la coordinación, también se evidenció una notable diferenciación en comparación con la red aleatoria. Dado el enfoque que tomamos de [20], se puede afirmar que la red generada por el modelo tiene indicadores mucho más altos en cuanto a la conectividad de sus nodos frente a los de la red aleatoria. Lo cual bajo nuestra definición de coordinación daría indicios positivos de la presencia de este mecanismo. No obstante, se sugeriría explorar otras opciones como el modelo de umbral y cascadas de información para complementar la identificación de coordinación bajo una perspectiva más de la dinámica de la red.

4.5. Análisis dinámico de la coordinación

Dada la definición de coordinación planteada en secciones anteriores; donde la coordinación en la red se atiende desde el punto de vista de que tan bien conectada está, se explora la dinámica de la red para enviar información y evaluar su rendimiento en cuanto a tiempo y tamaño de adopción de ésta en comparación con redes aleatorias.

4.5.1. Método

Para el análisis de la difusión de información en la red se utilizaron dos modelos consultados y obtenidos de la página web <https://ccl.northwestern.edu/> (Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling) la cual reúne gran cantidad de modelos y estudios realizados con la herramienta NetLogo. Los dos modelos utilizados se basan en el modelo de umbral y cascadas de información. Además éstos fueron modificados para poder observar lo planteado en este análisis.

Las redes cargadas para los experimentos fueron 3 generadas por el modelo base con las siguientes configuraciones:

- **Configuración 1:** Numero de personas: 100, Ticks: 1000, Capacidad de edición: 5. Generando un tamaño de red que clasificaremos como **red tipo 1**: Número de nodos: 100, Número de enlaces: 820.
- **Configuración 2:** Numero de personas: 500, Ticks: 5000, Capacidad de edición: 5. Generando un tamaño de red que clasificaremos como **red tipo 2**: Número de nodos: 500, Número de enlaces: 18022.
- **Configuración 3:** Numero de personas: 1000, Ticks: 10000, Capacidad de edición: 5. Generando un tamaño de red que clasificaremos como **red tipo 3**: Número de nodos: 1000, Número de enlaces: 73249.

Para cada red generada por el modelo se generó a través de la herramienta Mathematica redes aleatorias con las dimensiones clasificadas en los tres tipos de redes. Es decir que por cada red generada por el modelo base existirá una red aleatoria de su mismo tipo.

Modificaciones de los modelos

El primer modelo (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/diffusion>) simula la difusión de información sobre una red generada a partir del modelo preferential-attachment es decir una red libre de escala. La difusión se puede configurar ajustando las variables constant-effect, endogenous-effect y cohesion-effect. Los cambios que se introdujeron fueron la opción de cargar cualquier tipo de red al modelo, ajustar la ejecución de la simulación para que ésta se detenga una vez que todos los nodos de la red hayan adoptado la información. Se creó también un procedimiento experimento que lo que hace es recibir la cantidad de muestras que se piensan hacer; para al final obtener el promedio de ticks que le toma a la red difundir totalmente la información.

El segundo modelo propuesto en (https://ccl.northwestern.edu/2016/ZhuoChen_Thesis.pdf) no es una simulación típica en la que hay un tiempo de ejecución; el modelo es una mezcla de los modelos de cascadas de información y umbral, éste tiene como objetivo observar los rendimientos de la difusión en términos del tamaño de adopciones; es decir, el numero de nodos que adoptan la información a través de la selección del número de nodos adoptantes iniciales y de nodos líderes de opinión que tienen una gran importancia en la difusión, además bajo la configuración de las respectivas probabilidades de adopción de los nodos comunes y de los líderes de opinión. El modelo ya estaba muy bien diseñado para generar todo tipo de redes y además de cargarlas de un archivo externo. Los cambios que se realizaron fueron agregar un procedimiento experimento que permitiera correr la simulación una cantidad de veces especificada por cada configuración de nodos adoptantes iniciales empezando desde 1 hasta un límite establecido. El procedimiento genera una lista con los promedios de tamaño de adopción para cada número de nodos adoptantes iniciales. Es decir, que el valor en una posición n de la lista significa el promedio de adopciones para una configuración de n nodos adoptantes iniciales.

Experimento 1

Para este experimento se utiliza el primer modelo descrito anteriormente cargando las redes de tamaños correspondientes a los tipos 1, 2 y 3 del modelo y de las similares aleatorias con el propósito de observar y comparar los rendimientos en cuanto al tiempo que se tarda la información en llegar a cada uno de los nodos de la red. Las simulaciones se corrieron con los siguientes valores del modelo; constant-effect: 0, endogenous-effect: 0 y cohesion-effect: 2, se eligió esta configuración pues cohesion-effect refleja el efecto de difusión de información enfatizando la sensibilidad que hay entre el agente y sus vecinos, además con un valor bajo para que la difusión no se diera tan rápidamente.

Experimento 2

En este experimento se cargaron las mismas redes utilizadas en el experimento anterior pero sobre el segundo modelo modificado; con el objetivo de observar y comparar los rendimientos de ambas redes respecto al tamaño de la población adoptante de la información emitida inicialmente. Las simulaciones se corrieron con los siguientes valores propios del modelo:

$$P_{op} : 0,2,$$

$$P_n : 0,1$$

seed-nodes-preference: Degree Discount

Donde P_{op} es la probabilidad de propagación de los líderes de opinión, P_n es la probabilidad de propagación de los nodos comunes y seed-nodes-preference indica el método con el cual se seleccionan los nodos adoptantes iniciales. Se escogió el método Degree Discount debido a que fue el método que mejor rendimiento obtuvo en la mayoría de redes probadas por el autor del modelo en [22].

4.5.2. Análisis

Para el análisis del experimento 1 se tomaron de 100 en 100 muestras (es decir ejecuciones del modelo) hasta llegar a 1000 muestras por cada tipo y se calcularon los tiempos promedios en alcanzar una difusión completa de la información en la red. Por lo tanto se consiguió el tiempo promedio de difusión para las siguientes muestras (100, 200, 300, ..., 900, 1000) para al final sacar un promedio general que se comparó con los promedios obtenidos de las redes aleatorias en cada una de las tres tipos de redes antes declaradas.

En el caso del experimento 2 se tomaron muestras para cada tipo de red y se calculó el promedio del tamaño de adopciones empezando con un nodo adoptante inicial hasta llegar a 20 adoptantes iniciales. Para las redes tipo 1, se ejecutaron 1000 muestras por cada configuración de adoptantes iniciales. Para las redes tipo 2 se tomaron 100 muestras y 25 para las redes tipo 3. Por último, se obtuvo el promedio general por cada tipo de red y se comparó los rendimientos presentes en las redes generadas por el modelo y las aleatorias.

4.5.3. Resultados

Experimento 1: A continuación se presentan los resultados obtenidos de los promedios en tiempos de difusión completa de información, en redes aleatorias y las redes generadas por el modelo base:

| Red tipo 1 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 51,87 | 48,63 | 49,50 | 47,83 | 48,25 | 48,30 | 48,32 | 48,92 | 48,72 | 49,01 |

Tabla 4.5.1: Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 1

| Red tipo 2 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 9,88 | 9,96 | 10,00 | 9,93 | 9,88 | 9,96 | 9,88 | 9,92 | 9,94 | 9,91 |

Tabla 4.5.2: Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 2

| Red tipo 3 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 6,58 | 6,45 | 6,52 | 6,47 | 6,44 | 6,44 | 6,49 | 6,49 | 6,47 | 6,49 |

Tabla 4.5.3: Promedios de tiempo en red aleatoria tipo 3

| Red tipo 1 | Modelo base | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 117,99 | 116,02 | 114,19 | 113,98 | 114,54 | 112,88 | 115,18 | 112,93 | 114,17 | 114,79 |

Tabla 4.5.4: Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 1

| Red tipo 2 | Modelo base | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 38,82 | 37,98 | 36,51 | 37,73 | 36,19 | 37,83 | 37,90 | 37,34 | 37,61 | 37,64 |

Tabla 4.5.5: Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 2

| Red tipo 3 | Modelo base | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cantidad de muestras | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Tiempo promedio | 21,12 | 21,31 | 21,40 | 21,11 | 21,56 | 21,26 | 21,08 | 20,99 | 21,82 | 21,05 |

Tabla 4.5.6: Promedios de tiempo en red generada por modelo base tipo 3

En la siguiente tabla se puede apreciar el promedio de tiempos generales para cada tipo de red.

| Promedio general de tiempos (ticks) | | |
|-------------------------------------|-----------|-------------|
| Red | Aleatoria | Modelo base |
| Tipo 1 | 48,93 | 114,67 |
| Tipo 2 | 9,93 | 37,55 |
| Tipo 3 | 6,49 | 21,27 |

Tabla 4.5.7: Promedio general de tiempos de difusión completa en los tres tipos de redes

Experimento 2: En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos sobre las redes y sus diferentes tipos en cuanto al promedio de tamaño de adopción. Al final se presenta una tabla con el promedio general en cada una de las redes.

| Red tipo 1 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 77,64 | 79,42 | 80,47 | 80,26 | 80,39 | 81,25 | 81,34 | 81,49 | 81,22 | 81,71 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 81,82 | 81,83 | 82,01 | 82,26 | 82,39 | 83,40 | 83,24 | 83,79 | 84,12 | 84,13 |

Tabla 4.5.8: Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 1

| Red tipo 2 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 499,88 | 499,78 | 499,92 | 499,91 | 499,90 | 499,83 | 499,89 | 499,82 | 499,86 | 499,88 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 499,86 | 499,86 | 499,86 | 499,87 | 499,91 | 499,88 | 499,89 | 499,81 | 499,86 | 499,85 |

Tabla 4.5.9: Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 2

| Red tipo 3 | Aleatoria | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |

Tabla 4.5.10: Promedios de tamaño de adopción en red aleatoria tipo 3

| Red tipo 1 | Modelo base | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 75,69 | 76,08 | 75,57 | 75,79 | 76,28 | 76,54 | 76,56 | 76,43 | 76,93 | 76,45 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 76,50 | 77,43 | 76,69 | 77,63 | 77,41 | 77,51 | 78,09 | 78,52 | 78,47 | 78,87 |

Tabla 4.5.11: Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 1

| Red tipo 2 | Modelo base | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 492,68 | 492,56 | 492,54 | 492,53 | 492,65 | 492,85 | 492,84 | 492,63 | 493,16 | 492,85 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 493,05 | 492,72 | 492,78 | 492,75 | 493,34 | 492,77 | 493,07 | 492,31 | 492,57 | 492,81 |

Tabla 4.5.12: Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 2

| Red tipo 3 | Modelo base | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Adoptantes iniciales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tamaño promedio de adopción | 997,36 | 997,72 | 997,04 | 997,04 | 996,64 | 997,6 | 997,24 | 996,8 | 997,24 | 997,12 |
| Adoptantes iniciales | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Tamaño promedio de adopción | 997 | 997,6 | 997,36 | 997,2 | 997,2 | 997,72 | 997,24 | 997 | 997,2 | 997,32 |

Tabla 4.5.13: Promedios de tamaño de adopción en red generada por modelo base tipo 3

| Adopción Promedio General | | |
|---------------------------|-----------|--------|
| Red | Aleatoria | Modelo |
| Tipo 1 | 81,71 | 76,97 |
| Tipo 2 | 499,87 | 492,77 |
| Tipo 3 | 1000,00 | 997,23 |

Tabla 4.5.14: Promedio general del tamaño de adopción en los tres tipos de redes

4.5.4. Conclusiones

De los resultados del experimento 1 se pudo observar que en promedio el tiempo de propagación de la información en la totalidad de la red es mucho menor en las redes aleatorias en comparación a las generadas por el modelo base. En ambas redes se evidencia una mejoría en la velocidad de difusión a medida que las redes crecen en número de nodos y enlaces. Aunque la velocidad o tiempo de difusión no está contemplada explícitamente en la definición de coordinación propuesta era interesante conocer estos valores. El mejor desempeño en tiempo de las redes aleatorias puede deberse a su bajo nivel de integración, como se evidenció en el análisis estructural; ya que un nodo al estar menos integrado solo tiene opción de pasar información a unos pocos agentes y cubrir de esa forma más rápido la totalidad de la red.

En lo referente al tamaño promedio de adopción de información del experimento 2 se puede ver que el rendimiento de la red generada por el modelo base es casi igual al de las redes aleatorias; solo por debajo de ésta en unos cuantos nodos, además, se observa como la información alcanza casi la totalidad de los nodos en las redes de mayores dimensiones incluso con un solo nodo inicial adoptante y en general el promedio se mantiene en todas las configuraciones de nodos iniciales adoptantes. Lo anterior coincide con los descubrimientos obtenidos en la tesis [22] en la cual fue desarrollado el modelo 2 utilizado para este análisis, en donde el autor demuestra que el éxito

en la difusión de información se presenta mayoritariamente en redes con niveles de longitud de camino promedio (average path length) y coeficiente de agrupamiento promedio (average clustering coefficient) bajos; características propias de redes aleatorias y de las del modelo base que tiene propiedades de redes mundo pequeño. En la siguiente tabla se pueden apreciar las medidas de las redes utilizadas en las pruebas. Se corrió veinte veces el modelo con las configuraciones 1, 2 y 3 para obtener el promedio de conexiones, las cuales se utilizó para generar por cada configuración cien redes aleatorias para hallar los promedios de coeficiente de agrupamiento (ACC) y de longitud de camino promedio (APL).

| Red - Tipo | ACC | APL |
|----------------------|------------|------------|
| Aleatoria - 1 | 0,155418 | 1,92417 |
| Modelo - 1 | 0,298560 | 2,01099 |
| Aleatoria - 2 | 0,155863 | 1,84420 |
| Modelo - 2 | 0,305242 | 1,86038 |
| Aleatoria - 3 | 0,154347 | 1,84566 |
| Modelo - 3 | 0,302763 | 1,85004 |

Tabla 4.5.15: Promedios de coeficiente de agrupamiento y longitud de camino promedio de los tipos de redes

Es posible que la diferencia casi que duplicada del coeficiente de agrupación promedio de las redes del modelo respecto a las aleatorias sea lo que no le permite rendimientos tales a los de las redes aleatorias pese a que la longitud de camino promedio son similares y bajas en ambas redes; pero en general la difusión en las redes generadas por el modelo son bastante aceptables en términos de tiempo y muy buenas en tamaño de adopción.

Capítulo 5

Modelo propuesto

En este capítulo se presenta el modelo basado en agentes propuesto en este trabajo de grado, de manera que permita observar la emergencia de la coordinación en redes. El modelo está fuertemente basado e inspirado en el trabajo sobre coordinación en redes sociales de conocimiento propuesto en [3] y se intenta aproximar la conformación de la red a través del modelamiento de los mecanismos de integración descritos en él. Los mecanismos son la confianza mutua que debe existir entre dos agentes basada en el principio de reciprocidad. La traducción que es muy importante como puente de comunicación entre agentes heterogéneos que deriva de la importancia de los flujos de información y de la comunicación. Finalmente, la negociación y deliberación que permiten tomar decisiones para un objetivo o fin común.

5.1. Descripción de los mecanismos de integración

Confianza mutua: Este mecanismo está fundamentado en principio sobre la idea de que la comunicación es mucho más fluida entre personas que tienen características comunes. En [3] la confianza es una suma de tres dimensiones que pueden apoyarse, superponerse o contrarrestarse mutuamente; estas son: la confianza basada en el prestigio, la estratégica y la personal. Donde la primera depende de las capacidades y competencias percibidas de los participantes. La segunda depende de expectativas de ganancias mutuas que puede generar la relación y la última que depende de normas, creencias y valores compartidos; es decir, basados en la solidaridad social. Además, en [3] encontraron que muchas veces la confianza se desarrolla transitivamente: es decir que si A confía en B y B confía en C, entonces A confía en C.

Traducción: Este mecanismo se basa en la necesidad de mediar en conflictos de comunicación, es decir que actúa como un puente entre individuos muy diferenciados o con muy baja confianza mutua, que permite agilizar la integración entre ambos grupos para el mejoramiento de los flujos de información [3].

Negociación y deliberación: estos dos mecanismos adquieren importancia debido a que las decisiones toman forma de acuerdos o consensos en la identificación de metas compartidas. Lo anterior genera un efecto disciplinario para alcanzar dichas metas a través de la vigilancia multilateral y la presión de los pares [3].

5.2. Implementación de los mecanismos de integración en el modelo

Dada la descripción previa de los mecanismos de integración, a continuación se presentan las formas como se formuló la implementación de cada uno de ellos en el modelo.

En el modelo propuesto la confianza personal fue implementada por la transitividad mencionada anteriormente a través de las relaciones entre individuos desconocidos pero que tienen vecinos en común. La confianza estratégica y basada por el prestigio fue implementada de manera que los individuos se puedan relacionar con otros; donde a pesar de no ser confiables los unos con los otros aporten mejores capacidades de comunicación o que sirvan de enlaces de comunicación con otros colectivos dadas las expectativas obtenidas por su capacidad de intermediación o traducción.

El mecanismo de traducción se implementó como un atributo propio de cada individuo. La idea que se construyó fue que los traductores surgen dadas las relaciones entre individuos no confiables y funciona de manera acumulativa; pues los traductores reciben un punto adicional a su capacidad de traducción de ser elegidos. Es decir, que si un agente no encuentra con quién generar un vínculo de confianza; éste buscará alguno que tenga capacidades altas de traducción que le represente una expectativa de mejoramiento del flujo de información, lo cual se ajusta a una de las dimensiones de la confianza explicada anteriormente.

Finalmente, el mecanismo de negociación y deliberación en el modelo propuesto está ligado estrechamente al mecanismo de traducción y se implementó de manera que el agente que busca relacionarse con un traductor primero elija al agente que considere posea una buena capacidad de traducción respecto al resto y segundo, ponga a consideración de sus vecinos si el traductor es conveniente. Conveniencia que se explica mas detalladamente en la siguiente descripción del modelo.

5.3. Descripción del modelo

El modelo está compuesto por un conjunto de agentes que representan personas o individuos, donde cada agente persona posee los siguientes atributos: una capacidad de integración k y una capacidad de traducción t . La capacidad de integración es asignada aleatoriamente al inicio de la simulación para cada agente del sistema. Además, dicha capacidad está dada por una capacidad límite (limit-capacity) indicada en la configuración de la simulación; es decir que si la capacidad límite es de n unidades, por lo tanto los agentes tendrán valores de k variando entre 1 y n . La capacidad de traducción inicialmente es configurada en cero para todos los agentes y es a través de las interacciones entre agentes desconocidos o con confianza mutua nula que van adquiriendo mayores puntuaciones de esta capacidad. El sistema permite configurar simulaciones especificando el número de agentes o personas (num-people) y el tiempo de ejecución en ticks como unidad de tiempo de la simulación (stopTime), también es posible configurar el modelo especificando aproximadamente el número de enlaces (nb-of-links) que se quiere tenga la red resultante al final de la simulación. En la Figura 5.3.1 se presenta la interfaz gráfica del modelo Netlogo.

Por cada unidad de tiempo hay un nodo con k posibilidades de generar vínculos con otros agentes. El agente buscará relacionarse con los agentes que ya tienen enlaces con sus vecinos, es decir busca relacionarse con otro agente dada la confianza transitiva generada por su vecino. Si no se da la confianza mutua descrita anteriormente, se busca una relación con algún agente de buena reputación, es decir selecciona uno de los agentes con mayores capacidades de traducción y convoca una votación entre sus vecinos para que ellos deliberen si es conveniente relacionarse con dicho agente o no. Finalmente, en los casos en que el agente seleccionado no tenga aun vínculos con otros agentes, éste decidirá relacionarse con uno que tenga una capacidad de traducción considerablemente atractiva.

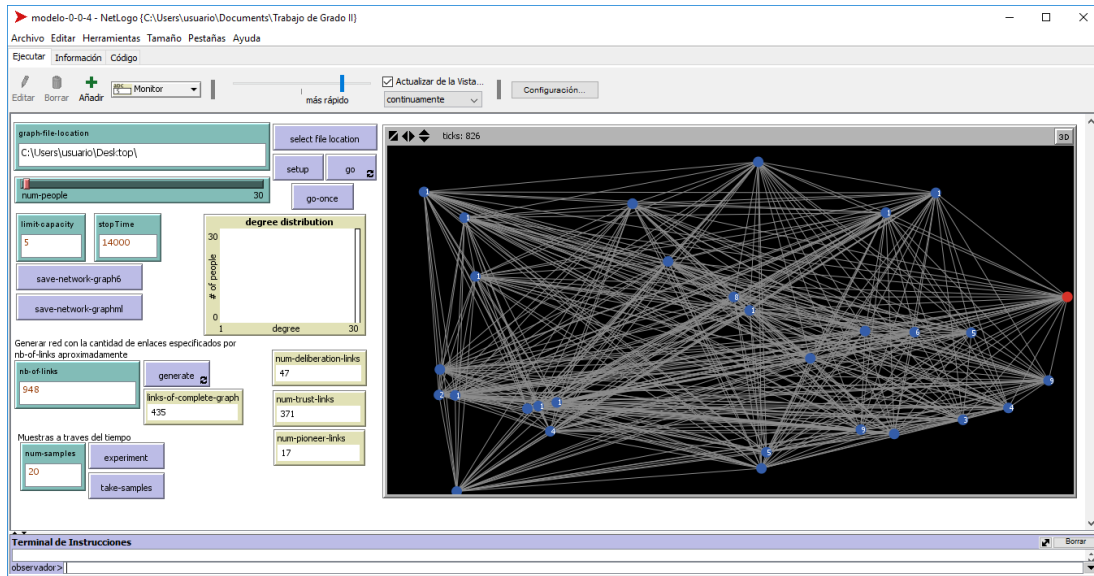


Figura 5.3.1: Interfaz gráfica del modelo

Como es lógico al inicio de la simulación ningún agente tiene vecinos, por lo tanto en las etapas tempranas de la simulación es donde se van definiendo los agentes con mejores capacidades de traducción. Además éstos son vitales para el surgimiento de la integración por el mecanismo de confianza. En la Figura 5.3.2 se presenta el diagrama de flujo del proceso de integración que explica mejor su funcionamiento.

El modelo además también está influenciado por la definición de coordinación propuesta en el capítulo 4, la cual denota la importancia de la densidad de ciclos de longitudes cortas como indicador de dicho fenómeno y potenciador de la densidad de ciclos de mayores tamaños. Por lo tanto la confianza transitiva se ajusta como mecanismo que influye en la aparición de ciclos en la red.

En general se puede declarar que las reglas que siguen los agentes en el modelo son las siguientes:

1. Relacionarse con los conocidos de sus propios vecinos
2. Relacionarse con los agentes de mejores capacidades de traducción

El proceso de deliberación que llevan a cabo los vecinos de un agente x al ser convocados por éste para seleccionar uno de los agentes con mejor capacidad de traducción, se da mediante la votación positiva para dicho traductor. Por lo tanto, la votación es positiva si y solo si; el traductor no está relacionado con la mayoría de los votantes, esto con el fin de convenientemente enriquecer más el círculo de amistades; ya que si éste es foráneo a la mayoría de vecinos, entonces se abren mayores posibilidades de conexión con agentes de otros círculos por la confianza que se establece posteriormente a través de la relación adquirida. El diagrama de flujo del proceso de deliberación se ilustra en la Figura 5.3.3.

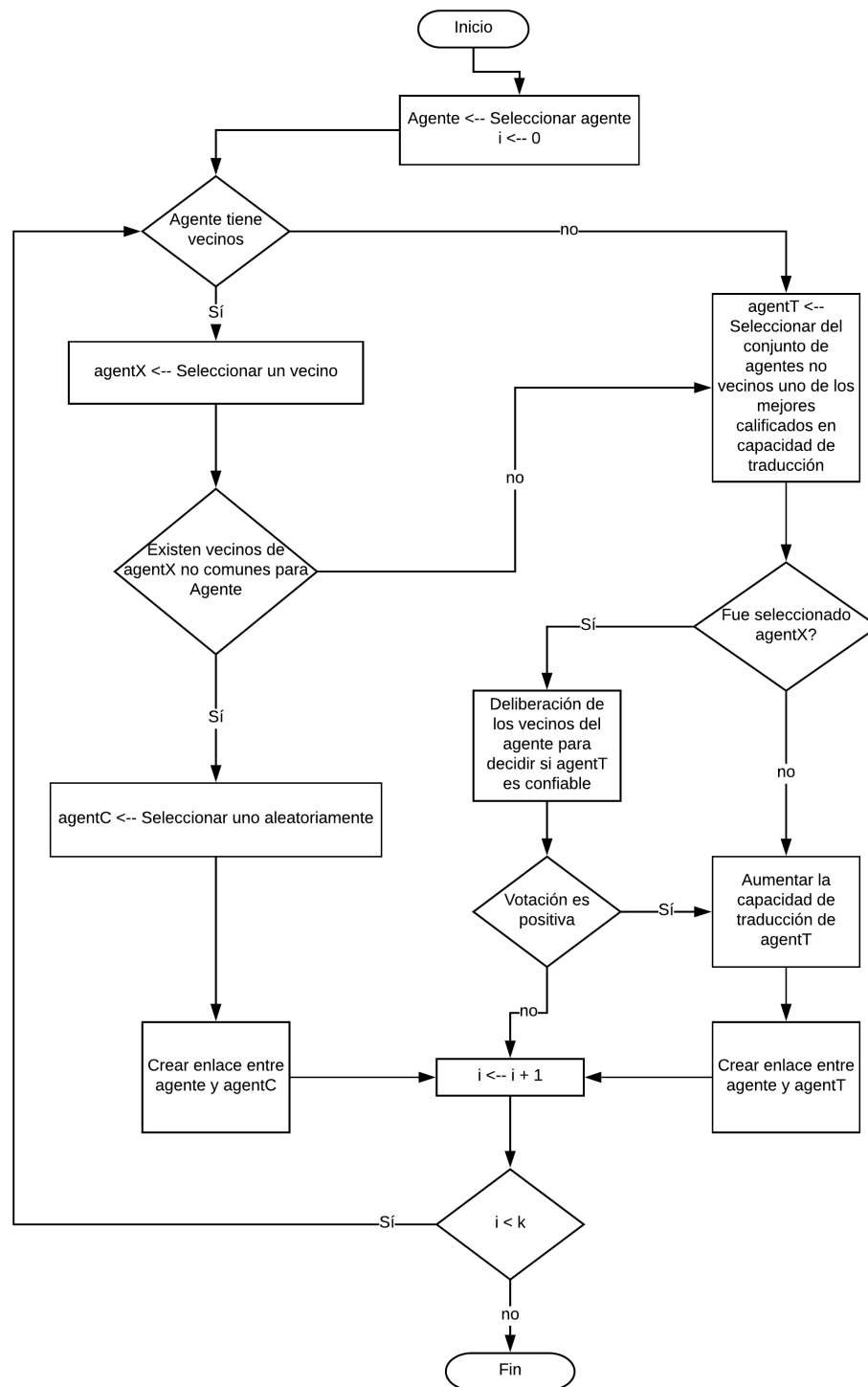


Figura 5.3.2: Diagrama de flujo del proceso de integración

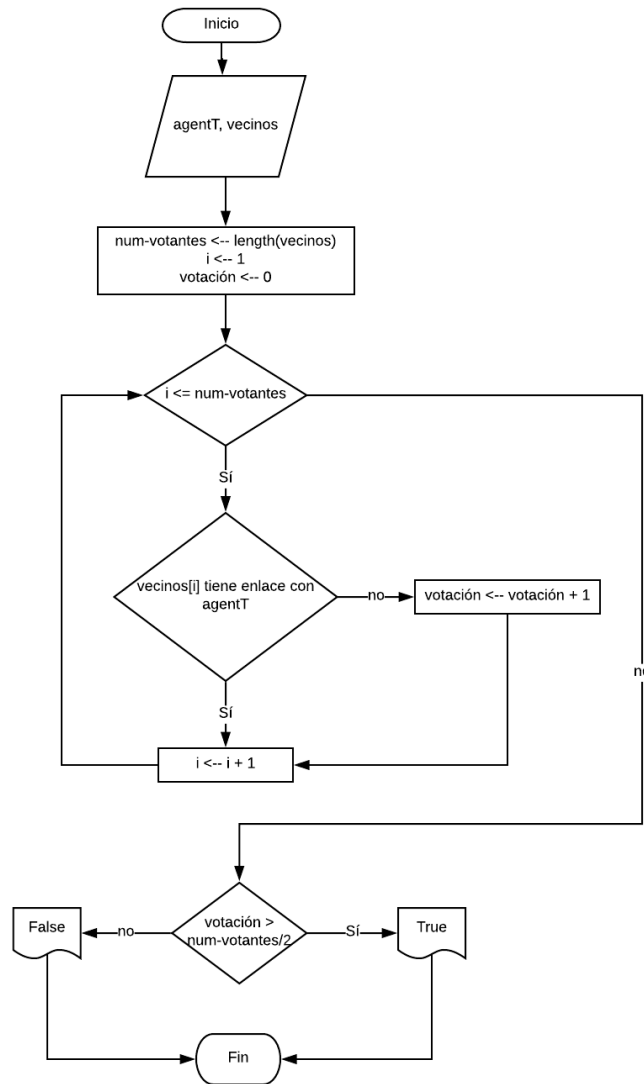


Figura 5.3.3: Diagrama de flujo del proceso de deliberación

La simulación del modelo se planteó de forma que se pueda identificar en cada tiempo (tick) con quiénes se relacionó el agente activo. El agente que está activo en búsqueda de nuevos enlaces se denotó de color rojo. Los agentes de color amarillo que se conectan al agente activo; son agentes de confianza nula y que no fueron elegidos por votación. Los agentes enlazados de color verde son agentes de baja confianza pero que según la deliberación efectuada por los vecinos del agente activo fueron convenientes para la integración. Finalmente, los agentes enlazados de color naranja son los agentes de alta confianza por tener conocidos en común. Por cada agente del modelo que ha sido elegido como traductor se muestra una etiqueta sobre él, con el valor de su capacidad de traducción. A continuación, se presentan dos instantáneas del proceso en el tiempo 1 y 2 para ejemplificar lo explicado anteriormente.

En la Figura 5.3.4 correspondiente al tiempo de ejecución numero uno, se puede apreciar a un agente activo con capacidad de integración $k=2$, para el cual al primer intento de integración tendrá que relacionarse con un agente aleatorio (agente amarillo) debido a que no tiene vecinos aún, y éste ganará un punto a su capacidad de traducción. En la segunda oportunidad de integración; el agente activo al ya contar con el agente amarillo como vecino lo

convoca a votación para deliberar si conviene relacionarse con el otro (agente verde) y como éste no es un conocido del agente amarillo, entonces (agente amarillo) vota favorablemente y se le adiciona un punto a la capacidad de traductor al agente verde.

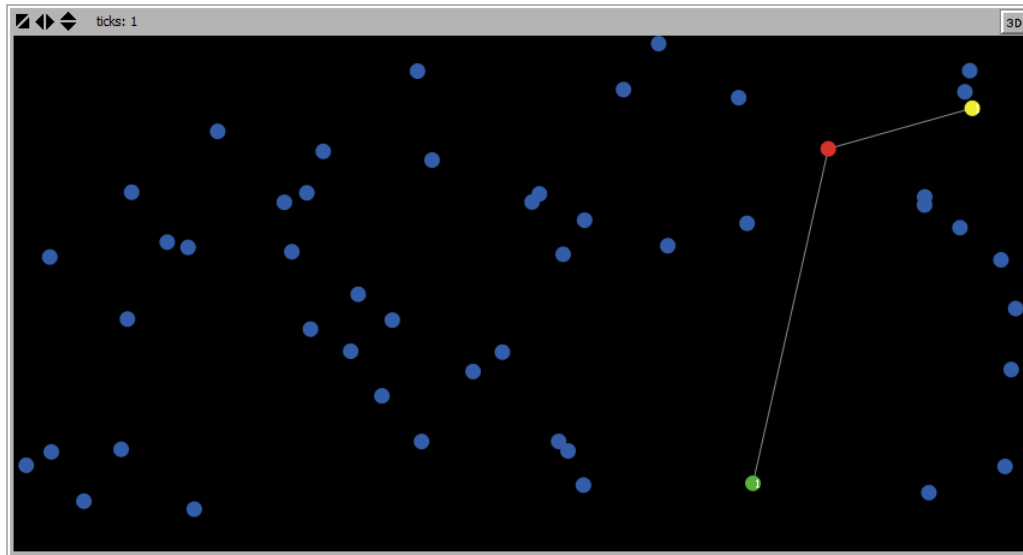


Figura 5.3.4: Ejemplo de integración en el tiempo 1

En la Figura 5.3.5 correspondiente al tiempo de ejecución número dos, se observa como aleatoriamente el anterior agente de color amarillo es seleccionado como agente activo, este agente tiene una propiedad $k=1$ por lo tanto, como tiene un solo vecino (es decir su vecino es el agente que estuvo activo en el tiempo 1) busca relacionarse con alguno de sus conocidos, siendo el único vecino disponible el agente que se pinta de color naranja dada la confianza mutua propiciada por el vecino en común.

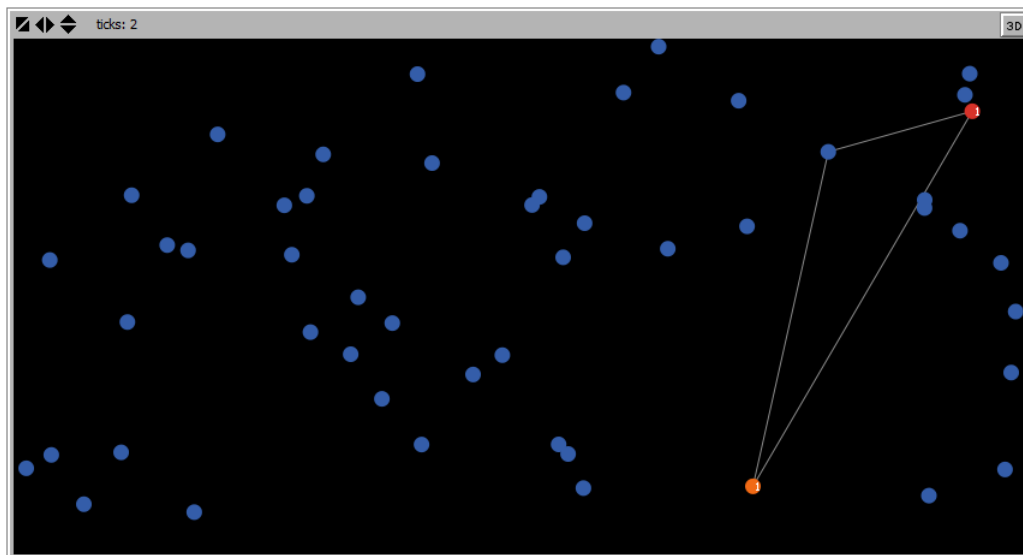


Figura 5.3.5: Ejemplo de integración en el tiempo 2

En la anterior figura casualmente se puede apreciar el proceso de formación de un primer ciclo, debido a los

mecanismos de integración implementados en el modelo en una instancia muy temprana de la simulación.

El modelo cuenta con monitores que permiten visualizar en tiempo de ejecución la distribución de conexiones que tienen los agentes mediante el histograma (degree distribution). También se lleva un registro del número de enlaces establecidos a través del proceso de deliberación (num-deliberation-links), de confianza mutua (num-trust-links) y enlaces pioneros (num-pioneer-links) que son los que se establecen generalmente al iniciar la simulación cuando ningún agente es conocido de otro.

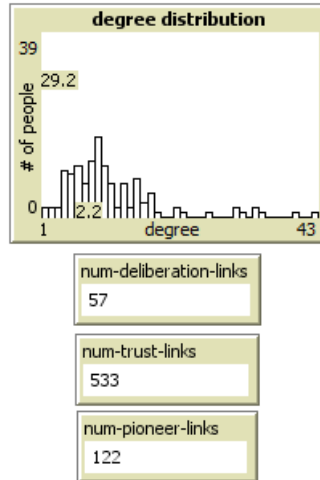


Figura 5.3.6: Monitores

También se cuenta con el monitor (links-of-complete-graph) el cual establece la cantidad de enlaces para un número dado de agentes que tendría la red en el caso de que todos sus agentes estuvieran conectados entre sí, este monitor varía de acuerdo a lo que la barra deslizante (num-people) que especifica la cantidad de agentes personas se actualiza. Este monitor fue creado solo con un objetivo informativo a la hora de correr una simulación especificando la cantidad de enlaces aproximada que se quiere la red resultante.

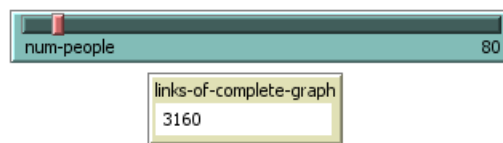


Figura 5.3.7: Monitor que calcula total de enlaces para agentes conectados todos entre sí

Capítulo 6

Pruebas y análisis de resultados

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas al modelo propuesto y su análisis. El trabajo consiste en la ejecución de varias simulaciones para obtener redes generadas por el modelo presentado en el capítulo anterior y comparar las cantidades de ciclos frente a los encontrados en redes aleatorias con mismas características; es decir, mismo número de nodos y enlaces.

6.1. Criterio de comparación

El análisis continua siendo comparativo con redes aleatorias como se hizo en el capítulo 4 ya que como se explica en el capítulo sobre redes aleatorias del libro Network Science [23], los modelos de redes aleatorias sirven como una importante referencia cuando se procede a explorar propiedades de redes reales. Es decir que si se observa alguna propiedad es necesario preguntarse si es posible que ésta emerja por casualidad. Por lo tanto, si la propiedad se presenta en el modelo aleatorio, quiere decir que la aleatoriedad puede explicarla. En caso contrario, la ausencia de la propiedad en redes aleatorias puede representar un tipo de orden. Así pues en nuestro caso una presencia mayor de ciclos de longitudes cortas respecto a las redes aleatorias nos dan indicios del surgimiento de la coordinación en las redes.

6.2. Prueba 1

Dado que nuestra definición propuesta de coordinación está cuantificada a través del número de ciclos presentes en la red, esto quiere decir que para una configuración de N nodos o agentes la cantidad máxima de ciclos que se pueden formar se presenta cuando la red es un grafo completo o clique; es decir, cuando cada nodo es vecino del resto de nodos. Por lo tanto se plantean pruebas donde se corran simulaciones donde se pueda observar el crecimiento de estos ciclos en redes generadas con enlaces 10, 20, 30, 40 y 50 por ciento de completitud o del máximo de enlaces posibles para los N nodos.

El experimento se ejecutó sobre redes de 200, 300, 400 y 500 nodos. Por cada red se observó la influencia del `limitCapacity` variando desde 1 hasta 5, cada simulación se ejecutó veinte veces por cada capacidad límite para encontrar valores promedios de ciclos de longitudes 3, 4, 5 y se compararon con los obtenidos también en redes

aleatorias. Todo esto con el objetivo de determinar para que configuraciones de la simulación se presentan mejores resultados de coordinación e integración.

6.2.1. Resultados

A.C.C: significa el promedio de los promedios de coeficiente de agrupamiento encontrados en las veinte simulaciones. **A.P.L:** significa el promedio de los promedios de las longitudes de camino. **D.E:** significa la desviación estandar. **prom ciclos Ln:** indica el promedio de ciclos de longitud n.

Resultados obtenidos para una configuración de **num-people:** 200 agentes, considerando porcentajes de su **Máximo de enlaces posibles:** 19900.

10 % de enlaces: 1990

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|--------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,398847 | 0,0156057 | 2,1624 | 0,0172755 | 1990 | 0 | 4859,85 | 59269,2 | 916076 |
| 2 | 0,417898 | 0,0134619 | INF | INF | 1990 | 1 | 5208,75 | 72477 | 1273740 |
| 3 | 0,443158 | 0,0146707 | INF | INF | 1991 | 1 | 5749,25 | 89824,8 | 1728580 |
| 4 | 0,446032 | 0,0176985 | INF | INF | 1991 | 1 | 5995,75 | 98976,6 | 1999130 |
| 5 | 0,454802 | 0,0206614 | INF | INF | 1991 | 1 | 6526,15 | 118403 | 2577960 |

Tabla 6.2.1: Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 10 % del máximo de enlaces posibles

20 % de enlaces: 3980

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,343751 | 0,00952339 | 1,80718 | 0,00217815 | 3980 | 0 | 18445,8 | 502648 | 16413400 |
| 2 | 0,384406 | 0,00951696 | 1,8175 | 0,00431514 | 3980 | 0 | 21369,8 | 653651 | 23318900 |
| 3 | 0,411906 | 0,00907065 | 1,82964 | 0,00471395 | 3980 | 1 | 23421,3 | 761249 | 28435300 |
| 4 | 0,436802 | 0,0140375 | INF | INF | 3981 | 1 | 25520,7 | 888769 | 34982600 |
| 5 | 0,44095 | 0,0171738 | INF | INF | 3981 | 1 | 25890,1 | 907842 | 35901600 |

Tabla 6.2.2: Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 20 % del máximo de enlaces posibles

30 % de enlaces: 5970

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,385713 | 0,00527594 | 1,70002 | 2,87056E-05 | 5970 | 0 | 47207,4 | 2061730 | 101434000 |
| 2 | 0,436052 | 0,00863561 | 1,70039 | 0,000279835 | 5970 | 0 | 55495,9 | 2629630 | 138018000 |
| 3 | 0,467219 | 0,0110156 | 1,70147 | 0,000653749 | 5971 | 1 | 61108,6 | 3052840 | 167038000 |
| 4 | 0,488932 | 0,0106534 | 1,70312 | 0,00131257 | 5971 | 1 | 64690,6 | 3319690 | 185571000 |
| 5 | 0,511305 | 0,0147154 | 1,70502 | 0,00227496 | 5971 | 1 | 68520,7 | 3607040 | 206018000 |

Tabla 6.2.3: Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 30 % del máximo de enlaces posibles

40 % de enlaces: 7960

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,457982 | 0,00281703 | 1,6 | 0 | 7960 | 0 | 99251,6 | 5916280 | 384572000 |
| 2 | 0,51423 | 0,00697173 | 1,59998 | 2,87056E-05 | 7960 | 1 | 115861 | 7372050 | 506369000 |
| 3 | 0,545423 | 0,00841132 | 1,60001 | 0,000097277 | 7961 | 1 | 124844 | 8190370 | 577674000 |
| 4 | 0,576114 | 0,00832928 | 1,60013 | 0,000132852 | 7961 | 1 | 133677 | 9014080 | 651046000 |
| 5 | 0,592937 | 0,0118003 | 1,60037 | 0,000505177 | 7961 | 1 | 138316 | 9473180 | 692937000 |

Tabla 6.2.4: Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 40 % del máximo de enlaces posibles

50 % de enlaces: 9950

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,541801 | 0,00362888 | 1,5 | 0 | 9950 | 0 | 182301 | 13698000 | 1103790000 |
| 2 | 0,600166 | 0,00605628 | 1,49998 | 2,52575E-05 | 9950 | 1 | 208331 | 16425500 | 1383150000 |
| 3 | 0,637825 | 0,00760318 | 1,49996 | 4,08406E-05 | 9951 | 1 | 224030 | 18159100 | 1567240000 |
| 4 | 0,657573 | 0,0115921 | 1,49996 | 4,96526E-05 | 9951 | 1 | 232705 | 19128000 | 1672130000 |
| 5 | 0,672065 | 0,0112462 | 1,49995 | 5,40731E-05 | 9951 | 1 | 237654 | 19710400 | 1735420000 |

Tabla 6.2.5: Resultados de cantidades de ciclos en redes generadas de 200 nodos variando limit-capacity para el 50 % del máximo de enlaces posibles

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre redes aleatorias de 200 nodos:

| Porcentaje | Enlaces | A.C.C | A.P.L | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|------------|---------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 1990 | 0,10015914 | 2,022206 | 1314,54 | 19410,52 | 304130,4 |
| 20 | 3980 | 0,2000936 | 1,800212 | 10506,42 | 310073,8 | 9716024 |
| 30 | 5970 | 0,3000668 | 1,69997 | 35465,28 | 1571900 | 73917300 |
| 40 | 7960 | 0,4000074 | 1,59997 | 84054,58 | 4966732 | 311432800 |
| 50 | 9950 | 0,4999088 | 1,49997 | 164133,6 | 12125540 | 950473800 |

Tabla 6.2.6: Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 200 nodos

Resultados obtenidos para una configuración de **num-people:** 300 agentes, considerando porcentajes de su **Máximo de enlaces posibles:** 44850.

10 % enlaces: 4485

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,307421 | 0,0114056 | 2,03487 | 0,0118552 | 4485 | 0 | 13323,3 | 238543 | 5607670 |
| 2 | 0,336871 | 0,00715742 | 2,05595 | 0,0066569 | 4485 | 0 | 14782 | 304382 | 8037160 |
| 3 | 0,354291 | 0,0118801 | INF | INF | 4486 | 1 | 15803,2 | 354139 | 10013400 |
| 4 | 0,37656 | 0,0101832 | INF | INF | 4486 | 1 | 17194,3 | 418592 | 12612400 |
| 5 | 0,388991 | 0,00968433 | INF | INF | 4486 | 1 | 18042,7 | 462439 | 14502200 |

Tabla 6.2.7: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles

20 % enlaces: 8970

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,297478 | 0,00499896 | 1,80059 | 0,000176496 | 8970 | 0 | 54776,6 | 2267130 | 111535000 |
| 2 | 0,336028 | 0,00716871 | 1,80363 | 0,00114167 | 8970 | 0 | 64616,1 | 3005120 | 161436000 |
| 3 | 0,359623 | 0,00829403 | 1,80754 | 0,00163063 | 8970 | 1 | 71109,3 | 3515110 | 197756000 |
| 4 | 0,378639 | 0,00595168 | 1,81153 | 0,0017691 | 8971 | 1 | 76101,8 | 3910410 | 226541000 |
| 5 | 0,396063 | 0,00985563 | INF | INF | 8971 | 1 | 80507,5 | 4265160 | 253096000 |

Tabla 6.2.8: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles

30 % enlaces: 13455

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|-----------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,357734 | 0,00305755 | 1,7 | 0 | 13455 | 0 | 148318 | 9828020 | 725527000 |
| 2 | 0,408119 | 0,00519316 | 1,70002 | 3,25729E-05 | 13455 | 0 | 177794 | 12825700 | 1014670000 |
| 3 | 0,436085 | 0,00569764 | 1,70019 | 0,000181196 | 13456 | 1 | 194304 | 14575400 | 1191440000 |
| 4 | 0,460041 | 0,0084562 | 1,70062 | 0,000290135 | 13456 | 1 | 208387 | 16096200 | 1349230000 |
| 5 | 0,474788 | 0,00948213 | 1,1.70124 | 0,000712961 | 13456 | 1 | 216736 | 17012200 | 1445940000 |

Tabla 6.2.9: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles

40 % enlaces: 17940

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,439499 | 0,00244228 | 1,6 | 0 | 17940 | 0 | 321685 | 28942400 | 2821730000 |
| 2 | 0,500345 | 0,00378488 | 1,59999 | 0,000099055 | 17940 | 0 | 383033 | 36848800 | 3813860000 |
| 3 | 0,53219 | 0,0082027 | 1,59999 | 1,83006E-05 | 17940 | 1 | 415330 | 41223500 | 4387930000 |
| 4 | 0,550856 | 0,00811277 | 1,59998 | 3,16149E-05 | 17941 | 1 | 433943 | 43785400 | 4730640000 |
| 5 | 0,572711 | 0,010977 | 1,60001 | 0,000102374 | 17941 | 1 | 455083 | 46750900 | 5133410000 |

Tabla 6.2.10: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles

50 % enlaces: 22425

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,528867 | 0,00193142 | 1,5 | 0 | 22425 | 0 | 600373 | 67717200 | 8183770000 |
| 2 | 0,590069 | 0,00499303 | 1,49999 | 0,000010483 | 22425 | 0 | 695120 | 82624300 | 10484000000 |
| 3 | 0,624324 | 0,0079982 | 1,49998 | 1,85844E-05 | 22426 | 1 | 745255 | 90806600 | 11792100000 |
| 4 | 0,641552 | 0,00696252 | 1,49998 | 2,31882E-05 | 22426 | 1 | 770792 | 95078300 | 12487200000 |
| 5 | 0,661133 | 0,00742603 | 1,49998 | 2,84571E-05 | 22426 | 1 | 799063 | 99839700 | 13271200000 |

Tabla 6.2.11: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 300 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre redes aleatorias de 300 nodos:

| Porcentaje | Enlaces | A.C.C | A.P.L | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|------------|---------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 4485 | 0,09992436 | 1,944658 | 4448,04 | 99093,76 | 2344750 |
| 20 | 8970 | 0,200057 | 1,799994 | 35649,82 | 1587788 | 75182800 |
| 30 | 13455 | 0,2999066 | 1,699988 | 120239,2 | 8035342 | 570703600 |
| 40 | 17940 | 0,3999556 | 1,599992 | 285081 | 25401460 | 2405772000 |
| 50 | 22425 | 0,50002 | 1,499988 | 556906,6 | 62020720 | 7342810000 |

Tabla 6.2.12: Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 300 nodos

Resultados obtenidos para una configuración de **num-people:** 400 agentes, considerando porcentajes de su **Máximo de enlaces posibles:** 79800.

10 % enlaces: 7980

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,258344 | 0,00658058 | 1,97157 | 0,0070433 | 7980 | 0 | 27228,5 | 643403 | 20187500 |
| 2 | 0,285629 | 0,00780004 | 1,9935 | 0,00611341 | 7980 | 0 | 30694,2 | 832480 | 29201400 |
| 3 | 0,301098 | 0,00607164 | 2,00767 | 0,00663167 | 7980 | 1 | 32849,9 | 981708 | 37220900 |
| 4 | 0,317542 | 0,00689618 | INF | INF | 7981 | 1 | 35112,4 | 1107940 | 43586000 |
| 5 | 0,335084 | 0,00970493 | INF | INF | 7982 | 1 | 37747 | 1293320 | 54243100 |

Tabla 6.2.13: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles

20 % enlaces: 15960

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,271171 | 0,00263468 | 1,80003 | 0,000021552 | 15960 | 0 | 118719 | 6625670 | 434882000 |
| 2 | 0,30962 | 0,00448199 | 1,80063 | 0,000170056 | 15960 | 0 | 142726 | 8950430 | 641162000 |
| 3 | 0,334988 | 0,00585647 | 1,80246 | 0,00058558 | 15961 | 1 | 158899 | 10560600 | 791306000 |
| 4 | 0,353884 | 0,00657648 | 1,80523 | 0,000974487 | 15961 | 1 | 170326 | 11661500 | 895577000 |
| 5 | 0,370409 | 0,00579082 | 1,80859 | 0,0016448 | 15962 | 1 | 181885 | 12935200 | 1022610000 |

Tabla 6.2.14: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles

30 % enlaces: 23940

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,342518 | 0,0017063 | 1,7 | 0 | 23940 | 0 | 336140 | 29845200 | 2928720000 |
| 2 | 0,394776 | 0,00417272 | 1,7 | 6,89373E-06 | 23940 | 0 | 408767 | 39471600 | 4158380000 |
| 3 | 0,423445 | 0,00609758 | 1,70001 | 2,37069E-05 | 23941 | 1 | 449581 | 45099600 | 4913200000 |
| 4 | 0,443951 | 0,00742068 | 1,70013 | 0,000145862 | 23941 | 1 | 478880 | 49326300 | 5497160000 |
| 5 | 0,4626 | 0,0121013 | 1,70037 | 0,000272314 | 23941 | 1 | 505058 | 53181700 | 6041520000 |

Tabla 6.2.15: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles

40 % enlaces: 31920

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,430092 | 0,00147278 | 1,6 | 0 | 31920 | 0 | 744826 | 89494000 | 1161290000 |
| 2 | 0,489903 | 0,00427213 | 1,6 | 6,13234E-06 | 31920 | 0 | 891235 | 114509000 | 15794200000 |
| 3 | 0,519915 | 0,00639025 | 1,59999 | 9,33784E-06 | 31921 | 1 | 963026 | 127235000 | 1801350000 |
| 4 | 0,54353 | 0,0079299 | 1,59999 | 1,14093E-05 | 31921 | 1 | 1019610 | 137599000 | 19863400000 |
| 5 | 0,56171 | 0,0126838 | 1,6 | 2,24444E-05 | 31921 | 1 | 1062820 | 145625000 | 21322400000 |

Tabla 6.2.16: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles

50 % enlaces: 39900

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,522585 | 0,00136293 | 1,5 | 0 | 39900 | 0 | 1405370 | 211493000 | 34069300000 |
| 2 | 0,584975 | 0,00333014 | 1,5 | 5,89176E-06 | 39900 | 0 | 1636770 | 259861000 | 44034700000 |
| 3 | 0,617129 | 0,00589545 | 1,49999 | 9,18164E-06 | 39901 | 1 | 1751500 | 284810000 | 49367300000 |
| 4 | 0,640248 | 0,00805475 | 1,49998 | 1,38473E-05 | 39901 | 1 | 1832180 | 302667000 | 53254100000 |
| 5 | 0,654524 | 0,00609486 | 1,49999 | 1,65024E-05 | 39901 | 1 | 1880780 | 313621000 | 55666900000 |

Tabla 6.2.17: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 400 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre redes aleatorias de 400 nodos:

| Porcentaje | Enlaces | A.C.C | A.P.L | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|------------|---------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 7980 | 0,10008648 | 1,91641 | 10594 | 315102 | 9979164 |
| 20 | 15960 | 0,199958 | 1,79999 | 84673,54 | 5042286 | 319409200 |
| 30 | 23940 | 0,300021 | 1,699994 | 285846,2 | 25531060 | 2426232000 |
| 40 | 31920 | 0,3999952 | 1,599994 | 677541,8 | 80696940 | 10225460000 |
| 50 | 39900 | 0,5000124 | 1,499994 | 1323372 | 197008400 | 31204880000 |

Tabla 6.2.18: Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 400 nodos

Resultados obtenidos para una configuración de **num-people: 500** agentes, considerando porcentajes de su **Máximo de enlaces posibles: 124750**.

10 % enlaces: 12475

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,229004 | 0,00578626 | 1,93594 | 0,00293401 | 12475 | 0 | 47778,7 | 1404790 | 55224700 |
| 2 | 0,249937 | 0,00430775 | 1,9549 | 0,00361003 | 12475 | 1 | 53458,9 | 1823110 | 80459000 |
| 3 | 0,271192 | 0,00772912 | 1,97268 | 0,00504273 | 12476 | 1 | 58960,5 | 2190740 | 102918000 |
| 4 | 0,286277 | 0,0086561 | INF | INF | 12476 | 1 | 63326,8 | 2494660 | 122155000 |
| 5 | 0,296897 | 0,0108674 | INF | INF | 12476 | 1 | 66016,8 | 2724780 | 138079000 |

Tabla 6.2.19: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 10 % de su máximo de enlaces posibles

20 % enlaces: 24950

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,256438 | 0,00180978 | 1,8 | 4,70656E-06 | 24950 | 0 | 219638 | 15542600 | 1277130000 |
| 2 | 0,294781 | 0,00301622 | 1,80017 | 5,70684E-05 | 24950 | 0 | 266598 | 21012600 | 1876340000 |
| 3 | 0,31793 | 0,00471264 | 1,80095 | 0,000199428 | 24951 | 1 | 295072 | 24424700 | 2268140000 |
| 4 | 0,337046 | 0,00597991 | 1,80242 | 0,000528593 | 24951 | 1 | 319693 | 27523300 | 2638090000 |
| 5 | 0,352953 | 0,00731911 | 1,80387 | 0,000789924 | 24951 | 1 | 339931 | 30195000 | 2966100000 |

Tabla 6.2.20: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 20 % de su máximo de enlaces posibles

30 % enlaces: 37425

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,334079 | 0,00141272 | 1,7 | 0 | 37425 | 0 | 639153 | 71178500 | 8709890000 |
| 2 | 0,38544 | 0,00357018 | 1,7 | 3,56122E-06 | 37425 | 0 | 780954 | 94543800 | 12431300000 |
| 3 | 0,415191 | 0,0043529 | 1,7 | 8,05811E-06 | 37426 | 1 | 862474 | 108475000 | 14760700000 |
| 4 | 0,435792 | 0,00765383 | 1,70002 | 0,000023028 | 37426 | 1 | 920441 | 118741000 | 16528900000 |
| 5 | 0,451442 | 0,00817676 | 1,70012 | 5,45087E-05 | 37426 | 1 | 965065 | 126802000 | 17945200000 |

Tabla 6.2.21: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 30 % de su máximo de enlaces posibles

40 % enlaces: 49900

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,424609 | 0,00114131 | 1,6 | 0 | 49900 | 0 | 1434330 | 215637000 | 34931200000 |
| 2 | 0,48409 | 0,00287395 | 1,6 | 3,76884E-06 | 49900 | 0 | 1719320 | 276157000 | 47562300000 |
| 3 | 0,519239 | 0,00552403 | 1,59999 | 5,87331E-06 | 49901 | 1 | 1887130 | 313416000 | 55700500000 |
| 4 | 0,537569 | 0,006627 | 1,59999 | 7,48138E-06 | 49901 | 1 | 1973940 | 333153000 | 60114000000 |
| 5 | 0,55622 | 0,00727696 | 1,59999 | 1,06836E-05 | 49902 | 1 | 2059470 | 352862000 | 64581400000 |

Tabla 6.2.22: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 40 % de su máximo de enlaces posibles

50 % enlaces: 62375

| limit-capacity | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.PL | D.E(A.PL) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|----------------|----------|-------------|---------|-------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,518182 | 0,000953625 | 1,5 | 0 | 62375 | 0 | 2719190 | 511603000 | 1,02946E+11 |
| 2 | 0,581427 | 0,00290505 | 1,5 | 2,93665E-06 | 62375 | 0 | 3181840 | 632000000 | 1,33968E+11 |
| 3 | 0,615702 | 0,00449925 | 1,49999 | 7,48138E-06 | 62376 | 1 | 3422920 | 697337000 | 1,51455E+11 |
| 4 | 0,635066 | 0,00524723 | 1,49999 | 8,17271E-06 | 62376 | 1 | 3556640 | 734323000 | 1,61539E+11 |
| 5 | 0,649586 | 0,0080446 | 1,49999 | 1,19959E-05 | 62377 | 1 | 3657140 | 762434000 | 1,69295E+11 |

Tabla 6.2.23: Resultados de cantidad de ciclos en simulación de 500 agentes para el 50 % de su máximo de enlaces posibles

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre redes aleatorias de 500 nodos:

| Porcentaje | Enlaces | A.C.C | A.P.L | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
|------------|---------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 12475 | 0,10000654 | 1,905998 | 20706,64 | 771576,6 | 30607540 |
| 20 | 24950 | 0,199943 | 1,799994 | 165623,6 | 12349020 | 979941200 |
| 30 | 37425 | 0,3000252 | 1,699994 | 559166,8 | 62528500 | 7443118000 |
| 40 | 49900 | 0,4000162 | 1,599992 | 1325398 | 197609400 | 31363800000 |
| 50 | 62375 | 0,5000102 | 1,499992 | 2588644 | 482459200 | 95718740000 |

Tabla 6.2.24: Resultados de cantidad de ciclos promedios por porcentajes del máximo de enlaces para redes aleatorias de 500 nodos

6.3. Prueba 2

Se busca correr simulaciones variando el tiempo de simulación desde 10000 ticks hasta 26000 ticks en intervalos de 2000 ticks. En una red compuesta por 1000 agentes o nodos, para cada tipo de configuración de la simulación se corre veinte veces para hallar medidas promedio. El propósito de esta prueba es calcular ciclos de longitudes 3, 4 y 5 en una red de mayor tamaño con una capacidad de integración límite de 5.

6.3.1. Resultados

A.C.C: significa el promedio de los promedios de coeficiente de agrupamiento encontrados en las veinte simulaciones. **A.P.L:** significa el promedio de los promedios de las longitudes de camino. **D.E:** significa la desviación estandar. **prom ciclos Ln:** indica el promedio de ciclos de longitud n.

| Redes generadas por modelo propuesto | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|------------|---------|------------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| Tiempo | A.C.C | D.E(A.C.C) | A.P.L | D.E(A.P.L) | promedio de conexiones | D.E(prom Conexiones) | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
| 10000 | 0,219451 | 0,00504292 | INF | INF | 29796 | 413 | 134379 | 5995520 | 356233000 |
| 12000 | 0,209281 | 0,00335683 | 2,01176 | 0,00599348 | 35998 | 542 | 195219 | 11049900 | 800074000 |
| 14000 | 0,210712 | 0,00258947 | 1,96421 | 0,00484794 | 42214 | 725 | 278092 | 19214300 | 1635910000 |
| 16000 | 0,216627 | 0,00345773 | 1,93169 | 0,00467034 | 48300 | 883 | 380338 | 30630400 | 2961000000 |
| 18000 | 0,224462 | 0,00326216 | 1,90844 | 0,00276974 | 54163 | 873 | 504097 | 46820200 | 5091090000 |
| 20000 | 0,232732 | 0,00386977 | 1,88973 | 0,00273519 | 59982 | 920 | 647420 | 67509100 | 8093120000 |
| 22000 | 0,243362 | 0,00387446 | 1,8725 | 0,00244772 | 66456 | 1102 | 832567 | 96310300 | 12656300000 |
| 24000 | 0,25443 | 0,00375659 | 1,85899 | 0,00244772 | 72138 | 1009 | 1030780 | 130586000 | 18572100000 |
| 26000 | 0,267113 | 0,00287239 | 1,84642 | 0,00244772 | 77758 | 1216 | 1264510 | 174053000 | 26653100000 |

Tabla 6.3.1: Resultados de cantidades de ciclos promedios en las redes generadas a través del tiempo

| Redes aleatorias | | | | | | |
|------------------|-----------|---------|------------|----------------|----------------|----------------|
| tiempo | A.C.C | A.PL | conexiones | prom ciclos L3 | prom ciclos L4 | prom ciclos L5 |
| 10000 | 0,0596771 | 1,96716 | 29796 | 35283,4 | 1573020 | 74759800 |
| 12000 | 0,0720365 | 1,93307 | 35998 | 62171 | 3351950 | 192479000 |
| 14000 | 0,0844701 | 1,9162 | 42214 | 100243 | 6337720 | 426757000 |
| 16000 | 0,0966959 | 1,90338 | 48300 | 150233 | 10861400 | 836758000 |
| 18000 | 0,108449 | 1,89157 | 54163 | 211878 | 17176000 | 1483880000 |
| 20000 | 0,120088 | 1,87992 | 59982 | 287738 | 25836000 | 2471890000 |
| 22000 | 0,133043 | 1,86696 | 66456 | 391306 | 38927100 | 4126370000 |
| 24000 | 0,144402 | 1,85558 | 72138 | 500451 | 54047000 | 6219190000 |
| 26000 | 0,15569 | 1,84433 | 77758 | 626959 | 72967100 | 9050750000 |

Tabla 6.3.2: Resultados de cantidades de ciclos en redes aleatorias

6.4. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos en la **prueba 1** observamos que el aumento del límite de capacidad de integración (limit-capacity) produce un incremento en las cantidades de ciclos de longitudes cortas respecto a las redes aleatorias en todas las redes analizadas. También observamos que hay una relación entre los coeficientes de agrupamiento promedio (ACC) y la cantidad de ciclos, lo que sugiere que si entre dos redes con mismo número de nodos y enlaces una posee mayor ACC que la otra lo más probable es que también tenga mayor cantidad de ciclos. Se observó además, que para redes con bajas cantidades de nodos se dificulta la conformación de una red integrada totalmente para porcentajes bajos de completitud con ajustes de capacidad límite mayores a uno; como se evidencia en las longitudes de camino promedio (APL) marcadas con el valor INF que denotan que a lo sumo una de las redes generadas tiene elementos fragmentados o separados del resto. Sin embargo, parece que a medida que las redes son más grandes en cantidad de nodos, se disminuye esta desintegración para capacidades límites de integración mayores.

Tomando como base los resultados obtenidos para 500 nodos de la prueba 1 se hace un análisis comparativo de las razones entre las cantidades de ciclos presentes en las redes generadas por el modelo propuesto y las redes aleatorias, por porcentaje de completitud de enlaces y limit-capacity. Se escogieron los resultados de 500 nodos ya que es donde menos casos de redes desintegradas se presentan, solamente en el 10 % de completitud de sus enlaces para capacidades límite de integración 4 y 5. A continuación se muestran las tablas con las razones calculadas.

| 10 % | | | | 20 % | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| limit-capacity | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 | limit-capacity | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 |
| 1 | 2,307409604 | 1,820674707 | 1,804284173 | 1 | 1,326127436 | 1,258609995 | 1,303272074 |
| 2 | 2,581727407 | 2,362837339 | 2,628731352 | 2 | 1,609661908 | 1,701560124 | 1,914747538 |
| 3 | 2,847419958 | 2,839303317 | 3,362504795 | 3 | 1,781581852 | 1,97786545 | 2,314567445 |
| 4 | 3,058284685 | 3,233198104 | 3,991010058 | 4 | 1,930238203 | 2,228784146 | 2,692090097 |
| 5 | 3,188194705 | 3,531444577 | 4,511274019 | 5 | 2,052430934 | 2,445133298 | 3,026814262 |
| 30 % | | | | 40 % | | | |
| limit-capacity | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 | limit-capacity | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 |
| 1 | 1,143045331 | 1,138336918 | 1,170193728 | 1 | 1,082188143 | 1,091228454 | 1,113742595 |
| 2 | 1,396638713 | 1,512011323 | 1,670173709 | 2 | 1,297210347 | 1,397489188 | 1,516471218 |
| 3 | 1,542427054 | 1,734808927 | 1,98313395 | 3 | 1,423821373 | 1,586037911 | 1,775948705 |
| 4 | 1,646093795 | 1,898990061 | 2,220695682 | 4 | 1,48931868 | 1,685916763 | 1,916668261 |
| 5 | 1,725898247 | 2,027907274 | 2,41097884 | 5 | 1,55385024 | 1,785653921 | 2,059106358 |
| 50 % | | | | | | | |
| limit-capacity | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 | | | | |
| 1 | 1,050430264 | 1,060406766 | 1,075505173 | | | | |
| 2 | 1,229153178 | 1,309955329 | 1,399600538 | | | | |
| 3 | 1,322283018 | 1,445380252 | 1,582292036 | | | | |
| 4 | 1,373939406 | 1,522041657 | 1,687642357 | | | | |
| 5 | 1,412762821 | 1,580307723 | 1,768671422 | | | | |

Tabla 6.4.1: razones de cantidad de ciclos en redes generadas por el modelo sobre redes aleatorias por porcentajes de completitud de enlaces

De las anteriores razones, podemos observar que entre menor es el porcentaje de completitud de los enlaces en la red, mayores son las cantidades de ciclos presentes en las redes generadas por el modelo propuesto en comparación con las aleatorias. Además a mayores porcentajes de completitud la red aleatoria cada vez se va a parecer más a la generada por el modelo ya que ambas tenderán a convertirse en un grafo completo y sus razones van disminuyendo acercándose cada vez más a las aleatorias como se ve cuando los porcentajes aumentan. Por lo tanto, las configuraciones que permiten evidenciar el surgimiento de la coordinación y la integración se dan de la siguiente manera: Para observarse en redes con un gran número de nodos, se debe seleccionar una alta capacidad limite de integración.. Por el contrario, si se simula una red con una baja cantidad de nodos, se requiere utilizar capacidades limites de integración bajas. En ambos casos lo mejor es hacer simulaciones no tan largas en tiempo para generar redes con bajos porcentajes de completitud.

De los resultados obtenidos en la **prueba 2** se puede observar que para una red con un número considerablemente superior a las de la prueba 1 se presentan integraciones de la red que conforman una única componente de red en porcentajes de enlaces de completitud menores a 10 %.

En la siguientes gráficas se puede evidenciar el crecimiento de los ciclos en las redes generadas por el modelo y las aleatorias para 1000 nodos a través del tiempo.

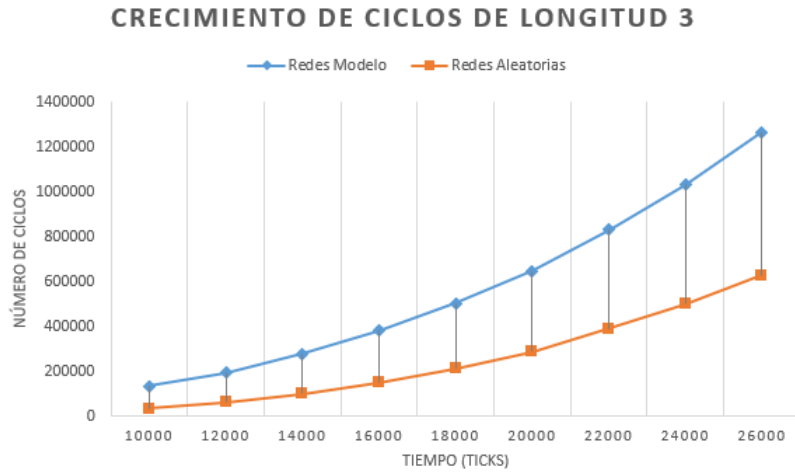


Figura 6.4.1: Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud tres a través del tiempo

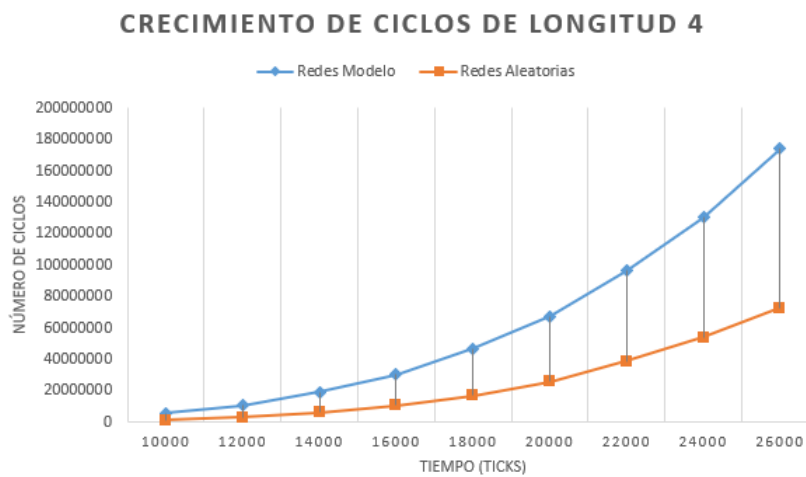


Figura 6.4.2: Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud cuatro a través del tiempo

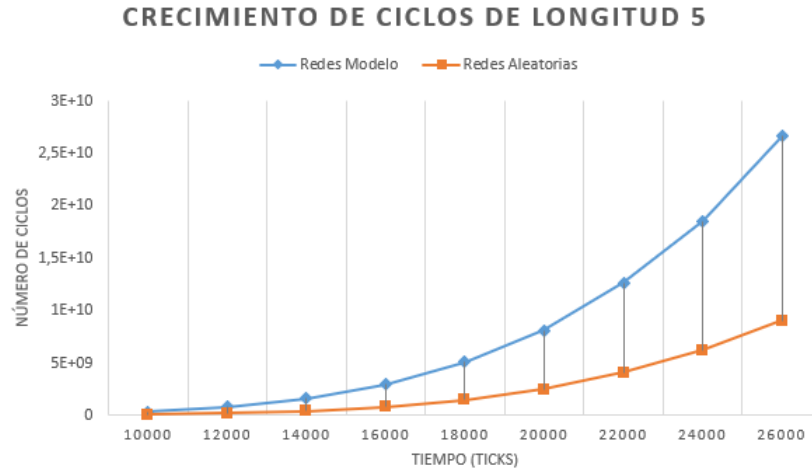


Figura 6.4.3: Comparativa de crecimiento de ciclos de longitud cinco a través del tiempo

A continuación se presentan las razones de las cantidades de ciclos presentes en la red generada por el modelo y las aleatorias.

| tiempo | % completitud | conexiones | razón cl3 | razón cl4 | razón cl5 |
|--------|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 10000 | 5,97 | 29796 | 3,809 | 3,811 | 4,765 |
| 12000 | 7,21 | 35998 | 3,140 | 3,297 | 4,157 |
| 14000 | 8,45 | 42214 | 2,774 | 3,032 | 3,833 |
| 16000 | 9,67 | 48300 | 2,532 | 2,820 | 3,539 |
| 18000 | 10,84 | 54163 | 2,379 | 2,726 | 3,431 |
| 20000 | 12,01 | 59982 | 2,250 | 2,613 | 3,274 |
| 22000 | 13,30 | 66456 | 2,128 | 2,474 | 3,067 |
| 24000 | 14,44 | 72138 | 2,060 | 2,416 | 2,986 |
| 26000 | 15,57 | 77758 | 2,017 | 2,385 | 2,945 |

Tabla 6.4.2: Razones comparativas de las redes generadas por el modelo frente a aleatorias con 1000 nodos y limit-capacity: 5

De las anteriores gráficas y tablas se observó que a medida que el tiempo transcurre, cada vez se generan más enlaces y por lo tanto más ciclos. El crecimiento de los ciclos es mayor en las redes generadas por el modelo propuesto pero también se evidenció como el paso del tiempo hace que las razones de las cantidades de ciclos del modelo empiecen a disminuir frente a las aleatorias, lo cual reafirma que entre más enlaces halla mayor será la semejanza entre ambas redes.

Capítulo 7

Conclusiones

El propósito de este proyecto era desarrollar un modelo basado en agentes para estudiar la coordinación e integración en la inteligencia colectiva a través de las redes resultantes de las simulaciones. Para cumplir con los objetivos fue necesario:

- Plantear una definición de coordinación e integración de manera que se pudiera tener un criterio comparativo y objetivo de lo que se quería evidenciar en los modelos.
- Consultar algunos modelos relacionados y literatura sobre coordinación en redes.
- Definir el modelo y las reglas simples que deben seguir sus agentes.
- Consultar e implementar algoritmos más eficientes para calcular ciclos de longitudes cortas en redes no dirigidas utilizando Mathematica.
- Correr muchas simulaciones para tomar datos y medidas promedio bajo parámetros variables.
- Analizar resultados e interpretarlos.

A continuación se listan algunas de las conclusiones encontradas en este trabajo de grado.

- La coordinación es un proceso que puede surgir estructuralmente en las redes dada las interacciones definidas tanto en el modelo Suárez [1] como en el propuesto en este trabajo de grado. Basados en la formación y cantidad de ciclos de longitudes cortas podemos concluir que hay evidencias de la emergencia de la coordinación debido a que presentan mayores concentraciones de ciclos comparativamente frente a redes aleatorias.
- El modelo propuesto en este trabajo de grado demuestra que la interpretación y modelado de algunos de los mecanismos de integración expuestos en el trabajo realizado en [3]; también sirvieron como herramientas para el surgimiento de la coordinación en las redes generadas, bajo nuestro concepto estructural de coordinación.
- El número de ciclos es directamente proporcional a la capacidad de integración límite ajustada en cada simulación. Entre mayor sea esta capacidad; mayores ciclos se presentan en la red. Sin embargo, si la cantidad de agentes o nodos es relativamente pequeña se presentan casos de redes segregadas o de baja integración.
- La simulación del modelo para tiempos muy prolongados lleva a la conformación de un clique o grafo completo en la red generada, lo cual es el escenario donde se presenta la máxima cantidad de ciclos posibles para un número dado de agentes. Lo anterior es muy raro de encontrar en redes complejas reales, por lo que

donde mejor se evidencia la coordinación basado en los resultados obtenidos es entre el 10 % y el 50 % de la cantidad de enlaces que tendría su clique.

- El modelo propuesto puede representar ambientes colaborativos casi utópicos donde no hay presencia de conflictos entre los agentes, lo cual lo aleja un poco de la realidad de las relaciones humanas. Sin embargo, el modelo se ajusta mejor a entornos en áreas académicas como las ciencias y la ingeniería donde casi no hay conflictos en cuanto a intereses.
- El modelo logró simular un sistema complejo, en este caso una red compleja; ya que se evidencia el surgimiento de la coordinación a través de las dos reglas simples implementadas y que sigue cada agente de manera local por cada iteración del modelo.
- La velocidad a la que se difunde la información no es tan determinante para la coordinación en las redes, por el contrario la presencia de ciclos si es buena señal de ello; pues estos bucles que se forman pueden estar generando circuitos de información que realimentan el sistema y así permitir tomar decisiones a situaciones cambiantes en este tipo de estructuras.
- El modelo Suárez [1] presenta algunos de los mecanismos de integración a través de la edición de artículos o documentos; donde cada uno de ellos gana votaciones favorables si son seleccionados para editar. Lo cual hace que su probabilidad de ser escogido por otros agentes sea mayor. Cada vez que un agente edita un documento ocasiona que se vayan creando cliques. Así pues, si un agente selecciona un artículo editado por N agentes, entonces se crean N nuevos enlaces hacia el resto de co-editores, por ende aumentando la cantidad de ciclos en la red.

7.1. Trabajo Futuro

Dada la relevancia de las redes en casi todos los campos de estudio; es importante continuar con el proceso de investigación de la coordinación en redes complejas. Por lo tanto, aún hay cabida para hacer cambios o ajustes al modelo que se consideren pertinentes, como por ejemplo; tratar de modelar algún tipo de conflicto en los mecanismos de integración entre los agentes para observar que correlación existe con la coordinación en dichas estructuras.

Además, se debe seguir estudiando el fenómeno de manera que se puedan probar las ideas aquí planteadas pero ya en un sistema con datos reales, como por ejemplo en Wikipedia, WikiITRB, etc. Lo cual permita ampliar o profundizar lo encontrado en este trabajo de grado.

Bibliografía

- [1] E. Suárez Valencia, V. Bucheli, R. Zarama, and Á. Garcia, “Collective intelligence: analysis and modelling,” *Kybernetes*, vol. 44, no. 6/7, pp. 1122–1133, 2015. iv, 2, 3, 15, 46, 47
- [2] U. Wilensky and W. Rand, *An introduction to agent-based modeling*. No. January, 2015. 2
- [3] I. Montoya-Restrepo, S. P. Rojas-Berrio, and L. A. Montoya-Restrepo, *Oportunidades de desarrollo de comunidades de investigación mediante la aplicación de la metáfora biológica*, vol. 3. 2012. 2, 27, 46
- [4] J. G. Restrepo, E. Ott, and B. R. Hunt, “Emergence of synchronization in complex networks of interacting dynamical systems,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 224, no. 1-2, pp. 114–122, 2006. 4, 5
- [5] J. A. Rojas and R. E. Giachetti, “An agent-based simulation model to analyze team performance on jobs with a stochastic structure,” *1st International Conference on Advances in System Simulation, SIMUL 2009*, pp. 148–154, 2009. 5, 6
- [6] Y. Xu, X. Li, and M. Liu, “Modeling and simulation of complex network attributes on coordinating large multiagent system,” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014. 7, 8
- [7] G. Cocho, C. Torrez Alcázar, J. Torres Nafarrete, G. Duval, P. Miramontes, O. Miramontes, and J. L. Gutiérrez Sánchez, *Perspectivas en las teorías de sistemas*. 2014. 10
- [8] G. Weng, “Complexity in Biological Signaling Systems,” *Science*, vol. 284, no. 5411, pp. 92–96, 1999. 10
- [9] J. Parrish, “Complexity, Pattern, and Evolutionary Trade-Offs in Animal Aggregation,” *Science*, vol. 284, no. 5411, pp. 99–101, 1999. 10
- [10] M. Aldana, “Redes Complejas : Estructura , Dinámica y Evolución,” pp. 1–26, 2011. 10, 11
- [11] F. M. Atay and J. Jost, “On the emergence of complex systems on the basis of the coordination of complex behaviors of their elements,” *Complexity*, vol. 10, no. 1, pp. 17–22, 2004. 11
- [12] E. Estrada, “Introduction to Complex Networks: Structure and Dynamics,” in *Evolutionary Equations with Applications in Natural Sciences*, vol. 2126, pp. 93–131, 2015. 11, 12
- [13] K. H. Rosen, *Discrete mathematics and its applications*. Boston: McGraw-Hill, 5 ed., 2007. 11
- [14] R. Van Der Hofstad, “Random Graphs and Complex Networks,” Available on <http://www.win.tue.nl/rhofstad/NotesRGCN.pdf>, vol. I, p. 365, 2016. 11
- [15] F. S. Caparrini, “Introducción a las redes complejas.” 12, 13
- [16] A. Cassar, “Coordination and cooperation in local, random and small world networks: Experimental evidence,” *Games and Economic Behavior*, vol. 58, no. 2, pp. 209–230, 2007. 15

- [17] A. Antonioni, M. P. Cacault, R. Lalive, and M. Tomassini, “Coordination on networks: Does topology matter?,” *PLOS ONE*, vol. 8, pp. 1–11, 02 2013. 15
- [18] R. Guimerà and L. A. Nunes Amaral, “Cartography of complex networks: modules and universal roles,” *Stat*, vol. 2005, pp. 1–17, 2007. 17
- [19] S. Strogatz, *Sync : the emerging science of spontaneous order*. New York: Hyperion, 2003. 17
- [20] J. P. Bagrow, “Analysis and application of complex networks,” 2008. 17, 20
- [21] V. Latora, V. Nicosia, and G. Russo, *Complex Networks: Principles, Methods and Applications*. 2017. 18
- [22] Z. Chen, “An agent-based model for information diffusion over online social networks,” Master’s thesis, Kent State University, dec 2016. 22, 25
- [23] A. Barabási and M. Pósfai, *Network Science*. Cambridge University Press, 2016. 34