

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



## Modelado de Sistemas Multinivel para Manejo de Contingencias.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

*Presenta:*

**JOSÉ DE JESÚS PARRA GALAVIZ**

*Bajo la dirección de:*

DRA. CARELIA GUADALUPE GAXIOLA

PACHECO

*Co-dirigido por:*

DR. MANUEL CASTAÑÓN PUGA

TIJUANA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

SEPTIEMBRE DEL 2019

*Tesis Dedicada a mi Familia y seres amados.*

**Universidad Autónoma de Baja California**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

FOLIO No. 284

Tijuana, B. C., a 20 de Septiembre 2019

C. José de Jesús Parra Galaviz  
Pasante de: Doctor en Ciencias  
Presente

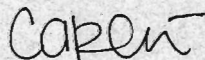
El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la  
Opción TESIS

Es propuesto, por los C.C. Dra. Carelia Guadalupe Gaxiola Pacheco y  
Dr. Manuel Castañón Puga

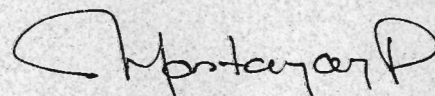
Quienes serán los responsables de la calidad de trabajo que usted presente,  
referido al tema “Modelado de Sistemas Multinivel para Manejo de  
Contingencias”

El cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

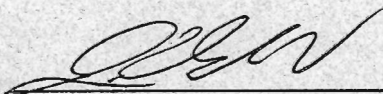
- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- MARCO TEÓRICO
- III.- METODOLOGÍA
- IV.- MODELO MLN-ABM
- V.- EXPERIMENTOS Y RESULTADOS
- VI.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO



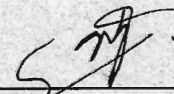
Dra. Carelia Guadalupe Gaxiola Pacheco  
Directora de Tesis



Dr. Manuel Castañón Puga  
Co-Director de Tesis



Dr. José Luis González Vázquez  
Director



Dra. Rocio Alejandra Chávez Santoscoy  
Sub Directora

# Agradecimientos

Deseo agradecer a CONACYT por brindar los medios y oportunidades para estudiar este doctorado. Así como a la Universidad Autónoma de Baja California por brindar sus instalaciones e infraestructura para facilitar los estudios de posgrado en sus diferentes programas, y especialmente al programa MyDCI por aceptarme como estudiante. A los doctores que me guiaron en el proceso de formación como investigador, y muy en especial a mi comité de tesis con mi mas sincero respeto y reconocimiento. Una especial mención a mi directora de tesis la Dra Carelia Gaxiola, quien aporto su experiencia y dedicación cuando fue necesario durante mi camino en el programa.

Imposible hubiese sido esta etapa en mi vida sin el apoyo de mi Esposa, mi hijo, mi hija y mi familia, quienes han sido fuente de inspiración y superación en mi día a día.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros de trabajo que siempre estuvieron al pendiente de mi salud y de mi progreso. Muchas gracias por toda la experiencia que me llevó y porque éste final será el principio de una nueva etapa. Gracias a todos.

Atentamente.

*José Parra*

# Resumen

Las redes complejas han sido utilizadas ampliamente para modelar sistemas del mundo real con gran éxito, sin embargo, una limitación emerge cuando se trata de modelar sistemas reales multi-capas donde nodos pueden pertenecer a diferentes capas al mismo tiempo y tener diferentes interacciones. Sin embargo, en muchos sistemas reales es necesario tomar decisiones, analizar alternativas, negociar y cooperar, características no contempladas en algunos modelos actuales. En este trabajo presentamos un modelo de sistemas multi-nivel que hace uso de las redes multi-capa y los sistemas multi-agentes (SMA) para el manejo de contingencias. Consideramos al sistema como la cooperación de varios subsistemas, cada subsistema está representado por agentes que tienen necesidades que buscan satisfacer como utilidad, bienestar y desempeño, hacen uso de su capacidad de cooperación para cubrir dichas necesidades. Cuando los agentes tienen sus necesidades satisfechas, buena utilidad y bienestar, se traduce en el rendimiento del sistema, si existen agentes que no tienen bienestar o utilidad puede colapsar el sistema. Las redes multi-capa se utilizaron para representar a cada una de las entidades, su comunicación inter-capa (misma capa) o intra-capa (de subsistema a subsistema) y obtener información de la topología del sistema. Los SMA tendrán el rol de administradores en los subsistemas y sistema. Cuando una contingencia emerge, los agentes administradores negociaran o cooperaran los recursos disponibles con la meta de mantener el funcionamiento del sistema. En este acercamiento del sistema multi-nivel mostramos resultados de dos casos de estudio, y se discuten las ventajas y desventajas de este enfoque.

# Abstract

Complex networks have been widely used to model real-world systems with great success; however, a limitation emerges when it comes to modeling real multilayer systems where nodes can belong to different layers at the same time and have different interactions. In several real systems, it is necessary to make decisions, analyze alternatives, negotiate and cooperate, characteristics not contemplated in the current models. In this project, we present a multi-level system model that makes use of multilayer networks and multi-agent systems (MAS) for contingency management. We consider the system as the cooperation of various subsystems; each subsystem is represented by agents that have needs that seek to satisfy and the ability to cooperate with other agents to achieve a purpose of maintaining adequate system performance. When agents have their needs satisfied, in terms of utility and well-being, the impact on the system performance is positive; if there are agents that do not have well-being or utility, the system can collapse. Multilayer networks were used to represent inter-layer (same layer) or intra-layer (from subsystem to subsystem) communication between entities and to obtain information on the system topology. MAS will have the role of administrators in the subsystems and system. When a contingency emerges, the managing agents will negotiate the use of the available resources to maintain the operation of the system. In this multi-level system approach, we show results from two case studies and the discussion about the advantages and disadvantages of this approach.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	3
1.2. Objetivo . . . . .	6
1.2.1. Objetivo general . . . . .	6
1.2.2. Objetivos particulares . . . . .	6
1.3. Estructura del documento . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Redes complejas . . . . .	8
2.1.1. Métricas más utilizadas en las redes complejas . . . . .	9
2.1.2. Topologías de redes complejas . . . . .	10
2.2. Redes multi-capa . . . . .	13
2.2.1. Definición formal de una red multi-capa . . . . .	13
2.2.2. Medidas de centralidad . . . . .	14
2.3. Sistemas multi-agente . . . . .	16

---

2.3.1. Arquitecturas de SMA . . . . .	17
2.3.2. Negociación . . . . .	19
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
3.1. Metodología . . . . .	21
3.1.1. Revisión bibliográfica . . . . .	22
3.1.2. Plan experimental . . . . .	22
3.1.3. Validación . . . . .	23
<b>4. Modelo MLN-ABM</b>	<b>24</b>
4.1. Modelando un sistema multi-capa . . . . .	24
4.2. Modelo de un sistema multi-capa para manejo de contingencias . . . . .	26
4.3. Pruebas . . . . .	29
<b>5. Experimentos y resultados</b>	<b>38</b>
5.1. Caso de estudio EATN . . . . .	38
5.2. Discusión de los resultados . . . . .	47
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>50</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	50
6.2. Trabajo futuro . . . . .	51

# Índice de figuras

2.1. Representación de grafos. . . . .	9
2.2. Red de mundo pequeño. . . . .	11
2.3. Red de libre escala. . . . .	12
2.4. Red dirigida. . . . .	12
2.5. Red multi-capas con tres capas. . . . .	15
2.6. Arquitectura BDI. . . . .	18
2.7. Protocolo de ofertas alternativas. . . . .	20
4.1. Modelo para representar sistemas complejos, donde la teoría de redes y los sistemas multi-agente se integran . . . . .	25
4.2. Modelo de una red multi-capas . . . . .	26
4.3. Simulación de una red, con enlaces fuera y dentro de cada subsistema. . . . .	31
4.4. Resumen de resultados del escenario uno, con un agente por subsistema que interactúa fuera de su subred. . . . .	34
4.5. Resumen de resultados del escenario dos, con dos agentes por subsistema que interactúan fuera de su subred. . . . .	37

---

5.1. Representación de la red de transporte aéreo europeo como una red mono-capa 41

5.2. Representación de la red de transporte aéreo europeo como una red MLN-ABM 42

5.3. Centralidad del grado . . . . . 44

5.4. Centralidad de la intermediación . . . . . 45

5.5. Medida de centralidad EigenVector . . . . . 45

# Índice de tablas

1.1. Organización en siete áreas de los sistemas complejos de acuerdo a Sayama Hiroki. . . . .	5
4.1. Red con igual importancia en los dos subsistemas 50-50 y con un agente por subsistema con interacción externa. . . . .	31
4.2. Red con importancia de los subsistemas 70-30 y con un agente por subsistema con interacción externa. . . . .	32
4.3. Red con importancia de los subsistemas 60-40 y con un agente por subsistema con interacción externa. . . . .	32
4.4. Red con importancia de los subsistemas 30-70 y con un agente por subsistema con interacción externa. . . . .	33
4.5. Red con importancia de los subsistemas 40-60 y con un agente por subsistema con interacción externa. . . . .	33
4.6. Resultados obtenidos de las pruebas al escenario uno, con un agente por subsistema que interactúa fuera de su subred. . . . .	33
4.7. Red con igual importancia de los subsistemas 50-50 y con dos agentes por subsistema con interacción externa. . . . .	35

---

4.8. Red con importancia de los subsistemas 70-30 y con dos agentes por subsistema con interacción externa. . . . .	35
4.9. Red con importancia de los subsistemas 60-40 y con dos agentes por subsistema con interacción externa. . . . .	35
4.10. Red con importancia de los subsistemas 30-70 y con dos agentes por subsistema con interacción externa. . . . .	36
4.11. Red con importancia de los subsistemas 40-60 y con dos agentes por subsistema con interacción externa. . . . .	36
4.12. Resultados del escenario dos, con dos subsistemas y dos agentes por subsistema que interactúan fuera de su subred. . . . .	37
5.1. Algoritmo del protocolo propuestas alternativas uno a uno a dos turnos. . . . .	40
5.2. Comparación de medidas de centralidad en red multi-capa y mono-capa . . . . .	40
5.3. Negociación propuestas alternativas en red mono-capa . . . . .	46
5.4. Negociación propuestas alternativas capa 20 . . . . .	47
5.5. Negociación propuestas alternativas en la red mono-capa y MLN-ABM . . . . .	47

# Capítulo 1

## Introducción

El uso de la tecnología ha cambiado drásticamente la forma en que los sistemas de todo el mundo interactúan y se comunican, ahora están altamente interconectados ya que existe gran dinamismo entre ellos. Un mundo en constante evolución, donde las interacciones son cada vez mas complejas encontramos que numerosos sistemas se componen por una gran cantidad de unidades dinámicas y altamente interconectadas [1].

Estos sistemas complejos aun no tienen una definición única aceptada por la comunidad científica, sin embargo en los diversos intentos por conceptualizarlo se pueden encontrar palabras claves como:

- Comportamiento Emergente.
- Descentralizado
- Auto Organización.
- Elementos Simples.

## 1.1. Antecedentes

Una definición que ha ganado popularidad es la de Melanie Mitchell [2] que describe a los sistemas complejos como «grandes redes de elementos carentes de cualquier tipo de control centralizado y que obedecen reglas de operación simples, exhibiendo un comportamiento colectivo complejo (emergente), procesamiento de información sofisticado y adaptación por aprendizaje o evolución».

A través de ejemplos podemos ver lo que es un sistema complejo. El más común al iniciar la investigación es del fenómeno de la colonias de hormigas, donde cientos o millones de hormigas, cada una simple y con la tarea de buscar comida, responde a una señal química de otras hormigas de su colonia para pelear en contra de otras hormigas, defender su nido, cooperar para realizar estructuras complejas o para transportar comida pesada y construir su nido. ¿Cómo explicar su comportamiento o su adaptación a los cambios?, aunque ahora se comprende mucho sobre este fenómeno, aun faltan cosas por explicar completamente, por ejemplo su comportamiento o como las acciones individuales de las hormigas forman estructuras grandes y complejas.

Con el uso de la tecnología (en áreas como bases de datos y herramientas de análisis) es posible estudiar la interacción entre las unidades dinámicas de diversos sistemas (como los tecnológicos, socio económicos y biológicos, entre otros) [3–6].

Algunos sistemas de redes reales muestran características de heterogeneidad, esta heterogeneidad puede estar relacionada con la dinámica entre sus unidades por ejemplo, diferentes tipos de enlaces en una red social [7–11], la capacidad de transmisión eléctrica desigual en una red neuronal [8, 12–14], y el tráfico irregular de internet en la web [15], por nombrar solo algunos.

Otras características observadas, que han atraído la atención de la comunidad científica

son la robustez, la tolerancia a los ataques y a los errores. La robustez es la capacidad de la red para evitar un mal funcionamiento cuando una fracción de elementos esta dañada. La tolerancia a ataques y a los errores es la capacidad del sistema para mantener las propiedades de conexión después de la eliminación o mal funcionamiento de una parte de los nodos [16].

Una fracción de los nodos dañados puede conducir a una falla en cascada a través de la red, cambiando el flujo de conexión y desencadenando redistribución de cargas en toda la red [17–24].

De acuerdo a Sayama Hiroki [25] divide en siete áreas a los sistemas complejos como lo observamos en la tabla 1, existen dos conceptos centrales que abarcan casi todas las sub-áreas de sistemas complejos, la primera es la emergencia que a palabras de Yaneer Bar-Yam [1] la define como “Una relación no trivial entre las propiedades del sistema a diferentes escalas”, y la segunda la Auto-organización que es un proceso dinámico que parece ir en contra de la segunda ley de la termodinámica. En este capítulo abordaremos las siguientes sub-áreas :

- Redes (Teoría de Grafos, Robustez/Vulnerabilidad, Redes de Libre Escala, Análisis de Redes Sociales, Centralidad, Redes de Mundo Pequeño)
- Teoría de Juegos (Toma de Decisiones Racionales, Negociación, Cooperación)
- Comportamiento Colectivo (Modelado Basado en Agentes).

**Tabla 1.1:** Organización en siete áreas de los sistemas complejos de acuerdo a Sayama Hiroki.

Sistemas Complejos Emergencia (Sobre Escala) & Auto-Organización(Sobre Tiempo)	
Tema	Áreas
Redes	Teoría de Grafos, Escalada, Robustez /Vulnerabilidad, Redes Sin Escala, Análisis de Redes Sociales, Centralidad, Redes de Mundo Pequeño, Redes Adaptivas, entre otros.
Evolución y Adaptación	Aprendizaje Automática, Vida Artificial, Redes Neuronales Artificiales, Computación Evolutiva, Algoritmos Genéticos / Programación Genética.
Formación de Patrones	Fractales Espaciales, Ecología Espacial, Auto-Replicación, Autómatas Celulares, Percolación, entre otros.
Teoría de Sistemas	Entropía, Teoría de la Computación, Teoría de la Información, Cibernética, Sistemas Dinámicos, Métricas de complejidad.
Dinámica No Linear	Atractores, Caos, Bifurcación, Análisis de Series de Tiempo, Ecuaciones Diferenciales Ordinarias.
Teoría de Juegos	Toma de Decisiones Racionales, Cooperación vs. Competición, Teoría de Juegos Evolutiva, Dilema del Prisionero(Pd).
Comportamiento Colectivo	Dinámica Social, Inteligencia Colectiva, Modelado Basado en Agentes (ABM), Colonia de Hormigas.

## 1.2. Objetivo

A continuación presentamos el objetivo planteado para esta tesis, primero el objetivo general a perseguir y los objetivos particulares necesarios para alcanzar el objetivo general.

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general consiste en presentar un modelo de sistemas multi-capa para el manejo de contingencias. deberá contar con agentes administradores de recursos por subsistemas, con la capacidad de cooperación y/o negociación con otros agentes administradores con el objetivo común de mantener el desempeño del sistema complejo.

### 1.2.2. Objetivos particulares

Como objetivos particulares planteamos desarrollar un modelado de un sistema complejo interdependiente, realizar pruebas de funcionamiento al modelo , construir la arquitectura y posteriormente modelar la interconexión entre dos o más sistemas complejos.

## 1.3. Estructura del documento

Este documento esta estructurado en 6 capítulos. El primer capítulo presenta la introducción, donde se mencionan las características de los sistemas complejos, el objetivo y la estructura de este documento de tesis.

En el capítulo dos se detalla el marco teórico de esta investigación, inicia con la definición de redes complejas y la topología de estas redes, continua con la descripción de las redes multi-capa y sus principales medidas de centralidad que aportan información de la estructura

de la red. Después se habla sobre los sistemas multi-agentes, las diferentes arquitecturas desarrolladas y por último en este capítulo se aborda el tema de la negociación entre agentes, técnica que ofrece muchas ventajas.

En el capítulo 3 se presenta la metodología desarrollada para esta investigación.

En el capítulo 4 Modelo MLN-ABM se formaliza nuestra propuesta, también se realizaron pruebas con datos sintéticos y se muestran los resultados de las pruebas.

El capítulo 5 experimentos y resultados se valida el modelo por medio de un caso de estudio se presentan los resultados y se analizan las pruebas a MLN-ABM y al caso de estudio.

Por último en el capítulo 6 conclusiones y trabajo futuro, detallamos después de un análisis y discusión de los resultados la conclusión de este trabajo de investigación, también se proponen pruebas y sugerencias que fortalecerán el modelo.

# Capítulo 2

## Marco teórico

Con la finalidad de proporcionar mas información sobre la teoría, sistemas y herramientas utilizadas para el desarrollo del modelo MLN-ABM, se desarrolla el presente capítulo.

### 2.1. Redes complejas

El marco natural para el tratamiento matemático de las redes complejas es la teoría de grafos [16]. Un grafo esta compuesto por nodos y enlaces, puede ser dirigido en el que es de suma importancia el orden de los nodos, o bien no dirigido con pesos en sus enlaces.

Por ejemplo en la figura 2.1 observamos tres tipos de grafos con nodos y sus enlaces en la figura 2.1 (a) se encuentra un grafo en la que la interacción entre los nodos es no dirigida por lo que la comunicación es en las dos vías: ida y vuelta. En la figura 2.1(b)se representa un grafo donde sus nodos se comunican con enlaces dirigidos, es decir de una sola vía, para que dos nodos estén totalmente comunicados es necesario tener dos enlaces.

Por último, en la figura 2.1(c) se observa un grafo con enlaces no dirigidos y cada uno de los enlaces tiene un valor numérico comúnmente llamado peso, el cual denota su importancia.

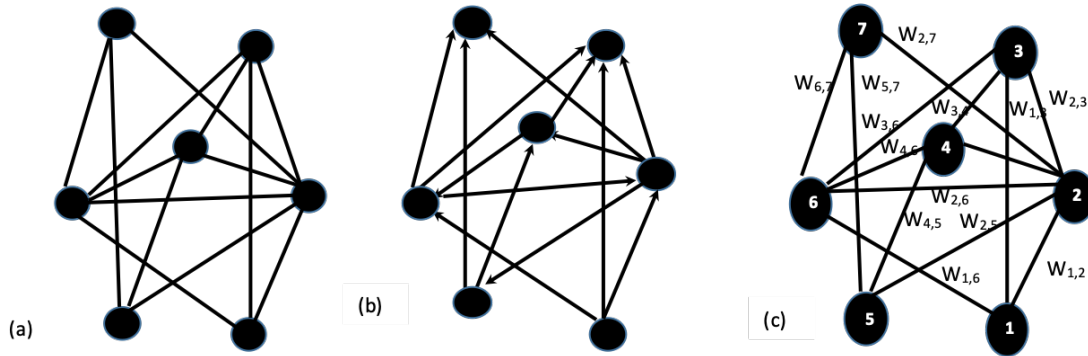


Figura 2.1: Representación de grafos.

### 2.1.1. Métricas más utilizadas en las redes complejas

Con el modelo de grafos se puede observar características de suma importancia en las redes complejas como:

- El grado de un nodo o conectividad, dada por:

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}$$

donde  $k_i$  de un nodo  $i$  es el número de aristas incidentes con el nodo y es definida en términos de una matriz de adyacencia  $A$ .

- El grado promedio de vecino más cercano de un nodo  $i$  dada por:

$$k_{nn,i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in N_i} k_j = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} k_j$$

donde la suma se ejecuta en los nodos que pertenecen a  $N_i$ , el conjunto de los primeros vecinos de  $i$ .

- **Promedio ruta mas corta** donde  $d_{ij}$  es la longitud de la ruta del nodo  $i$  al nodo  $j$  dada por [26, 27]

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij}$$

- **Agrupamiento** que puede ser cuantificado definiendo la transitividad  $T$  del grafo como el número relativo de triples transitivos [28–30] dada por :

$$T = \frac{3 \times \text{números de triángulos en } G}{\text{Número de triples conectados en los } v \text{ vertices de } G}$$

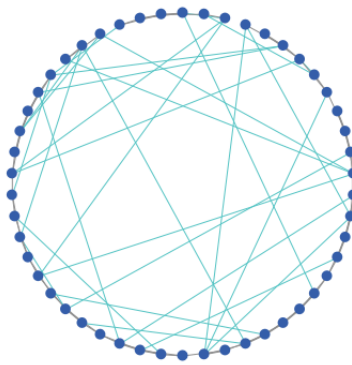
Todas estas características esenciales para determinar que tan conectada esta la red, observar que nodos tienen mayor conectividad, que rutas son las mas cortas o criticas, conocer subgrupos en la red, entre otras, para mayor referencias [16].

Una ventaja de la teoría de redes complejas es la representación lógica de la interconexión entre una cantidad inmensa de elementos simples (como los sistemas complejos), este enfoque ha sido utilizado en el modelado de fallas en cascada.

### 2.1.2. Topologías de redes complejas

Tradicionalmente, cuando se modela una red multicapa para simular comunicación, encontrar caminos mas cortos o caminos erróneos, un ataque directo o aleatorio una de los siguientes metodologías entre otras son aplicadas:

- **Redes de Mundo Pequeño.** Este modelo de red tiene una distribución de intermediación heterogénea, también su grado de distribución es heterogénea. Otros estudios



**Figura 2.2:** Red de mundo pequeño.

revelan que esta red de mundo pequeño es robusta ante ataques aleatorios, pero frágil a los ataques intencionales cuando un escenario de fallas en cascada se presenta [31]. En la figura 2.2 observamos un ejemplo de este tipo de redes en donde todos los nodos están conectados.

- **Redes Sin Escala.** Matemáticamente, la ley de distribución de potencias significa que los momentos estadísticos de la variable de grado no están definidos, de ahí el nombre de redes sin escala. Debido a la ubicuidad de las redes sin escala en sistemas naturales y creados por el hombre, la seguridad de estas redes, es decir como los fallos o ataques afectan la integridad y operación de las redes, han sido de gran interés desde que su propiedad sin escala se descubrió [32]. En la figura 2.3 presentamos un ejemplo de este tipo de redes
- **Redes Dirigidas.** La mayoría de las redes del mundo real, por ejemplo, red eléctrica, Internet y redes de transporte; se pueden modelar como redes dirigidas, donde la ruta de extremo a extremo consiste en un conjunto de nodos intermedios desde la fuente hasta el destino [33]. En la figura 2.4 mostramos un ejemplo de este tipo de redes

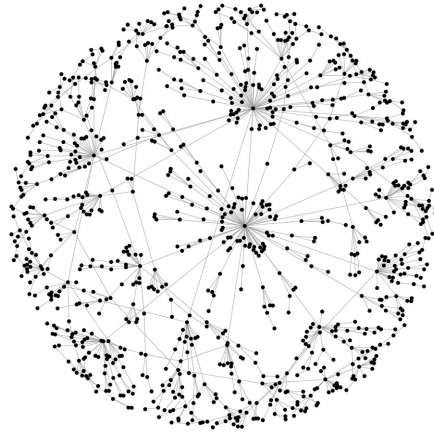


Figura 2.3: Red de libre escala.

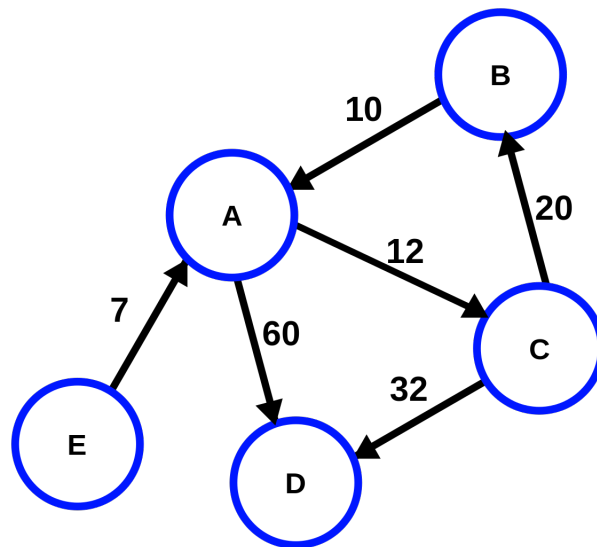


Figura 2.4: Red dirigida.

## 2.2. Redes multi-capa

Las redes multi-capa constituyen el entorno natural para representar sistemas interconectados, donde una entidad puede estar presente en mas de un de estos sistemas al mismo tiempo. Cada uno de estos sistemas forman una capa de la red [34]. Esta claro qué en algunos sistemas complejos, los nodos a menudo tienen interacciones de diferentes formas que toman lugar sobre algunas redes con las que interactúan, es decir forman una red multiplexada.

Por ejemplo, en una red social [35] un individuo tiene diferentes interacciones con otros nodos tales como: familia, compañeros, amigos, entre otros, si cada una de estas interacciones es representada en distintas redes, entonces el modelo representara mejor los sistemas reales [36] .

### 2.2.1. Definición formal de una red multi-capa

Una red multi-capa es un par  $L = (\eta, E)$  donde  $\eta = \{N_\alpha; \alpha \in \{1, \dots, L\}\}$  es un (Directo o No dirigido, Con Pesos o Sin Pesos) grafo  $N_\alpha = (X_\alpha, l_\alpha)$  (capas de  $L$ ) y

$$E = \{l_{\alpha\Phi} \subseteq X_\alpha \times X_\Phi; \alpha\Phi \in \{1, \dots, L\}, \alpha \neq \Phi\}$$

es el conjunto de interconexiones entre nodos de diferentes capas  $N_\alpha$  y  $N_\Phi$  con  $\alpha \neq \Phi$  . Los elementos de  $E$  son llamados inter-capas, y los elementos de cada  $l_\alpha$  son llamados como conexiones intra-capa de  $L$  en contraste con los elementos de cada  $l_{\alpha\Phi} (\alpha \neq \Phi)$  que son llamados conexiones inter-capa. El concepto de redes multi-capa se extiende a otros objetos matemáticos [34] como:

- Redes Multiplexadas [37]
- Redes Temporales [38]

- Redes Interconectadas o Interactivas[39]
- Redes Multidimensionales [40]
- Redes Interdependientes[41]
- Redes Multinivel [42]
- Hiper Redes[43]

### 2.2.2. Medidas de centralidad

Con el análisis de las redes multi-capa, se pueden identificar a los elementos que tienen un rol crucial en la estructura del sistema. Las interacciones pueden ser clasificadas y se puede descubrir que tan propensos son los nodos a formar triángulos, así como reconocer que nodo es el más usado como puente para alcanzar a otros nodos, estas entre otras métricas que contribuyen a identificar información relevante que podría ayudar a minimizar las contingencias que se presenten en la estructura de la red. En la figura 2.5 se muestra un sistema con tres capas, modelado con grafos, donde un nodo tiene interacción con otros nodos, algunas interacciones son con nodos de su misma red y otras con nodos pertenecientes a otra red, mientras un nodo puede ser prioridad en su red para la correcta operación, su relevancia puede ser mínima en otra capa de la red.

- **El grado de centralidad** de cada nodo es una de las medidas más importantes, cuando un nodo tiene una alta cantidad de conexiones, se vuelve más relevante para el sistema. El grado de centralidad de un nodo  $i \in X$  de una red multiplex  $L = (\eta, E)$  es el vector [40–42, 44]

$$K_i = (K_i^1) \dots K_i^L$$

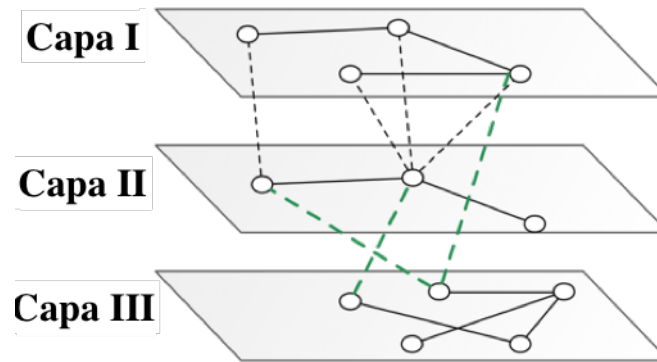


Figura 2.5: Red multi-capa con tres capas.

donde  $K_{i\alpha}$  es el grado del nodo  $i$  en la capa  $\alpha$ , esto es

$$K_i^\alpha = \sum_j a_{ij}^\alpha$$

esta formalización de el grado del nodo es la extensión natural del grado del nodo en una red compleja simple.

- **Centralidad de intermediación** tiene como objetivo calcular la aparición de un nodo en el trazado geodésico entre dos nodos.
- **Eigenvector** mide la capacidad de la influencia de un nodo en la red, por ejemplo, si sus nodos vecinos tienen un alto grado de centralidad, entonces representa una alta relevancia en la red, y
- **Coeficiente de Agrupación** Este coeficiente dado por Watts y Strogatz [26], puede ser extendido de una red simple a el concepto de una red multi-capa en muchas formas. La métrica de agrupación nos da como resultado, la tendencia de los nodos a formar triángulos, siguiendo la famosa frase “El amigo de mi amigo es también mi amigo”.

En una red  $N(X, l)$  el coeficiente de agrupación de un nodo es dada por

$$C_N = \frac{\text{Número de enlaces entre los vecinos de } i}{\text{El mayor número posible de enlaces entre los vecinos de } i}$$

En [36] modelan la red de transporte aéreo europeo. El objetivo principal es reprogramar los vuelos de los pasajeros y sobre todo, observar la resiliencia de la red ante fallos aleatorios. Para simular este problema se implementó una red multi-capa, las aerolíneas se modelaron como capas y los nodos que representan los aeropuertos están presentes en todas capas, los vuelos son directos de origen a destino sin escalas, en su estudio concluyen que la estructura multi-capa incrementa considerablemente la resiliencia de estos sistemas ante disturbios.

### 2.3. Sistemas multi-agente

Con los Sistemas Multi-Agente (SMA), se puede percibir la interacción entre entidades quienes están representadas por agentes; esta es una característica importante en los sistemas complejos. La simulación basada en agentes ha probado ser una gran técnica para modelar sistemas complejos, y especialmente los sistemas sociales [45–48]. El objetivo de la simulación basada en agentes es encontrar métodos que nos permitan construir modelos de sistemas complejos, construida por agentes autónomos que, aunque operan solo con conocimiento local y poseen capacidades limitadas, son capaces de implementar los comportamientos globales deseados [49].

Los SMA se componen de varios agentes que interactúan intercambiando mensajes entre ellos, ya sea para ayudarse en una tarea para la solución de problemas o para lograr una serie de metas individuales o colectivas [45]. Un agente es un sistema situado en un lugar, con la capacidad de detectar el entorno en el que se ubica y realizar una serie de acciones para cumplir sus objetivos [50].

### 2.3.1. Arquitecturas de SMA

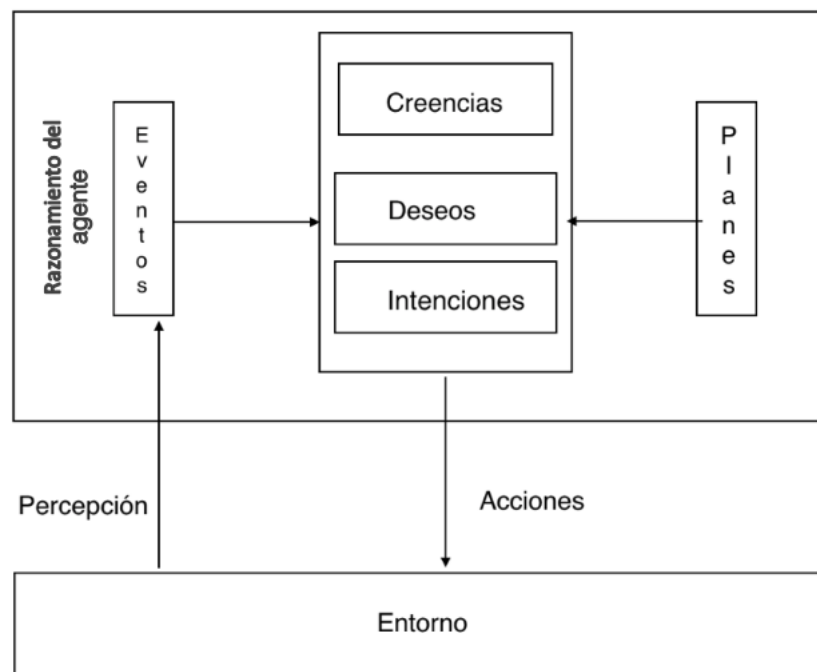
Diferentes arquitecturas han sido propuestas para desarrollar agentes con comportamientos específicos. De acuerdo al comportamiento, los agentes pueden ser clasificados como deliberativos, reactivos e híbridos.

- **Deliberativos:** son aquellos en los que su comportamiento pueden predecirse por el método de atribuirseles deseos, creencias y comprensión racional [51]. Entre ellos, los agentes intencionales son una de las arquitecturas de agentes mas populares denominada BDI (Belief, Desire, Intention) [52]. Estos agentes están dotados con estados mentales tales como deseos, creencias e intenciones, están basados en modelo cognitivo del ser humano, por lo que los agentes usan una representación interna de lo que los rodea, además de un modelo simbólico de el mundo que los rodea.
- **Reactivos:** son agentes elementales (y a menudo sin memoria) con una ubicación definida en el entorno. Los agentes reactivos realizan sus acciones como consecuencia de la percepción de estímulos provenientes de otros agentes o del entorno; en general las especificaciones del comportamiento de este tipo de agentes es un conjunto de reglas condición-acción, con la adición de una estrategia de selección para elegir una acción que se llevará a cabo cada vez que se puedan activar más reglas. En este caso, la motivación para una acción deriva en la provocación de un evento detectado en el medio ambiente; estos agentes no pueden ser pro-activos [52].
- **Híbridos:** son la combinación de los componentes del tipo reactivo, con componentes del tipo deliberativo. La mayoría de las veces se usa la parte reactiva para interactuar con el entorno y la reacción inmediata a los eventos que pueden ocurrir sin invertir tiempo en el razonamiento, mientras que la parte deliberativa es responsable de la planificación y la toma de decisiones. La ventaja de usar este tipo de arquitectura es

que aprovecha las otras dos arquitecturas, y de hecho, la mayoría de los fenómenos no han adaptado arquitecturas puramente reactivas o deliberativas. Estas arquitecturas se organizan típicamente en una estructura jerárquica de capas, donde las capas inferiores son principalmente reactivas y las capas más altas son deliberativas [50].

### Arquitectura BDI

Como se menciona anteriormente la arquitectura BDI es una de las más populares, se basa en el agente el cual tiene un estado mental como base para su razonamiento en la figura 2.6 muestra la interacción entre el razonamiento del agente y el medio ambiente.



**Figura 2.6:** Arquitectura BDI.

- Las creencias son la información del agente sobre el mundo (medio ambiente), que no necesariamente tiene que corresponder a la realidad. Sin embargo, es necesario que el agente crea que la información es correcta.

- Los deseos son todos los posibles estados de las tareas que el agente desea lograr. Estas representan el estado emocional del agente y pueden influir en las decisiones del agente.
- Las intenciones son los planes necesarios para lograr un objetivo en particular [53]. Los planes son especificaciones de los pasos a seguir para alcanzar una meta.

El proceso de como los agentes realizan la toma de decisiones es siempre algo que se tiene que analizar cuidadosamente. En [54] se presenta un resumen de 14 arquitecturas que han logrado captar el interés de la comunidad científica, siendo la arquitectura BDI una de las mas populares [55] se recomienda para construir sistemas de racionamiento para tareas complejas en entornos dinámicos [56].

### 2.3.2. Negociación

La negociación es una técnica que ofrece muchas ventajas, es usada por los agentes cuando un objetivo o recurso es necesario para mas de un agente. Son cuatro los componentes requeridos para establecer una negociación [57].

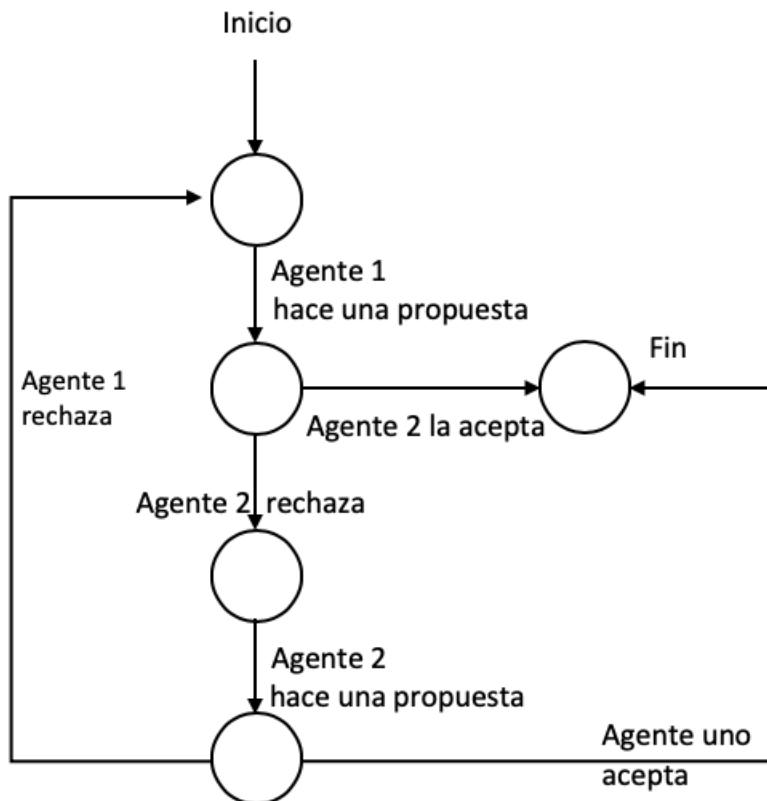
1. Conjunto de negociaciones.
2. Protocolo.
3. Estrategias, una por cada agente.
4. Una regla para determinar cuando un acuerdo es alcanzado y cuando un trato esta atascado.

Una negociación típica es la que tiene una serie de turnos, se presenta una propuesta en cada turno. Hay tres formas de llevar a cabo la negociación entre agentes:

1. Uno a uno, involucra dos agentes, y la negociación es entre ellos.

2. Muchos a uno, un agente negocia con muchos otros agentes
3. Muchos a muchos, aquí la negociación se lleva simultáneamente muchos agentes con muchos otros agentes

La negociación uno a uno es comúnmente la más utilizada, y ofertas alternativas es uno de sus más fundamentales protocolos uno a uno [58]. En la figura 2.7 se describe el modelo básico con dos agentes. Iniciando con la propuesta del agente uno y la aceptación o rechazo del agente dos, si acepta significa que los agentes llegaron a un acuerdo y termina la negociación, si no el agente dos realiza una propuesta que el agente uno puede aceptar o rechazar, si acepta entonces la negociación termina, de lo contrario inician de nuevo.



**Figura 2.7:** Protocolo de ofertas alternativas.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se presenta los pasos, y las formas en la que se llevo a cabo la investigación. Iniciamos con la metodología, continuamos con una extensa revisión bibliográfica en el estado del arte, después se diseña u plan experimental y como ultimo la validación de la investigación.

### 3.1. Metodología

La metodología aplicada esta basada en la teoría de sistemas complejos, estos sistemas los encontramos en muchos fenómenos naturales que podemos ver en problemas reales como economía, transporte, salud entre muchos otros, están formados por unidades simples y reglas simples pero complejas interacciones. La teoría de redes multi-capa es una forma para representar estos sistemas complejos, tiene las siguientes características, nos permite analizar la estructura de la red a través de métricas como la centralidad. Para que esta metodología de sistemas complejos sea mas robusta y comprenda problemas mas aproximados a la realidad se necesito la teoría de sistemas multi-agentes con la que fue posible realizar simulaciones de escenarios, negociación y cooperación de recursos y dotarle una personalidad al agente que

se encuentra en un entorno de subsistemas que forman un sistema complejo.

Los pasos a seguir fueron los siguientes :

### 3.1.1. Revisión bibliográfica

Como primer paso se realizará una investigación del estado del arte en las siguientes temáticas:

- Sistemas complejos.
- Sistemas auto-organizables.
- Simulación.
- Sistemas multi-agente.
- Efectos en cascada en redes complejas.
- Redes multi-capas

### 3.1.2. Plan experimental

Para el plan experimental se comenzó con la unidad básica de nuestro modelo MLN-ABM el agente, después se avanzó con más agentes hasta lograr un sistema multi-capas, el siguiente paso fue formalizar la arquitectura y por último interconectar al menos dos sistemas complejos. Los pasos se encuentran listados a continuación :

1. Desarrollar un modelo de agente consciente del contexto el cual sirva para modelar los elementos base en sistema complejo.

2. Simular interacciones entre distintos agentes para observar su comportamiento emergente.
3. Modelar un sistema multi-capa para describir sus componentes y las interacciones básicas entre ellos.
4. Definir una arquitectura multi-agente para modelar un sistema complejo y las interacciones entre sus elementos.
5. Simular distintos sistemas complejos y observar su comportamiento emergente.
6. Modelar las interacciones entre sistemas complejos.
7. Simular las interacciones entre sistemas complejos interconectados.

### 3.1.3. Validación

- Simular al menos un caso de estudio de sistemas complejos interconectados que permita validar el modelo.

# Capítulo 4

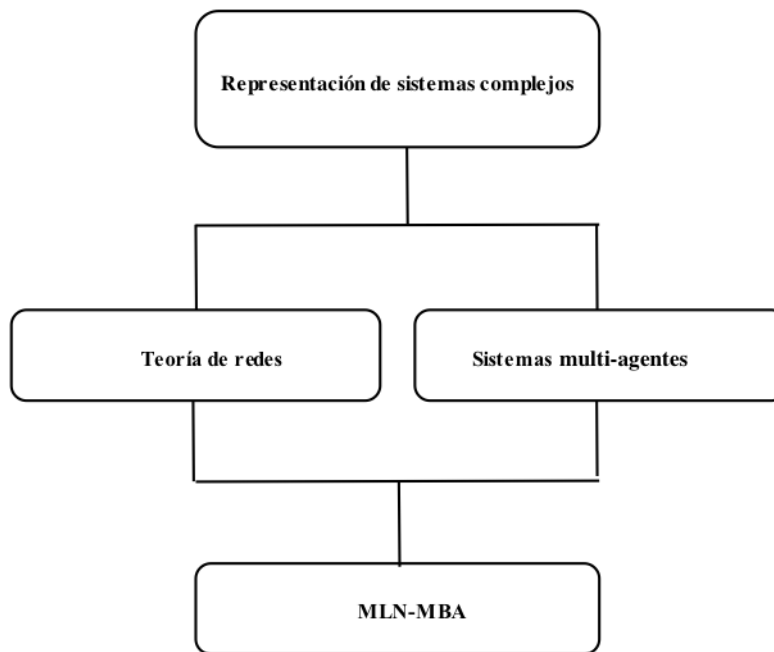
## Modelo MLN-ABM

En este capítulo, primeramente se propone una estrategia de modelado que considera los enfoques de sistemas complejos, teoría de redes y sistemas multi-agente. Después, se hace una descripción formal del modelo propuesto que representa a un sistema multi-capas para el manejo de contingencias. Finalmente, se presentan una serie de pruebas con el objetivo de validarlo.

### 4.1. Modelando un sistema multi-capas

El uso de la teoría de redes nos ofrece la capacidad de analizar la estructura de una red, además de proporcionar métricas que nos ayudan a identificar entidades importantes o relevantes en la estructura, por otra parte, los SMA nos permiten representar y simular diversos escenarios con agentes que pueden representar diferentes roles, con capacidad de negociar, tomar decisiones y reaccionar ante contingencias. Para representar sistemas multi-capas más apegados a los sistemas reales, proponemos un modelo que obtenga ventaja de la teoría de redes y los SMA, como resultado tenemos el modelo MLN-ABM para representar

sistemas multicapa y técnicas que analizan la estructura y robustez de la red y es capaz de tomar decisiones, negociar y reaccionar ante contingencias como la eliminación o bajo rendimiento de alguna entidad. En la figura 4.1 se muestra el esquema propuesto de la teoría de redes y los sistemas basados en agentes como están integrados en un solo modelo para representar sistemas complejos.



**Figura 4.1:** Modelo para representar sistemas complejos, donde la teoría de redes y los sistemas multi-agente se integran

Con el fin de gestionar contingencias en redes multi-capas, se presenta esta propuesta, con la cual buscamos representar entidades capaces de evaluar soluciones alternativas, negociar recursos y tomar decisiones. El modelo propuesto facilita el análisis a la estructura de la red, obteniendo características e información relevante, así como la interacción y dinámica entre sus diferentes capas. En la figura 4.2 agentes representan a nodos de la red y sus enlaces. Los agentes pueden estar conectados al mismo tiempo con agentes dentro de su capa o fuera de su capa, la cual es una característica de las redes multi-capas.

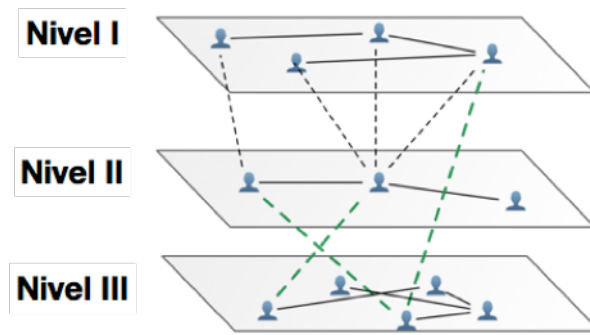


Figura 4.2: Modelo de una red multi-capa

## 4.2. Modelo de un sistema multi-capa para manejo de contingencias

Algunas de las medidas más utilizadas en el análisis de una red que tienen como objetivo medir la robustez y tolerancia a fallos son las medidas de centralidad degree centrality, Betweenness, EigenVector y neighbors centrality. Esta última realiza una sumatoria del grado de centralidad de cada uno de los vecinos del nodo, y el nodo que tenga los vecinos con más alto grado, es considerado importante dentro de la red [59]. Como caso de estudio presentamos una red con  $n$  nodos y  $l$  enlaces con la finalidad de simular un sistema en el que sus entidades están conectadas entre sí, prestando y solicitando servicios, y observar el funcionamiento de la red cuando una o más entidades ya no estén desempeñándose a su máximo nivel por lo que ocasionalmente pueden negar sus servicios, lo que conduciría a que gradualmente se produzca una cascada de fallos que colapse la red. En el modelo de la red se integrará un agente negociador que analizará la información obtenida de las medidas de centralidad para tomar decisiones que sirvan para el manejo de contingencias ante el colapso de la red.

En el modelo de la red, los nodos están representados por un conjunto de agentes  $A = A_{g1}, \dots, A_{gn}$ , donde un agente se representa mediante la tupla  $A_{gi} = \langle \alpha, \beta, \gamma, \delta \rangle$ , donde  $\alpha$  representa un conjunto de necesidades  $\alpha = \alpha_1, \dots, \alpha_n$  que permiten al agente mantener un nivel de desempeño  $\delta$  dentro de la red. Estas necesidades  $\alpha_i$  son cubiertas por un servicio

donde  $\beta$  representa un conjunto de servicios  $\beta = \beta_1, \dots, \beta_n$ .

Cada  $A_{gi}$  tiene una utilidad  $\gamma$  que aumenta cuando se presta un servicio  $\beta_i$  y disminuye cuando se solicita cubrir una necesidad  $\alpha_i$ . Cuando a un  $A_{gi}$  se le proporciona un servicio  $\beta_i$  su nivel de desempeño  $\delta$  aumenta en un porcentaje y el  $A_{gj}$  que proporciono el servicio  $\beta_i$  ve disminuido su nivel de desempeño  $\delta$  en un porcentaje determinado. Cada cierto periodo de tiempo  $\varepsilon$  cada agente recupera un porcentaje de su desempeño  $\delta$  mientras su desempeño sea  $\delta < max$ .

La interacción entre un agente  $A_{gi}$  y un agente  $A_{gj}$  agentes ocurre cuando un agente  $A_{gi}$  solicita un servicio  $\beta_i$  y otro agente  $A_{gj}$  es quien lo proporciona entonces se establece un enlace entre ellos, si no hay respuesta a la solicitud de servicio  $\beta_i$  que el agente  $A_{gi}$  solicita, entonces el nivel de desempeño  $\delta$  disminuye en un porcentaje al no recibir un servicio necesario para su funcionamiento.

Cada agente  $A$  tiene una escala de colores que indican su nivel de desempeño en la red, si su color es verde significa que tiene un buen desempeño que puede estar en 80 % al 100 % de su capacidad, cuando su color esta en ámbar entonces su nivel de desempeño varia del 50 % al 89 % y podría estar ocasionando fallas en la red, al alcanzar el color rojo este agente ya no está en la disposición de prestar un servicio a los demás agentes, ya que prioriza su funcionamiento y espera hasta alcanzar un nivel de desempeño de color amarillo para volver a prestar un servicio, mientras tanto se ocupa de solicitar servicios que le ayudan a incrementar su nivel de desempeño.

Para que un agente  $A_{gj}$  pueda otorgar un servicio  $\beta_i$  se deben cumplir las siguientes características:

- Que  $A_{gi}$  cuente con una utilidad  $\gamma \geq 1$
- Que  $A_{gj}$  tenga un desempeño  $\delta > min$

- Si  $A_{gj}$  tiene un desempeño  $\delta = max$  se proporciona un servicio  $\beta_i$  sin condiciones.
- Cuando  $A_{gj}$  tenga un desempeño  $\delta > min \& \delta < max$  entonces ofrecerá el servicio  $\beta_i$  en proporción a su funcionalidad, es decir si esta al 80 % de su capacidad el 20 % de las peticiones podrían ser rechazadas.

En el algoritmo MNF (Management of network failures) se muestran los pasos que se siguen en la simulación de la red donde se inicializan las necesidades  $\alpha$  y servicios  $\beta$  de los agentes  $A$  de forma aleatoria, también se les asigna una utilidad  $\gamma$  y desempeño inicial  $\delta$ , como criterio de parada se revisa el funcionamiento de la red si  $\delta > min$  continua las interacciones en la red, si es menor entonces las fallas en cascada han colapsado la red.

#### Algorithm: Management of Network Failures (MNF)

---

*Method Network\_collapse*  $\langle \alpha, \beta, \gamma, \delta \rangle$

*Set*  $\alpha, \beta, \gamma, \delta \forall A_{gi}$  where  $\delta, \beta$  &  $\gamma, \delta$  are positives.

*Do*

*if* ( $\varepsilon$ )

*set*  $\delta + 1 \forall A_{gi}$  with  $\delta < max$

$A_{gi}$  ask to  $A_{gj}$  for  $\beta$

*if* ( $\alpha_i \subset \alpha$  of  $A_{gi} \ni \beta$  of  $A_{gj}$ )

*if* ( $(A_{gi}(\gamma > min) \& (A_{gj}\delta > min))$ )

*set*  $A_{gi} \left\{ \begin{array}{l} \delta + 1 \\ \gamma - 1 \end{array} \right.$

*set*  $A_{gj} \left\{ \begin{array}{l} \delta - 1 \\ \gamma + 1 \end{array} \right.$

*else*

```
    set  $A_{gi}\{\delta\} - 1$   
    set  $\varepsilon \varepsilon + 1$   
    while( $\delta > 1$ )  
End Method
```

Cuando un subsistema o ambos alcanzan un nivel de advertencia o nivel crítico; es decir color ámbar o rojo solicitan recursos al agente administrador del sistema. Los agentes negociadores inicializarán con el protocolo de negociación: Alternando propuestas, un modelo de Rubinstein [57]. Alternando propuestas es un protocolo uno a uno y se asume en cada agente negociador las siguientes premisas:

- El desacuerdo es el peor resultado por lo que ambos agentes prefieren cualquier resultado a caer en desacuerdo.
- Los agentes buscan maximizar el recurso.
- El tiempo es valioso.

Una vez obtenido el recurso, se asignará a los agentes conforme a su nivel de prioridad dentro del subsistema. La asignación de prioridad de los agentes depende de los resultados de las métricas de centralidad (Degree, Betweenness). Se proponen dos formas de interpretar las medidas, la primera consiste en asignar prioridad 1 hasta prioridad 3 tomando en cuenta los resultados de mayor a menor, es decir el agente más conectado con mayor tráfico es más importante, la segunda considera las métricas en forma inversa, es decir, el agente con menos interacción o menos tráfico es el más importante.

### 4.3. Pruebas

Las pruebas realizadas son las siguientes:

- Escenario 1: Iniciar la red con 2 subsistemas, 5 agentes por cada capa y solo uno tiene interacción tanto interna como externa de su red, la importancia de las subredes es de (50-50), posteriormente se cambia la importancia de las redes a 70-30, 40-60, 30-70 y 60-40, para todos los casos se iniciara sin negociación y dos pruebas con negociación. Una para la prioridad asignada con los resultados de las métricas de mayor a menor y la segunda con la interpretación de menor a mayor.
- Escenario 2: Iniciar la red con 2 subsistemas, 5 agentes por cada capa y solo 2 agentes por subsistemas que tienen interacción tanto interna como externa a su red, con pruebas que varían la importancia de los subsistemas de 50-50, 70-30, 40-60, 30-70 y 60-40. Para todos los casos primero se realiza la simulación sin negociación y con negociación. De igual forma las pruebas con negociación serán interpretando los resultados de las métricas de mayor a menor y viceversa.

En la figura 4.3 se muestra la simulación del sistema con los agentes en diferentes niveles de funcionalidad y los enlaces que representan la interacción entre ellos, visualmente la inter-linea café separa los subsistemas. Adicionalmente se asigno un cuadrado en la esquina superior derecha de cada subsistema para observar el nivel de desempeño de cada subred.

En las siguientes tablas 4.1,4.2,4.3,4.4,4.5 se muestran los resultados de las pruebas realizadas al sistema con las características antes mencionadas en el escenario numero uno.

Al analizar los resultados mostrados en la tabla 4.1 se destaca la métrica centralidad de grado, interpretando al agente con menos conexiones como primera prioridad y el agente con mayor número de conexiones como menor prioridad al momento de asignar recursos obtenidos de la negociación. En resumen, en este escenario sin aplicar una negociación en la asignación de recursos el sistema entero colapsa solo después de 704 ticks (iteraciones) y al utilizar la negociación el sistema mantiene su funcionamiento por mas tiempo antes de colapsar.

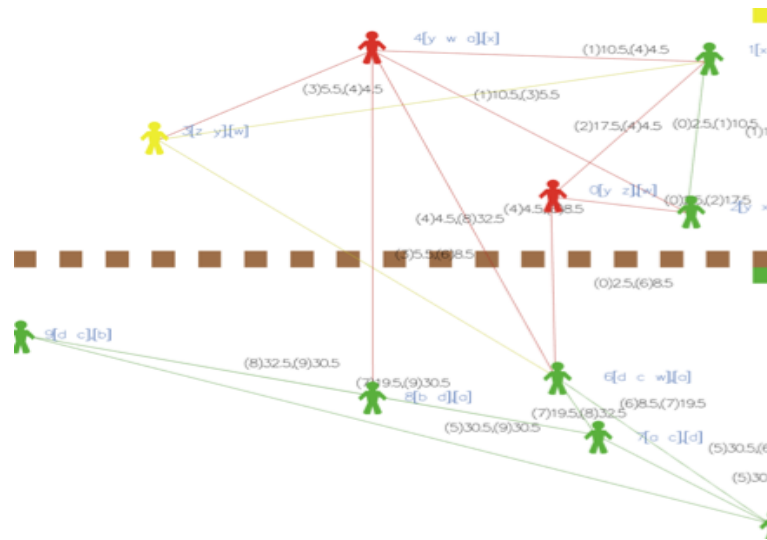


Figura 4.3: Simulación de una red, con enlaces fuera y dentro de cada subsistema.

Tabla 4.1: Red con igual importancia en los dos subsistemas 50-50 y con un agente por subsistema con interacción externa.

Red 1, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
704	Ninguna
902	Degree Alto-Bajo
903	Between Alto-Bajo
2480	Degree Bajo-Alto
1784	Between Bajo-Alto

Los resultados de la tabla 4.2 donde los subsistemas tienen diferentes capacidades para el sistema general, continúan indicando que el agente con menos conexiones es importante dentro de la subred a la que pertenece.

**Tabla 4.2:** Red con importancia de los subsistemas 70-30 y con un agente por subsistema con interacción externa.

Red 1, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
510	Ninguna
1032	Degree Alto-Bajo
1407	Between Alto-Bajo
1680	Degree Bajo-Alto
1671	Between Bajo-Alto

Sin una negociación, en la tabla 4.3 se obtuvo resultados que muestran un rápido colapso de la red, mientras que al implementarla permaneció funcionando el doble de tiempo antes de que las fallas la colapsaran.

En las tablas 4.4 y 4.5 por las características propias de la distribución de los subsistemas donde la subred 2 tiene mejor desempeño (60 en la tabla 4 y 70 en la tabla 5) obtuvimos un mayor rendimiento del sistema y también se observa que la negociación y asignación de recursos utilizados pueden no ser los adecuados, en esos casos, sería necesario implementar otro tipo de negociación o inclusive una arquitectura de agentes diferentes.

En la tabla 4.6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el escenario uno

**Tabla 4.3:** Red con importancia de los subsistemas 60-40 y con un agente por subsistema con interacción externa.

Red 1, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
512	Ninguna
1007	Degree Alto-Bajo
1007	Between Alto-Bajo
2472	Degree Bajo-Alto
1680	Between Bajo-Alto

**Tabla 4.4:** Red con importancia de los subsistemas 30-70 y con un agente por subsistema con interacción externa.

Red 1, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
824	Ninguna
782	Degree Alto-Bajo
781	Between Alto-Bajo
3591	Degree Bajo-Alto
1830	Between Bajo-Alto

**Tabla 4.5:** Red con importancia de los subsistemas 40-60 y con un agente por subsistema con interacción externa.

Red 1, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
808	Ninguna
854	Degree Alto-Bajo
792	Between Alto-Bajo
3583	Degree Bajo-Alto
1830	Between Bajo-Alto

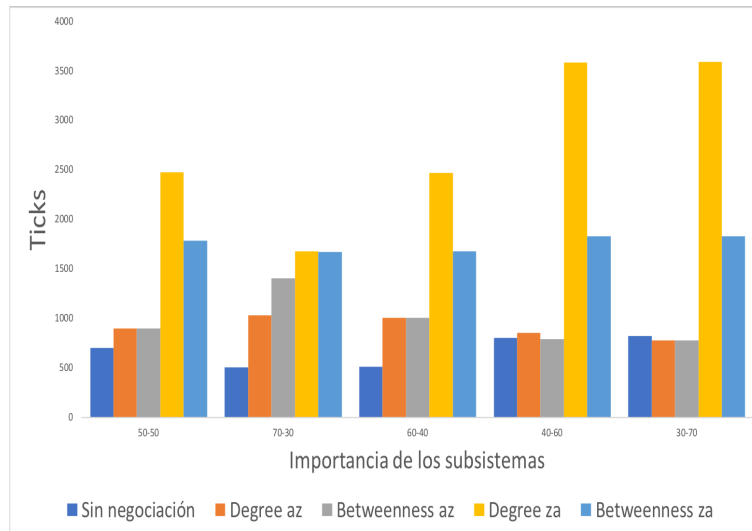
como primer columna se encuentra la medida de centralidad aplicada, en la segunda columna mostramos la importancia 50-50 de ambos subsistemas y los ticks obtenidos al realizar las pruebas, y de manera consecutiva encontramos el resto de la configuración de los subsistemas.

En la figura 4.4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el escenario uno. Donde en todos los casos el sistema multicapa presento un mayor tiempo de funcionamiento cuando se otorgo prioridad al nodo con menos conexiones; es decir al aplicar la métrica grado

**Tabla 4.6:** Resultados obtenidos de las pruebas al escenario uno, con un agente por subsistema que interactúa fuera de su subred.

Escenario uno, resultados por importancia de subsistema					
Medida de centralidad	50-50	70-30	60-40	30-70	40-60
Ninguna	704	510	512	824	808
Degree Alto-Bajo	902	1032	1007	782	854
Between Alto-Bajo	903	1407	1007	781	792
Degree Bajo-Alto	2480	1680	2472	3591	3583
Between Bajo-Alto	1784	1671	1680	1830	1830

del nodo se asigno prioridad uno al de menor grado, prioridad dos al siguiente con menor grado y así sucesivamente para la asignación de recursos al establecer la negociación.



**Figura 4.4:** Resumen de resultados del escenario uno, con un agente por subsistema que interactúa fuera de su subred.

Los resultados para las pruebas realizadas en el escenario dos se muestran en las siguientes tablas 4.7,4.8,4.9,4.10,4.11 y la figura 4.5 con el resumen de las pruebas realizadas.

En la primer prueba 4.7 donde ambos subsistemas son prioritarios para la red y cuentan cada uno con dos nodos que interactúan en su red, y además tienen la capacidad de comunicarse fuera de su red se observa un colapso del sistema en pocas iteraciones, al aplicar la negociación dos de los resultados de las métricas con sus respectivas interpretaciones permiten que el sistema completo permanezca por mayor tiempo en actividad antes de que una falla inicie fallos en cascada dejando sin operación ambos subsistemas.

Al cambiar la prioridad que representa cada subsistema para el sistema multicapa en la tabla 4.8 solo uno de los resultados de las medidas aplicadas nos ofrece un mejor rendimiento en el sistema. en el resto de los casos donde no se blinda al nodo correcto concluye con una falla que se extiende a otros nodos a los que no se les considero prioritarios y estos a su vez

**Tabla 4.7:** Red con igual importancia de los subsistemas 50-50 y con dos agentes por subsistema con interacción externa.

Red 2, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
304	Ninguna
1152	Degree Alto-Bajo
472	Between Alto-Bajo
479	Degree Bajo-Alto
864	Between Bajo-Alto

propagan la falla hasta que el sistema deja de funcionar correctamente.

**Tabla 4.8:** Red con importancia de los subsistemas 70-30 y con dos agentes por subsistema con interacción externa.

Red 2, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
319	Ninguna
976	Degree Alto-Bajo
336	Between Alto-Bajo
280	Degree Bajo-Alto
280	Between Bajo-Alto

En los resultados de la tabla 4.9 se presenta la misma tendencia que la tabla anterior cuando el subsistema número uno tiene prioridad alta para el sistema multicapa, cuando se protege al nodo que tiene mayor conexión en ese subsistema, la red funciona por un mayor tiempo, En el resto de los casos el sistema deja de funcionar por los fallos en un corto periodo.

**Tabla 4.9:** Red con importancia de los subsistemas 60-40 y con dos agentes por subsistema con interacción externa.

Red 2, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
312	Ninguna
1157	Degree Alto-Bajo
472	Between Alto-Bajo
296	Degree Bajo-Alto
312	Between Bajo-Alto

En las siguientes pruebas realizadas, el segundo subsistema es considerado con mayor

prioridad dentro del sistema multicapa. Con una importancia de 70% del subsistema, en la tabla 4.10 tomando en cuenta los resultados obtenidos de aplicar las métricas se concluye que en todos los casos el funcionamiento de la red es superior al aplicar la negociación para distribuir los recursos que no aplicarla.

**Tabla 4.10:** Red con importancia de los subsistemas 30-70 y con dos agentes por subsistema con interacción externa.

Red 2, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
240	Ninguna
1151	Degree Alto-Bajo
520	Between Alto-Bajo
520	Degree Bajo-Alto
911	Between Bajo-Alto

De la misma forma en la tabla 4.11 cuando el subsistema número dos tiene prioridad y se aplica la negociación propuesta el sistema multicapa permanece por un tiempo mas prolongado funcionando, mientras que al no negociar los recursos los nodos comienzan a fallar y propagan rápidamente las fallas a otros nodos hasta colapsar la red.

**Tabla 4.11:** Red con importancia de los subsistemas 40-60 y con dos agentes por subsistema con interacción externa.

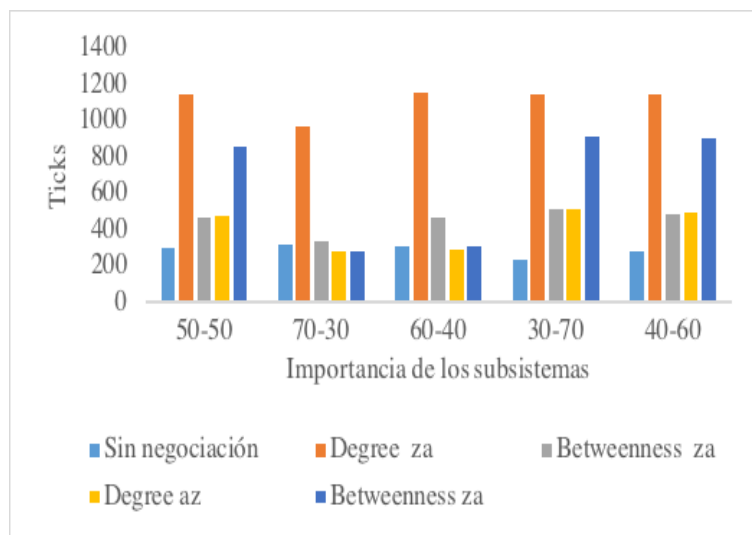
Red 2, características de inicialización en la red	
Ticks	Medida de centralidad
280	Ninguna
1152	Degree Alto-Bajo
488	Between Alto-Bajo
495	Degree Bajo-Alto
903	Between Bajo-Alto

En la tabla 4.12 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el escenario uno como primer columna se encuentra la medida de centralidad aplicada, en la segunda columna mostramos la importancia 50-50 de ambos subsistemas y los ticks obtenidos al realizar las pruebas, y de manera consecutiva encontramos el resto de la configuración de los subsistemas.

**Tabla 4.12:** Resultados del escenario dos, con dos subsistemas y dos agentes por subsistema que interactúan fuera de su subred.

Escenario dos, resultados por importancia de subsistema					
Medida de centralidad	50-50	70-30	60-40	30-70	40-60
Ninguna	304	319	312	240	280
Degree Alto-Bajo	1152	976	1157	1151	1152
Between Alto-Bajo	472	336	472	520	488
Degree Bajo-Alto	479	280	296	520	495
Between Bajo-Alto	864	280	312	911	903

En la figura 4.5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas en el escenario número dos. Donde sin importar la prioridad de los subsistemas y tomando en cuenta los resultados de la medida grado del nodo (Degree az), interpretando como prioridad al nodo con mas conexiones se obtiene un mayor funcionamiento de la red. Sin embargo también tiene resultados destacados en tres de los cinco casos la medida de centralidad Betweenness (Betweenness za), cuando se interpreta que el nodo que menos es utilizado como puente en las conexiones tiene una mayor importancia en el subsistema.



**Figura 4.5:** Resumen de resultados del escenario dos, con dos agentes por subsistema que interactúan fuera de su subred.

# Capítulo 5

## Experimentos y resultados

En este capítulo se describe el experimento EATN (por sus siglas en inglés European Air Transport Network) utilizado para la validación del modelo propuesto, para fines de comparación el experimento se presenta en una red de una sola capa y la propuesta basada en redes multi-capas y sistemas multi-agentes, después de las pruebas realizadas se analizan los resultados obtenidos mostrándolos en tablas e imágenes.

### 5.1. Caso de estudio EATN

El problema de la red de transporte aéreo europeo EATN, ha sido estudiado y analizado desde múltiples enfoques, en este trabajo proponemos el análisis de la estructura de la red, como una forma de superar las fallas que surgen cuando se interrumpe la funcionalidad de los nodos de la red o sus enlaces. Los datos utilizados para construir la red fueron empleados en [36]. Primero, construimos la red con el modelo MLN-ABM, es decir presentando los datos como una red con múltiples niveles o capas, donde cada capa está integrada por agentes (aplicando nuestro modelo los agentes los programamos como nodos) que representan aero-

puertos; en total la red tiene 37 capas  $L$ , cada capa representa una aerolínea  $A$ , los enlaces  $i, j; l$  representan los vuelos disponibles desde  $i$  a  $j$ . Todos los aeropuertos están incluidos en cada capa, pero solo hay una aerolínea por capa por lo tanto aunque están presentes no estarán activos si no hay vuelos hacia ellos. Con el propósito de comparación se modela una red de una sola capa utilizando los mismos datos.

Acorde a nuestro modelo MLN-ABM planteamos agentes negociadores en el problema de cancelación de vuelos, por lo que se establecen un conjunto de agentes  $A = Ag_1, \dots, Ag_n$ , donde la tupla que representa un agente es  $Ag_i = \langle \gamma, \tau \rangle$ , donde  $\gamma$  representa un conjunto de preferencias de vuelo  $\gamma = f_1, \dots, f_n$ , y  $\tau$  el conjunto finito de estrategias disponibles para negociar  $\tau = s_1, \dots, s_n$ .

La negociación utilizada después de la cancelación de un vuelo, es el protocolo de propuestas alternativas uno a uno, además el juego definitivo 2 turnos, donde si no alcanzan un acuerdo y llegan a un conflicto, resultara en el reembolso del vuelo.

El protocolo de la negociación entre agentes  $Ag_i$  se llevará a cabo de la siguiente manera:

- Turno 1, el agente con rol de pasajero expresara su oferta, la cual el agente que representa la aerolínea podrá aceptar o rechazar. Si el agente aerolínea acepta la oferta, la negociación termina. En caso de no aceptar la oferta continua al turno 2
- Turno 2, la aerolínea ofrece una contra-oferta, la cual el pasajero puede aceptar o no.

Si el pasajero rechaza la contra-oferta, el equilibrio de Nash no se alcanzará, y se activara el acuerdo de conflicto.

En 5.1 se describe el proceso de negociación a dos turnos, en un algoritmo. Donde se inicia estableciendo sus preferencias de viaje y las estrategias que seguirán en la negociación, se estableció una restricción de dos turnos para que ambos puedan proponer sus ofertas. En este algoritmo, no se estableció ninguna regla para indicar que es mejor aceptar cualquier

**Tabla 5.1:** Algoritmo del protocolo propuestas alternativas uno a uno a dos turnos.**Función juego definitivo***Se inician las preferencias para  $Ag_1$ ,  $Ag_2$* *Se establecen las estrategias para  $Ag_1$ ,  $Ag_2$*  *$Ag_1$  realiza una oferta**si ( $Ag_2$  acepta)**{la negociación termina con un acuerdo}**si no { $Ag_2$  realiza una contra oferta**si( $Ag_1$  acepta)**{la negociación termina con un acuerdo}**si no {la negociación termina con un conflicto}}***Fin de la función**

oferta antes de llegar a un acuerdo de conflicto.

**Tabla 5.2:** Comparación de medidas de centralidad en red multi-capa y mono-capa

Posición	Grado Capa 1	Grado Capa 17 de 37	Grado Capa 20 de 37	Betweenness Capa 1	Betweenness Capa 17 de 37	Betweenness Capa 20 de 37
1	112	40	41	2641	207	219
2	103	13	6	1339	148	214
3	100	3	5	1281	143	171
4	99	3	4	1130	84	144
5	95	2	4	859	76	115

En ambos modelos (MLN-ABM y mono-capa) se les aplicaron las medidas de centralidad como se explica en el cuadro 5.2 donde se muestra una comparación del grado de centralidad y la métrica Betweenness. La primera columna enumera los cinco resultados mas altos al aplicar las medidas, y las siguientes columnas indican el nombre de la métrica y los resultados de la red mono-capa y la capa 17 y 20 de la red MLN-ABM. A diferencia de las pruebas realizadas en el modelo propuesto a este experimento se opto después de analizar el problema que solo se tomara en cuenta las métricas en forma ascendente.

Los resultados de ambas mediciones presentan una aparente diferencia entre la red mono-capa y cada capa de la red multi-capa. En cuanto al grado de centralidad, podemos observar que en la red mono-capa hay nodos con más de 100 conexiones, esto se debe a que este

modelo considera todas las aerolíneas en todo momento y no las trata por separado, de tal forma que, si un nodo altamente conectado es eliminado, el modelo podría interpretar que nadie más puede realizar el vuelo, esta sola falla puede provocar una serie de fallas hasta colapsar el sistema. Por otro lado, el grado de centralidad de cada capa de la red multi-capa, muestra una conexión inferior debido a que representan solo un fragmento de toda la red. En el contexto de las aerolíneas si se presenta una falla en una capa, aun existe la posibilidad de volar utilizando otra capa diferente, es decir una aerolínea que realice el mismo vuelo.

Finalmente, de la métrica Betweenness en la red mono-capa del cuadro 5.2 podemos inferir que existen nodos críticos en la red.



**Figura 5.1:** Representación de la red de transporte aéreo europeo como una red mono-capa

La figura 5.1 muestra una representación del gráfico de los aeropuertos y vuelos directos simulados como una red mono-capa. Solo se tuvieron en cuenta los aeropuertos y los vuelos directos.

Para modelar la pérdida total de un aeropuerto, la red de una sola capa funcionaría bien,

pero a veces es necesario modelar la falla de una o más aerolíneas y no la capacidad de los vuelos en general. En la figura 5.2 (a), se presenta el modelado de la capa 17; tiene 42 aeropuertos que realizan 53 vuelos directos, de los cuales 20 vuelos pueden ser operados por más de una aerolínea. En la figura 5.2 (b) se representa la capa 20, tiene 44 aeropuertos y 55 vuelos, de los cuales 25 pueden ser realizados por más de una aerolínea.



(a) Capa 17 con 32 aeropuertos y 53 vuelos



(b) Capa 20 con 44 aeropuertos y 55 vuelos

**Figura 5.2:** Representación de la red de transporte aéreo europeo como una red MLN-ABM

Algunos aeropuertos tienen un alto tráfico de pasajeros, y esa es la razón por la que son considerados como nodos importantes en la red de transporte (medida centralidad del grado

interpretada de mayor a menor). Si fuera el caso de estudio analizar a que aeropuertos con menos trafico de personas (medida de centralidad del grado interpretada de menor a mayor) se deben desviar vuelos, podremos hacer uso del modelo MLN-ABM que nos ofrece robustez en el análisis de redes, su estructura, eficiencia y los sistemas multi-agentes para la simulación de escenarios, con una gran variedad de técnicas de negociación.

En la figura 5.3 (a) se muestra la medida centralidad del grado de la red con todos los aeropuertos con sus vuelos directos modelados como una red mono-capa, en el gráfico algunos nodos (aeropuertos) tienen un alto grado de centralidad, estos son los aeropuertos con numerosas conexiones algunos de ellos con mas de 100. En la figura 5.3 (b) están representados los resultados de analizar la capa 17 de la red MLN-ABM, las conexiones también representan vuelos directos entre aeropuertos, entre mas vuelos directos existan en la capa la centralidad de el nodo es más alta. Los resultados representados en la gráfica 5.3 (b),(c) son menores que los obtenidos en (c) por el modelado de la red mono-capa en el que no hay distinción entre las aerolíneas. La gráfica 5.3 (c) muestra los resultados obtenidos de aplicar la métrica a la capa 20, como resultado del análisis observamos que un nodo destaca sobre los demás, por esa razón se deduce que es un nodo critico en capa 20.

Para reconocer los aeropuertos más concurridos según las conexiones, y que podrían ser vulnerables a los ataques debido a su importancia, se utiliza la intermediación. La Figura 5.4 (a) muestra la medida de la intermediación de la red mono-capa y la Figura 5.4 (b) representa los resultados de la capa 17 y la Figura 5.4 (c) muestra algunos nodos más ocupados de la capa 20 de una red MLN-ABM.

Para determinar los nodos mas influyentes en la red, se utilizo la medida de eigenvector primero en una red mono-capa como se muestra en el gráfico 5.5 (a) y en las capas 17 y 20 de una red multi-capa representadas en el gráfico 5.5 (b),(c)

En el cuadro 5.3 se muestran los resultados de la negociación en la capa 17, con 42

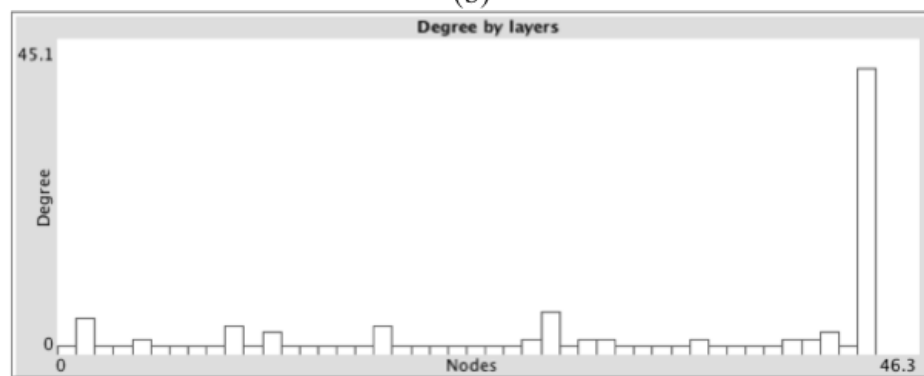
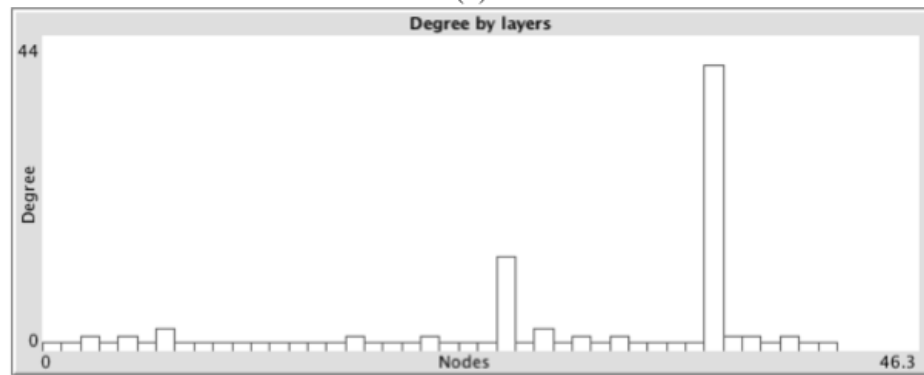
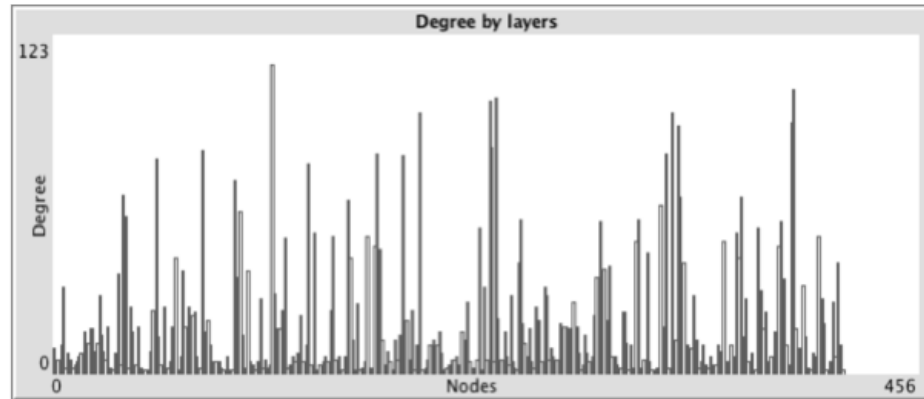


Figura 5.3: Centralidad del grado

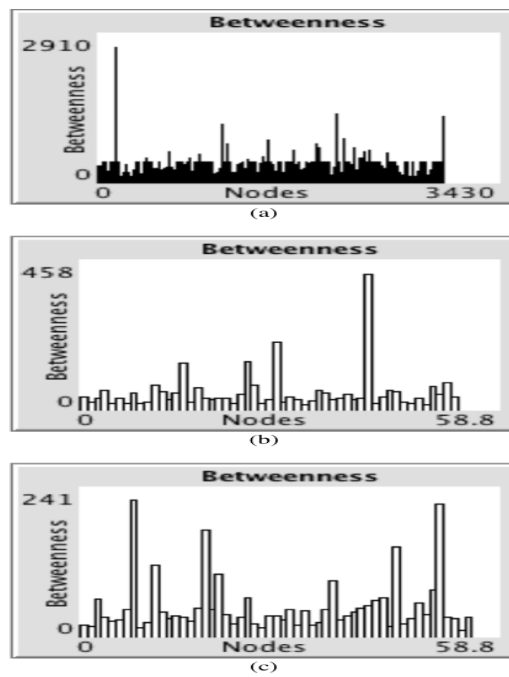


Figura 5.4: Centralidad de la intermediación

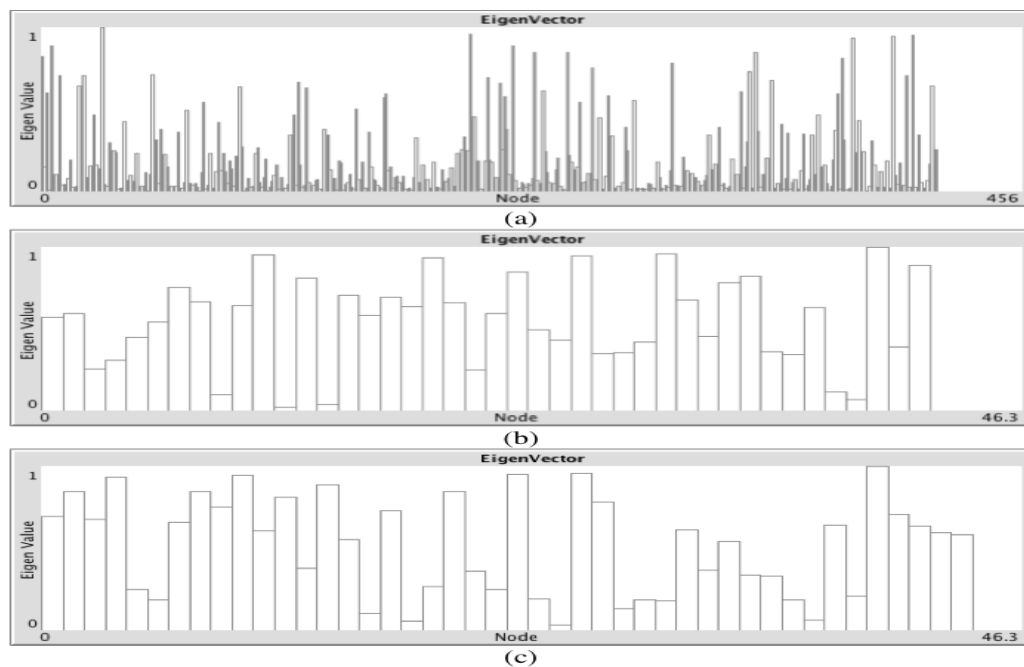


Figura 5.5: Medida de centralidad EigenVector

aeropuertos y 53 vuelos de la misma aerolínea. En la primer columna se encuentran los 5 resultados donde cada uno representa un promedio de 30 pruebas. La columna 2 de “Vuelo hoy” son los espacios disponibles por la aerolínea y que un pasajero negocio acorde a sus preferencias. En la columna de “Volar mañana” se muestran los que por su preferencia su vuelo puede ser reprogramado a un día después con la finalidad de evitar un conflicto, y la ultima columna representa aquellos que no alcanzaron un acuerdo.

**Tabla 5.3:** Negociación propuestas alternativas en red mono-capa

Prueba	Vuelo hoy	Vuelo mañana	Conflicto
1	10	27.5	17.5
2	10	28.16	16.83
3	10	27.56	17.43
4	10	27.76	17.23
5	10	27	18
Promedio	10	27.6	17.4

El cuadro 5.4 representa el resultado de la negociación propuestas alternativas aplicada en una red mono-capa, que contiene 417 aeropuertos y 2953 vuelos. En la columna “Prueba” se enumeran los 5 resultados realizados donde cada uno es el promedio de 30 pruebas. En la columna “Vuelo hoy” representa el total donde la aerolínea acepto la oferta del pasajero, en la tercer columna “Vuelo mañana” las veces que el pasajero evito alcanzar un conflicto y la ultima columna “Conflicto” las ocasiones que no alcanzaron un acuerdo pasajero y aerolínea.

El cuadro 5.5 muestra los promedios de las pruebas realizadas en la red mono-capa y las capas 17 y 20 de la red MLN-ABM. En la columna “Vuelo mañana” se encuentra el numero de veces que un pasajero acepto el trato de la aerolínea para evitar alcanzar un conflicto. En la columna “Conflicto” el promedio de los pasajeros quienes rechazaron oferta de la aerolínea y tienen un conflicto.

**Tabla 5.4:** Negociación propuestas alternativas capa 20

Prueba	Vuelo hoy	Vuelo mañana	Conflicto
1	600	1481.06	871.93
2	600	1480.03	872.96
3	600	1473.23	879.76
4	600	1479.06	873.93
5	600	1472.53	880.46
Promedio	600	1477.18	875.81

**Tabla 5.5:** Negociación propuestas alternativas en la red mono-capa y MLN-ABM

Red	Vuelo mañana	Conflicto
Mono-capa	1477.18	875.81
MLN-ABM	26.76	16.24

## 5.2. Discusión de los resultados

En el caso de estudio EATN, se modeló y simuló una red desde la perspectiva de una sola capa, como tradicionalmente se realizaban estos modelos, también se planteó el mismo caso desde el enfoque del modelo propuesto MLN-ABM, donde la red está compuesta por diferentes capas o niveles y un agente puede tener conexiones a una o más capas y otros agentes cuentan con la capacidad de negociación y/o cooperación.

Para obtener información de la estructura y robustez en la red, se aplicaron las medidas de centralidad acorde al tipo de modelo mono-capa o MLN-ABM [16, 60], con los resultados observados en las pruebas realizadas, identificamos que una red mono-capa considera una ruta como única, es decir, para este modelo de red solo plasma un enlace de un vuelo origen a uno destino, y en caso de una contingencia que afecte esa ruta, esta quedará deshabilitada, nadie podrá volar desde ese origen a ese destino. En cambio, el modelo de la red MLN-ABM representa las rutas por aerolíneas, por lo tanto un vuelo de origen a destino pueden hacerlo

diferentes aerolíneas y si se presenta una contingencia es posible que solo afecte a la aerolínea y no a toda la ruta.

La aplicación de las medidas de centralidad nos proporciono información relevante como identificar al nodo con mas conexiones, que nodo es el mas usado como puente de comunicación o que nodo tiene mas influencia en la red. En el contexto del caso de estudio identificamos en una red mono-capa el aeropuerto más conectado, el nodo por el que mas vuelos pasan. En la red MLN-ABM, cada capa tiene un aeropuerto altamente conectado es importante para esa capa y no tan significativo en otras capas.

Para representar problemas más aproximados a la realidad en el caso de estudio EATN es necesario simular cancelaciones de vuelos diarios, en la simulación observamos que la mayoría de los pasajeros, es decir agentes que simulan negociaciones con la aerolínea, prefieren no caer en un conflicto y aceptar la oferta de la aerolínea.

En el modelo MLN-ABM se presento dos subredes, cada una administrada por un agente negociador de recursos ante un agente administrador de la red, se aplicaron las métricas de centralidad para las redes MLN-ABM, este rol asignado a agentes se ha utilizado en otro contexto y escenario recientemente, como el presentado en[61] con buenos resultados. En este modelo MLN-ABM los resultados de las pruebas se interpretaron de dos maneras,

1. Al nodo con mayor evaluación se le identificaba como primer prioridad al momento de negociar los recursos, al siguiente nodo con alta evaluación como prioridad dos, y así sucesivamente.
2. Al nodo con menor evaluación se le consideraba como prioridad uno, al segundo nodo con menor evaluación prioridad dos, continuando esa secuencia hasta el nodo con mayor evaluación que se interpretaba con menor prioridad.

En el modelo MLN-ABM y el experimento EATN, se identifico la importancia de las

métricas al momento de negociar los recursos para que el sistema continuara funcionando después de algunas fallas.

En las pruebas del modelo MLN-ABM con el escenario uno, los nodos con menor conexión fueron determinantes en el rendimiento de la red, al otorgarles un nivel de prioridad uno y asignarles recursos para que este se recuperara de una falla, se observó un mayor funcionamiento de la red al que se obtuvo al darle prioridad uno al más conectado. Otra métrica con buenos resultados fue la Betweenness asignando prioridad uno al de menor evaluación, con resultados superiores a los obtenidos cuando no se aplicó la negociación y cuando los nodos con alta evaluación eran prioridad uno.

En el segundo escenario el mejor funcionamiento de la red cuando los fallos se presentaron fue con la medida centralidad de grado, al nodo con más conexiones se consideró como prioridad uno obteniendo los mejores resultados. La medida Betweenness con prioridad uno al nodo con menor evaluación de nuevo presentó buenos resultados al considerarlos en el momento de la negociación de recursos.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

Una vez terminadas las pruebas, obtenido los resultados procedemos a realizar un análisis del modelo, las pruebas y los resultados. En este capítulo se muestran las conclusiones a las que se llegó después del análisis, además se añade sugerencias para un futuro seguimiento del modelo. Como parte final se mencionan recomendaciones para el seguimiento del modelo.

### 6.1. Conclusiones

Algunos de los problemas con los que nos enfrentamos hoy en día, poseen características similares como grandes cantidades de componentes, son unidades simples y mantienen una comunicación dinámica. De las diferentes teorías y herramientas existentes para modelar problemas complejos, seleccionamos la teoría de redes y los sistemas multi-agentes, formando el modelo MLN-ABM con el cual se obtiene relevante información sobre la estructura, robustez del sistema, el planteamiento de redes multi-capa, además de poder simular cualquier cantidad de escenarios y utilizar agentes con capacidades de negociación.

En el experimento EATN, se puede observar que modelar el problema de la red de trans-

porte aéreo europeo en una red multi-capa resulta en información relevante que no podríamos ver fácilmente si el problema se modela como una red mono-capa. En caso de una contingencia, nos dice cuales aeropuertos son los más activos y cuáles tienen más conexiones.

Por otra parte, el uso de los agentes nos permite modelar los problemas con más características que nos acercan a la simulación de problemas reales. El agente reactivo que se implemento negocia solo si se presenta una cancelación de vuelo. Sin embargo, puede implementarse para reaccionar ante situaciones más complicadas, como retrasos en los vuelos, reprogramación de vuelos, elección de conexiones, entre otros.

En el modelo MLN-ABM, el uso de la información obtenida por la medidas de centralidad fueron de gran importancia para el agente negociador de recursos, en los diferentes escenarios planteados los resultados fueron mejores cuando se utilizo esta información por lo que el sistema permanecía un mayor tiempo funcionando, el proponer la interpretación de las medidas como el mejor de cada métrica considerarlo como prioridad uno y en otros casos el resultado mas bajo evaluarlo como prioridad uno fue de gran utilidad y se obtuvieron buenos resultados en ambos escenarios.

Con el planteamiento propuesto podemos modelar problemas más apegados a la realidad, la utilización de los sistemas multi-agente y la teoría de redes nos permite construir modelos robustos y obtener importante información acerca de ellos.

## 6.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, en el caso de estudio EATN, es necesario incluir en los agentes de simulación para administrar los diferentes tipos de pasajeros(primer clase, necesidades especiales, tercera edad, niños entre otros), los costos de vuelo, entre otras variables que afectan las negociaciones con los pasajeros de un vuelo cancelado. Además, sería necesario llevar a

cabo una prueba de robustez de la red, así como calcular la tolerancia a las desconexiones. Así como evaluar el funcionamiento de la red con mas medidas de centralidad.

En el caso de las pruebas realizadas al modelo MLN-ABM, para los escenarios planteados se debe considerar mas tipos de negociaciones, cooperación y mas niveles dentro de la red, así como considerar comunicaciones directas y realizar pruebas con otras métricas de centralidad.

# Bibliografía

- [1] Yaneer Bar-Yam. *Dynamics of complex systems*, volume 12. CRC Press, 2003.
- [2] Melanie Mitchell. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, 2009.
- [3] H Jeong, S P Mason, A.-L. Barabasi, and Z N Oltvai. Lethality and centrality in protein networks. *Nature*, 411(6833):41–42, may 2001.
- [4] H Jeong, B Tombor, R Albert, Z N Oltvai, and A.-L. Barabasi. The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 407(6804):651–654, oct 2000.
- [5] R. V. Sole and M. Montoya. Complexity and fragility in ecological networks. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 268(1480):2039–2045, oct 2001.
- [6] Juan Camacho, Roger Guimerà, and Luís A. Nunes Amaral. Robust Patterns in Food Web Structure. *Phys. Rev. Lett.*, 88(22):228102, may 2002.
- [7] Massimo Marchiori and Vito Latora. Harmony in the small-world. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 285(3):539–546, 2000.
- [8] Vito Latora and Massimo Marchiori. Efficient Behavior of Small-World Networks. *Phys. Rev. Lett.*, 87(19):198701, oct 2001.
- [9] M. E. J. Newman. Scientific collaboration networks. I. Network construction and fundamental results. *Phys. Rev. E*, 64(1):016131, jun 2001.

- 
- [10] M. E. J. Newman. The structure of scientific collaboration networks. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98(2):404–409, 2001.
- [11] Mark S Granovetter. The Strength of Weak Ties. *Am. J. Sociol.*, 78(6):1360–1380, 1973.
- [12] V. Latora and M. Marchiori. Economic small-world behavior in weighted networks. *Eur. Phys. J. B*, 32(2):249–263, mar 2003.
- [13] O Sporns, G Tononi, and G.M Edelman. Connectivity and complexity: the relationship between neuroanatomy and brain dynamics. *Neural Networks*, 13(8-9):909–922, nov 2000.
- [14] Olaf Sporns. Network analysis, complexity, and brain function. *Complexity*, 8(1):56–60, sep 2002.
- [15] Alessandro Vespignani Romualdo Pastor-Satorras. Evolution and structure of the internet. *Cambridge Univ. Press. Cambridge*, 2004.
- [16] Stefano Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D. U. Hwang. Complex networks: Structure and dynamics. *Phys. Rep.*, 424(4-5):175–308, 2006.
- [17] Rosario N. Mantegna, H. Eugene Stanley, and Neil A. Chriss. An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance. *Phys. Today*, 53(12):70–70, 2000.
- [18] D. J. Watts. A simple model of global cascades on random networks. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 99(9):5766–5771, 2002.
- [19] Y Moreno and A Vazquez. The Bak-Sneppen model on scale-free networks. *Europhys. Lett.*, 57(5):765–771, 2002.
- [20] Per Bak and Kim Sneppen. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Phys. Rev. Lett.*, 71(24):4083–4086, dec 1993.

- 
- [21] Henrik Jeldtoft Jensen and Marcelo O. Magnasco. Self-Organized Criticality: Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems. *Phys. Today*, 1999.
- [22] L de Arcangelis and H.J Herrmann. Self-organized criticality on small world networks. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 308(1-4):545–549, may 2002.
- [23] K.-I. Goh, D.-S. Lee, B. Kahng, and D. Kim. Sandpile on Scale-Free Networks. *Phys. Rev. Lett.*, 91(14):148701, 2003.
- [24] F. Caruso, V. Latora, A. Rapisarda, and B. Tadić. The olami-feder-christensen model on a Small-World topology. In *Complexity, Metastability and Nonextensivity*, pages 355–360, jul 2005.
- [25] Hiroki Sayama and Open SUNY Textbooks. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. *Complex Adapt. Syst. Model.*, 2015.
- [26] Duncan J. Watts and Steven H. Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world networks’. *Nature*, 393(6684):440–442, jun 1998.
- [27] Duncan J. (Princeton Studies in Complexity) Watts. Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness, Princeton University Press, 1999. \$39.50 (hardcover), 262 pp. ISBN: 0-691-00541-9. (Book Reviews). *Bull. Math. Biol.*, 62(4):794–796, jul 2000.
- [28] M E J Newmann. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.*, 45(2):167–256, 2003.
- [29] A. Barrat and M. Weigt. On the properties of small-world network models. *The European Physical Journal B(2000)*, mar 1999.
- [30] N Alon, R Yuster, and U Zwick. Finding and counting given length cycles. *Algorithmica*, 17(3):209–223, mar 1997.

- 
- [31] Yongxiang Xia, Jin Fan, and David Hill. Cascading failure in Watts-Strogatz small-world networks. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 389(6):1281–1285, mar 2010.
- [32] Jianwei Wang, Lili Rong, Liang Zhang, and Zhongzhi Zhang. Attack vulnerability of scale-free networks due to cascading failures. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 387(26):6671–6678, 2008.
- [33] Xinli Fang, Qiang Yang, and Wenjun Yan. Modeling and analysis of cascading failure in directed complex networks. *Saf. Sci.*, 65:1–9, jun 2014.
- [34] S. Boccaletti, G. Bianconi, R. Criado, C. I. del Genio, J. Gómez-Gardeñes, M. Romance, I. Sendiña-Nadal, Z. Wang, and M. Zanin. The structure and dynamics of multilayer networks. *Phys. Rep.*, 544(1):1–122, 2014.
- [35] Stanley Wasserman and Katherine Faust. *Social network analysis: Methods and applications*, volume 8. Cambridge university press, 1994.
- [36] Alessio Cardillo, Jesús Gómez-Gardeñes, Massimiliano Zanin, Miguel Romance, David Papo, Francisco del Pozo, and Stefano Boccaletti. Emergence of network features from multiplexity. *Sci. Rep.*, 3:1–6, 2013.
- [37] Luis Solá, Miguel Romance, Regino Criado, Julio Flores, Alejandro García del Amo, and Stefano Boccaletti. Eigenvector centrality of nodes in multiplex networks. *Chaos An Interdiscip. J. Nonlinear Sci.*, 23(3):033131, sep 2013.
- [38] Petter Holme and Jari Saramäki. *Temporal networks*, 2012.
- [39] J F Donges, H C H Schultz, N Marwan, Y Zou, and J Kurths. Investigating the topology of interacting networks. *Eur. Phys. J. B*, 84(4):635–651, 2011.

- 
- [40] Michele Berlingerio, Michele Coscia, Fosca Giannotti, Anna Monreale, and Dino Pedreschi. Foundations of Multidimensional Network Analysis. In *2011 Int. Conf. Adv. Soc. Networks Anal. Min.*, pages 485–489. IEEE, jul 2011.
- [41] Sergey V Buldyrev, Roni Parshani, Gerald Paul, H Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291):1025–8, apr 2010.
- [42] Regino Criado, Julio Flores, Alejandro García del Amo, Jesús Gómez-Gardeñes, and Miguel Romance. A mathematical model for networks with structures in the mesoscale. *Int. J. Comput. Math.*, 89(3):291–309, feb 2012.
- [43] R. Criado, M. Romance, and M. Vela-Pérez. Hyperstructures, a new approach to complex system. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 20(03):877–883, mar 2010.
- [44] Federico Battiston, Vincenzo Nicosia, and Vito Latora. Structural measures for multiplex networks. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 89(3), 2014.
- [45] Nigel Gilbert and K Troitzsch. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, 2005.
- [46] Rosaria Conte, Rainer Hegselmann, and Pietro Terna, editors. *Simulating Social Phenomena*, volume 456 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [47] Nigel Gilbert and Pietro Terna. How to build and use agent-based models in social science. *Mind Soc.*, 1(1):57–72, 2000.
- [48] Scott de Marchi and Scott E. Page. Agent-based models. *Annual Review of Political Science*, 17(1):1–20, 2014.

- [49] Jm Vidal. Fundamentals of multiagent systems with netlogo examples. *AI Mag.*, 1:151, 2007.
- [50] S. Nolfi. Power and limits of reactive agents. *Neurocomputing*, 42:119–145, 2002.
- [51] Daniel C. Dennett. The Intentional Stance. *Philos. Books*, 30(3):169–172, jul 1989.
- [52] Anand S Rao, Michael P Georgeff, and Others. BDI Agents: From Theory to Practice. In *ICMAS*, volume 95, pages 312–319, 1995.
- [53] Philip R. Cohen and Hector J. Levesque. Intention is choice with commitment. *Artif. Intell.*, 42(2-3):213–261, 1990.
- [54] Tina Balke and Nigel Gilbert. How do agents make decisions? A survey. *JASSS*, 17(4):1, 2014.
- [55] Michael Georgeff, Barney Pell, Martha Pollack, M. Tambe, and Michael Wooldridge. The belief-desire-intention model of agency. *Intell. Agents V Agents Theor. Archit. Lang. 5th Int. Work. ATAL'98.*, pages 1–10, 1998.
- [56] Rafael H. Bordini, Jomi Fred Hübner, and Michael Wooldridge. *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason*. John Wiley and Sons, 2007.
- [57] Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley Publishing, 2nd edition, 2009.
- [58] Martin J Osborne and Ariel Rubinstein. *Bargaining and Markets*. Emerald Group Publishing Limited, 1990.
- [59] Jun Ai, Hai Zhao, Kathleen M. Carley, Zhan Su, and Hui Li. Neighbor vector centrality of complex networks based on neighbors degree distribution. *The European Physical Journal B*, 86(4):163, Apr 2013.

- 
- [60] Stuart Oldham, Ben Fulcher, Linden Parkes, Aurina Arnatkeviciute, Chao Suo, and Alex Fornito. Consistency and differences between centrality measures across distinct classes of networks. *PLOS ONE*, 14(7):1–23, 07 2019.
- [61] K. Raya, C. G. Gaxiola, and M. Castanon. Agent-based model for self management of network flows using negotiation. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1):210–215, Jan 2018.