



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO
DE LA DISPONIBILIDAD EN SISTEMAS P2P**

Presenta

Maria Elena Melgar Estrada

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias y Tecnologías de la Información

Asesora: DRA. ELIZABETH PÉREZ CORTÉS

Jurado Calificador:

Presidente: DRA. NARELI CRUZ CORTÉS CIC-IPN

Secretario: DRA. ELIZABETH PÉREZ CORTÉS UAM-I

Vocal: DR. RENÉ MACKINNEY ROMERO UAM-I

Vocal: DR. RICARDO MARCELÍN JIMENEZ UAM-I

México, D.F. Noviembre 2011



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO
DE LA DISPONIBILIDAD EN SISTEMAS P2P**

Presenta
Maria Elena Melgar Estrada
Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnologías de la Información

Asesora: DRA. ELIZABETH PÉREZ CORTÉS

Jurado Calificador:

Presidente:	DRA. NARELI CRUZ CORTÉS	CIC-IPN
Secretario:	DRA. ELIZABETH PÉREZ CORTÉS	UAM-I
Vocal:	DR. RENÉ MACKINNEY ROMERO	UAM-I
Vocal:	DR. RICARDO MARCELÍN JIMENEZ	UAM-I

México, D.F. Noviembre 2011

Con todo mi amor para

Israel

y

Aldahir

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Metropolitana y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado en la realización de este proyecto de investigación.

A la Dra. Elizabeth Pérez Cortés por su gran y maravilloso apoyo, por aceptarme y guiarme en este proyecto.

A los profesores Dra. Narelí Cruz Cortés, Dr. René Mackinney Romero y Dr. Ricardo Marcelín Jimenez por sus valiosas observaciones que contribuyeron a mejorar este trabajo de investigación.

A Carlos A. Pérez (*MVF*), por compartir conmigo su inmenso talento, su inteligencia excepcional y su gran generosidad.

A Israel y Aldahir por ser la luz, la energía, la sonrisa, el sol y el motor de mi vida.

A Aída Pérez Guízar por ser una gran amiga y la mejor compañera de clases que he podido tener.

A Quintín Pedraza, Sabina Ortega, y Omar Pedraza por el gran apoyo que me ofrecieron el cual contribuyó a la realización de este trabajo.

No podría haber hecho nada en mi vida sin mi familia. A mi mamá María Elena Melgar y mis hermanos Martín, Juan Manuel, Genaro, Rosario, Miguel Ángel e Israel. En especial a Juan Manuel por ser mi inspiración desde niña y un ejemplo a seguir.

RESUMEN

El éxito de los sistemas P2P (Par a Par, en inglés *Peer to Peer*) depende en gran medida en los recursos aportados por cada par que se integra al sistema. Sin embargo, la ausencia de autoridad central y la característica de autonomía de los pares conduce a una gran heterogeneidad en los comportamientos que adoptan. Si los pares en su autonomía determinan dejar la red, los recursos compartidos ya no estarán presentes y la disponibilidad de éstos puede verse afectada. El presente trabajo se enfoca en identificar estrategias que al ser adoptadas por los pares permitan mantener una disponibilidad de los recursos de acuerdo a un umbral mínimo, considerando la transitoriedad (entrada-participación-salida) de los pares y la demanda de los recursos en el sistema P2P.

Para ello, en la primera parte de este trabajo se propone un modelo evolutivo innovador que permite el estudio del comportamiento emergente de los pares en un sistema P2P. Este modelo utiliza como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva al asumir al sistema como una población de jugadores donde cada par tiene una estrategia e interactúa de forma repetida con el ambiente. La interacción se realiza a través del juego *Ansioso – Perezoso* el cual representa la situación estratégica (*determinar el momento más adecuado para crear una réplica de un recurso afectado*) que enfrentan los pares en el sistema P2P. La interacción repetida da lugar, a que con el paso del tiempo, algunos comportamientos se desempeñen mejor que otros y que a través de un proceso evolutivo se favorezca la persistencia de los comportamientos más aptos. Para conocer los comportamientos evolucionados, el modelo evolutivo contempla el uso de la técnica de algoritmos genéticos.

Posteriormente, en este trabajo se realiza un conjunto de simulaciones del modelo evolutivo expuesto para evaluar: el comportamiento de la población de pares, el tiempo que les toma recuperar la disponibilidad de un recurso y los patrones de comportamiento presentes en las estrategias evolucionadas.

Los resultados obtenidos muestran una estrecha relación entre el comportamiento de los pares y las ganancias y costos de crear y/o mantener un recurso en caché. Esta relación se observa claramente en el tiempo requerido por los pares para restaurar la disponibilidad de un recurso afectado el cual es mayor si la ganancia disminuye. Por otro lado, se identificaron patrones de comportamiento que aparecen constantemente en las poblaciones de estrategias evolucionadas independientemente de los escenarios de simulación realizados.

CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Motivación	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodología	5
1.4	Contribución	5
1.5	Estructura del documento	6
2	Marco teórico	9
2.1	Sistemas P2P	9
2.1.1	Definición	10
2.1.2	Características principales	11
2.1.3	Aplicaciones	12
2.1.4	Clasificación	15
2.1.5	Retos	17
2.2	Teoría de Juegos	18
2.2.1	Elementos básicos	18
2.2.2	Representación de los juegos	19
2.2.3	Clasificación de los juegos	23
2.2.4	Equilibrio	24
2.3	Teoría de Juegos Evolutiva	27
2.3.1	Modelo básico	28

2.3.2	Dinámica del replicador	29
2.3.3	Juegos repetidos	31
2.3.4	Otras dinámicas	38
2.4	¿Por qué la teoría de juegos evolutiva?	42
3	Trabajo previo	43
3.1	Introducción	43
3.2	Modelos de juego	44
3.2.1	Juego “Caching”	44
3.2.2	Modelo Zhang et al.	46
3.2.3	Modelo Feng et al.	47
3.2.4	Modelo Cho et al.	47
3.3	Modelos evolutivos	48
3.3.1	Dinámica del replicador	49
3.3.2	Dinámica basada en agentes	49
3.3.3	Dinámica micro-macro	50
3.4	Resumen	52
3.5	Discusión	56
4	Estrategias de mantenimiento de la disponibilidad en sistemas P2P	59
4.1	Objetivos	59
4.2	Metodología	61
4.3	Diseño de modelos	63
4.3.1	Modelo del sistema	63
4.3.2	Modelo de juego	65
4.3.3	Modelo evolutivo	68
4.4	Simulación	75
4.5	Análisis y discusión de resultados	78
4.5.1	Comportamiento de la población	78
4.5.2	Tiempo de recuperación	80
4.5.3	Patrones de comportamiento	82
5	Conclusiones y trabajo futuro	87
	Apéndice A. Dilemas sociales	91

Apéndice B. Implementación del sistema	93
B.1 Requerimientos funcionales	93
B.2 Requerimientos de calidad	94
B.3 Arquitectura	94
B.3.1 Descripción de módulos	95
Lista de acrónimos	103
Lista de figuras	105
Lista de símbolos	107
Lista de tablas	111
Referencias	113

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los sistemas P2P (Par a Par, en inglés *Peer to Peer*) son sistemas distribuidos que consisten de nodos interconectados capaces de auto-organizarse en topologías de red, con el propósito de compartir recursos como contenidos, ciclos de CPU, almacenamiento, ancho de banda, capaces de adaptarse a fallas y acomodarse a poblaciones transitorias de nodos mientras que mantienen rendimiento y conectividad aceptable, sin requerir de intermediarios o soporte de un servidor global centralizado o autoridad [1].

Estas características han motivado ampliamente el desarrollo de aplicaciones (p. ej., Gnutella, BitTorrent, Kazaa, BOINC, redes de sensores, etc.) para la compartición de recursos [13]. La forma típica de operación en estos sistemas involucra a un nodo (solicitante o cliente) el cual realiza una consulta sobre la red P2P para solicitar algún recurso, otros nodos (proveedores o servidores) reciben esta consulta y le notifican quién proporciona este recurso, después el nodo solicitante establece una conexión hacia los nodos proveedores para adquirir el recurso. Es importante destacar que a diferencia de la aproximación tradicional cliente/servidor, en la que el nodo solicitante y el nodo proveedor son claramente distintos, en los sistemas P2P un nodo puede desempeñar ambos roles.

El éxito de los sistemas P2P depende en gran medida en los recursos aportados por cada par que se integra al sistema. Sin embargo, la ausencia de autoridad central y la característica de autonomía de los pares conducen a una gran heterogeneidad en los comportamientos que adoptan (p. ej., determinar en qué momento se encuentran presentes en la red, apor-

tar recursos, sólo consumir recursos, etc.). Si los pares en su autonomía determinan dejar la red, los recursos compartidos ya no estarán presentes y la disponibilidad de éstos puede verse afectada. Es por ello, que los servicios proporcionados deben estructurarse de tal manera que el funcionamiento correcto del sistema se base en el conjunto de pares que participan activamente en la aplicación, y que un cambio repentino en este conjunto, no conlleve a ningún malfuncionamiento del sistema. La carencia de control central y el inherente dinamismo representan un gran reto para la disponibilidad y en consecuencia crean la necesidad de identificar estrategias eficaces y eficientes que los pares podrían adoptar para mantener la disponibilidad de los recursos en el sistema P2P ante la transitoriedad (entrada-participación-salida) de otros pares.

La teoría de juegos evolutiva es uno de los principales marcos de trabajo para conocer y analizar los diferentes tipos de comportamientos que emergen de la interacción entre individuos en una población [33]. En el estudio del comportamiento emergente de los pares en el sistema P2P ante problemáticas relativas a la disponibilidad de los recursos se ha utilizado esta teoría en [6, 7, 14, 27, 26, 28, 34]. En estos trabajos, se asume al sistema P2P como una población de jugadores donde cada par tiene un comportamiento fijo e interactúa de forma aleatoria y repetida con otros pares (p. ej., solicitando un recurso, realizando una consulta, etc.) a través de un juego. La interacción se realiza a través de un juego el cual representa la situación estratégica (p. ej., cooperar o no cooperar para mantener un recurso en caché, compartir o no compartir un recurso, etc.) que enfrentan los pares en el sistema P2P. Así también, consideran que un proceso de evolución selectiva operará en el tiempo sobre la distribución de estrategias presentes en el sistema, permitiendo con ello analizar cuáles tienen la habilidad de persistir y cuáles tienden a extinguirse.

El enfoque principal de estos trabajos radica en el estudio del grado de cooperación de los pares al compartir un recurso. Con base en ello, consideran los recursos del sistema como un bien común, a todos los pares, para el análisis de la situación representada por el siguiente dilema social: debido a que compartir recursos conlleva costos (p. ej., procesamiento de carga, almacenamiento, ancho de banda, etc.), los pares se benefician más si optan por no contribuir y sólo consumen recursos, comportamiento conocido como *oportunistista* (en inglés *free-riding*), pero si todos los pares en el sistema optan por comportarse así, a todo el conjunto le va peor.

La situación descrita en el párrafo anterior es analizada a través de modelos evolutivos (dinámica del replicador, dinámica basada en agentes y dinámica micro-macro) que

permiten el estudio del comportamiento emergente en el sistema P2P con el objeto de proporcionar mecanismos efectivos que podrían adoptarse para mantener un funcionamiento adecuado en el sistema. Así también, estos trabajos proponen modelos de juegos en los cuales definen las acciones disponibles para cada par en el sistema al enfrentar una determinada situación estratégica. Varios de estos modelos establecen las reglas que regirán la interacción entre los pares al utilizar los marcos de trabajo proporcionados por juegos representativos de dilemas sociales (p. ej., El Dilema del Prisionero, La Caza del Ciervo, etc.).

1.1 Motivación

Este trabajo busca conocer estrategias eficaces y eficientes que los pares podrían adoptar para mantener una disponibilidad adecuada, de acuerdo a un umbral mínimo, de los recursos considerando la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos en un sistema P2P. Así también, en el desarrollo de este proyecto se abordan algunas cuestiones no contempladas en la literatura revisada. Entre ellas podemos mencionar las siguientes:

- En el estudio del sistema P2P se consideran modelos que establecen un conjunto de comportamientos predefinidos en la población. ¿Qué pasaría si los comportamientos no fueran sembrados y en lugar de ello, se permitiera la innovación de comportamientos en la población?
- En los modelos evolutivos, los pares tienen encuentros repetidos de forma aleatoria con otros pares y/o recursos en el sistema y los resultados de interacciones previas no tienen ninguna incidencia en su decisión actual. ¿Es posible que los pares puedan recordar (tener memoria) acerca de los resultados de interacciones previas?, y si es así, ¿Podría la experiencia previa conducir a estrategias con un buen desempeño?
- El enfoque principal de los modelos evolutivos expuestos radica en el estudio del grado de cooperación de los pares al compartir un recurso. Sin embargo, en éstos, no se considera la transitoriedad de los pares. ¿Es posible evolucionar estrategias con un buen desempeño a través de un modelo evolutivo que considere la transitoriedad de los pares en un sistema P2P?

Con base en esto, el presente trabajo presenta un modelo evolutivo innovador que permite el estudio del comportamiento emergente en el sistema P2P. Este modelo considera:

comportamientos no preestablecidos en la población, la experiencia previa de los pares en la toma de decisiones, la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos.

1.2 Objetivos

El presente trabajo propone un modelo evolutivo utilizando como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva. Dicho modelo debe considerar por un lado la exploración de estrategias no predefinidas, y por otro reflejar la experiencia previa de los pares en la toma de sus decisiones para alcanzar los siguientes objetivos:

■ **Objetivo principal.**

Identificar estrategias que al ser adoptadas por los pares permitan mantener una disponibilidad de los recursos de acuerdo a un umbral mínimo, considerando la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos en el sistema P2P.

■ **Objetivos específicos.**

- Diseño de un modelo del sistema que permita establecer las premisas base para el estudio del sistema P2P.
- Diseño de un modelo de juego que represente la situación estratégica que enfrentan los pares al mantener la disponibilidad adecuada de los recursos afectados.
- Diseño de un modelo evolutivo que permita establecer la dinámica poblacional para el estudio del comportamiento emergente de los pares en un sistema P2P.
- Diseño e implementación de una herramienta que permita evolucionar estrategias de mantenimiento de la disponibilidad de los recursos en un sistema P2P mediante un algoritmo evolutivo.
- Analizar el tiempo que tardan los pares en recuperar la disponibilidad de un recurso afectado.
- Identificar qué patrones de comportamiento se encuentran presentes en las poblaciones de estrategias evolucionadas.

1.3 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto consiste en las siguientes cuatro fases: diseño de modelos, implementación, simulación y análisis y discusión de resultados. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

■ Fase I. Diseño de modelos

Se plantea el diseño de modelos que permitan incorporar las características relevantes al problema de la disponibilidad en el sistema P2P considerando la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos.

■ Fase II. Implementación

Esta fase contempla la implementación de una aplicación (en un lenguaje de programación orientado a objetos) que integre los modelos expuestos en la fase I para su simulación.

■ Fase III. Simulación

Esta fase consiste en la configuración y ejecución de las simulaciones para los modelos propuestos en la fase I utilizando la aplicación implementada en la fase II.

■ Fase IV. Análisis y discusión de resultados

En esta fase se analizarán los resultados de las simulaciones ejecutadas en la fase III considerando:

1. El análisis del comportamiento de la población.
2. El tiempo requerido por los pares para restaurar la disponibilidad de un recurso.
3. Patrones de comportamiento presentes en la población de estrategias evolucionadas.

1.4 Contribución

Las principales contribuciones de este proyecto son las siguientes:

1. Estado del arte de trabajos que consideran la teoría de juegos evolutiva para el estudio del comportamiento emergente en los sistemas P2P ante problemáticas relativas a la disponibilidad de los recursos. Este estado del arte se incluye en el capítulo 3 y se centra principalmente en lo siguiente:

- Modelos de juegos que representan la situación estratégica que enfrentan los pares en el sistema P2P.
 - Modelos evolutivos para el estudio del comportamiento emergente en el sistema P2P.
2. Diseño innovador de un modelo de juego (*Ansioso – Perezoso*) que representa la situación estratégica que enfrentan los pares al dar mantenimiento a la disponibilidad de los recursos afectados por la transitoriedad de los pares y que considera la demanda de los recursos.
 3. Diseño innovador de un modelo evolutivo que permite el estudio del comportamiento emergente en un sistema P2P considerando como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva. Este modelo se inspira en el trabajo realizado por Robert Axelrod [2] en el cual aplica la técnica de algoritmos genéticos para el estudio de comportamientos evolucionados en una población de individuos cuya interacción se rige por el juego del Dilema del Prisionero iterado.
 4. Diseño e implementación de un simulador que permite evolucionar poblaciones de estrategias a través del algoritmo genético. El diseño arquitectónico del simulador es altamente modular con el fin de definir, agregar y/o modificar de manera relativamente sencilla lo siguiente:
 - Parámetros del algoritmo genético (p. ej., tamaño de la población, número de generaciones, tamaño del cromosoma, etc.).
 - Modelos de selección, cruce y mutación (p.ej., selección elitista, selección por torneo, cruce en dos puntos, etc.).
 - Modelos de juego.
 - Métodos para el cálculo de la aptitud.
 5. Identificación de patrones de comportamiento que permiten dar mantenimiento a la disponibilidad de los recursos en un sistema P2P.

1.5 Estructura del documento

Este documento está organizado de la siguiente manera. El capítulo 2 describe los principales conceptos y teorías empleados para el desarrollo de este trabajo. Primero se describe a los sistemas P2P, los cuales son objeto de estudio en este proyecto, y después se abordan

los principales conceptos de la teoría de juegos y la teoría de juegos evolutiva cuyos marcos de trabajo son empleados para el estudio del comportamiento emergente de los pares en el sistema. El capítulo 3 presenta la revisión de la literatura relacionada. Esta revisión se enfoca en los trabajos que utilizan la teoría de juegos evolutiva para la resolución de problemas relativos a la disponibilidad de los recursos en un sistema P2P. El capítulo 4 presenta la propuesta y desarrollo de este proyecto considerando el diseño de modelos, implementación, simulación y análisis y discusión de resultados. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los principales conceptos y teorías empleados para el desarrollo del presente trabajo. Primero se describe a los sistemas P2P, los cuales son objeto de estudio en este trabajo de investigación, y posteriormente se presentan los principales conceptos de la teoría de juegos y la teoría de juegos evolutiva cuyos marcos de trabajo se utilizan para analizar la problemática abordada en este proyecto.

2.1 Sistemas P2P

Con el auge de las redes de comunicaciones, entre ellas Internet, la necesidad de compartir recursos ha aumentado día con día. En torno a esto se han desarrollado diferentes tecnologías que han resuelto poco a poco esta necesidad.

La evolución de las computadoras personales (CP) y el desarrollo de las redes de computadoras trajeron consigo el desarrollo de múltiples aplicaciones que se ejecutan en dicha computadora, y a su vez el desarrollo de una nueva arquitectura llamada arquitectura cliente/servidor. En esta arquitectura la mayoría del procesamiento es llevado a cabo en la CP, y los equipos servidores son accedidos únicamente cuando se requieren servicios especializados. Bajo este esquema diversos tipos de servicios fueron apareciendo, entre ellos servicios de bases de datos, correo electrónico, web, almacenamiento, etc. El empleo

de servidores que ofrecen servicios discretos ofreció una flexibilidad a las instituciones al permitirles adquirir servidores de acuerdo al desarrollo de las necesidades. Hoy en día es común que una institución tenga una colección de servidores para atender las solicitudes de los usuarios. Sin embargo, hay servicios que son más requeridos que otros, conduciendo a cuellos de botella en los procesos más utilizados y por otro lado, los servidores con una frecuencia de acceso menor pueden ser no aprovechados al máximo.

Para resolver estos inconvenientes, una tecnología reciente, que ha sido adoptada ampliamente son los sistemas P2P que consideran a todos los equipos interconectados como “iguales”, es decir que todos pueden ofrecer o requerir recursos, permitiéndonos el acceso potencial a una gran cantidad de recursos (p. ej., almacenamiento, procesamiento, etc.).

2.1.1. Definición

Los niveles actuales de exigencia sobre los servicios de cómputo demandan tecnologías y/o arquitecturas que resuelvan de la mejor manera posible los siguientes requerimientos:

- Servicios que siempre estén disponibles.
- Servicios que aprovechen los recursos disponibles.
- Servicios que de forma fácil y económica se puedan escalar de acuerdo a las necesidades.

Las redes P2P son una respuesta a estas necesidades. Pero ¿qué es una red P2P?, un par de definiciones son las siguientes:

De acuerdo a Shen et al. [30], *“una arquitectura de red distribuida puede ser llamada red P2P, si los participantes comparten una parte de sus recursos de hardware (poder de procesamiento, capacidad de almacenamiento, capacidad de red, impresoras, etc.). Estos recursos compartidos son necesarios para proveer el servicio y contenido ofrecido por la red (por ejemplo: compartir archivos o espacios de trabajo colaborativo). Estos participantes son accesibles por otros pares”*.

De acuerdo a Androutsellis-Theotokis [1], *“los sistemas P2P son sistemas distribuidos que consisten en nodos interconectados que pueden auto-organizarse en topologías de red con el propósito de compartir recursos como contenido, ciclos de CPU, almacenamiento y ancho de banda. Capaces de adaptarse a fallas y acomodar poblaciones transitorias de nodos mientras mantienen un rendimiento y conectividad aceptables, sin requerir la intermediación o soporte de un servidor central global o autoridad”*.

Bajo el contexto actual podemos definir a un sistema P2P como una red superpuesta auto-organizada en donde todos los actores pueden tomar el rol de cliente o de servidor para compartir recursos de distintos tipos y en donde cada par es autónomo y no requiere ninguna autoridad central.

Un punto importante de esta definición es el concepto de red superpuesta. Una red superpuesta es “Una red lógica o virtual de capa de aplicación en donde los nodos son direccionables y proveen conectividad, encaminamiento y envío de mensajes entre puntos. Las redes superpuestas son frecuentemente usadas como un substrato para implementar nuevos servicios de red o para proveer de topologías de encaminamiento no disponibles desde la red física que está debajo. Muchos sistemas P2P son redes sobrepuestas que funcionan sobre la Internet” [30].

2.1.2. Características principales

Si bien, las definiciones citadas son amplias, podemos describir características comunes a todas las redes P2P, entre ellas [13, 30]:

- Cada par puede contribuir con recursos a la operación del sistema P2P.
- Los pares son capaces de actuar como cliente o como servidor en función de las necesidades de la red como un todo. En algunos casos se permite la definición de nodos especiales como *súper nodos* o pares de comunicación.
- Todos los nodos pueden comunicarse entre sí.
- Los pares deben poder intercambiar recursos directamente sin la intervención de entidades externas.
- Estos recursos pueden ser poder de cómputo, información, espacio de almacenamiento, archivos, etc.
- Si existieran servidores en la red, son únicamente para permitir el descubrimiento de los pares pertenecientes a la red, en este caso, el sistema es denominado P2P híbrido, en caso contrario, es llamado sistema P2P puro [29].
- Los pares son autónomos, es decir, tienen la libertad de ingresar o salir de la red. La red se auto-organiza en función de los pares conectados al sistema.
- Los sistemas son escalables dado que cada par que ingresa al sistema contribuye también a los recursos disponibles a todo el sistema.

Estas características de los sistemas P2P conllevan a beneficios únicos que hacen estas redes tan atractivas [30]. Entre ellos:

- Debido a que cada par puede actuar como servidor, la carga puede ser distribuida entre una gran cantidad de pares disminuyendo los cuellos de botella.
- El aprovechamiento de los recursos es más eficiente ya que los equipos cliente, que en otras arquitecturas permanecen inactivos, en esta arquitectura participan activamente.
- No hay un control central derivando en una auto-organización de la red, incluso si se agregan nuevos pares.
- Entre más pares existan en el sistema, más recursos existen para compartir por lo que es un sistema altamente escalable.
- Los sistemas pueden replicar un recurso en una gran cantidad de pares por lo que el sistema tienen una tendencia hacia la alta robustez.

Por otro lado, existen inconvenientes en los sistemas P2P que aun necesitan investigación y desarrollo [30]. Por ejemplo:

- Debido a un par puede ser una computadora personal, es más susceptible a ataques maliciosos.
- Incluso cuando un sistema P2P es altamente distribuido no está exento de las dificultades para dividir tareas en unidades pequeñas distribuibles a cada par.
- Aunque puede existir una gran robustez, la dinamicidad de los pares no permite garantizar ni la disponibilidad de los recursos, ni el rendimiento.
- La ausencia característica de un control central dificulta la implantación de estándares, el control del uso ilegal de los recursos o la disminución de pares llamados *oportunistas*, los cuales utilizan los recursos del sistema P2P sin contribuir a él [11].
- Las comunicaciones entre los pares del sistema pueden generar un tráfico excesivo en la red.

2.1.3. Aplicaciones

Actualmente, los sistemas P2P han encontrado su nicho en dos áreas de forma extensa, los sistemas de compartición de archivo y los sistemas de cómputo en paralelo. Existen sin embargo otras aplicaciones que están en uso actual o en desarrollo como sistemas de multimedia, sensores distribuidos y redes de área personal.

2.1.3.1. *Sistemas P2P de compartición de archivos*

Uno de los primeros usos para los que P2P fue empleado es la compartición de archivos, donde cada par ofrece como recurso sus archivos poniéndolos a disposición de cualquier otro par y de forma recíproca, cuando una par requiere un archivo puede solicitarlo a cualquier de los pares que lo posee.

Napster [13] surgió como una forma de compartir archivos de música en la red P2P. Uno de los principales problemas con los que se enfrentó el desarrollo de *Napster* fue el descubrimiento de los pares y de qué archivos tiene cada par. Para solucionar este problema se implementó un servidor central que contenía esa información. Sin embargo, ante la falla del servidor, la aplicación quedaba inutilizada por completo.

La lección fue aprendida al implementar un nuevo sistema P2P de compartición de archivos llamado *Gnutella* [13]. *Gnutella* carecía de servidores centrales en donde buscar otros pares del sistema, en lugar de ello, los pares buscaban a algún vecino en su red cercana y al encontrar alguno, lo consultaban por las direcciones de otros vecinos. Este conllevaba con el tiempo a una red de alto rendimiento debido a la tendencia natural de buscar los pares con más recursos llamados súper nodos. Sin embargo, existía aun un problema por resolver, muchos nodos ingresan al sistema únicamente para obtener un recurso sin estar dispuestos a compartir los recursos que ellos poseen.

BitTorrent fue concebido con la idea de evitar comportamientos oportunistas en los pares, para ello planteó dividir un archivo en partes más pequeñas. Cuando un par descarga una parte, inmediatamente comienza a compartirla con otros pares aun cuando no haya terminado de obtener todo el archivo [13].

2.1.3.2. *Cómputo en paralelo*

Otro uso importante de los sistemas P2P es la compartición del poder de cómputo de miles de equipos que, si bien individualmente no son muy potentes, en conjunto pueden ser considerados una supercomputadora. Esta aplicación surgió en contraposición a las tradicionales supercomputadoras que tienen un costo extremadamente alto, requieren de programadores altamente especializados y no pueden usarse para cómputo general.

Las aplicaciones de cómputo para las cuales los sistemas P2P pueden ayudar incluyen química cuántica, modelado molecular, nano electrónica, astrofísica computacional, explo-

raciones petroleras, modelado celular y secuenciación de ADN (ácido desoxirribonucleico), desarrollo de fármacos, modelado de órganos humanos, predicción y modelado del clima y modelado de mercados financieros entre otros.

SETI@Home [13] surgió como uno de estos sistemas en el cual, gigabytes de información son recibidos por el radiotelescopio ubicado en Arecibo. Toda esta información necesita ser procesada en búsqueda de patrones que podrían denotar transmisiones de radio extraterrestres. Los científicos encargados de este proyecto desarrollaron, para tal efecto, un sistema P2P donde cada par descarga un pequeño trabajo, lo procesa y regresa los resultados. Este proyecto permite unirse a cualquier persona que desee cooperar.

Un proyecto similar llamado Proyecto contra el cáncer (en inglés *AntiCancer Project*) [13] simula el doblamiento y desdoblamiento de proteínas y su interacción con diversos fármacos para descubrir posibles drogas que puedan combatir el cáncer.

Actualmente, estos proyectos y muchos más unieron fuerzas en una plataforma llamada BOINC (Infraestructura Abierta de Berkeley para la Computación en Red, en inglés *Berkeley Open Infrastructure for Networking Computing*), donde cada grupo de científicos comparten una gran red de cómputo paralelo P2P para ejecutar pequeños trabajos y, en conjunto, resolver problemas altamente complejos. Hoy en día, con cerca de 528,000 pares tiene un poder de procesamiento de 5.427 PFLOPS (Peta Operaciones de Punto Flotante por Segundo, en inglés *Peta Floating Operations per Second*).

2.1.3.3. Otras aplicaciones

Los sistemas P2P han sido aplicados también en las siguientes áreas [30]:

- Se ha explorado las redes P2P para sistemas de entretenimiento casero donde los dispositivos electrónicos (p.ej., sistemas de entretenimiento multimedia) se comuniquen vía P2P y compartan recursos.
- Redes de múltiples sensores para aplicaciones científicas o industriales.
- Redes de uso personal (PAN, en inglés *Personal Area Networks*) donde se intercomunican por ejemplo computadoras, celulares, reproductores multimedia, etc.
- Sistemas de transmisión de video donde los pares comparten ancho de banda llamados P2PTV (Televisión P2P, en inglés *Peer to Peer Television*).
- VoP2P (Voz sobre P2P, en inglés *Voice over Peer to Peer*), o sistemas de voz sobre IP (Protocolo de Internet, en inglés *Internet Protocol*) como *Skype*, donde de forma similar

a P2PTV los nodos comparten su ancho de banda para transmitir la voz entre llamadas de otros pares.

2.1.4. Clasificación

El auge de diversos diseños en redes P2P ha dado lugar a varias propuestas para su clasificación basadas, por ejemplo, en su aplicación o su arquitectura de red. De acuerdo a su arquitectura se encuentran las redes superpuestas estructuradas, no estructuradas, jerárquicas y federadas. Estas redes para su estudio utilizan un grafo en el cual cada vértice representa un par y cada arista representa un enlace de comunicación entre dos pares.

2.1.4.1. Redes superpuestas P2P no estructuradas

Una red superpuesta no estructurada se presenta cuando la aplicación P2P no impone mucha o ninguna estructura a la interconexión de los pares (p. ej., *Napster*, *Freenet*, *Gnutella*, *FasTrack*, *Fast Freenet* etc.) [1].

En las redes superpuestas no estructuradas la propagación de mensajes es realizada por los pares a través de sus nodos vecinos inmediatos, quienes a su vez, entregan dichos mensajes a sus respectivos nodos vecinos en la red [5]. En este tipo de redes la estructura de los grafos se ha comparado a grafos aleatorios, de ley de potencia, de escala-libre, grafos que exhiben fenómenos como “mundos pequeños”, y otras redes sociales. Entre los principales objetivos de investigación en este tipo de redes se encuentran:

1. el diseño de búsqueda eficiente la cual incluye propagación y procesamiento de la consulta y colocación de los objetos en la red,
2. estructura óptima del grafo y
3. algoritmos descentralizados para mantener las estructuras de los grafos ante fenómenos como la transitoriedad y popularidad de los objetos.

Una de las principales desventajas en las redes no estructuradas se presenta cuando la popularidad de los objetos disminuye y en consecuencia no es posible encontrarlos con unas cuantas consultas (encaminamiento ineficiente). En muchas aplicaciones la garantía de encontrar un objeto, si se encuentra en la red, es muy importante, esto ha motivado a nuevos desarrollos que incluyen a las redes superpuestas estructuradas.

2.1.4.2. *Redes superpuestas P2P estructuradas*

Para aliviar algunas de las principales problemáticas encontradas en las redes superpuestas no estructuradas surgen nuevos diseños con mecanismos de encaminamiento determinístico, que ofrecen garantías sobre la capacidad de encontrar cualquier objeto almacenado en la red. Estos diseños dan lugar a una nueva categoría que son las redes superpuestas estructuradas las cuales se diferencian de acuerdo a una variedad de dimensiones como lo son [5]:

- Número máximo de saltos tomados por una solicitud en una red de N pares (p. ej., múltiples saltos, un-salto, y saltos variables).
- Organización del espacio de direcciones (p. ej., plano, jerárquico).
- Criterio de decisión para el próximo salto (p. ej., métrica XOR, distancia euclidiana en un espacio d-dimensional, distancia lineal en un anillo).
- Geometría de la red superpuesta (p. ej., anillo, De Bruijn , mariposa)
- Número de enlaces entrantes y salientes en cada par (p. ej., grafos de grado logarítmico, grafos de grado constante).
- Tipo de búsqueda (p. ej., iterativa vs recursiva, y serial vs paralela).
- Mantenimiento de la red superpuesta.

Algunos ejemplos de este tipo de redes son: Chord, CAN, PAST, Tapestry, etc. En este tipo de redes los pares del sistema cooperan para mantener información acerca de cómo alcanzar a todos los otros pares de la red (encaminamiento determinístico) [5]. Cada par tiene una tabla local de encaminamiento, utilizada por el algoritmo de encaminamiento, la cual es inicializada en el momento en que el par se une a la red a través de un procedimiento de auto-arranque. Esta tabla es actualizada periódicamente cuando se presentan cambios en el sistema como parte del mantenimiento de la red superpuesta.

Las redes superpuestas estructuradas utilizan principalmente el encaminamiento basado en claves de tal forma que los identificadores de objetos son mapeados al espacio de direcciones del par y una solicitud del objeto se encamina al par más cercano de su espacio de direcciones [5]. Los sistemas P2P que utilizan el encaminamiento basado en claves se denominan sistemas de localización y encaminamiento de objetos distribuidos (DOLR por sus siglas en inglés). Las tablas hash distribuidas (THD) son un tipo específico de estos sistemas, éstas utilizan encaminamiento basado en claves para realizar operaciones sobre

los índices (obtener, colocar). Para el mantenimiento de la THD, a cada par se le asigna una porción del índice de ésta misma.

Una de las principales ventajas presentes en este tipo de redes es el mantenimiento de la estructura requerida para el encaminamiento eficiente de mensajes ante la transitoriedad de los pares en el sistema.

2.1.4.3. Redes superpuestas jerárquicas

Una red superpuesta jerárquica es un conjunto de capas de redes superpuestas organizadas por jerarquías o niveles interconectados en una estructura de árbol. Una característica de estas redes es que un mensaje enviado a un par en otra capa requiere ser enviado primero al padre común de ambas capas para luego reencaminarse hacia la capa destino [5]. Este tipo de redes favorece las comunicaciones locales dentro de la misma capa donde generalmente, por la cercanía, las velocidades de transmisión son mayores.

2.1.4.4. Redes superpuestas federadas

Las redes superpuestas federadas son un conjunto de redes superpuestas independientes una de la otra que poseen un mecanismo de comunicación entre ellas. Los protocolos de cada red pudieran ser distintos por lo que para enviar un mensaje de una red a la otra es necesario que exista un par en común capaz de transformar el mensaje de un protocolo al otro.

2.1.5. Retos

Los beneficios potenciales de los sistemas P2P dependen de condiciones ideales difíciles de lograr y que requieren desarrollo, entre ellas [5]:

- Se asume que los pares son altruistas. En la práctica, los pares en su autonomía pueden comportarse de acuerdo a sus intereses y contribuir de forma mínima al sistema.
- La participación de los pares es impredecible y debido a la transitoriedad de los mismos es difícil medir la disponibilidad y rendimiento del sistema.
- Sin control central es difícil autenticar a los pares y por lo tanto verificar el correcto uso del sistema.

2.2 Teoría de Juegos

La teoría de juegos es una rama de las matemáticas que se avoca al estudio de las interacciones entre individuos completamente racionales [25]. La teoría de juegos fue propuesta inicialmente por John von Neumann y Oscar Morgenstern, en su libro *Teoría de juegos y comportamiento económico* en 1944 [19], como un marco de trabajo para el estudio de situaciones estratégicas. En una situación estratégica los individuos cuentan con opciones que afectan potencialmente no sólo a sus propios intereses, sino además los intereses de los otros; en este sentido, la teoría de juegos puede ser aplicada a una gran variedad de contextos, entre estos se pueden mencionar los siguientes:

- Si una compañía decide lanzar un nuevo producto, ésta tendrá que elegir de forma estratégica cuál será el precio para colocarlo en el mercado, en el cual existen otros productos similares.
- Un aspirante a un puesto político deberá elegir, de forma estratégica, qué posición (derecha o izquierda) adoptará con la finalidad de ganar mayor número de simpatizantes.
- En un juicio legal, la defensa y el acusado deberán, de forma estratégica, determinar qué argumentos presentarán ante el jurado.

2.2.1. Elementos básicos

Para el análisis de una situación estratégica la teoría de juegos utiliza el juego como modelo formal [24]. En un juego los jugadores contienden uno contra otro de acuerdo a un conjunto de reglas. Un juego, G , con n jugadores comprende esencialmente los siguientes elementos:

- **Jugadores:** conjunto de individuos (I) que interactúan entre sí. Un *jugador racional* es un individuo que puede: (a) evaluar sus ganancias, en el sentido de ordenarlas con respecto a la contribución a su bienestar; (b) calcular el camino de las ganancias, es decir, ver que secuencia de acciones conducirían a dichas ganancias; y (c) seleccionar acciones de su conjunto de alternativas que lo conduzcan a los resultados preferidos por éste, considerando las acciones de los otros jugadores en el juego [25].
- **Acciones:** conjunto M de opciones disponibles para cada jugador. Una *acción* o *movimiento* del jugador i , m_i , es una elección que puede hacer y $M_i = \{m_i\}$ es el *conjunto de acciones* que tiene disponibles.

La *estrategia pura* del jugador i , s_i , es un conjunto de reglas que determinan qué acción tomar ante cualquier situación que pueda surgir en G . Se denomina *estrategia mixta* cuando escoge aleatoriamente entre sus estrategias puras. S_i es el *conjunto de estrategias* que tiene disponible. Un *perfil de estrategias*, $s = (s_1, \dots, s_n)$, es un conjunto ordenado que consiste de una estrategia por cada jugador en el juego.

- **Función de pagos:** cada jugador en el juego tiene preferencias y éstas son representadas por la función de pagos. La función de pagos (u) asocia un valor (generalmente numérico) a cada acción de tal forma que las acciones con valores más altos son las preferidas por los participantes en el juego. Para un jugador $i \in I$ cualquier par de acciones $\{a, b\} \in M_i$ si $u_i(a) > u_i(b)$ entonces el jugador i prefiere a sobre b . Los *pagos* que cada jugador recibe están en función de las estrategias escogidas por los demás jugadores y la suya misma. El pago del jugador i se denota por $u_i(s_1, \dots, s_n)$ ó $u_i(s)$.

2.2.1.1. Reglas del juego

Las reglas del juego [24] deben especificar *quién* puede hacer *qué* y *cuándo* puede hacerlo. Así también, debe indicar *cuánto* obtiene cada quien en cada realización (partida completa) del juego. El *quién* está dado por el grupo de jugadores que interactúan estratégicamente, el *qué* por las estrategias que cada jugador tiene disponibles, el *cuándo* por el orden en que cada jugador juega, y el *cuánto* por la ganancia (o pérdida) que obtiene cada quien al finalizar el juego.

2.2.2. Representación de los juegos

Para la descripción formal de las reglas del juego la teoría de juegos utiliza principalmente dos formas de representación: *forma estratégica* y *forma extensiva*.

2.2.2.1. Forma estratégica (normal)

La forma estratégica o *juego de movimientos simultáneos* [24] es una representación del juego carente de dimensión temporal, la cual contempla: una lista completa de quiénes son los jugadores, qué estrategias tiene disponible cada uno de ellos, y cuál es el pago obtenido

por cada jugador ante una realización del juego. Para ilustrar la representación de la forma estratégica se plantea a continuación el juego del Dilema del prisionero.

Dilema del Prisionero

Dos sospechosos, Alicia y Beto (en inglés *Alice & Bob*) son arrestados por haber cometido un crimen grave. Existe evidencia suficiente para condenarlos por un cargo menor, pero no la suficiente para condenarlos por un crimen grave a menos que uno de ellos actúe como informador y testifique en contra del otro. La policía los recluye en celdas separadas para ser interrogados. El fiscal se presenta ante cada uno de ellos y les ofrece el siguiente trato:

Si testificas en contra de tu compinche y él (ella) no lo hace en contra tuya, saldrás libre inmediatamente y él (ella) purgará una condena de 10 años. Sin embargo, si rehusas testificar en su contra y él (ella) lo hace en contra tuya, entonces él (ella) saldrá libre y tú purgarás una condena de 10 años. Si ambos testifican uno en contra del otro entonces ambos purgarán una condena por 6 años pero si ambos se abstienen de testificar uno en contra del otro, entonces purgarán una condena de 1 año por cargo menor.

¿Qué es lo que cada sospechoso debería hacer? Supongamos que Beto razona de la siguiente manera: “Alicia tiene dos opciones: puede optar por traicionarme (testificar en mi contra) o bien puede optar por cooperar (permanecer callada). Si Alicia me traiciona y yo la traiciono ambos purgaremos una condena de 6 años, pero si coopero y ella me traiciona entonces purgaré una condena de 10 años. Ahora, si ambos cooperamos entonces purgaré una condena menor de 1 año. Pero, si la traiciono y ella coopera entonces me podré ir inmediatamente a mi casa. No importa lo que Alicia decida hacer mi mejor respuesta ante cualquier elección de Alicia es traicionarla”.

El razonamiento de Alicia será análogo y ella también concluirá que no importa lo que Beto determine; que ante cualquier combinación de movimientos realizados, la mejor respuesta es traicionarlo. En consecuencia, ambos escogerán traicionarse. Ese es el dilema, pues habrían obtenido un mejor resultado si hubieran optado por cooperar, ya que el fiscal no tendría pruebas para incriminarlos y saldrían libres purgando una condena menor. Sin embargo, cooperar no es la opción racional.

El problema descrito mediante la fábula del Dilema del Prisionero fue planteado inicialmente por Merrill Flood y Melvin Dresher en 1950 como parte de la Corporación de investigación RAND en teoría de juegos. La versión de la fábula fue descrita por Albert Tucker con la intención de clarificar la situación estratégica a una audiencia de psicólogos [12]. El juego generalmente se formula como un juego de dos personas, cada jugador elige

de forma independiente, simultánea y sin comunicar al otro jugador su estrategia con el objetivo de maximizar su utilidad.

		Beto	
		C	D
Alicia	C	3,3	0,5
	D	5,0	1,1

Matriz de pagos

Figura 2.1: Representación del juego estratégico: El Dilema del Prisionero (forma normal).

El Dilema del Prisionero es un ejemplo de juego de **2x2** debido a que cada uno de los dos jugadores cuenta únicamente con dos elecciones en su conjunto de acción. La representación del juego se ilustra en la figura 2.1, este tipo de representación también se conoce como *forma normal*. En este ejemplo los componentes del juego son los siguientes:

- *Jugadores*. Son representados por los dos sospechosos –Alicia y Beto.
- *Acciones*. Cada jugador tiene dos posibles opciones, cooperar (C) y traicionar. En lo adelante, a la acción de no cooperar en este juego, se le llamará “desertar” y será representado por la letra D. Las filas representan las posibles opciones para Alicia y las columnas representan las de Beto.
- *Función de pagos*. La utilidad obtenida por cada jugador se muestra en la *matriz de pagos* (figura 2.1). Cada cuadro en esta matriz contiene los valores asignados a las preferencias de cada jugador, dichos valores se asignan de la siguiente manera: a) para un jugador que utiliza la opción de una fila contra otro que escoge utilizar la opción de la columna se asignará el primer valor y b) para el jugador que escoge una opción de una columna contra otro que escoge utilizar una de una fila se asignará el segundo valor. Los valores para este juego representan el tiempo en prisión. A mayor número de puntos obtenidos menor tiempo en prisión por ejemplo: si Alicia escoge C y Beto escoge D entonces el pago para Alicia, $u_{Alicia}(C,D)$, será de 0 puntos el cual representa 10 años en prisión, en tanto que el pago para Beto, $u_{Beto}(D,C)$, será de 5 puntos el cual representa 0 años en prisión, en consecuencia Alicia permanecerá mayor tiempo en prisión.

2.2.2.2. *Forma extensiva*

La forma extensiva [24] agrega una dimensión temporal a la descripción de la forma estratégica. La forma extensiva describe explícitamente la estructura secuencial permitiendo analizar la situación estratégica conforme los participantes van tomando decisiones. Para ilustrar la representación de la forma extensiva se presenta el juego del Ultimátum.

El Ultimátum

Suponga que se encuentra sentado junto un desconocido en una sala de espera del hospital X. De repente se aproxima un tercero, le da cierta cantidad de dinero ($\$x$) al desconocido y les dice que es un regalo que pueden quedarse si logran ponerse de acuerdo al repartirse el dinero. Las reglas son las siguientes -dice el tercero- él decidirá cómo repartir el dinero y usted tendrá que decidir si acepta o rechaza, la renegociación no es posible por lo que en cualquier situación resultante la decisión será definitiva. Es decir, si usted acepta la oferta se reparten el dinero, pero si rechaza ninguno podrá quedarse con nada.

¿Qué es lo que cada uno debería de elegir? Supongamos que la cantidad de dinero $x = 10,000$ pesos. El desconocido puede hacer una propuesta justa digamos 50 y 50% o una injusta 80 y 20% para él y para usted respectivamente. Usted (como individuo racional) posiblemente razone de la siguiente manera: si me hace una propuesta justa y acepto ganaré \$5,000, pero si rechazo, no ganaré nada. Por otro lado, si la oferta es injusta y acepto entonces ganaré \$2,000, pero si rechazo, no ganaré nada. Ante cualquier combinación de acciones mi mejor respuesta es siempre aceptar.

El desconocido sabrá que usted es un individuo racional y que le es más conveniente aceptar algo a nada, así que como individuo racional determinará que su mejor respuesta ante cualquier elección que usted pueda adoptar es realizar una propuesta injusta.

El juego del Ultimátum fue planteado inicialmente por Güth, Schmittberger, y Schwarze en 1982 como una representación básica de la negociación [9]. El juego generalmente se formula como un juego de dos jugadores quienes realizan los movimientos de forma secuencial, primero el que propone (jugador I) y después el que responde (jugador II), y en cada estrategia elegida cada jugador (como individuo racional) intentará maximizar los puntos obtenidos.

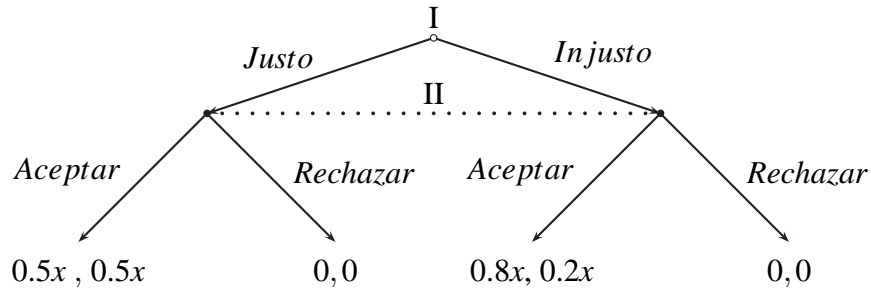


Figura 2.2: Representación del juego extensivo: El Ultimátum.

La representación del juego en su forma extensiva se ilustra en la figura 2.2. Este tipo de representación considera el uso de una estructura de árbol (que indica el quién, qué, cuándo y cuánto) con las siguientes características:

- Cada nodo (no terminal) corresponde a un posible movimiento en el juego y tiene asignada una etiqueta que identifica al jugador que puede realizar dicho movimiento. En el caso del juego del Ultimátum el primer movimiento es dado por el jugador I (representado por el nodo raíz) y el movimiento siguiente es realizado por el jugador II.
- Las aristas salientes de un nodo representan las acciones disponibles para el jugador. *Justo* o *Injusto* para el jugador I, y *Aceptar* o *Rechazar* para el jugador II.
- Un camino desde la raíz hasta un nodo terminal representa una partida.
- Un nodo terminal en el árbol corresponde a los posibles resultados del juego (consecuencias de la jugada para cada jugador). En el caso del Ultimátum si (*Justo*, *Aceptar*) entonces cada jugador obtendrá $0.5x$ y $0.5x$ para el jugador I y II respectivamente, y de manera similar para cualquier otra partida presente en el juego.

2.2.3. Clasificación de los juegos

Existen diversas formas en que los juegos son caracterizados en la teoría de juegos [24]. A continuación se presentan algunos de estos criterios:

- **Orden de movimientos:** los juegos en los que los jugadores realizan sus movimientos de forma simultánea se denominan juegos *estáticos* o de *movimientos simultáneos*. Si algún jugador adquiere información respecto a movimientos previos realizados por su oponente se dice que el juego es de *movimientos secuenciales* o juego *dinámico*.

- **Suma cero o no suma cero.** Un juego de *suma cero* ó *estrictamente competitivo* es un juego en el cual la suma de los pagos de todos los jugadores es cero sin importar la estrategia que han elegido (un jugador gana lo que el otro pierde). Por otro lado, los juegos de *no suma cero* describen la situación en la cual las ganancias de los jugadores es diferente de cero.
- **Juegos repetidos:** Los juegos que se juegan una sola vez se denominan juegos *no repetidos* o de *estado único*. Los juegos que son jugados por los dos mismos jugadores un número repetido de veces se denominan juegos *repetidos* o *multi-estado*. Las estrategias para un juego repetido deben establecer un plan de acción para cada repetición o estado del juego. Esta clase de estrategias también se denomina *meta-estrategias*.
- **Cooperativos o no cooperativos:** se dice que un juego es *cooperativo* si se permite que los jugadores se comuniquen y lleguen a algún acuerdo. Si no es el caso, se denominan juegos *no cooperativos*.
- **Juegos con n jugadores:** n corresponde al número de jugadores en el juego. Si el juego tiene dos jugadores se denomina juego de *2-jugadores*. Pero si hay más de dos jugadores el juego se denomina juego de *n -jugadores*.
- **Tipo de información:** Es un juego de *información perfecta* si todos los jugadores conocen en qué estado del juego se encuentran, contra quién están jugando y todos los movimientos que se han realizado en el juego previamente. Los juegos de *información incompleta* consideran a un pseudo jugador denominado “naturaleza” el cual escoge sus movimientos de forma aleatoria y no es observado por ninguno de los otros jugadores. Se denominan juegos de *información asimétrica* si los jugadores cuentan con información diferente después de haber realizado sus movimientos.
- **Juego simétrico y asimétrico** Un juego es *simétrico* si cada jugador tiene exactamente el mismo conjunto de estrategias, y función de pago idéntica a la de los demás. Cuando esta condición no se cumple se dice que el juego es *asimétrico*.

2.2.4. Equilibrio

¿Cómo puede la teoría de juegos predecir el resultado de un juego? Los resultados de un juego son consecuencia de las interacciones de las diferentes estrategias de los jugadores que participan en él, por lo tanto los perfiles de estrategias que se presenten permitirán

predecir qué es lo que sucede. Un **equilibrio** (s^*) en el juego es un perfil de estrategias (s_1^*, \dots, s_n^*) en el cual cada jugador (como individuo racional) escoge su *mejor estrategia* en el juego [24]. Al escoger una estrategia de este perfil cada jugador está optando por su mejor decisión dada las decisiones de los otros jugadores. En estas circunstancias no existe ningún incentivo para que un jugador cambie de estrategia.

Para determinar los resultados de un juego en la teoría de juegos existen dos formas ampliamente utilizadas: equilibrio de Nash y estrategia dominante [24]. Para describir estos conceptos se utiliza la siguiente notación:

s_{-i} denota la elección estratégica de los otros jugadores en el juego excepto la del jugador i , dada por el vector $(s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$.

$u_i(s_i, s_{-i})$ denota la utilidad obtenida por el jugador i al utilizar la estrategia s_i contra la elección de estrategias de los otros jugadores.

Esta notación permite definir la mejor respuesta del jugador i

Definición 2.1. \hat{s}_i es la **mejor respuesta** del jugador i a las estrategias de los otros jugadores s_{-i} si

$$u_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}) \quad \forall s'_i \neq \hat{s}_i \quad (2.1)$$

2.2.4.1. Equilibrio de Nash

Una solución a muchos juegos expuestos en la teoría de juegos es el equilibrio de Nash [21], nombre que se le asigna en honor al matemático John F. Nash Jr. al definir los equilibrios en su tesis de doctorado. La noción de equilibrio de Nash amplió considerablemente el ámbito de aplicación de la teoría de juegos, la cual en sus inicios solo se había centrado en juegos estrictamente competitivos. Un equilibrio de Nash indica que en el equilibrio ningún jugador tiene un incentivo para desviarse de su estrategia, dado que el hacerlo lo conduce a un resultado que no es mejor. En términos de la mejor respuesta, el equilibrio de Nash se define como sigue:

Definición 2.2. Un perfil de estrategias $s^* = \{s_1^*, \dots, s_n^*\}$ es un **Equilibrio de Nash** si $\forall i$ s_i^* es una mejor respuesta a la elección de los otros jugadores s_{-i}

Consideremos el juego del Ultimátum (figura 2.2). El juego tiene cuatro posibles resultados (*Justo, Aceptar*), (*Justo, Rechazar*), (*Injusto, Aceptar*) y (*Injusto, Rechazar*). El

equilibrio de Nash está determinado por *(Injusto, Aceptar)* debido a lo siguiente: a) supon- gamos que el jugador I escoge *Injusto*, la mejor respuesta del jugador II contra *Injusto* es *Aceptar* (con *Rechazar* no ganaría nada); por otro lado, si I escoge *Justo*, la mejor respuesta del jugador II es también *Aceptar*. Dado que ambos jugadores tienen como objetivo maxi- mizar sus resultados, el jugador I sabrá que la mejor respuesta de II es *Aceptar* y que no se desviará de ésta dado que ésto lo conducirá a un resultado subóptimo, en consecuencia, la mejor respuesta del jugador I a *Aceptar* es elegir *Injusto*.

2.2.4.2. Estrategias dominantes

Otra noción técnica utilizada para predecir el resultado de un juego es el de estrategia dominante. Para presentar esta solución se requiere de algunas definiciones previas:

Definición 2.3. s_i^β es una **estrategia dominada** si existe una única s_i' tal que

$$u_i(s_i^\beta, s_{-i}) < u_i(s_i', s_{-i}) \quad \forall s_{-i} \quad (2.2)$$

Una estrategia s_i^β es dominada por s_i' , si el pago obtenido por el jugador i al utilizar s_i^β contra las estrategias de los otros jugadores siempre es menor que el pago que obtendría utilizando s_i'

Definición 2.4. s_i^α es una **estrategia dominante** si

$$u_i(s_i^\alpha, s_{-i}) > u_i(s_i', s_{-i}) \quad \forall s_i', \quad \forall s_i' \neq s_i^\alpha \quad (2.3)$$

Una estrategia dominante es estrictamente una mejor respuesta ante cualquier otra es- trategia que los otros jugadores pudieran elegir.

Definición 2.5. Un perfil de estrategias s^{α^*} es un **equilibrio en estrategia dominante** si

$$\forall i, \quad s_i^\alpha \in s^{\alpha^*} \quad (2.4)$$

Consideremos la definición 2.3, 2.4, y 2.5 para analizar los resultados del juego del Dilema del prisionero (figura 2.1). Se tienen cuatro posibles resultados del juego (C, C), (C, D), (D, C) y (D, D). El equilibrio de estrategia dominante está dado por (D,D) debido a lo siguiente: a) $u_{Alicia}(D,C) > u_{Alicia}(C,C)$ y $u_{Alicia}(D,D) > u_{Alicia}(C,D)$, en consecuencia D es una estrategia dominante (C es la estrategia dominada) y b) dado que el juego es simétrico, el mismo resultado aplicará para Beto.

2.3 Teoría de Juegos Evolutiva

La teoría de juegos evolutiva surge como una aplicación de la teoría de juegos a contextos biológicos al observar que la aptitud dependiente de la frecuencia de un organismo presenta un aspecto estratégico en la evolución. La razón por la que teoría de juegos es relevante en este contexto es porque permite conocer cuáles son las dificultades que surgen cuando el éxito de un individuo depende de los otros en la población. Sin embargo, se podría argumentar que teoría de juegos considera individuos racionales cuyo objetivo es maximizar sus ganancias (auto-interés), entonces, ¿cómo es posible que tales suposiciones puedan aplicarse a un contexto evolutivo? La respuesta es reemplazando dichas suposiciones. El supuesto de racionalidad es reemplazado por dinámica poblacional y equilibrio, y el de auto-interés por aptitud Darwiniana [15]. Los primeros en aplicar ideas de teoría de juegos en el campo de la biología fueron William Hamilton y Robert Trivers, pero el campo de teoría de juegos evolutiva fue fundado principalmente por John Maynard Smith y otros, incluyendo a Peter Taylor, Josef Hofbauer, y Karl Sigmund [23].

A diferencia de la teoría de juegos clásica, basada en la teoría de la elección racional, la teoría de juegos evolutiva considera poblaciones de jugadores con racionalidad limitada interactuando entre sí en un juego. Los individuos tienen estrategias fijas (pre-programadas) y contienden de forma aleatoria con otros individuos en la población. La suma de los pagos obtenidos durante los encuentros es interpretada como la aptitud del individuo y su éxito en el juego como su aptitud reproductiva. En este contexto una estrategia es un fenotipo del comportamiento el cual indica qué es lo que un individuo hará ante cualquier situación que se le presente.

En el análisis de la dinámica poblacional la teoría de juegos evolutiva utiliza varios modelos evolutivos para la resolución de diferentes problemáticas. A continuación se presentan los principales modelos evolutivos utilizados por esta teoría.

2.3.1. Modelo básico

El modelo básico analiza la dinámica evolutiva de la población considerando: una población infinita, reproducción asexual, torneo entre dos oponentes, no se puede discernir entre uno y otro individuo antes del inicio del torneo, y un número finito de estrategias. Este modelo plantea como solución al concepto de equilibrio –la estrategia evolutivamente estable (EEE), concepto muy similar al equilibrio de Nash, planteado por Maynard Smith & Price en 1973 [16].

2.3.1.1. Estrategia evolutivamente estable

Imagine una población muy grande donde todos los individuos interactúan entre sí en parejas. Suponga que los encuentros son repetidos y de forma aleatoria y que todos inicialmente tienen un comportamiento pre-programado. Ahora, suponga que, de alguna forma, surge una pequeña porción de individuos con un comportamiento alternativo. ¿Podrá la estrategia invasora incrementarse y persistir en la población? Una forma de saberlo es determinar si la estrategia residente es una estrategia evolutivamente estable concepto que se describe a continuación.

Sea P^* una población consistente mayoritariamente de jugadores I y una pequeña proporción p de algún estrategia alternativa J . La aptitud (pago) de cada jugador está dada por $U(I)$ para I , o $U(J)$ para J . Antes del inicio de la contienda todos los individuos en la población tienen la misma aptitud, U_0 . Sea $E(I, J)$ el pago esperado del jugador al adoptar I contra J y de forma similar para $E(J, I)$.

Supongamos que cada individuo en P^* participa en un solo torneo, entonces

$$\begin{aligned} U(I) &= U_0 + pE(I, I) + (1 - p)E(I, J) \\ U(J) &= U_0 + pE(J, I) + (1 - p)E(J, J) \end{aligned} \tag{2.5}$$

la frecuencia, p' , de jugadores I para la próxima generación está dada por

$$p' = \frac{(1-p)U(I)}{(1-p)U(I) + pU(J)} \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 describe la dinámica de la población indicando cómo cambiará en el tiempo. Si I es una estrategia estable, entonces I debe cumplir con la propiedad siguiente: si casi todos los miembros de una población adoptan I , entonces la aptitud de I es mayor que cualquier otra estrategia mutante J ; de otra forma, J puede invadir a la población y I no sería una estrategia estable [15], formalmente,

Definición 2.6. I es una **estrategia evolutivamente estable** o **EEE** si para $J \neq I$,

$$\text{se tiene } E(I,I) > E(J,I) \quad (2.7)$$

$$\text{o } E(I,I) = E(J,I) \text{ y } E(I,J) > E(J,J) \quad (2.8)$$

2.3.2. Dinámica del replicador

El modelo básico describe la dinámica evolutiva de una población infinita de individuos que contendrán contra un único tipo de oponente, a través de estrategias puras o mixtas. La dinámica del replicador, propuesta por Josef Taylor y Leo Jonker en 1978 [32], extiende al modelo básico en el sentido de que considera que el éxito de un individuo depende, no solo de contender contra un único tipo de oponente, sino contra un grupo de individuos, o contra alguna propiedad promedio de la población. La dinámica del replicador describe la selección pura, sin utilizar el mecanismo de mutación, donde los *replicadores* son las estrategias puras; las cuales son copiadas sin error de padres a hijos [33]. La aptitud de un individuo es dependiente de la frecuencia de los diferentes fenotipos presentes en la población, si la composición de la población cambia, también la aptitud de las estrategias cambia y en consecuencia su aptitud reproductiva.

Considere una población dividida en n tipos de E_1 a E_n con frecuencias $\mathbf{x} = x_1, \dots, x_n$ donde \mathbf{x} define la composición de la población. Sea A una matriz de pagos de $n \times n$ donde el elemento a_{ij} representa el pago de la estrategia E_i al interactuar con la estrategia E_j . La aptitud de E_i es $f_i = \sum_{j=1}^n x_j a_{ij}$ y la aptitud promedio de la población es $\bar{f}^* = \sum_{i=1}^n x_i f_i$. La tasa de incremento, \dot{x}_i/x_i , del tipo E_i está dada por:

$$\frac{\dot{x}_i}{x_i} = \text{aptitud de } E_i - \text{aptitud promedio de la población}$$

lo cual da lugar a la **ecuación del replicador**

$$\dot{x}_i = x_i(f_i(\mathbf{x}) - \bar{f}^*(\mathbf{x}))$$

2.3.2.1. Equilibrio de Nash y EEE

La ecuación del replicador está definida sobre el simplejo (S_n) [31], el cual está dado por el conjunto de puntos cuyas coordenadas no son negativas y cuya suma es igual a 1 ($\sum_{i=1}^n x_i = 1$). Cada punto en S_n se refiere a una estructura en particular de la población, la figura 2.3 ilustra este concepto para una población compuesta por 2, 3, y 4 tipos diferentes de estrategias. El interior de S_n es invariante, es decir, si una trayectoria comienza en el interior, ésta siempre permanecerá en el interior. Las caras, subconjunto del simplejo donde al menos una estrategia tiene frecuencia cero, también son invariantes, y los vértices son puntos fijos (estados estacionarios) en la dinámica del replicador. Los vértices indican la extinción de una estrategia en la población. Una población que se encuentra en un punto fijo igual a cero permanece allí para siempre.

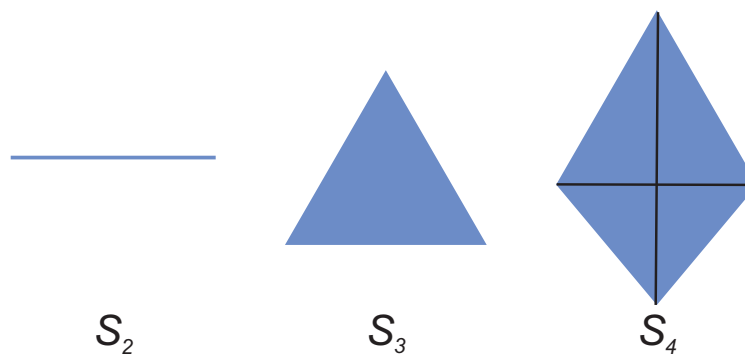


Figura 2.3: Simplejo S_n para $n = 2, 3, 4$.

Algunas clasificaciones de puntos fijos son las siguientes [31]:

- Un punto fijo x^* es *estable* si para todo vecindario V de x^* existe otro vecindario abierto $O \subseteq V$ de tal forma que cualquier trayectoria que comienza inicialmente en el interior de O permanece en V .

- El punto fijo x^* es *inestable* si no es estable.
- El punto fijo x^* es *atrayente* si existe un vecindario abierto V de x^* tal que la trayectoria inicialmente en V converge a x^* .
- El punto fijo x^* es *asintóticamente estable* si es estable y atrayente.

Para juegos en su forma normal bajo la dinámica del replicador el **teorema popular de teoría de juegos evolutiva** establece [31]:

- El equilibrio de Nash es un punto fijo.
- Un equilibrio de Nash estricto (cuando una estrategia es mejor respuesta a si misma) es un punto fijo asintóticamente estable.
- Si una órbita interior converge a x^* , entonces el punto fijo es un equilibrio de Nash.
- Si un punto fijo es estable entonces es un equilibrio de Nash.

Dos de los resultados principales de la relación entre la dinámica del replicador y estabilidad evolutiva son:

1. Una EEE es un punto fijo asintóticamente estable.
2. Para juegos de forma normal de dos jugadores un punto fijo es una EEE si y solo si es un punto fijo asintóticamente estable.

2.3.3. Juegos repetidos

El método básico y la dinámica del replicador muestran que existen estados en los cuales una vez que se establece una población, no existe bajo el esquema de la selección natural forma de salir¹. Sin embargo, la evolución conduce a otras trayectorias evolutivas cuando la interacción entre dos mismos individuos con la posibilidad de reconocer a otro individuo con el cual ha interactuado previamente se repite.

2.3.3.1. El Dilema del Prisionero iterado

Previamente se analizó el juego del Dilema del Prisionero desde la perspectiva de teoría de juegos (sección 2.2.2.1) y se determinó que un equilibrio de Nash se presenta cuando ambos jugadores deciden no cooperar el uno con el otro. También, es posible mostrar a través del

¹ Esto sucede cuando la población se encuentra en un punto fijo igual a cero en la ecuación del replicador.

análisis del modelo básico y de la dinámica del replicador que la estrategia D es una EEE, es decir, una vez que la estrategia D se establece en la población los cooperantes no pueden invadir, y cualquier fracción de cooperantes en este medio inexorablemente se extingue. Sin embargo, en muchos contextos (p. ej., social, económico, biológico, etc.) se puede observar que los individuos cooperan entre sí. En particular, si la interacción se repite, la cooperación se convierte en una opción prometedora. Considere cualquier situación representada por el Dilema del Prisionero, uno se lo pensaría dos veces antes de desertar si esto hace que el oponente decida desertar en el próximo encuentro y también si es posible que dicho encuentro ocurra.

Reciprocidad directa

En la figura 2.4 se presenta un esquema general del Dilema del Prisionero para dos jugadores. La descripción es la siguiente: Si ambos jugadores cooperan, recibirán como pago R (Recompensa, en inglés *Reward*), el cual se asume que es mayor que el pago P (Castigo, en inglés *Punishment*) obtenido si ambos desertan. Si un jugador escoge D, mientras que el otro escoge C, entonces el desertor recibe un pago T (Tentación, en inglés *Temptation*) el cual es mayor que R, mientras que el cooperante recibe como pago S (Bobo, en inglés *Sucker*). Además de cumplir con la condición de $T > R > P > S$, los pagos también deben cumplir la condición de $2R > T + S$, el cual indica que el pago total obtenido por los dos jugadores es mayor si ambos cooperan que si uno coopera y el otro no.

	C	D
C	R,R	S,T
D	T,S	P,P

Figura 2.4: Representación general del Dilema del Prisionero.

De acuerdo a Martin Nowak [23], reciprocidad directa se refiere al concepto de que el juego no es jugado una única vez, sino más bien, se repite varias veces entre los dos mismos jugadores. Para el Dilema del Prisionero iterado una estrategia es una regla que le indica al jugador qué hacer en cada ronda de acuerdo a una historia previa (conjunto o subconjunto de resultados obtenidos en juegos previos). El conjunto de estrategias para el Dilema del Prisionero iterado contempla estrategias determinísticas y estrategias estocásti-

cas. Las primeras establecen D o C para el próximo movimiento y las segundas asignan al próximo movimiento con cierta probabilidad D o C. Si se considera que el juego se repite m rondas se tendrá 2^{4^m} estrategias determinísticas y un espacio 4^m dimensional de estrategias estocásticas.

Asumamos que con cierta probabilidad w una ronda más ocurre, entonces w^n es la probabilidad de que en el n -ésimo encuentro se lleve a cabo. El número esperado de juegos es $\bar{w} = \sum w^n = (1 - w)^{-1}$, si $w = 1$, el juego se repetirá por un número infinito de rondas. En este contexto, existe una gran variedad de estrategias, ninguna de las cuales es mejor respuesta a todas las demás. Considere, por ejemplo, que su oponente escoge la estrategia *AllC* (la estrategia que en cualquier situación siempre coopera) entonces *AllD* (la estrategia que siempre deserta) es mejor respuesta a *AllC* debido a que el pago total para *AllD* es $\bar{w}T$ el cual claramente es mayor que $\bar{w}S$. Ahora, considere que el oponente decide cooperar hasta que usted deserte y de ahí en adelante nunca volver a cooperar, entonces le es más conveniente no arruinar la asociación y desertar en alguna ronda. Las razones son las siguientes: (i) supongamos que usted valora más el presente que el futuro y juega D en la ronda actual, los pagos acumulados serán de la forma (T, P, P, ...) y (ii) ahora supongamos que usted considera que el mañana si importa y considera C en cada ronda, entonces los pagos acumulados serán de la forma (R, R, R, ...). Claramente (ii) lo conduce a un mejor resultado si la asociación se establece a largo plazo.

Cabe mencionar que no necesariamente la interacción entre ambos jugadores debe ser infinita, basta con que ninguno de los dos jugadores tenga conocimiento de cuál será la última ronda, de esta forma, el comportamiento descrito en el párrafo anterior se repite.

La amplia variedad de estrategias y la carencia de una estrategia que sea mejor respuesta a todas las demás no han hecho fácil determinar qué trayectorias evolutivas podrían seguirse para el Dilema del Prisionero Iterado.

2.3.3.2. *La evolución de la cooperación*

Para averiguar qué estrategias pueden resultar de tan amplio universo de estrategias Robert Axelrod, un científico político, realizó dos torneos de cómputo para jugar el Dilema del Prisionero Iterado [2]. En el primer torneo se presentaron 14 propuestas de estrategias, en forma de programas, las cuales en conjunto con una estrategia aleatoria contendieron una contra otra en forma de round-robin. El pago más alto fue obtenido por la más simple de

ellas, TFT (Toma y Daca, en inglés *Tit For Tat*) de Anatol Rapoport. TFT es una estrategia que coopera en el primer movimiento y después hace lo que el oponente hizo en la ronda previa. Axelrod publicó los resultados y convocó a un segundo torneo. En esta ocasión se presentaron 62 propuestas las cuales contendieron de la misma forma que en el primer torneo, TFT fue presentada nuevamente por el ganador del primer torneo y volvió a ganar. TFT obtuvo como ventaja el recibir en promedio un mejor pago que los demás contendientes ante una gran variedad de ambientes. Axelrod se preguntó si los resultados de los torneos estaban influenciados por preconcepciones o creencias a priori de los participantes acerca de lo que los otros harían o si el éxito de TFT no tenía nada que ver con ello y se debía solo a su reciprocidad y a la forma de reaccionar con las otras. Para averiguarlo requería de un método para generar y evolucionar nuevas estrategias que no involucraran ninguna preconcepción humana.

Axelrod decidió utilizar como método de análisis el algoritmo genético, el cual fue planteado inicialmente por John Holland como una técnica de búsqueda para descubrir soluciones adaptativas a problemas difíciles [18]. Axelrod realizó el experimento probándolo primero en un ambiente conocido, tomando 8 representantes de los torneos, para probar que la técnica funcionaba en dicho contexto. Los resultados fueron más allá de sus expectativas, Axelrod encontró estrategias que se conducían incluso mejor que TFT. Habiéndose convencido de lo poderosa que era la técnica de análisis probó el experimento en una situación más real. Comenzó un experimento con una población compuesta de estrategias generadas completamente de forma aleatoria y dejó que la población evolucionara a través del algoritmo genético. Los resultados fueron contundentes, la mayoría de las estrategias evolucionadas se comportaban de forma similar a TFT llevando a cabo la cooperación basada en la reciprocidad. Axelrod demostró que los resultados en sus torneos no eran dependientes de preconcepciones humanas y que la reciprocidad era clave para el éxito de las estrategias.

A continuación se describe la metodología empleada por Axelrod para llevar a cabo la evolución de las estrategias en el Dilema del prisionero iterado.

Ambiente de simulación

Para conocer qué estrategias evolucionaban Axelrod necesitaba contar con un ambiente en el cual probar dichas estrategias. Para dicho ambiente consideró 8 estrategias representati-

vas de los torneos realizados para determinar qué tan bien se conducía una estrategia dada con respecto al conjunto completo de estrategias.

Evolución de estrategias en el juego del Dilema del Prisionero Iterado a través de algoritmos genéticos

El algoritmo genético [18] requiere una población de soluciones donde cada solución pueda ser representada por medio de un cromosoma, generalmente una cadena binaria que corresponde al genotipo². Al emular el proceso evolutivo, cada cromosoma puede sufrir transformaciones genéticas por medio de la cruce y/o mutación. El algoritmo genético procesa poblaciones de cromosomas, reemplazando sucesivamente una población con otra. Cada cromosoma en la población será puesto a prueba en un ambiente definido donde generación tras generación solo los cromosomas más aptos serán seleccionados para reproducirse y en consecuencia mantener la persistencia de su material genético.

Para construir un algoritmo genético se requiere básicamente de los siguientes pasos:

1. Diseñar una representación de los individuos.
2. Generar un conjunto de soluciones candidatas al problema que se desea resolver.
3. Diseñar una forma de evaluar a un individuo.
4. Determinar cómo seleccionar a los mejores individuos.
5. Determinar operadores de cruce y mutación adecuados al problema.

La descripción de cómo fueron resueltos estos criterios por Axelrod se presentan en las secciones siguientes.

Representación de estrategias

Axelrod consideró estrategias determinísticas para jugar el Dilema del prisionero iterado. Estas estrategias determinan cuál será el próximo movimiento con base en una memoria finita (la tabla 2.1 ilustra algunos ejemplos con diferentes tamaños de memoria).

Considere una historia previa de memoria 2, resultan 4 historias diferentes debido a que en el juego se presentan 4 posibles resultados (C,C), (C,D), (D,C) y (D,D). Dado que una estrategia es un conjunto de reglas que determinan qué es lo que un jugador debe hacer ante cualquier situación que surja de acuerdo a una historia previa, se obtienen un total de 2^4 posibles estrategias (tabla 2.2)

² El termino genotipo se refiere a la composición genética del individuo

Una estrategia determina su próximo movimiento con base en:	
Memoria 0	Ninguna memoria.
Memoria 1	La última elección de su oponente (o su última elección).
Memoria 2	Las acciones realizadas por sí misma y por su oponente en la ronda previa.

Tabla 2.1: Ejemplos de estrategias con base en el tamaño de la memoria.

		Estrategias				
		<i>AllC</i>	...	TFT	...	<i>AllD</i>
<i>Caso 1</i>	Si CC entonces	C	...	C	...	D
<i>Caso 2</i>	Si CD entonces	C	...	D	...	D
<i>Caso 3</i>	Si DC entonces	C	...	C	...	D
<i>Caso 4</i>	Si DD entonces	C	...	D	...	D

Tabla 2.2: 2^4 posibles estrategias si se considera una ronda previa.

En su experimento de simulación Axelrod consideró una historia previa de memoria 6 (3 rondas) lo cual resulta en $4 \times 4 \times 4 = 64$ historias diferentes. Se requiere una lista de 64 C's o D's para que una estrategia determine qué hacer en cada situación resultante. Si se considera $C = 1$ y $D = 0$ la lista se puede representar con una cadena binaria de 64 bits. Así también, se requiere recordar las tres rondas previas lo cual suma 6 bits más (2 bits por cada ronda). La cadena resultante está compuesta por 70 bits los cuales conforman el cromosoma que caracteriza al individuo.

Soluciones candidatas y función de aptitud

La representación da lugar a un total de 2^{70} soluciones candidatas si se considera una historia previa de memoria 6. Para determinar el conjunto inicial Axelrod generó cadenas binarias de 70 bits de forma aleatoria manteniendo generación tras generación un tamaño de población constante.

Para determinar la aptitud de una estrategia cada individuo utiliza la estrategia definida por su cromosoma para jugar el Dilema del Prisionero iterado contra los otros individuos en la población. La aptitud, \bar{f}_i , del jugador i se define por la siguiente formula:

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_i^j}{n}$$

donde u_i^j es el pago obtenido por el jugador i en el encuentro j y n corresponde al número total de encuentros realizados.

Criterio de selección y operadores genéticos

El método utilizado por Axelrod considera dar una pareja de cruza a un individuo que está dentro del rango de una desviación estándar de la aptitud promedio de la población, dos parejas de cruza a los individuos que se encuentren una desviación estándar por encima de la media y ninguna pareja de cruza a aquellos que estén a una desviación estándar por debajo de la media.

Axelrod utilizó como operadores genéticos cruza en un punto y mutación por inversión (ambos con una probabilidad fija).

Resultados de la simulación

Axelrod llevo a cabo dos experimentos de simulación. En el primero considero dos casos: (i) reproducción sexual (ambos padres contribuyen al material genético de la estrategia hija) y (ii) reproducción asexual (solamente un padre contribuye con material genético). En este experimento generó una población de estrategias aleatorias las cuales contendieron en forma de round-robin contra 8 representantes obtenidas de los torneos. En el segundo experimento consideró reproducción sexual en una población de estrategias aleatorias conteniendo una contra otra en forma de round-robin. Los valores empleados para la ejecución de dichos experimentos se presentan en la tabla 2.3.

Parámetro	Primer experimento	Segundo experimento
Población (cromosomas)	20 + 8 representativas	20
Número de juegos (entre dos estrategias)	151	151
Movimientos por generación	24,000	60,000
Número de corridas (cada corrida con 50 generaciones)	40	10
Probabilidad de cruza	1/70	1/70
Probabilidad mutación	1/140	1/140

Tabla 2.3: Parámetros utilizados por Axelrod para evolucionar estrategias a través del algoritmo genético.

En el primer experimento, caso (i), el algoritmo genético evolucionó estrategias cuyo miembro promedio era tan exitoso o incluso mejor que TFT. Los cromosomas evolucionados presentaron 5 alelos³ del comportamiento notables:

³ Se denomina alelo a cada valor posible que puede adquirir un determinado gen.

1. *No agitar las aguas*: continúa cooperando después de tres cooperaciones mutuas (abreviado como C después de RRR)
2. *Se provocativo*: deserta cuando el otro jugador deserte de la nada (D después de RRS)
3. *Acepta una disculpa*: continua cooperando después de que la cooperación se ha restaurado (C después de TSR)
4. *Olvida*: coopera cuando la cooperación mutua se ha restaurado (C después de SRR)
5. *Acepta la rutina*: deserta después de tres deserciones mutuas (D después de PPP)

En once de las 40 corridas Axelrod encontró estrategias que se desempeñaban mejor que TFT en determinados ambientes. Las estrategias evolucionadas siempre desertaban al primer movimiento, y algunas veces en el segundo, y utilizaban las elecciones del oponente para discriminar que es lo que deberían hacer en los movimientos siguientes. Estas estrategias sacaban provecho de las representativas que permitían ser explotadas, y “disculparse” y reanudar la cooperación cuando no era posible.

En el caso (ii), Axelrod encontró estrategias que se condujeron igual o incluso mejor que TFT. Sin embargo, en estas corridas era la mitad de probable que la población evolucionara a miembros que en promedio se condujeran mejor que TFT.

En el segundo experimento, Axelrod llevo a cabo 10 corridas y encontró que en las generaciones iniciales las estrategias no eran tan responsivas y tendía a predominar la deserción mutua. Sin embargo, al paso de 10 o 20 generaciones la tendencia comenzó a revertirse. Algunos jugadores evolucionaron patrones de reciprocidad con aquellos que cooperaban, lo cual hizo que la frecuencia de cooperantes se incrementara en la población.

2.3.4. Otras dinámicas

En la teoría de juegos evolutiva existen también otras dinámicas que permiten estudiar el comportamiento emergente de la población [10]. Entre las principales se encuentran: la dinámica basada en agentes, dinámica micro-macro, dinámica de imitación, dinámica de selección monótona, dinámica de la mejor respuesta. En este trabajo se describen únicamente las dos primeras debido a que han sido utilizadas para el estudio de las redes P2P.

2.3.4.1. *Dinámica basada en agentes*

Un análisis a nivel microscópico de la dinámica poblacional se denomina *basado en agentes* debido a que la unidad básica de análisis en este modelo son los agentes mismos. Un agente es un individuo en la población el cual tiene un estado, interactúa con otros agentes en la población modificando mutuamente su estado.

De acuerdo a Szabó [31], la dinámica basada en agentes se define generalmente por las *reglas de actualización* de estrategias las cuales describen cómo los agentes perciben su entorno, la información que adquieren, las creencias y expectativas que se forman a partir de la experiencia previa, y como todo esto se traduce en actualización de su estrategia durante el juego.

Existe una gran variedad de reglas de actualización de estrategia reportadas en la literatura de teoría de juegos: estocásticas, determinísticas, síncronas, asíncronas, síncronas con un componente estocástico, etc. La elección de regla de actualización dependerá en gran medida del problema que se desee resolver. A continuación se describen dos de las reglas más relevantes y/o populares encontradas en la literatura.

Actualización síncrona y asíncrona

Considere una población cuyos miembros están distribuidos sobre un arreglo bi-dimensional o de mayor dimensión. En cada ronda, cada estrategia interactúa con cada uno de sus vecinos inmediatos. El pago obtenido por cada estrategia es la suma de los pagos sobre todos los juegos en los que participó en esa ronda.

La regla de *actualización síncrona* es como sigue:

1. Cada jugador adopta la estrategia con el pago más alto en su vecindario.
2. Todos los miembros de la población actualizan de forma síncrona.

La regla de *actualización asíncrona* es como sigue:

1. Se escoge a un jugador de forma aleatoria de la población.
2. Se determina su pago y el pago correspondiente a todos sus vecinos.
3. El jugador actualiza su estrategia de acuerdo a algún criterio, el más simple es *imitar si es mejor*.

2.3.4.2. *Dinámica micro-macro*

En 1978 Grannovetter presentó un modelo de umbral [8] para caracterizar la heterogeneidad en un colectivo. Estos modelos permiten explicar fenómenos colectivos en una sociedad. Considere, por ejemplo, la siguiente situación: un grupo de personas enfrenta un problema de decisión colectiva de tal forma que un individuo participa únicamente si muchos otros participan. Cada individuo cuenta con un umbral el cual determina exactamente cuántos individuos del total deben participar para que él participe. Si el total de participantes es mayor que el umbral del individuo entonces éste participará en el colectivo, de otra forma permanecerá inactivo.

El modelado y análisis de esta situación se puede realizar a través de la dinámica micro-macro [20], la cual permite caracterizar la relación entre el comportamiento micro (interacciones de individuos heterogéneos) y el comportamiento macro (resultado de las interacciones). La descripción del modelo se presenta a continuación.

Considere un colectivo de agentes heterogéneos $G^* = \{i : 1 \leq i \leq N\}$ cada uno de los cuales enfrenta un problema de decisión binaria con dos alternativas A_1 y A_2 . El modelo asume lo siguiente: cada agente nace con su propio interés, la decisión racional de cada agente depende de cómo los otros agentes tomen sus decisiones, el agente no cuenta con el conocimiento suficiente para que de forma correcta pueda anticipar las decisiones de los otros agentes y ningún agente puede observar directamente las decisiones de los otros agentes, pero sí puede obtener información agregada. Es decir, cada agente tiene conocimiento de la estrategia de la población en el pasado, y en cualquier momento cada agente tiene la oportunidad de observar las proporciones de agentes que han elegido entre las dos estrategias.

La elección repetida de estrategias por un número grande de agentes puede modelarse como un juego repetido de dos personas, es decir un agente juega contra todos los otros agentes, quienes a su vez también juegan colectivamente. La representación del juego se ilustra en la figura 2.5

Sea $p(t)$ la proporción de agentes que escogen A_1 al tiempo t ($0 \leq p(t) \leq 1$). En cualquier momento, cada agente tiene la oportunidad de observar la estrategia de la población, $\mathbf{p}(t) = (p(t), 1 - p(t))$.

El pago esperado del agente i obtenido por escoger A_1 o A_2 , condicionado a que todos los demás continúen con sus elecciones previas está dado por:

		<i>Colectivo</i>	
		$A_1 (p(t))$	$A_2 (1 - p(t))$
<i>Agente i</i>	A_1	a_i	b_i
	A_2	c_i	d_i

Figura 2.5: Matriz de pagos del agente i .

$$\begin{aligned} U_i(A_1) &= a_i p(t) + b_i(1 - p(t)) \\ U_i(A_2) &= c_i p(t) + d_i(1 - p(t)) \end{aligned} \quad (2.9)$$

El agente i escoge A_1 si

$$a_i p(t) + b_i(1 - p(t)) > c_i p(t) + d_i(1 - p(t)) \quad (2.10)$$

o A_2 si

$$a_i p(t) + b_i(1 - p(t)) < c_i p(t) + d_i(1 - p(t)) \quad (2.11)$$

Se asume que los pagos mostrados en la figura 2.5 satisfacen la condición $a_i + d_i - b_i - c_i \neq 0$. En consecuencia la estrategia que es mejor respuesta para el agente i está dada por:

Caso 1: $a_i + d_i - b_i - c_i > 0$

$$\begin{aligned} (i) \quad &\text{Si } p(t) > (d_i - b_i) / (a_i + d_i - b_i - c_i) \equiv \theta_i : \text{ entonces } A_1 \\ (ii) \quad &\text{Si } p(t) < (d_i - b_i) / (a_i + d_i - b_i - c_i) \equiv \theta_i : \text{ entonces } A_2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Caso 2: $a_i + d_i - b_i - c_i < 0$

$$\begin{aligned} (i) \quad &\text{Si } p(t) < \theta_i : \text{ entonces } A_1 \\ (ii) \quad &\text{Si } p(t) > \theta_i : \text{ entonces } A_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

La matriz de pagos mostrada en la figura 2.5, una por cada agente, puede ser reemplazada por un umbral unidimensional θ_i definido en la ecuación 2.12. La dinámica micro-macro está dada por las ecuaciones 2.12 y 2.13, las cuales muestran las relaciones entre el comportamiento micro (decisión racional de un agente) y el comportamiento macro (decisión del colectivo).

2.4 ¿Por qué la teoría de juegos evolutiva?

La teoría de juegos clásica permite modelar situaciones de interés y conflicto social considerando que los resultados de las interacciones son causadas por individuos racionales que intentan maximizar sus pagos. Sin embargo, es posible observar en determinados ambientes (por ejemplo, sociedad humana) que los individuos no siempre se comportan racionalmente sino que son guiados por instintos que frecuentemente conducen a diferentes situaciones para las cuales la teoría de juegos clásica no tiene una respuesta satisfactoria [17]. La teoría de juegos evolutiva hace frente a algunas carencias encontradas en la teoría de juegos clásica. Algunas de las más importantes son las siguientes:

- Consideración de agentes racionales

La teoría de juegos clásica impone una alta racionalidad en los individuos, sin embargo, en determinados ambientes los individuos que interactúan en situaciones conflictivas, no siempre tienen claridad para decidir si prefieren la opción (*a*) o la opción (*b*), (*b*) a (*c*), o (*c*) a (*a*), es decir existen fallas en la transitividad de preferencias. Por otro lado, en el equilibrio, ningún individuo tiene incentivos para desviarse de su estrategia, dado que ésta es la mejor respuesta a las estrategias escogidas por los otros jugadores. Sin embargo hay juegos que tienen múltiples equilibrios, cada uno con pagos diferentes y en consecuencia unos mejores que otros, y no es posible para un individuo racional decidir cuál de estos equilibrios es el correcto.

La teoría de juegos evolutiva explica exitosamente la predominancia de ciertos comportamientos donde claramente las suposiciones de racionalidad fuerte fallan.

- Captura del dinamismo

La teoría de juegos clásica establece la selección de estrategia, previamente al juego, de lo que el individuo hará en cualquier estado posible. Esta selección presupone jugadores hiper-racionales y falla en representar el proceso dinámico. La teoría de juegos evolutiva representa el proceso dinámico al permitir a cada jugador observar a su oponente, aprender de sus observaciones y en el próximo movimiento realizar la mejor respuesta en función de lo que ha aprendido.

CAPÍTULO 3

TRABAJO PREVIO

En este apartado se presenta la revisión de la literatura relacionada con este trabajo. Esta revisión se enfoca en los trabajos que utilizan la teoría de juegos evolutiva para la resolución de problemas relativos a la disponibilidad de recursos en un sistema P2P. En particular, la revisión se centra en los modelos de juego y modelos evolutivos de la dinámica poblacional que se haya empleado.

3.1 Introducción

La teoría de juegos evolutiva es uno de los principales marcos de trabajo para conocer y analizar los diferentes tipos de comportamientos que emergen de la interacción entre individuos en una población [33]. Esta teoría ha encontrado aplicaciones en sociología, antropología, economía, ciencias políticas, ciencias de la computación, etc. La idea básica entre la teoría de juegos evolutiva y las disciplinas previamente mencionadas es relacionar estrategias con genes y pagos con aptitud genética. De esta forma esta teoría puede ser aplicada en otros contextos (diferentes al biológico) para el estudio del comportamiento emergente de la población.

En particular, en este trabajo se presenta la aplicación de la teoría de juegos evolutiva en los sistemas P2P para el estudio de problemas relativos a la disponibilidad de los recursos.

En este contexto las interacciones entre pares se modelan a través de un juego y la dinámica del sistema a través de un modelo evolutivo. A continuación se describen algunos modelos de juego y modelos evolutivos empleados en el análisis de los sistemas P2P.

3.2 Modelos de juego

Los modelos de juego empleados ilustran las situaciones estratégicas que enfrentan los pares en el sistema P2P. Así también, permiten establecer los tipos de comportamientos presentes en la población los cuales se ven afectados por la utilidad obtenida al adoptar una estrategia específica. A continuación se presenta la descripción de cada uno de los modelos utilizados en el trabajo previo.

3.2.1. Juego “Caching”

Sasabe et al. en [27] presentan dos modelos de juego de 2x2 (figura 3.1 y 3.2) para la representación de la situación estratégica. Ambos modelos coinciden en que los pares deben determinar si mantienen (*caching*) o no (*no caching*) un recurso en caché, pero difieren en el costo asociado a mantenerlo. El primer modelo considera el costo asociado al procesamiento de carga causado por el mismo u otro par al acceder al archivo. En este modelo, los pagos cumplen la condición de $T > R > S > P$ por lo cual el juego es análogo al marco de trabajo proporcionado por La Ventisca (apéndice A) donde la estrategia de cooperar (C) es representada por *caching* y la de desertar (D) por *no caching*. El segundo modelo considera el costo asociado a la capacidad de almacenamiento. Los pagos cumplen con la condición $T > R = S > P$ la cual no corresponde a ninguna clase de juego predefinida. Este modelo es presentado por ellos mismos en [28], ampliando los parámetros de medición de desempeño del sistema P2P (impacto de la matriz de pagos, impacto de la estructura de red, entre otros). La interpretación de los parámetros utilizados en cada modelo se presenta en la tabla 3.1.

Así también, Sasabe et al. en [26] presentan un modelo de juego (figura 3.3) el cual es una extensión al juego de “Caching” propuesto en [27], pero considera además una población de pares heterogéneos. Cada par proveedor tiene diferente sentido de apreciación por un archivo y debe determinar si mantiene (*cooperar*) o no (*desertar*) dicho recurso en

		Jugador 2	
		<i>キャッシング</i>	<i>no caching</i>
Jugador 1	<i>キャッシング</i>	$b - c_l, b - c_l$	$b - 2c_l, b$
	<i>no caching</i>	$b, b - 2c_l$	$0, 0$

$R = b - c_l, T = b, S = b - 2c_l$ y $P = 0$

Figura 3.1: Juego “Caching” costo: procesamiento de carga.

		Jugador 2	
		<i>キャッシング</i>	<i>no caching</i>
Jugador 1	<i>キャッシング</i>	$b - c_s, b - c_s$	$b - c_s, b$
	<i>no caching</i>	$b, b - c_s$	$0, 0$

$R = b - c_s, T = b, S = b - c_s$ y $P = 0$

Figura 3.2: Juego “Caching” costo: almacenamiento.

Parámetro	Interpretación
b	Beneficio obtenido por utilizar un archivo
c_l	Costo de procesamiento de carga causado por el mismo u otro par al acceder al archivo
c_s	Costo asociado a la capacidad de almacenamiento

Tabla 3.1: Interpretación de los parámetros utilizados en el juego de Caching.

caché. Este modelo también es planteado en [14] pero considerando además otros parámetros de medición de desempeño del sistema P2P.

		Jugador j	
		<i>cooperar</i>	<i>desertar</i>
Jugador i	<i>cooperar</i>	R_i, R_j	S_i, T_j
	<i>desertar</i>	T_i, S_j	P_i, P_j

$T_k > R_k \geq S_k > P_k$ ($k = i, j$)

Figura 3.3: Modelo de juego propuesto en [26] considerando heterogeneidad de los pares.

3.2.2. Modelo Zhang et al.

Zhang et al. en [34] plantean un modelo de juego de 2-jugadores para un sistema P2P de compartición de archivos (figura 3.4). Los pares enfrentan un problema de decisión binaria; deben de determinar si comparten (*compartir*) o no (*no compartir*) un recurso en el sistema. Los pagos en el juego cumplen la condición de $R > T > P > S$ por lo que la situación estratégica se modela a través del marco de trabajo proporcionado por el juego de La Caza del Ciervo (apéndice A) donde la estrategia de cooperar (C) es representada por *compartir* y la de desertar (D) por *no compartir*. La interpretación de los parámetros utilizados en este modelo se presentan en la tabla 3.2.

		Par j	
		<i>compartir</i>	<i>no compartir</i>
Par i	<i>compartir</i>	$\pi_i + \Delta S_i, \pi_j + \Delta S_j$	$\pi_i - l_i a_i, \pi_j$
	<i>no compartir</i>	$\pi_i \pi_j - l_j a_j$	π_i, π_j

Figura 3.4: Modelo de juego propuesto por Zhang et al. [34].

Parámetro	Interpretación
$\pi_i = \delta_i^{t-1} \Delta S_i$	Ingreso general
δ_i	Factor de descuento $0 \leq \delta_i < 1$
$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_j$	Beneficios excedentes cuando ambos (i, j) escogen <i>compartir</i> ($\Delta S_i, \Delta S_j$, y $\Delta S > 0$)
$\Delta S_i = r_i a_j - l_i a_i$	Beneficio excedente
a_i	Capacidad de servicio de recursos
r_i	Coefficiente de ingreso
$r_i a_j$	Ingreso excepcional cuando ambos (i, j) escogen <i>compartir</i>
l_i	Nivel de riesgo
$l_i a_i$	Costo inicial al adoptar por primera vez <i>compartir</i>

Tabla 3.2: Interpretación de los parámetros asociados al par i (figura 3.4).

3.2.3. Modelo Feng et al.

En este trabajo, Feng et al. [7] presentan un modelo de juego de 2x2 (figura 3.5). En este modelo cada par tiene dos estrategias $\{0,1\}$. La estrategia 0 denota que el par contribuye a otros pares con sus propios recursos mientras que de forma simultanea descarga recursos de otros. La estrategia 1 denota que el par únicamente descarga recursos de los otros pares en el sistema pero no hace ninguna contribución. La interpretación de los parámetros empleados en este modelo se presentan en la tabla 3.3.

		Par j	
		0	1
Par i	0	$-gD_d + cD_s, -gD_d + cD_s$	$cD_s, -gD_d$
	1	$-gD_d, cD_s$	$0, 0$

Figura 3.5: Modelo de juego propuesto por Feng et al.[7].

Parámetro	Interpretación
D_s	Contribución de una unidad de recurso cuando se adopta la estrategia 0
D_d	Descarga asociada a cada par
c	Ingreso por contribuir una unidad
g	Costo asociado a descargar una unidad

Tabla 3.3: Interpretación de los parámetros del juego (figura 3.5).

3.2.4. Modelo Cho et al.

Cho et al. en [6] presentan dos modelos de juego (figuras 3.6 y 3.7). Ambos modelos coinciden en el conjunto de acciones disponibles para cada par en el sistema $\{\text{compartir}, \text{no compartir}\}$, pero difieren en la situación estratégica. El primer modelo representa una situación análoga al marco de trabajo proporcionado por el juego La Caza del Ciervo (apéndice A) donde la estrategia de cooperar es representada por *compartir* (compartir un recurso) y la de desertar por *no compartir* (no compartir un recurso) y el segundo modelo representa

una situación análoga al marco de trabajo proporcionado La Ventisca donde la estrategia de cooperar corresponde a *compartir* y la de desertar corresponde a *no compartir*. La interpretación de los parámetros utilizados en estos modelos se presentan en la tabla 3.4.

		Nodo j	
		<i>compartir</i>	<i>no compartir</i>
Nodo i	<i>compartir</i>	$G_i + B_i, G_j + B_j$	$G_i - U_i, G_j$
	<i>no compartir</i>	$G_i, G_j - U_j$	G_i, G_j

Figura 3.6: Juego “SHG” propuesto por Cho et al. [6].

		Nodo j	
		<i>compartir</i>	<i>no compartir</i>
Nodo i	<i>compartir</i>	$G_i + C_i, G_j + C_j$	$G_i + B_i, U_j$
	<i>no compartir</i>	$G_i + U_j$	G_i, G_j

Figura 3.7: Juego “SG” propuesto por Cho et al. [6].

Parámetro	Interpretación
G_k	Ingreso general
U_k	Capacidad de servicio
$B_k = U_{\bar{k}} - U_k$	Ganancia por compartir un recurso
$C_k = U_{\bar{k}} - U_k/2$	Ganancia por compartir un recurso en el juego SG

Tabla 3.4: Interpretación de los parámetros utilizados en el juego SGH y SG asociados al nodo k .

3.3 Modelos evolutivos

Los modelos de juego previamente mencionados establecen la situación estratégica que enfrentan los pares en el sistema. Para descubrir qué comportamientos tienden a predominar y/o establecerse en el sistema P2P de acuerdo a estos modelos de juego se utilizaron tres modelos evolutivos: la dinámica del replicador, dinámica basada en agentes y dinámica

micro-macro. El comportamiento emergente de los pares en el sistema P2P es estudiado a través de estos modelos evolutivos.

3.3.1. Dinámica del replicador

La dinámica del replicador (sección 2.3.2) es un modelo evolutivo que permite revelar como una fracción de individuos, que utilizan una determinada estrategia, se incrementa en la población si el pago obtenido por éstos es mayor que el pago promedio de la población. Este modelo es empleado por Sasabe et al. en [27, 28], Zhang et al. en [34], Cho et al. en [6] para obtener la proporción de pares en el sistema que escogen una determinada estrategia en estado estacionario y evaluar la incidencia de ciertos parámetros, propuestos en sus modelos de juego, sobre esta tasa de individuos. Por otro lado, Feng et al. en [7] propone un mecanismo de incentivos para un sistema P2P el cual es validado por medio de esta técnica. La descripción general de la dinámica del replicador mencionada en los trabajos previos se ilustra en la figura 3.8

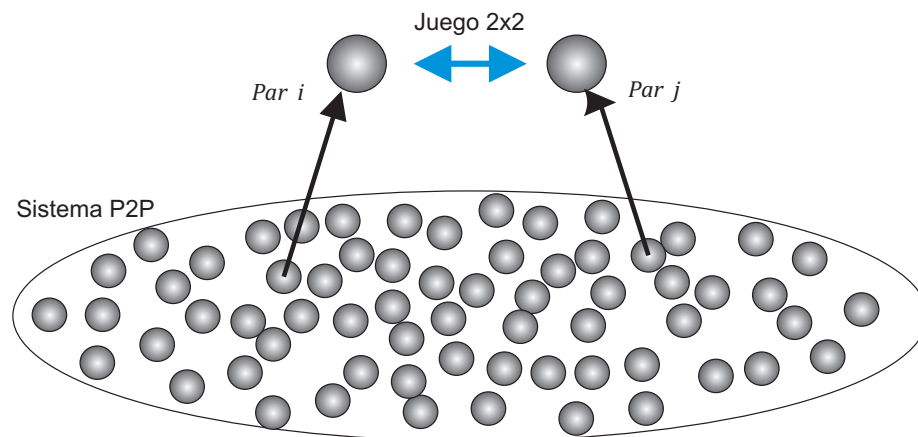


Figura 3.8: Dinámica del replicador: cada par i en el sistema juega con los otros pares. El encuentro entre el par i y el par j se determina de forma aleatoria.

3.3.2. Dinámica basada en agentes

La dinámica basada en agentes (sección 2.3.4) permite revelar cómo una estrategia superior se esparce sobre una distribución espacial de estrategias preestablecidas en una población.

Cada individuo en la población es afectado por su ambiente circundante a través de las interacciones locales con sus vecinos más próximos. Sin embargo, sus acciones tardan en tener efecto ante aquellos individuos con quienes no establecen una relación directa. Sasabe et al. en [27, 28] emplean este modelo para determinar, dadas diferentes estructuras de red, la cantidad y distribución de los pares que mantienen un archivo en caché y evaluar la latencia de búsqueda ante un recurso dado. La regla de actualización de estrategia empleada en este trabajo es síncrona. Por otro lado, Matsuda et al. en [14] analizan cómo el intercambio de información local entre pares afecta el rendimiento del sistema, y la distribución de estrategias en la red. En este trabajo consideran dos experimentos de simulación, el primero considera una regla de actualización síncrona y el segundo actualización asíncrona. La descripción general de la dinámica basada en agentes utilizada en los trabajos previos se ilustra en la figura 3.9.

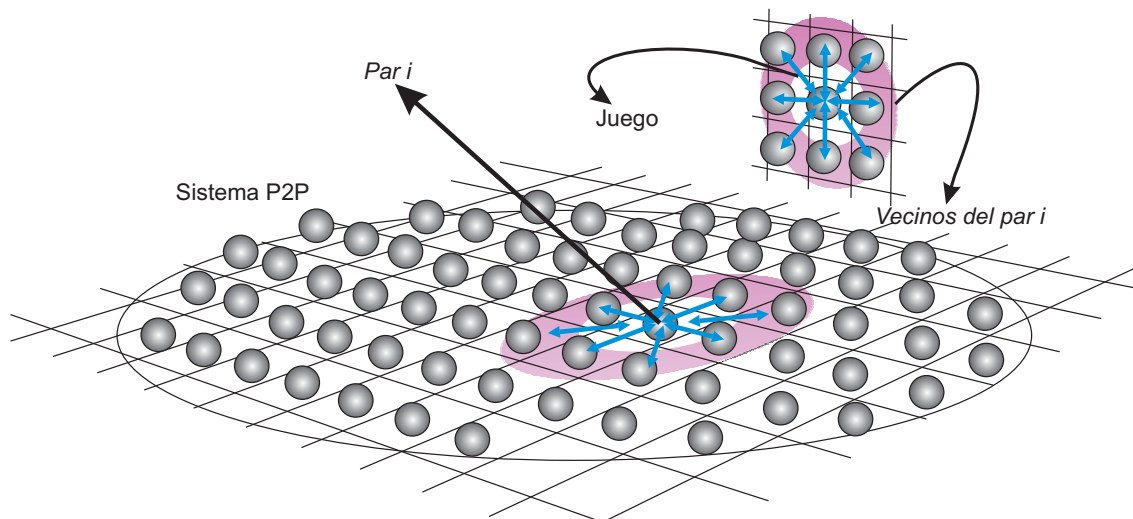


Figura 3.9: Dinámica basada en agentes sobre un arreglo bidimensional: cada par en el sistema juega con sus vecinos inmediatos y actualiza su estrategia de acuerdo a una regla preestablecida (misma regla para todos los pares en el sistema).

3.3.3. Dinámica micro-macro

La dinámica micro-macro (sección 2.3.4) permite revelar cómo las interacciones de individuos heterogéneos (comportamiento micro) afectan el comportamiento colectivo en el sistema (comportamiento macro) y a su vez cómo el colectivo afecta las preferencias de cada individuo. Este modelo es planteado por Sasabe et al. en [26] y Matsuda et al. en

[14] para revelar cómo las interacciones resultantes de mantener un archivo en caché afectan la condición de caché en el sistema completo. La descripción general de la dinámica micro-macro utilizada en los trabajos previos se ilustra en la figura 3.10.

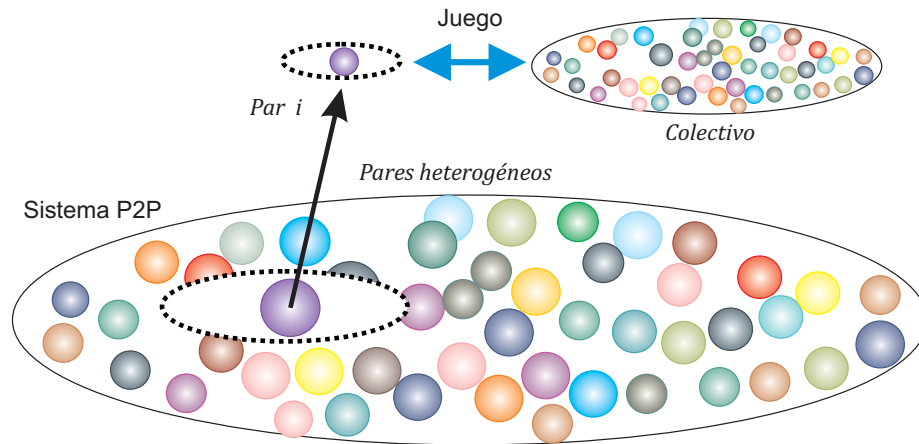


Figura 3.10: Dinámica micro-macro: cada par i en el sistema juega contra el colectivo y cambia de estrategia de acuerdo a un umbral preestablecido (θ_i) y la estrategia poblacional ($\mathbf{p}(t)$).

3.4 Resumen

A continuación se presenta de manera sintética los trabajos en los que se ha aplicado la teoría de juegos evolutiva para la resolución de problemáticas relativas a la disponibilidad de los recursos en un sistema P2P.

Tabla 3.5: Síntesis de los trabajos expuestos.

Descripción	
Artículo:	<i>A Caching Algorithm using Evolutionary Game Theory in a File-Sharing System</i> [27], 2007.
Objetivo:	Lograr el almacenamiento efectivo en el sistema a partir de un nodo autónomo con comportamiento egoísta tomando en cuenta la demanda del archivo y el costo de mantenerlo en caché.
Modelo de Juego:	Juego 2x2 “Caching” (figuras 3.2, 3.1) Estrategias: mantener (<i>caching</i>) o no (<i>no caching</i>) un recurso en caché. Pagos: asociados al costo de procesamiento de carga, costo de capacidad de almacenamiento y demanda de un archivo.
Modelo evolutivo:	Dinámica del replicador, dinámica basada en agentes.
Conclusiones	Modelar los costos de caching como la capacidad de almacenamiento permite que el sistema de compartición de archivos sea robusto a la desaparición de archivos independientemente de la topología de red incluso si los nodos tienen comportamiento egoísta.

Tabla 3.5 Síntesis de los trabajos expuestos.

Descripción	
Artículo:	<i>An Evolutionary Game Model of Resources-sharing Mechanism in P2P Networks</i> [34], 2007.
Objetivo:	Establecer un modelo de juego evolutivo para la compartición de recursos en una red P2P.
Modelo de Juego:	Juego 2x2. Conflicto e interés social utilizando como marco de trabajo el juego La Caza del Ciervo (figura 3.4). Estrategias: compartir (<i>compartir</i>) o no (<i>no compartir</i>) un recurso. Pagos: asociados a ganancias extras por compartir, capacidad de servicio del nodo, ingreso por encima de la media para fomentar la compartición, riesgo y costo inicial de compartir un archivo.
Modelo evolutivo:	Dinámica del replicador.
Conclusiones	Existe una correlación entre la dirección de evolución del sistema y la matriz de pagos. La dirección de evolución del sistema P2P es afectada por las condiciones iniciales de éste, y los parámetros usados en el modelo.
Artículo:	<i>How does user heterogeneity affect performance of P2P caching?: evolutionary game theoretic approach</i> [26], 2008.
Objetivo:	Investigar el rendimiento del sistema cuando todos los usuarios autónomos se comportan egoístamente. Investigar como la heterogeneidad de los usuarios afecta la disponibilidad en el sistema P2P.
Modelo de Juego:	Juego asimétrico de dos jugadores “Caching” (figura 3.3). Estrategias: mantener (<i>caching</i>) o no (<i>no caching</i>) un recurso en caché Pagos: asociados a la heterogeneidad de la red y sentido de apreciación hacia un archivo por los distintos usuarios, considerando el costo de procesamiento de carga, costo de almacenamiento y demanda de un archivo.
Modelo evolutivo:	Dinámica micro-macro.
Conclusiones	La alta heterogeneidad de los usuarios conlleva a mejorar un sistema estable para el caching manteniendo la disponibilidad de los archivos.

Tabla 3.5 Síntesis de los trabajos expuestos.

Descripción	
Artículo :	<i>P2P Incentive Model On Evolutionary Game Theory</i> [7], 2008.
Objetivo:	Utilizar la teoría de juegos evolutiva para determinar un mecanismo de incentivos en una red P2P.
Modelo de Juego:	Juego simétrico de 2x2 (figura 3.5). Estrategias: (i) contribuir y descargar simultáneamente contenidos y (ii) descargar contenidos y no contribuir. Pagos: asociados a los costos e ingresos percibidos por descargar y/o contribuir un recurso.
Modelo evolutivo:	Dinámica del replicador.
Conclusiones	La población individual en un sistema P2P es estable si los nodos utilizan como juego el modelo de incentivos diseñado en el artículo, el cual contempla pagos asociados a la contribución y/o descarga de unidades de contenido.
Artículo:	<i>Modeling and Dynamics Analysis of P2P Networks Based on Evolutionary Games</i> [6], 2009.
Objetivo:	Emplear la teoría de juegos evolutiva para analizar el proceso dinámico evolutivo del mecanismo de compartición de recursos en redes P2P, así mismo, revelar cómo el comportamiento egoísta de los nodos afecta la dinámica del sistema completo.
Modelo de Juego:	Juego simétrico de 2x2 (figuras 3.6 y 3.7). Conflicto e interés social considerando el marco de trabajo proporcionado por La Caza del Ciervo y La Ventisca. Estrategias: cooperar (<i>compartir</i>) o no (<i>no compartir</i>). Pagos: asociados a la capacidad de servicio, ingreso general y ganancias por compartir.
Modelo evolutivo:	Dinámica del replicador.
Conclusiones	Existe una relación entre la dirección de evolución del sistema y la matriz de pagos, y el radio costo/beneficio es el factor clave para incrementar el rendimiento del sistema.

Tabla 3.5 Síntesis de los trabajos expuestos.

Descripción	
Artículo:	<i>User selfishness vs. file availability in P2P file-sharing systems Evolutionary game theoretic approach</i> [28], 2009.
Objetivo:	Llevar a cabo un sistema de compartición de archivos con alta disponibilidad y baja latencia de búsqueda incluso si los nodos en el sistema son autónomos y tienen comportamiento egoísta.
Modelo de Juego:	Juego “Caching” simétrico de 2x2 (figura 3.2 y 3.1). Estrategias: mantener (<i>caching</i>) o no (<i>no caching</i>) un recurso en caché. Pagos: asociados al costo de procesamiento de carga, costo de capacidad de almacenamiento y demanda de un archivo.
Modelo evolutivo:	Dinámica del replicador, dinámica basada en agentes.
Conclusiones	Los modelos propuestos logran un sistema de compartición de archivos robusto contra la desaparición de éstos, independientemente de la estructura de red incluso si los nodos tienen un comportamiento egoísta.
Artículo:	<i>Evolutionary Game Theory-Based Evaluation of P2P File-Sharing Systems in Heterogeneous Environments</i> [14], 2010.
Objetivo:	Evaluar el rendimiento de un sistema P2P de compartición de archivos en ambientes heterogéneos.
Modelo de Juego:	Juego asimétrico de dos jugadores “Caching” (figura 3.3). Estrategias: mantener (<i>caching</i>) o no (<i>no caching</i>) un recurso en caché. Pagos: asociados a la heterogeneidad de la red y sentido de apreciación hacia un archivo por los distintos usuarios, considerando el costo de procesamiento de carga, costo de almacenamiento y demanda de un archivo.
Modelo evolutivo:	Dinámica micro-macro, dinámica basada en agentes.
Conclusiones	La alta heterogeneidad de los usuarios conlleva a la estabilidad de la disponibilidad de los archivos.

3.5 Discusión

En los modelos de juegos planteados (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, y 3.7) se representa la situación estratégica que enfrentan los pares en el sistema P2P. Estos modelos consideran estrategias que los pares podrían adoptar para resolver problemáticas concernientes a la mejora de la disponibilidad de los recursos en el sistema completo. Así también, para la resolución de estas problemáticas, cada modelo considera la incidencia de determinados parámetros (tablas 3.1, 3.2, 3.3, y 3.4) ante la dinámica poblacional.

Para el estudio del comportamiento emergente utilizan modelos evolutivos que permiten determinar: (i) los estados estacionarios del sistema indicando la composición de la población y (ii) como es afectado el comportamiento individual y/o colectivo ante los parámetros predefinidos. En los modelos expuestos analizan la dinámica poblacional a nivel microscópico (la incidencia de las interacciones individuales en el sistema) [27, 28, 14], a nivel macroscópico (comportamiento global resultado de las interacciones individuales) [6, 7, 27] y micro-macro (combinación de ambos) [26, 14]. Así también, consideran poblaciones homogéneas (todos los pares en el sistema tienen el mismo sentido de apreciación o valor por algún recurso) [27, 28, 6, 7, 34] y heterogéneas [26, 14], así como diferentes estructuras de red, por ejemplo: redes de malla completa, [27, 34, 7, 6, 28] redes de escala libre y grafos aleatorios [27, 28, 14].

Aunque los modelos evolutivos expuestos exploran cómo se conducen las distintas estrategias en un determinado ambiente, ninguno de éstos permite descubrir nuevas estrategias que, en los ambientes descritos, pudieran conducirse mejor. Al definir la situación estratégica establecen las posibles opciones con las que cuenta un par ante una problemática dada, en todos los trabajos expuestos los pares enfrentan un problema de decisión binaria en el cual solo pueden optar por una solución sin existir un punto intermedio. Por otro lado, tampoco consideran que un par, cuyo comportamiento al final está determinado por un humano, pueda actuar de acuerdo a la experiencia previa, es decir, cada vez que un par interactúa con otros pares en el sistema lo que haya sucedido en el pasado no tiene ninguna incidencia en su decisión actual. Con base en esto, el presente trabajo propone un modelo evolutivo que considere por un lado la exploración de estrategias no predefinidas, y por otro que permita reflejar la experiencia previa de los pares en la toma de sus decisiones.

En la tabla 3.6 se comparan algunas de las características relevantes de cada modelo expuesto, así como del modelo propuesto en el presente trabajo.

Parámetro	Dinámica del replicador	Dinámica basada en agentes	Dinámica micro-macro	Algoritmos genético
Nivel de análisis Permite revelar	Macroscópico Comportamientos predominantes en el sistema	Micro-macro Impacto del comportamiento individual sobre el rendimiento del sistema	Microscópico Esparcimiento de una estrategia superior sobre una distribución espacial de estrategias	Comportamientos evolucionados dentro de un ambiente dinámico
Población de pares	Homogéneos	Heterogéneos	Homogéneos /heterogéneos	Homogéneos
Topología de red	Malla completa	Malla completa	Diversas	Diversas
Actualización de estrategia	No hay	Determinada por la estrategia poblacional y un umbral	Diversas	Por medio de operadores genéticos
Innovación de estrategias	No	Si	No	Si

Tabla 3.6: Características relevantes a los modelos evolutivos empleados en Sistemas P2P.

CAPÍTULO 4

ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD EN SISTEMAS P2P

Este capítulo comienza con la presentación de los objetivos de este proyecto, presenta la síntesis de la metodología empleada, y después describe detalladamente los apartados involucrados en la metodología los cuales incluyen: diseño, simulación y análisis y discusión de resultados.

4.1 Objetivos

Descripción de la problemática abordada: los sistemas P2P tienen como característica esencial la ausencia de autoridad centralizada, esto a la vez, puede dar lugar a que los pares se desvíen del objetivo del sistema y se comporten de manera egoísta al no compartir sus recursos [11]. Así también, los pares en su autonomía pueden determinar en qué momento se encuentran presentes en el sistema, lo que ocasiona que sus recursos compartidos no estén disponibles cuando dejan la red. Ante estos hechos, los servicios proporcionados

deben estructurarse de tal manera que el funcionamiento correcto del sistema se base en el conjunto de pares que participan activamente en la aplicación, y un cambio repentino en este conjunto, no debería conllevar a ningún malfuncionamiento del sistema. La carencia de control central y el inherente dinamismo representan un gran reto para la disponibilidad y en consecuencia surge la necesidad de identificar estrategias eficaces y eficientes que los pares podrían adoptar para mantener la disponibilidad de los recursos en el sistema P2P.

En la revisión de la literatura expuesta (capítulo 3) se encontró que la problemática planteada en el párrafo anterior es estudiada utilizando como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva. Así también, a través de los modelos evolutivos expuestos (sección 3.3) se estudia el comportamiento emergente del sistema P2P con el objeto de proporcionar mecanismos efectivos que podrían adoptarse para mantener un funcionamiento adecuado en el sistema. Sin embargo, ninguno de estos trabajos permite descubrir nuevas estrategias que, en los ambientes descritos, podrían conducirse mejor. Por otro lado, tampoco consideran que un par (cuyo comportamiento al final está determinado por un humano) en el sistema pueda actuar de acuerdo a la experiencia previa, es decir, cada vez que un par interactúa con otros pares en el sistema los resultados de interacciones previas no tienen ninguna incidencia en su decisión actual. Con base en esto, el presente trabajo propone un modelo evolutivo utilizando como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva. Dicho modelo debe considerar por un lado la exploración de estrategias no predefinidas, y por otro reflejar la experiencia previa de los pares en la toma de sus decisiones para alcanzar los siguientes objetivos:

■ **Objetivo principal.**

Identificar estrategias que al ser adoptadas por los pares permitan mantener una disponibilidad de los recursos de acuerdo a un umbral mínimo, considerando la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos en el sistema P2P.

■ **Objetivos específicos.**

- Diseño de un modelo del sistema que permita establecer las premisas base para el estudio del sistema P2P.
- Diseño de un modelo de juego que represente la situación estratégica que enfrentan los pares al mantener la disponibilidad adecuada de los recursos afectados.
- Diseño de un modelo evolutivo que permita establecer la dinámica poblacional para el estudio del comportamiento emergente de los pares en un sistema P2P.

- Diseño e implementación de una herramienta que permita evolucionar estrategias de mantenimiento a la disponibilidad de los recursos en un sistema P2P mediante un algoritmo evolutivo.
- Analizar el tiempo que tardan los pares en recuperar la disponibilidad de un recurso afectado.
- Identificar qué patrones de comportamiento se encuentran presentes en las poblaciones de estrategias evolucionadas.

4.2 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto consiste en las siguientes cuatro fases: diseño de modelos, implementación, simulación y análisis y discusión de resultados. A continuación se describen brevemente cada una de ellas.

Fase I. Diseño de modelos

En esta fase se plantea el diseño de modelos que permitan incorporar las características relevantes al problema de la disponibilidad en un sistema P2P. Los modelos a considerar son los siguientes:

- **Modelo del sistema.** Diseño de un modelo del sistema P2P en el que cada par que participe en la aplicación esté interesado en el mantenimiento de la disponibilidad de los recursos y que en conjunto y mediante decisiones independientes determinen las estrategias de recuperación de la disponibilidad cuando ésta se ve afectada por la transitoriedad de los pares considerando la demanda de los recursos en el sistema.
- **Modelo de juego.** Diseño de un modelo que represente la situación estratégica que enfrentan los pares al interactuar con otros pares y con los requerimientos del sistema.
- **Modelo evolutivo.** Diseño de un modelo que permita el estudio del comportamiento emergente en una población de pares a través del uso de la técnica de algoritmos genéticos. Esta técnica debe considerar como instancia a evolucionar el comportamiento de los pares que participan activamente en la aplicación.

Fase II. Implementación

Esta fase contempla el diseño e implementación de los modelos realizados en la fase I, para lo cual se requiere:

- Diseñar una aplicación basada en una arquitectura modular que cumpla con los requerimientos expuestos en la Fase I de diseño.
- Implementar dicha aplicación en un lenguaje de programación orientado a objetos.

Fase III. Simulación

Esta fase contempla la configuración y ejecución de las simulaciones para los modelos propuestos en la fase I utilizando la aplicación implementada en la fase II. Las actividades a realizar son:

- Determinar los parámetros de configuración de las simulaciones (p. ej., número de generaciones, tamaño de la población, etc.)
- Establecer escenarios significativos que permitan analizar el efecto que ejerce las ganancias sobre los costos de mantener un recurso en caché.
- Realizar la ejecución de las simulaciones planteadas y coleccionar los resultados obtenidos.

Fase IV. Análisis y discusión de resultados

En esta fase se analizarán los resultados de las simulaciones ejecutadas en la fase III considerando:

- Análisis del comportamiento de la población.
- El tiempo requerido por los pares para restaurar la disponibilidad de un recurso.
- Patrones de comportamiento presentes en la población de estrategias evolucionadas

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Determinar la información relevante al comportamiento de la población y al tiempo requerido por los pares para restaurar la disponibilidad de un recurso.

- Establecer un método para el reconocimiento de patrones en las estrategias evolucionadas.
- Analizar, discutir y presentar los resultados encontrados en un formato adecuado.

4.3 Diseño de modelos

Esta sección contempla el diseño de tres modelos: el modelo del sistema el cual permitirá establecer las premisas base para el estudio del sistema P2P, el modelo del juego que representará la situación estratégica que enfrentan los pares al mantener la disponibilidad adecuada de los recursos afectados y el modelo evolutivo que establecerá la dinámica poblacional para el estudio del comportamiento emergente de los pares en el sistema.

4.3.1. Modelo del sistema

Se considera el diseño de un modelo del sistema P2P en el que cada par que participe en la aplicación esté interesado en el mantenimiento de la disponibilidad de los recursos, y que en conjunto y mediante decisiones independientes, determinen las estrategias de recuperación de la disponibilidad cuando ésta se ve afectada por la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos en el sistema.

Para establecer dicho modelo se requiere determinar qué elementos en el sistema tienen incidencia y/o afectan la disponibilidad de los recursos en el sistema P2P. Entre estos se reconoce principalmente: (i) al conjunto de pares que participan activamente en el sistema, (ii) al conjunto de pares cuya entrada-participación-salida repentina afecta la disponibilidad de un recurso, y (iii) la demanda de dicho recurso. La población de pares es representada por (i), un par en esta población será denotado como *Par*. El *Ambiente* es representado por (ii) y (iii).

Con base en estos elementos se formulan las siguientes premisas: se describe un sistema P2P con una población de N pares. En el sistema existen k recursos diferentes. Cada recurso, r_j ($1 \leq j \leq k$) tiene un umbral de disponibilidad asociado, θ_{r_j} . Cada *Par* en el sistema tiene una lista de recursos l_i (el número de recursos en l_i es \leq que k), cuya disponibilidad vigila. Cuando la disponibilidad de r_j cae por debajo de θ_{r_j} los pares interesados en su disponibilidad deben determinar la estrategia de recuperación. Para alcanzar este objetivo

cada *Par* adoptará en cada iteración la estrategia *Ansioso* o *Perezoso* mientras la disponibilidad de r_j no se haya restablecido o no se haya excedido un tiempo límite. La estrategia *Ansioso* (*A*) implica crear una réplica inmediata del recurso y la estrategia *Perezoso* (*P*) retrasar la replicación hasta que sea absolutamente necesario. Si el *Par* ha optado por *A* en una iteración previa, *A* denota que continuará manteniendo dicha réplica del recurso y *P* que éste eliminará su réplica.

4.3.1.1. ¿Ser Ansioso o ser Perezoso?

El comportamiento adoptado por los pares al llevar a cabo la restauración de la disponibilidad de un recurso puede verse afectado por el conjunto de pares que participan activamente en la recuperación y por el *Ambiente*. Considere por ejemplo, el siguiente escenario: supongamos que la disponibilidad de un recurso cae por debajo de su nivel preestablecido, y que todos los pares participantes en dicha restauración adoptan la estrategia *A*, suponga también que en el *Ambiente* dicho recurso nunca es solicitado debido a que los pares que almacenaban dicho recurso han regresado, o porque su demanda es baja. Es claro que esta situación conlleva, por un lado, a una mala asignación de los recursos disponibles en el sistema (p. ej., ancho de banda, almacenamiento, etc.) debido a que bien podrían haberse asignado a otro con mayor demanda, y por otro lado, genera costos absorbidos por los pares al optar por crear réplicas. En consecuencia en este escenario la estrategia *P* habría sido una mejor opción, ya que no generará ningún costo hasta que el recurso se haya replicado. Sin embargo, *P* tiene la desventaja de que eventualmente se pierda la última copia sin ninguna posibilidad de recuperar el recurso conforme el tiempo pase y más pares dejen el sistema o remuevan su réplica del caché. En otros escenarios, podría ser que la estrategia *A* se conduzca mejor siempre que los recursos sean requeridos regularmente en el *Ambiente*, pero si no es el caso, *A* solo generará costos derivados de su mantenimiento. Dados estos hechos, se puede notar que los resultados obtenidos por cada *Par* en el sistema no dependen únicamente de sus acciones sino además de las acciones de los otros pares y las acciones presentes en el *Ambiente*. Estos escenarios, así como muchos otros, dan lugar a la situación estratégica que enfrentan los pares: *determinar el momento más adecuado para crear una réplica de un recurso afectado*.

Para el estudio de los comportamientos evolucionados en el sistema P2P, se modela esta situación estratégica a través de un juego repetido “*Ansioso – Perezoso*” bajo el supuesto

de que cada *Par* juega este juego con éxito. El análisis se realiza para un solo recurso, y se asume que cada *Par* en el sistema está interesado en la disponibilidad del mismo. Cabe señalar que el resultado puede ser aplicado a k recursos, y que los pares pueden tomar decisiones independientes para cada uno de ellos.

4.3.2. Modelo de juego

El diseño de este modelo contempla la situación estratégica que enfrentan los pares al tener que determinar el momento más adecuado para replicar los recursos cuya disponibilidad ha sido afectada. Esta situación estratégica es reflejada en el juego *Ansioso-Perezoso* el cual es un juego extensivo, asimétrico, de dos jugadores (sección 2.2.2). Este juego contempla, como actores principales de la situación estratégica, al *Par* interesado en recuperar la disponibilidad de un recurso y al *Ambiente* cuyo comportamiento está determinado por la transitoriedad de los pares y las solicitudes realizadas al recurso en cuestión. Para determinar quién hace qué en este juego, cuándo lo hace y cuánto obtiene, se establecen las reglas del juego que se describen a continuación.

4.3.2.1. Reglas del juego

Las reglas del juego (sección 2.2.1.1) nos indican lo que el *Par* y el *Ambiente* pueden hacer y cuando pueden hacerlo, así también, indican lo que cada uno obtiene (utilidad) al finalizar el juego. Las reglas del juego, representadas a través de la estructura de árbol mostrada en la figura 4.1, establecen que:

- El primer movimiento es dado por el jugador *Par* (representado por el nodo raíz) y el movimiento siguiente es realizado por el pseudo-jugador ¹ *Ambiente*.
- Las acciones disponibles para cada movimiento están dadas por:
 - *Par*: puede adoptar *Ansioso* (*A*) o *Perezoso* (*P*).
 - *Ambiente*: puede adoptar con cierta probabilidad *Requerido* (*R*) o *No Requerido* (*NR*).

¹ En la teoría de juegos el término *pseudo – jugador* (o *naturaleza*) es utilizado para referirse a un jugador cuyas acciones son decididas de forma aleatoria en puntos determinados del juego con probabilidades preestablecidas [24].

- Un camino del nodo raíz a un nodo terminal representa una partida en el juego.
- Cada partida da lugar a una ronda.
- Los posibles resultados del juego son: (A, R) , (A, NR) , (P, R) y (P, NR) si se considera una sola ronda.

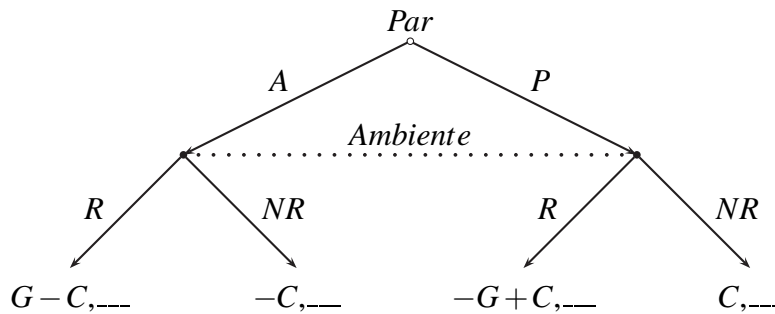


Figura 4.1: Representación del juego *Ansioso – Perezoso*

Interpretación de las acciones

El juego presenta 4 acciones en total (A , P , R , y NR). La interpretación de estas acciones se describe a continuación.

Considere un recurso r_j cuyo umbral de disponibilidad es θ_{r_j} .

- El *Par* puede elegir A o P donde:
 - A denota: crear una réplica de r_j , si su nivel de disponibilidad se encuentra por debajo de θ_{r_j} , y si ya se mantiene una réplica de r_j en caché, entonces A denota que r_j continuará manteniéndose disponible.
 - P denota: no crear una réplica de r_j , y si ya mantiene una réplica de r_j en cache, entonces, P denota remover r_j del caché.
- El *Ambiente* puede elegir R o NR donde:
 - R corresponde a la situación en la cual r_j es solicitado (por algún otro par en el sistema) y el regreso de los pares, cuya salida afectó la disponibilidad de r_j , no han permitido recuperarla.
 - NR corresponde al caso contrario, es decir, r_j no es solicitado por ningún otro par o los pares cuya salida afectó su disponibilidad han regresado.

De forma ilustrativa, en la tabla 4.1 se presenta el uso de estas acciones en tres rondas consecutivas.

	<i>Par</i>	<i>Ambiente</i>	
Ronda 1	<i>A</i>	<i>R</i>	El primer movimiento es dado por el <i>Par</i> quien selecciona <i>A</i> que denota que replicó el recurso (r_j) inmediatamente después de que el nivel de disponibilidad se establece por debajo de θr_j . El segundo movimiento es dado por el <i>Ambiente</i> quien escoge <i>R</i> que denota que el recurso r_j fue requerido. En la segunda Ronda, el mismo <i>Par</i> interactúa con el <i>Ambiente</i> . El <i>Par</i> adopta <i>A</i> en el tercer movimiento, indicando, que continuara manteniendo la réplica de r_j . El <i>Ambiente</i> determina en su cuarto movimiento <i>NR</i> lo cual indica que r_j no fue requerido. En la tercer ronda: el <i>Par</i> opta por remover la réplica de r_j y el <i>Ambiente</i> determina que dicho recurso no es requerido de nueva cuenta.
Ronda 2	<i>A</i>	<i>NR</i>	
Ronda 3	<i>P</i>	<i>R</i>	

Tabla 4.1: Interpretación de las acciones entre el *Par* y el *Ambiente* considerando 3 rondas consecutivas

Interpretación de los pagos

Cada partida realizada tiene consecuencias para cada jugador y éstas se representan por las ganancias o pérdidas obtenidas al finalizar cada partida.

La utilidad obtenida por el *Par* está en términos de G y C donde:

- G representa una ganancia (popularidad, reputación, mayor acceso a recursos, etc.) al crear y/o mantener una réplica de un recurso y
- C representa los costos asociados a crear y/o almacenar un recurso. C contempla el costo de almacenamiento (C_a) y el costo de procesamiento de carga (C_p). El costo total está representado por:

$$C = C_a + C_p \quad (4.1)$$

C_a se hace efectivo durante el tiempo que el *Par* mantenga disponible un recurso, en tanto que, C_p solo cuando se crea una réplica de un recurso. La tabla 4.2 ilustra la interpretación de la utilidad obtenida por el jugador *Par* al final de cada partida.

La utilidad obtenida por el *Ambiente* no es relevante al estudio realizado, por lo que no es incluida en el modelo.

Jugada	Utilidad (<i>Par</i>)	Interpretación
<i>AR</i>	$G - C$	Dado que el recurso es requerido (<i>R</i>) y el <i>Par</i> actúa de forma ansiosa (<i>A</i>), el <i>Par</i> recibe una ganancia (<i>G</i>) menos los costos asociados (<i>C</i>) de crear y/o almacenar el recurso
<i>ANR</i>	$-C$	Dado que el recurso no es requerido (<i>NR</i>) y el <i>Par</i> actúa de forma ansiosa (<i>A</i>), no obtiene ninguna ganancia (<i>G</i>), debido a que éste no es solicitado, pero si tiene costos asociados (<i>C</i>) a crear y/o mantener dicho recurso disponible.
<i>PR</i>	$-G + C$	Dado que el recurso es requerido (<i>R</i>) y el <i>Par</i> actúa de forma perezosa (<i>P</i>), la ganancia del <i>Par</i> (<i>G</i>), se convierte en su pérdida (al no contribuir a la disponibilidad de un recurso que es solicitado) y sus costos (<i>C</i>) se convierten en su ganancia debido a que no invierte recursos para crear y/o mantener dicho recurso.
<i>PNR</i>	C	Dado que el recurso no es requerido (<i>NR</i>) y el <i>Par</i> actúa de forma perezosa (<i>P</i>), el <i>Par</i> recibe como ganancia <i>C</i> , debido al ahorro de recursos por no crear y/o almacenar un recurso que no es solicitado.

Tabla 4.2: Interpretación de los pagos obtenidos por el jugador *Par*

4.3.3. Modelo evolutivo

El diseño de este modelo tiene como finalidad conocer el comportamiento emergente de la población en el sistema P2P, en particular, qué patrones de comportamiento son más idóneos para que la población de pares autónomos pueda proveer una disponibilidad adecuada de los recursos. Cabe mencionar, que estos recursos podrían no tener la misma demanda, en consecuencia el deseo de dar mantenimiento a su disponibilidad podría variar entre los distintos recursos presentes en el sistema. Conocer cómo inciden en el sistema las decisiones entre la población de pares y el *Ambiente* y qué patrones de comportamiento emergen de la interacción dinámica entre éstos permitirá establecer los mecanismos necesarios para mantener eficientemente una disponibilidad adecuada.

4.3.3.1. Juego Ansioso-Perezoso iterado

La característica de autonomía del par en un sistema P2P, le permite decidir si abandona o no la red y en qué momento. Cuando el par opta por dejar la red, la disponibilidad de los recursos que comparte puede verse afectada. En reacción a esto, los pares que participan activamente en el sistema y que están interesados en dichos recursos deben determinar,

de forma independiente, las acciones necesarias para mantener su disponibilidad. Estas acciones pueden estar influenciadas si la interacción con un recurso se repite, ya que es posible que el *Par* sea capaz de reconocer el comportamiento o patrón de uso de éste, basándose en los resultados obtenidos en interacciones previas. Cuando esto se presenta, la situación estratégica se convierte en un juego *Ansioso – Perezoso* iterado en donde una estrategia es una regla que determina cual será el próximo movimiento del *Par* dada una historia previa.

El número de estrategias disponibles a cada *Par* dependerá en gran medida del tamaño de memoria utilizado en recordar qué es lo que sucedió en la historia previa (la tabla 4.3 ilustra algunos ejemplos de tamaños de memoria). Considere, por ejemplo, un tamaño de memoria 2, existen cuatro historias previas resultantes (tabla 4.4). El *Caso 1* corresponde a la situación donde el *Par* recuerda que actuó de forma perezosa (*P*) al no crear una réplica del recurso, y que en el *Ambiente* dicho recurso no fue requerido (*NR*). El *Caso 2* indica que el *Par* recuerda que actuó de forma perezosa (*P*) y que en el *Ambiente* dicho recurso fue requerido (*R*), y así sucesivamente. Una historia previa de memoria 2 da lugar a 2^4 posibles estrategias, las cuales determinan que es lo que debe de hacer el *Par* ante cualquier situación que pueda surgir. Algunos ejemplos de estas estrategias se ilustran en la tabla 4.5.

Una estrategia determina su próximo movimiento con base en:	
Memoria 0	ninguna memoria
Memoria 1	la última elección realizada por el <i>Ambiente</i> (o la última elección del <i>Par</i>)
Memoria 2	la última acción realizada por el <i>Par</i> y la última realizada por el <i>Ambiente</i>
Memoria 3	la última acción realizada por el <i>Par</i> y las dos últimas acciones realizadas por el <i>Ambiente</i> o las dos últimas acciones realizadas por el <i>Par</i> y la última acción realizada por el <i>Ambiente</i> .

Tabla 4.3: Ejemplos de estrategias con base en el tamaño de la memoria

<i>Caso 1: PNR</i>
<i>Caso 2: PR</i>
<i>Caso 3: ANR</i>
<i>Caso 4: AR</i>

Tabla 4.4: Historias previas si se considera una memoria de tamaño 2

¿Qué sucede si se incrementa el tamaño en la memoria del *Par*? Considere por ejemplo un tamaño de memoria 6, resultan 2^6 posibles historias diferentes (tabla 4.6), lo cual da lugar a 2^{64} posibles estrategias que un *Par* en el sistema podría adoptar para dar mante-

		Estrategias		
		Siempre A	Previsor	Siempre P
<i>Caso 1:</i>	Si (<i>PNR</i>) entonces	A	P	P
<i>Caso 2:</i>	Si (<i>PR</i>) entonces	A	A	P
<i>Caso 3:</i>	Si (<i>ANR</i>) entonces	A	P	P
<i>Caso 4:</i>	Si (<i>AR</i>) entonces	A	A	P

Tabla 4.5: Ejemplos de estrategias considerando una historia previa de memoria 2

nimiento a la disponibilidad de un recurso afectado. Este tamaño de memoria da lugar a estrategias como: a) no crear una réplica de un recurso si nunca es solicitado, b) crear una réplica de un recurso si es solicitado al menos tres veces, c) si el recurso es demandado en la primera ronda entonces crear una réplica, etc. Ha de notarse que algunas de estas reglas no habrían podido establecerse considerando un tamaño de memoria 2. Si la memoria se incrementa el espacio de estrategias disponibles para cada *Par* también se incrementa, sin embargo la rapidez con la que lo hace es exponencial (tabla 4.7).

Si bien el incremento en la memoria permite obtener estrategias que en un ambiente real se desempeñen mejor, considerar probar cada estrategia de memoria de tamaño 6 (y en adelante) resulta intratable incluso hoy en la actualidad con los avances tecnológicos. Para resolver esta problemática se requiere de una técnica de análisis poderosa que permita conocer cuáles son las estrategias emergentes ante las diversas situaciones que podrían enfrentar los pares del sistema, y es aquí donde el algoritmo genético (al emular el proceso evolutivo) nos permitirá descubrir cuáles son estas estrategias.

<i>Caso 1:</i>	<i>PNR PNR PNR</i>
<i>Caso 2:</i>	<i>PNR PNR PR</i>
<i>Caso 3:</i>	<i>PNR PNR ANR</i>
<i>Caso 4:</i>	<i>PNR PNR AR</i>
.	.
.	.
.	.
<i>Caso 61:</i>	<i>AR AR PNR</i>
<i>Caso 62:</i>	<i>AR AR PR</i>
<i>Caso 63:</i>	<i>AR AR ANR</i>
<i>Caso 64:</i>	<i>AR AR AR</i>

Tabla 4.6: En el *Caso 1* el *Par* recuerda que en las tres rondas previas (interacciones con el *Ambiente*): (i) no hizo ninguna réplica del recurso, y (ii) que dicho recurso nunca fue solicitado. En el *Caso 2* el *Par* recuerda: (i) no hizo ninguna réplica del recurso y (ii) que el recurso le fue solicitado en la última ronda, y así sucesivamente para los demás casos.

Memoria	Número de historias previas	Número de estrategias
1	2	2
2	2^2	2^4
3	2^3	2^8
4	2^4	2^{16}
5	2^5	2^{32}
6	2^6	2^{64}
m	2^m	2^{2^m}

Tabla 4.7: Crecimiento exponencial en el número de estrategias

4.3.3.2. Modelo evolutivo inspirado en algoritmos genéticos

Para descubrir qué estrategias pueden surgir de tan amplio universo, se hace uso de los algoritmos genéticos cuya técnica de análisis fue inicialmente concebida por John Holland como un medio para estudiar el comportamiento adaptativo [18]. El algoritmo genético requiere una población de soluciones donde cada solución pueda ser representada por medio de un cromosoma, generalmente una cadena binaria que corresponde al genotipo. Al emular el proceso evolutivo, cada cromosoma puede sufrir transformaciones genéticas por medio de la cruce y/o mutación. El algoritmo genético procesa poblaciones de cromosomas, reemplazando sucesivamente una población con otra. Cada cromosoma en la población será puesto a prueba en un ambiente definido donde generación tras generación solo los cromosomas más aptos serán seleccionados para reproducirse y en consecuencia mantener la persistencia de su material genético.

Para construir un algoritmo genético se requiere básicamente de los siguientes pasos:

1. Diseñar una representación de los pares que indique cual es el comportamiento que adoptará ante cualquier situación que pueda surgir.
2. Generar un conjunto de soluciones candidatas al problema que se desea resolver.
3. Diseñar una forma de evaluar a los pares en un ambiente dado.
4. Determinar cómo seleccionar aquellos comportamientos que se desempeñen mejor.
5. Determinar operadores de cruce y mutación adecuados al problema.

Representación de estrategias

El conocimiento de qué comportamientos prevalecen en el tiempo ante las diversas condiciones que se presenten en el sistema P2P, permite establecer mecanismos que ayuden a mantener una disponibilidad adecuada de los recursos. Es por ello que este modelo considera como instancias a evolucionar el comportamiento de los pares y para ello se requiere idear una forma de representar dichos comportamientos a través de un cromosoma.

El cromosoma en el modelo representará una estrategia en el juego. Cada estrategia determinará el próximo movimiento considerando los resultados obtenidos en las tres rondas previas (memoria de tamaño 6), lo cual resulta en $2^6 = 64$ posibles historias diferentes. Cada estrategia debe establecer cuál será el próximo movimiento (A o P) ante cualquier situación que pueda surgir, lo cual puede determinarse a través de una lista de 64 A 's o P 's. Si definimos $A = 1$ y $P = 0$ esta lista puede codificarse como una cadena binaria de 64 bits. Por otro lado, se requiere establecer la premisa inicial de la historia previa, si definimos $R = 1$ y $NR = 0$ la historia previa puede codificarse con una cadena binaria de 6 bits (2 bits por cada ronda) (tabla 4.8). De esta forma el cromosoma que caracteriza al comportamiento del *Par* en el modelo estará conformado por una cadena binaria de 70 bits donde 64 bits representan el próximo movimiento del *Par* (dada una historia previa) y 6 bits representan la codificación de la historia previa.

	Historia previa	Codificación de la historia previa
<i>Caso 1</i>	<i>PNR PNR PNR</i>	00 00 00
<i>Caso 2</i>	<i>PNR PNR PR</i>	00 00 01
<i>Caso 3</i>	<i>PNR PNR ANR</i>	00 00 10
<i>Caso 4</i>	<i>PNR PNR AR</i>	00 00 11
.	.	.
.	.	.
.	.	.
<i>Caso 61</i>	<i>AR AR PNR</i>	11 11 00
<i>Caso 62</i>	<i>AR AR PR</i>	11 11 01
<i>Caso 63</i>	<i>AR AR ANR</i>	11 11 10
<i>Caso 64</i>	<i>AR AR AR</i>	11 11 11

Tabla 4.8: Representación binaria de historia previa de tres rondas

La figura 4.2 ilustra la codificación de estrategia del *Par* y cómo éste interactúa con el *Ambiente*. Así también, ilustra cómo el *Par* establece el próximo movimiento dada una historia previa de memoria 6.

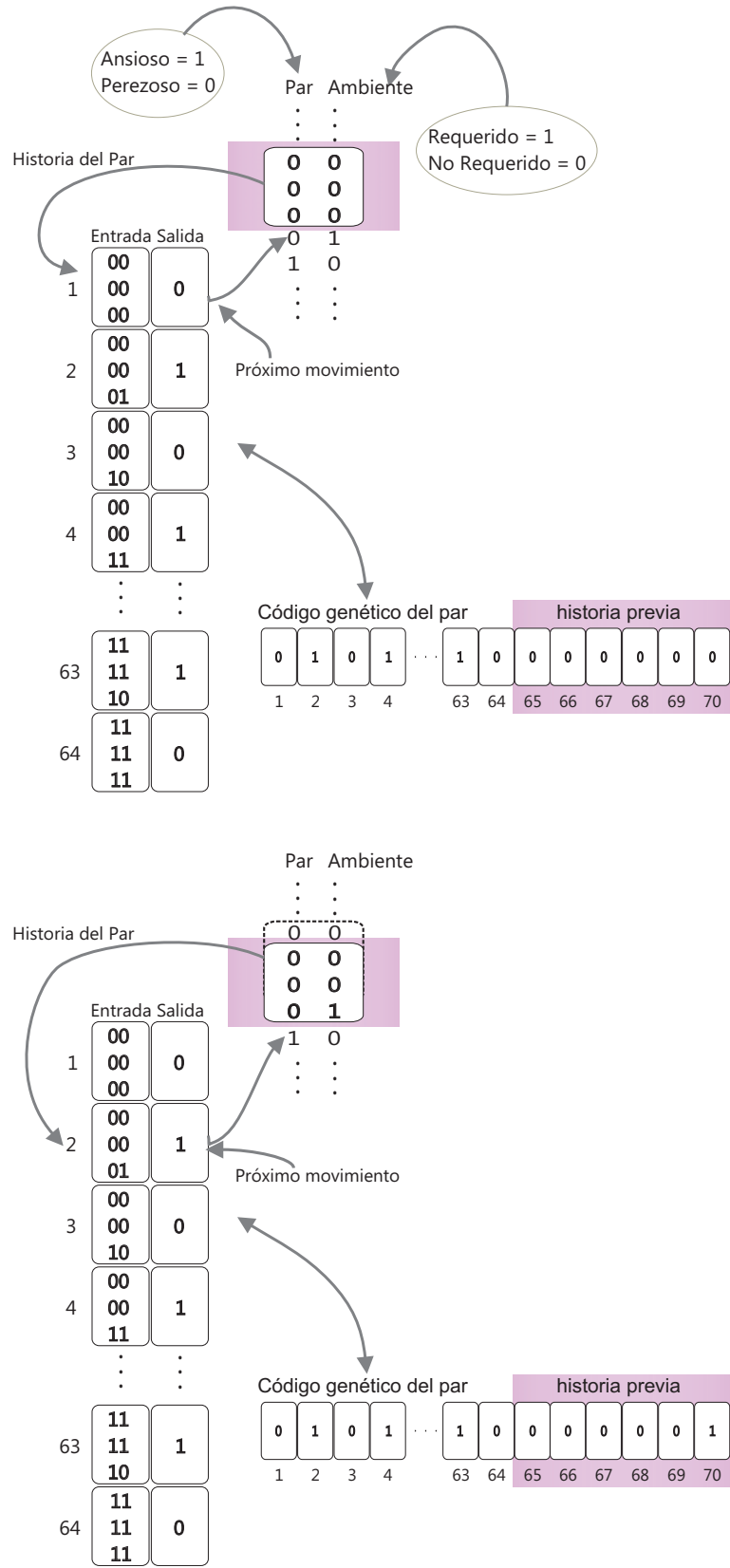


Figura 4.2: Representación de estrategias como cadena binarias considerando una memoria de tamaño 6.

Soluciones candidatas, población inicial y función de aptitud

El comportamiento adoptado por el *Par* dada una historia previa de memoria 6 es representado por el cromosoma el cual corresponde a una cadena binaria de 70 bits. Esta representación da lugar a 2^{70} posibles soluciones candidatas.

El modelo contempla una población inicial de tamaño constante donde cada cromosoma es generado de forma aleatoria.

Cada *Par* en el sistema utilizará la estrategia definida por su cromosoma para interactuar con el *Ambiente* a través del juego *Ansioso – Perezoso*. La aptitud promedio, \bar{f}_i , del *Par* se define por la siguiente formula:

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_i^j}{n} \quad (4.2)$$

donde u_i^j es el pago obtenido por el *Par* en el encuentro j y n corresponde al número total de encuentros realizados.

Mecanismo de selección, cruza, y mutación

Para seleccionar las estrategias más aptas nos inspiramos en el mecanismo de selección utilizado por Robert Axelrod [2]. El mecanismo de selección empleado considera lo siguiente:

- Determinar el valor esperado ($ExpVal_i(t)$) del *Par* como sigue:

$$ExpVal_i(t) = \frac{f(i) - \bar{f}(t)}{\sigma(t)} \quad (4.3)$$

donde $\bar{f}(t)$ es la media y $\sigma(t)$ es la desviación estándar de la población al tiempo t respectivamente.

- (a) Si el $ExpVal_i(t)$ del *Par* se encuentra dentro del rango $[-\sigma(t), \sigma(t)]$ se le asignará de forma aleatoria una pareja para cruza.
- (b) Si se encuentra por encima de $|\sigma(t)|$, se le asignará de forma aleatoria dos parejas para cruza.
- (c) Aquellos cromosomas que no cumplan (a) o (b) serán removidos de la población y no podrán ser elegidos para cruza.

Las estrategias exitosas serán seleccionadas para mantener la persistencia de su material genético. Esta persistencia se realizará a través de la cruza en un punto con probabilidad

$P_{cross} = 1/70$, y para introducir nuevo material genético en la población se utilizará mutación por inversión en cada gen con probabilidad P_{mut} .

4.4 Simulación

Se desarrolló una aplicación (apéndice B) que permite estudiar la evolución del comportamiento en una población de pares que participan activamente en la recuperación de la disponibilidad de un recurso afectado. Esta aplicación integra los diseños de los modelos expuestos previamente para la simulación del algoritmo 4.1.

Algoritmo 4.1: Algoritmo básico de simulación

```

1  Genera población inicial
2  mientras número de generaciones  $\leq$  numGen haz
3      mientras número de ciclos  $\leq$  numCiclos haz
4          Ambiente determina disponibilidad inicial de  $r_j$ 
5          mientras disponibilidad de  $r_j$  no alcanzada o numMovimientos  $<$   $N$  haz
6              para cada Pari interesado en la disponibilidad del recurso  $r_j$  haz
7                  Pari invoca a su estrategia ( $A$  o  $P$ )
8                  Ambiente actualiza disponibilidad de  $r_j$ 
9                  Ambiente invoca a su estrategia ( $R$  o  $NR$ )
10                 Actualiza el pago correspondiente al Pari
11     Selecciona estrategias más aptas
12     Cruza y muta estrategias exitosas
13     Obtener población que reemplace a la actual

```

Las simulaciones tienen como propósito: (i) conocer la proporción de pares que participa activamente en la recuperación y el tiempo que les toma recuperar la disponibilidad considerando diversas condiciones establecidas en el *Ambiente* (ii) determinar qué patrones de comportamiento permiten restaurar de forma eficaz la disponibilidad de un recurso afectado por la salida repentina de pares en el sistema considerando la demanda de éste.

Para llevar a cabo dichos propósitos se establecen varios escenarios de simulación que consideran lo siguiente:

1. La dinámica evolutiva comienza cuando la disponibilidad de un recurso (r_j) cae α_j unidades por debajo de un umbral de disponibilidad preestablecido (θ_{r_j}). Los pares en el sistema interactuarán repetidamente con el *Ambiente* a través del juego *Ansioso – Perezoso* para restablecer la disponibilidad de r_j hasta el nivel establecido por θ_{r_j} .
2. Se asume que el conjunto de pares que participa activamente en la restauración de r_j no se retiran del sistema. Así también, se asume que no existen errores en los enlaces de comunicación entre los pares ni fallas de almacenamiento.
3. Se establece un tiempo límite (*numMovimientos*) en el cual los pares pueden recuperar la disponibilidad de r_j . Esta medida se utiliza para determinar en qué momento la dinámica evolutiva debe concluir ya que podría presentarse la situación donde la disponibilidad de dicho recurso no pueda recuperarse (debido a que el recurso no es demandado y/o la ganancia asociada a la replicación es menor a los costos de su mantenimiento).
4. El regreso de los pares cuya salida afectó la disponibilidad de r_j se modela a través de una distribución exponencial con parámetro λ [22]. Si uno de estos pares se incorpora de nueva cuenta al sistema, se asume que no se retira del sistema durante el tiempo que dura la restauración de la disponibilidad de los recursos afectados.
5. Se establece una población inicial de estrategias (cromosomas generados de forma aleatoria). Se considera un tamaño de población constante.
6. Se determina el efecto que ejerce la ganancia sobre el costo de mantener un recurso al considerar dos casos: a) $G = C$ y b) $G > C$.
7. Cada *Par* interesado en r_j determina la acción a realizar (invoca a su estrategia) para restaurar su disponibilidad al utilizar la estrategia definida por su cromosoma (A o P).
8. El *Ambiente* determina la acción a realizar (invoca a su estrategia) como sigue:
 - a) Determina la disponibilidad actual de r_j

$$d_{actual} = (num_A + f(t)) + d_{inicial}$$

donde:

- num_A representa al número de pares que crearon o mantienen una réplica de r_j .

- $f(t)$ representa el número de pares que regresaron al tiempo t .
 - $d_{inicial}$ representa la disponibilidad inicial de r_j .
- b) Determina si r_j es solicitado (por algún otro par en el sistema) como sigue:
- Genera un número aleatorio (*aleatorio*) con distribución uniforme.
 - Si ($aleatorio \leq P_{solicitado}$) entonces $solicitado = F$, en otro caso, $solicitado = V$ ($P_{solicitado}$ representa la probabilidad de que r_j sea solicitado en el sistema)
- c) Si ($(d_{actual} \leq \theta_{r_j}) \& solicitado$) entonces elige R , en otro caso elige NR .
9. Se determina la aptitud de cada estrategia en la población. En este contexto, esto significa que cada *Par* utiliza la estrategia definida por su cromosoma para interactuar con el *Ambiente*, y la puntuación que obtiene es el pago promedio sobre todos los juegos en los que participa (sección 4.3.3.2).
10. Se seleccionan aquellas estrategias cuyo desempeño se destacó al interactuar con el *Ambiente*. Para ello, los pares cuya aptitud promedio se encuentre a una desviación estándar de la media se les asignará de forma aleatoria una pareja para cruzar, los que estén por encima de esta región se les asignará de forma aleatoria dos parejas, y los que estén por debajo no obtendrán ninguna pareja. (sección 4.3.3.2).
11. Se realiza la cruce y mutación de las estrategias exitosas utilizando cruce en un punto con probabilidad P_{cross} y mutación por inversión de un gen con probabilidad P_{mut} (sección 4.3.3.2).

Los parámetros utilizados en la simulación se especifican en la tabla 4.9. Cabe mencionar que los valores asignados a: número de movimientos, población inicial, número de generaciones, número de ciclos, número de corridas, operadores de cruce y mutación, son tomados como referencia del trabajo realizado por Robert Axelrod [2], en el cual aplica la técnica de algoritmos genéticos para evolucionar estrategias en el juego del Dilema del Prisionero Iterado. Los valores asociados al costo/beneficio de mantener un recurso disponible (C y G) se asignaron para mantener la relación $G = C$ y $G > C$ las cuales permitirán estudiar el efecto ejercido de las ganancias sobre los costos de mantener un recurso disponible.

Parámetro	Valor
r_j	$0 \leq j \leq 150$
α_j	número aleatorio con distribución uniforme ($10 \leq \alpha_j \leq 30$)
Número de movimientos (<i>numMovimientos</i>)	150 máximo (en cada juego)
$P_{solicitado}$	0.00, 0.25, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.75
C_a	1
C_p	2
G	3, 4
λ	0.005
Población inicial	20 cromosomas
Número de generaciones (<i>numGen</i>)	150
Número de corridas	25 (150 generaciones \times corrida)
Número de ciclos (<i>numCiclos</i>)	150
P_{mut}	0.025

Tabla 4.9: Parámetros de configuración

4.5 Análisis y discusión de resultados

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del algoritmo 4.1 con los parámetros correspondientes a la tabla 4.9. Los resultados obtenidos describen (i) el comportamiento de la población, (ii) el tiempo necesario para recuperar la disponibilidad de un recurso, y (iii) los patrones de comportamiento presentes en la población.

4.5.1. Comportamiento de la población

Para conocer la proporción de pares que participa activamente en la recuperación se registró la aptitud promedio de la población en cada generación como sigue:

$$\bar{f}_{poblacion} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_i}{N} \quad (4.4)$$

donde \bar{f}_i es la aptitud promedio del Par i y N es el número de pares en la población. Los resultados obtenidos se ilustran en las figuras 4.3 y 4.4.

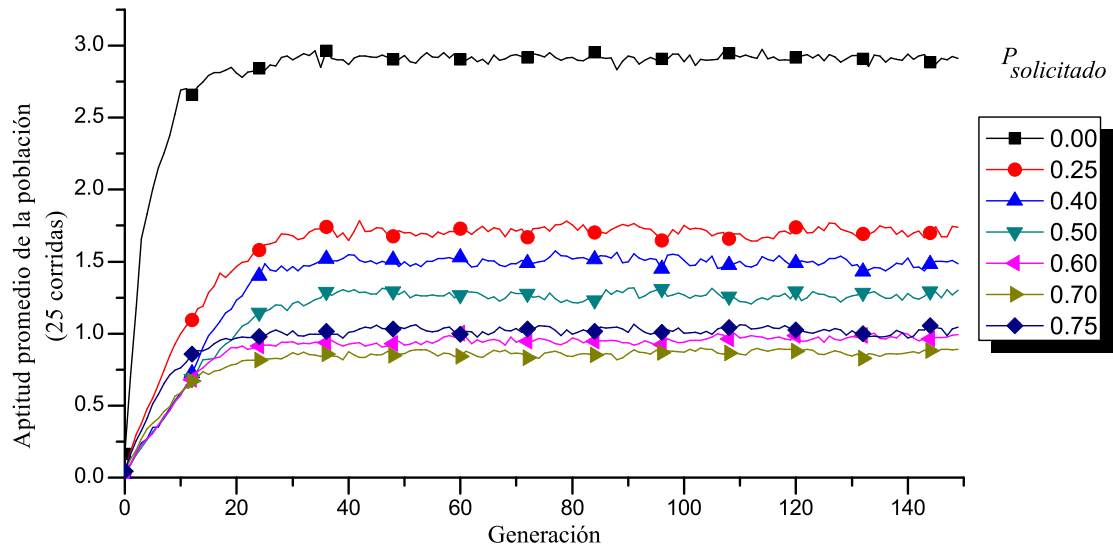


Figura 4.3: Aptitud promedio de la población considerando que la ganancia es igual al costo de mantener un recurso en caché ($G = C$)

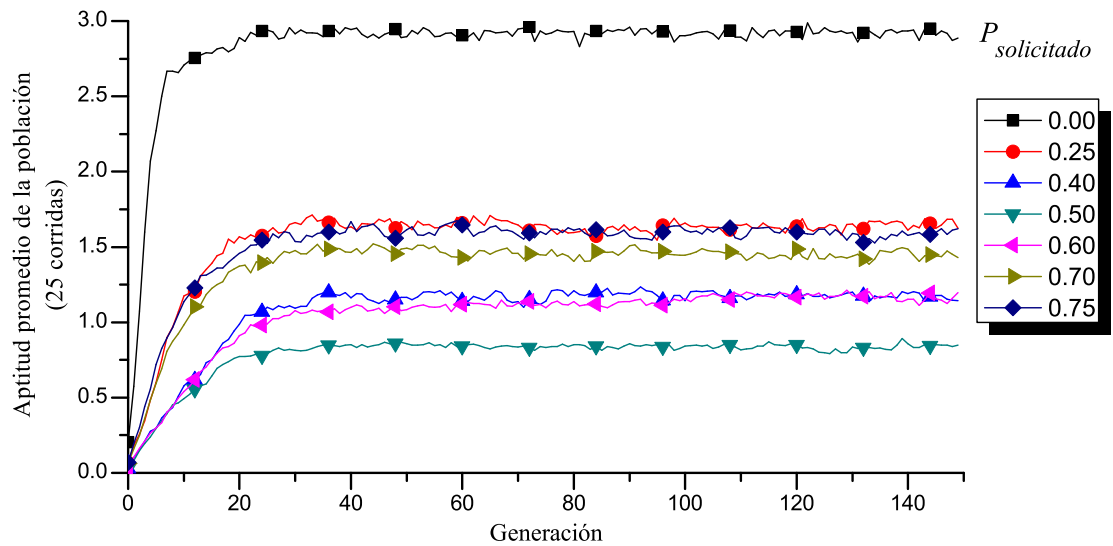


Figura 4.4: Aptitud promedio de la población considerando que la ganancia es mayor al costo de mantener un recurso en caché ($G > C$)

El primer escenario (figura 4.3) considera que la ganancia de mantener un recurso es igual a los costos ($G = C$) y el segundo escenario (figura 4.4) considera que la ganancia es mayor al costo de mantener un recurso ($G > C$). En ambas figuras se puede apreciar que si $P_{solicitado}$ (probabilidad de que un recurso sea solicitado por algún nodo externo) es igual a cero, la aptitud promedio de la población se establece muy cercana a 3, valor que corresponde al pago obtenido por el *Par* al elegir la opción P , indicando que los pares en el sistema tienden a no crear réplicas de los recursos afectados. En la figura 4.3 se observa

que si el valor de $P_{solicitado}$ se incrementa, la aptitud promedio de los pares en el sistema se decrementa con un mínimo en $P_{solicitado} = 0.70$ a partir del cual la tendencia comienza a revertirse observándose un incremento en $P_{solicitado} = 0.75$. De forma similar en la figura 4.4 la aptitud promedio se decrementa hasta un mínimo en $P_{solicitado} = 0.50$ a partir del cual comienza a incrementarse llegando en $P_{solicitado} = 0.75$ a tener valores muy cercanos a los establecidos por $P_{solicitado} = 0.25$.

El comportamiento observado en ambas figuras indica que si los recursos son solicitados con menor frecuencia es más conveniente no crear réplicas. Este comportamiento predomina hasta un punto en el cual la creación de réplicas permite a los pares en el sistema obtener un mejor pago. Debido a que los experimentos difieren en las ganancias y costos asociados a mantener un recurso disponible, es posible observar que si la ganancia es mayor, la disposición de los pares a cooperar a la disponibilidad de un recurso también es mayor.

4.5.2. Tiempo de recuperación

Para conocer el tiempo que les toma a los pares recuperar la disponibilidad de un recurso se registró el número de movimientos promedio realizado en cada juego. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.5 y 4.6.

Una generación puede terminar por dos hechos: la disponibilidad del recurso se ha recuperado o el tiempo límite para restaurar la disponibilidad se ha excedido. Los pares en el sistema pueden realizar hasta 150 movimientos en cada juego para restablecer la disponibilidad de un recurso afectado. Si la disponibilidad es recuperada en un número menor de movimientos la duración del juego disminuye. De esta forma el número de movimientos realizados se interpreta como el tiempo que les toma a los pares llevar a cabo la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado.

La figura 4.5 considera $G = C$ y la figura 4.6 $G > C$. En ambas figuras se puede observar que si $P_{solicitado}$ es igual a cero la disponibilidad de los recursos tiende a no ser recuperada por los pares que participan activamente en la restauración, es decir, la generación terminó por que se llegó al máximo número de movimientos permitido. En la figura 4.5 esta tendencia continua hasta $P_{solicitado} = 0.70$ donde el tiempo necesario para recuperar la disponibilidad disminuye indicando que los pares perciben que es mejor opción crear

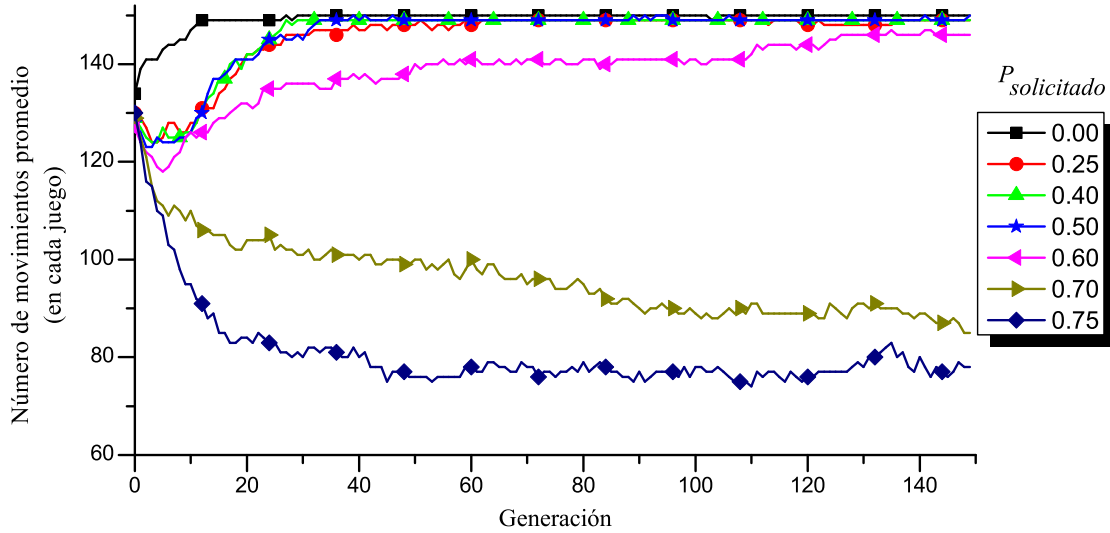


Figura 4.5: Número de movimientos utilizados por los pares para la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado ($G = C$)

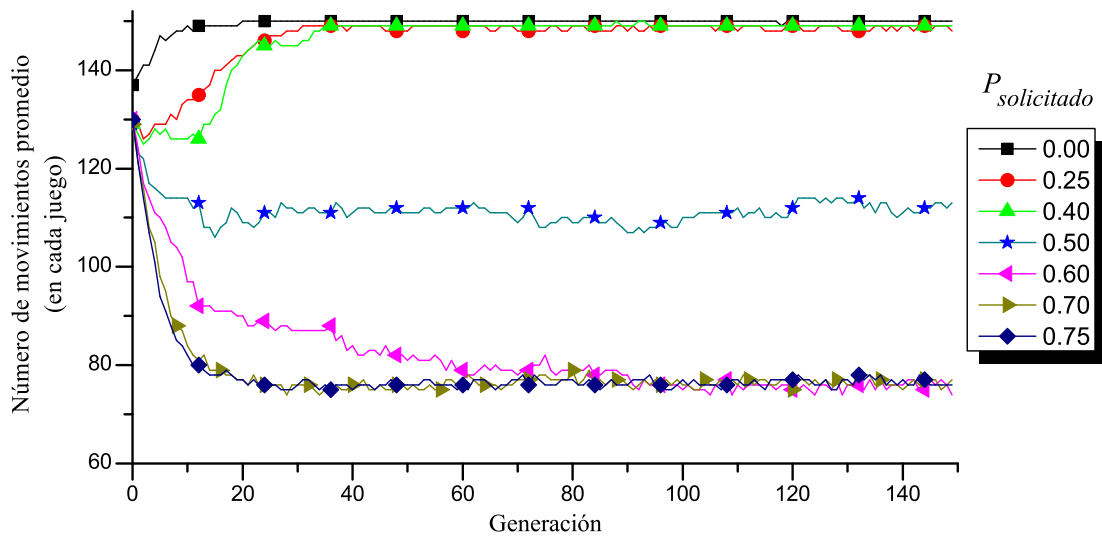


Figura 4.6: Número de movimientos utilizados por los pares para la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado ($G > C$)

una réplica del recurso. En la figura 4.6 se observa un comportamiento similar, es decir, los pares prefieren no crear una réplica del recurso hasta que $P_{solicitado} = 0.50$ tras lo cual la recuperación se realiza en menor número de movimientos. Estos resultados apoyan la discusión expuesta en el apartado anterior ya que indica que la relación entre G y C determinan un punto de inflexión a partir del cual los pares optan por A o P . Se observa que estos puntos ocurren para $G = C$ en $P_{solicitado} = 0.70$ y para $G > C$ en $P_{solicitado} = 0.50$.

4.5.3. Patrones de comportamiento

Para conocer los patrones de comportamiento presentes en la población, en la última generación de cada simulación se registró, para todos los cromosomas, el número de veces que cada bit en el cromosoma fue utilizado. Así también, para cada movimiento realizado durante el juego, se registró la próxima acción a realizar (A o P). Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.7 y 4.8.

La figura 4.7 considera los resultados obtenidos donde $G = C$. En esta figura se puede observar que hasta antes de $P_{solicitado} = 0.70$ los pares optan por estrategias cuyo próximo movimiento es P , a partir de $P_{solicitado} = 0.70$ las estrategias comienzan a considerar como opción al próximo movimiento A . Sin embargo es hasta $P_{solicitado} = 0.75$ que la opción A predomina. La figura 4.8 considera los resultados donde $G > C$. En esta figura se puede observar que hasta antes de $P_{solicitado} = 0.50$ los pares optan por estrategias cuyo próximo movimiento está determinado por P , posteriormente en $P_{solicitado} = 0.50$ se puede observar una coexistencia entre ambas opciones, aunque la opción P domina sobre A . Después de $P_{solicitado} = 0.60$ y hasta $P_{solicitado} = 0.75$ A predomina cada vez más.

Dadas estas observaciones, es claro que si $G = C$ la acción A no es elegida por los pares en el sistema hasta casi garantizar que los recursos serán solicitados ($P_{solicitado} = 0.70$). Sin embargo, si $G > C$ la acción A comienza a ser elegida por los pares con solo un 50% de certeza de que un recurso será solicitado. Estos hechos indican que la relación entre ganancias y costos influye notablemente en las acciones elegidas por los pares, así como en la recuperación de la disponibilidad de los recursos afectados, así también, apoyan la discusión de las secciones anteriores donde se observa que existe un punto en $P_{solicitado}$ en el cual los pares cambian su preferencia de uso de P a A y este punto tiene una estrecha relación con la proporción entre G y C .

En ambas figuras 4.7 y 4.8, se observa que existen patrones de comportamiento que las estrategias tienden a elegir persistentemente mostrando que una población específica de cromosomas utiliza mayoritariamente un subconjunto de genes ($\approx 25\%$) de todo su material genético. Esto indica que existen patrones de comportamiento presentes en la población que conducen a un mejor desempeño de las estrategias. La tabla 4.10 ilustra algunos de los patrones del comportamiento más notables encontrados en la población. Estos patrones de comportamiento muestran en general dos reglas que rigen mayoritariamente el comportamiento de los pares:

1. Si en las tres últimas rondas un recurso no es solicitado entonces elegir como próximo movimiento *P*.
2. Si en las tres últimas rondas el recurso es solicitado entonces elegir como próximo movimiento *A*.

Número de bit	Historia previa	Próximo movimiento
0	<i>PNR PNR PNR</i>	<i>P</i>
2	<i>PNR PNR ANR</i>	<i>P</i>
10	<i>PNR ANR ANR</i>	<i>P</i>
12	<i>PNR AR PNR</i>	<i>P</i>
21	<i>PR PR PR</i>	<i>A</i>
23	<i>PR PR AR</i>	<i>A</i>
29	<i>PR AR PR</i>	<i>A</i>
31	<i>PR AR AR</i>	<i>A</i>
32	<i>ANR PNR PNR</i>	<i>P</i>
34	<i>ANR PNR ANR</i>	<i>P</i>
40	<i>ANR ANR PNR</i>	<i>P</i>
42	<i>ANR ANR ANR</i>	<i>P</i>
53	<i>AR PR PR</i>	<i>A</i>
55	<i>AR PR AR</i>	<i>A</i>
61	<i>AR AR PR</i>	<i>A</i>
63	<i>AR AR AR</i>	<i>A</i>

Tabla 4.10: Alelos del comportamiento que se destacan por su uso en la población de pares. Por ejemplo: el bit 0 decodifica la historia previa *PNR PNR PNR* la cual denota que el *Par* nunca creó una réplica del recurso, que dicho recurso nunca fue solicitado en el *Ambiente* y que en tal situación los cromosomas evolucionados escogen como próximo movimiento la opción *P*.

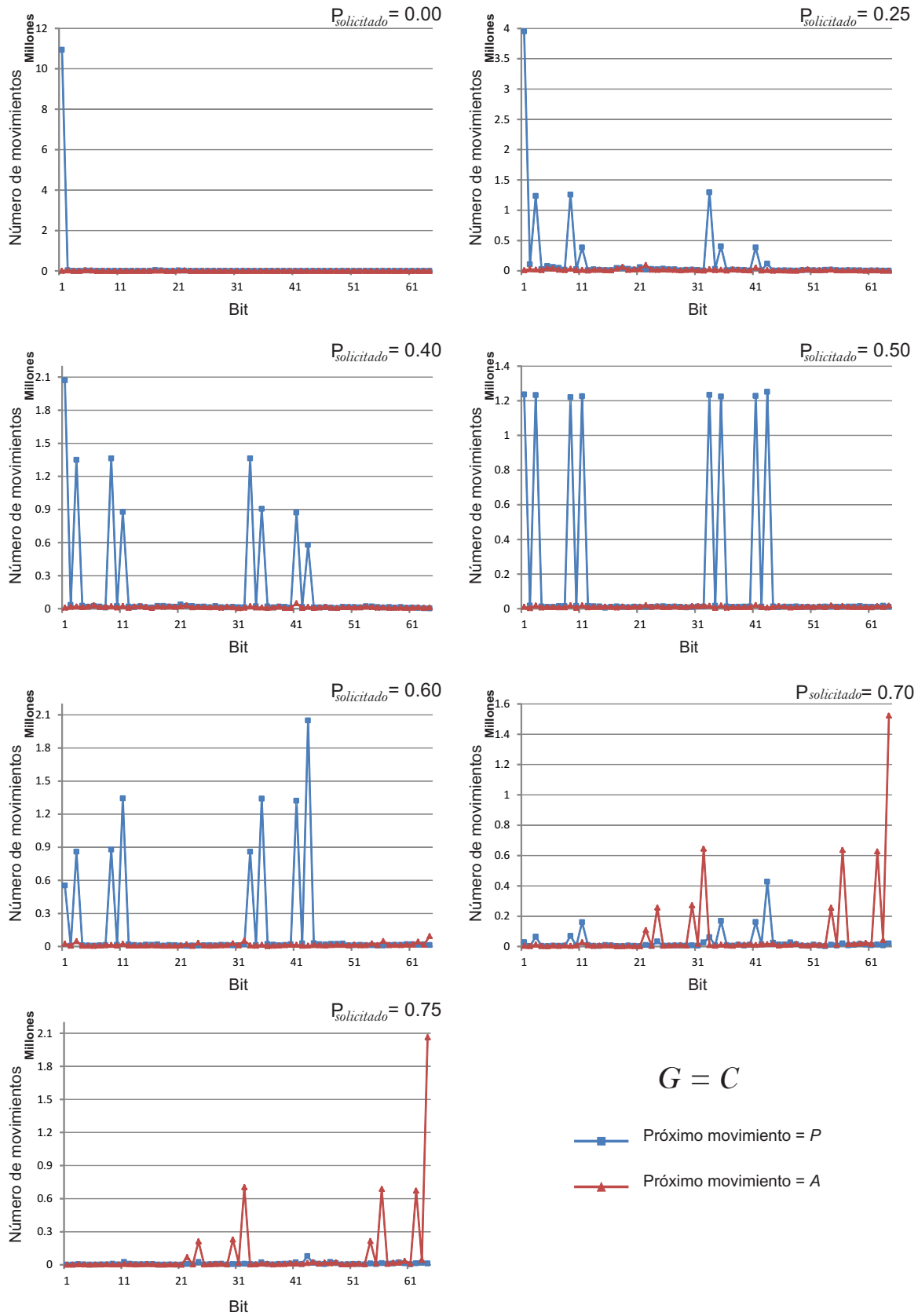


Figura 4.7: Patrones de comportamiento de las estrategias evolucionadas.

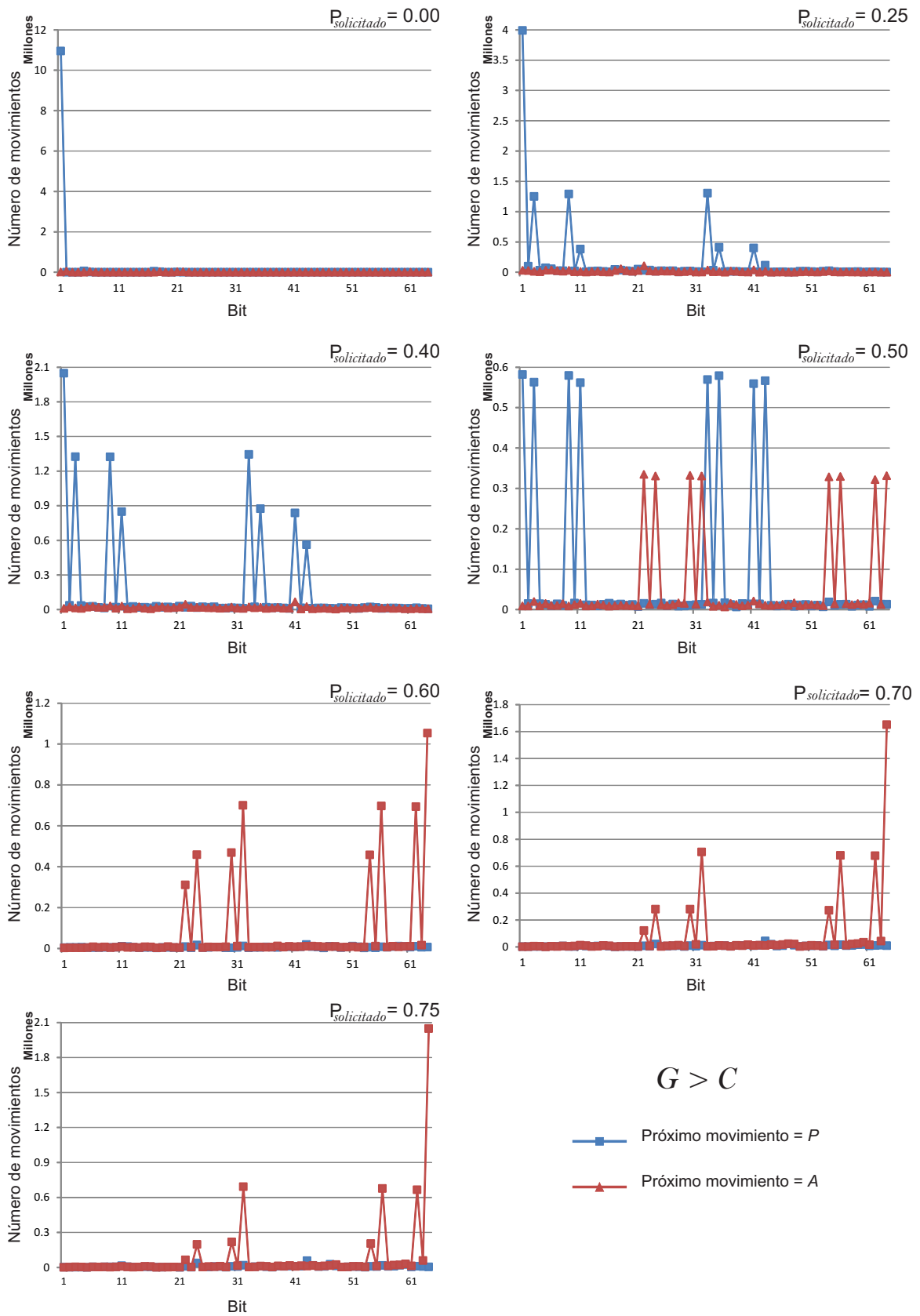


Figura 4.8: Patrones de comportamiento de las estrategias evolucionadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo estudió el comportamiento emergente de los pares en un sistema P2P al adoptar acciones para restaurar la disponibilidad de recursos afectados por la transitoriedad de los pares y la demanda de éstos. Bajo este contexto, el objetivo principal se enfocó en identificar estrategias que al ser adoptadas por los pares permitan mantener una disponibilidad de los recursos de acuerdo a un umbral mínimo, considerando la transitoriedad de los pares y la demanda de los recursos en el sistema P2P.

Para ello, en la primera parte de este trabajo se propuso un modelo evolutivo innovador que permite el estudio del comportamiento emergente de los pares ante la situación previamente descrita. Este modelo utilizó como marco de trabajo la teoría de juegos evolutiva asumiendo al sistema P2P como una población de jugadores donde cada *Par* que participó en la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado interactuó repetidamente con el *Ambiente* a través del juego *Ansioso – Perezoso*.

Posteriormente, se realizó un conjunto de simulaciones del modelo evolutivo expuesto para evaluar: 1) el comportamiento de la población de pares, 2) el tiempo que les toma recuperar la disponibilidad de un recurso y 3) los patrones de comportamiento presentes en las estrategias evolucionadas. Estas simulaciones consideraron el efecto que ejercen las ganancias sobre los costos de crear y/o mantener un recurso en caché al plantear dos casos: (a) ganancias igual a costos y (b) ganancias mayores a los costos.

Los resultados de estas simulaciones muestran que existe una estrecha relación entre el comportamiento de los pares y las ganancias y costos de crear y/o mantener un recurso en caché. Esta relación se observa claramente en el tiempo requerido por los pares para restaurar la disponibilidad de un recurso afectado el cual es mayor si la ganancia disminuye. Más aun, en ambos casos (a, b) se encontró que existe un valor en la probabilidad de que un recurso sea solicitado ($P_{solicitado} = 0.7$ para el caso (a) y $P_{solicitado} = 0.5$ para el caso (b)) en el cual la estrategia predominante por los pares cambia de ser P (no crear ni mantener una réplica de un recurso) a ser A (crear o mantener la réplica del recurso). Estos resultados muestran la fuerte dependencia que ejercen los pagos obtenidos por los pares en sus acciones. Por otro lado, en el análisis de las estrategias evolucionadas se encontraron patrones de comportamiento que persisten constantemente en las poblaciones evolucionadas independientemente de los escenarios de simulación realizados.

Como sugerencias de trabajo futuro se plantean los siguientes puntos:

- Modelo evolutivo inspirado en algoritmos genéticos:
 - Estudiar el efecto que ejercen en las poblaciones evolucionadas los valores establecidos en los parámetros del algoritmo (p. ej., P_{mut} , número de generaciones, tamaño de la población, etc.).
 - Estudiar el efecto en las poblaciones evolucionadas al utilizar diferentes tipos de seleccionador y operadores genéticos (p. ej., selección elitista, selección por torneo, cruza en dos puntos, etc.).
 - Estudiar el efecto que ejerce en las estrategias evolucionadas la duración de cada juego, es decir, variar el número de encuentros entre el *Par* y el *Ambiente*.
 - Explorar el efecto en el comportamiento de la población al considerar tamaños de memoria heterogéneos. Es decir, no todos en el sistema tienen que recordar tres rondas previas, cada quién podría recordar, una, dos, o tres o más rondas.
- Experimentos de simulación:
 - Analizar el efecto que ejerce en las estrategias evolucionadas el modelado de la transitoriedad de los pares si se considera otros tipos de distribución de probabilidad (p. ej., Weibull, Poisson, etc.).
 - Estudiar el efecto que ejerce el modelado de la demanda de los recursos en las estrategias evolucionadas al considerar otros modelos que consideren el ciclo de vida de la información.

- Explorar qué estrategias pueden evolucionar si se consideran comportamientos preestablecidos en la población, es decir, no generar la población inicial con estrategias determinadas de forma aleatoria.
 - Aplicar otras dinámicas (p. ej., dinámica del replicador, dinámica basada en agentes, etc.) para el estudio del comportamiento emergente en el sistema P2P considerando estrategias que adopten los patrones de comportamiento obtenidos en el presente trabajo.
- Validación por medio de simuladores:
 - Explorar simuladores de redes P2P que permitan integrar las características expuestas en el modelo evolutivo del presente trabajo.
 - Topologías de red:
 - Estudiar el comportamiento emergente de los pares en un sistema P2P a través de otras dinámicas (p. ej., dinámica basada en agentes) que permitan explorar diversas topologías de red.

APÉNDICE A. DILEMAS SOCIALES

Los dilemas sociales [4] son situaciones en las cuales la racionalidad individual conduce a la irracionalidad colectiva. Es decir, un comportamiento razonable conduce a una situación en la que todo el mundo está peor de lo que podría haber estado de otra manera. La contaminación ambiental, la explosión demográfica, la proliferación de armas nucleares, son todos ejemplos en los cuales los beneficios individuales de no contribuir a la causa común son mayores, pero si todos optan por no contribuir entonces a todo mundo le va peor.

		columna	
		C	D
fila	C	R,R	S,T
	D	T,S	P,P

Dilema del Prisionero si $T > R > P > S$, La ventisca si $T > R > S > P$, La Caza del Ciervo si $R > T > P > S$

Figura A.1: Juegos representativos de dilemas sociales

En la teoría de juegos algunos de estos dilemas sociales pueden formalizarse por medio de juegos de 2×2 . Considere la figura A.1, hay dos jugadores, columna y fila. Cada jugador puede elegir cooperar (C) o desertar (D). Si ambos jugadores cooperan, recibirán como pago R (la recompensa), el cual se asume que es mayor que el pago P (el castigo) obtenido si ambos desertan; cuando uno coopera y el otro deserta, el cooperante obtiene S (la ingenuidad), mientras que el otro obtiene T (la tentación). Asumiendo que ninguno de los pagos es igual, la esencia de un dilema social es capturada por el hecho de que ambos jugadores prefieren cualquier resultado en el cual el oponente coopera (C) y ninguno en el cual el

oponente deserta (D). El Dilema del Prisionero (sección 2.2.2.1), La Caza del Ciervo, y La Ventisca son juegos que capturan la esencia del dilema social.

Las fabulas que dramatizan La Caza del Ciervo y La Ventisca son las siguientes:

- **La Caza del Ciervo:** un grupo de cazadores busca cazar un ciervo. El éxito es incierto, y si es que se tiene, requiere del esfuerzo conjunto. Por otro lado, cualquiera de ellos puede abandonar al grupo e ir a la captura de una liebre con buena oportunidad de éxito. Sin embargo, la caza de la liebre vale menos que la caza del ciervo.
- **La Ventisca:** dos individuos conducen sobre una carretera en sentidos opuestos durante una tormenta de nieve. En cierto punto del viaje ambos se encuentran con la carretera obstruida por la nieve. Cada conductor tiene la opción de bajar del automóvil y despejar el camino o quedarse dentro, esperando que el otro conductor lo despeje. Si ambos determinan limpiar el camino podrán continuar con el viaje más rápidamente que si ambos determinan permanecer en el auto.

La interpretación de las estrategias se muestra en la tabla A.1:

Juego	Interpretación estrategia
La Caza del Ciervo	C: denota cooperar con el grupo e ir por el ciervo D: denota no cooperar con el grupo e ir por la liebre
La ventisca	C: denota cooperar al limpiar el camino D: denota no cooperar al permanecer en el auto

Tabla A.1: Interpretación de las estrategias en La Caza del Ciervo, y La Ventisca.

El problema de como promover la cooperación en estas situaciones sin recurrir a una autoridad central ha sido ampliamente estudiado en diferentes disciplinas entre ellas: sociología, biología, ciencias de la computación, etc. Desde la perspectiva de los sistemas P2P entender como la cooperación puede emerger y ser promovida es crucial para su diseño donde la acción colectiva puede dar lugar a un beneficio común.

APÉNDICE B. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En este apartado se describen las características de la aplicación utilizada para la ejecución del algoritmo 4.1. Primero se especifican los requerimientos funcionales y de calidad. Posteriormente se presenta la arquitectura de software utilizada así como una descripción de los módulos que la componen.

B.1 Requerimientos funcionales

Se plantea un sistema de simulación que permita el estudio del comportamiento emergente de los pares a través de la técnica de algoritmos genéticos. Para ello, se establecen los siguientes requerimientos funcionales:

- El sistema debe permitir modificar de manera relativamente sencilla los valores de los parámetros del algoritmo genético entre ellos: longitud del cromosoma, tamaño de la población, número de generaciones, número de corridas, probabilidad de cruce, y probabilidad de mutación. Así también, la aplicación debe permitir agregar y/o modificar esquemas de selección, cruce y mutación.
- El sistema debe implementar en su versión inicial el modelo del juego *Ansioso – Perezoso* y también debe permitir agregar y/o modificar modelos de juego, de costos, y de ganancias.
- El sistema debe permitir agregar y/o modificar mecanismos de análisis de datos.

B.2 Requerimientos de calidad

La arquitectura determina el grado en que un sistema puede alcanzar la calidad en términos de rendimiento, disponibilidad, fiabilidad, seguridad y modificabilidad. En particular, el simulador debe cumplir al menos con 3 de estos aspectos:

- **Modificabilidad:** debido a que se plantea la posibilidad de modificar los parámetros del algoritmo genético y del modelo de juego, para ello es esencial que el sistema permita hacer estas modificaciones sin que impliquen un cambio mayor en su estructura.
- **Fiabilidad:** al ser concebido como un instrumento de uso científico los valores que arroje el sistema deben de ser fiables y precisos.
- **Rendimiento:** el sistema está planteado para simular poblaciones de individuos durante varias generaciones, por lo tanto deben considerarse técnicas que permitan aprovechar los recursos de cómputo.

B.3 Arquitectura

En la implementación del sistema de simulación es importante determinar la arquitectura del software adecuada. Una arquitectura de software puede definirse como “la estructura o estructuras de un sistema, que comprende elementos de software, las propiedades externamente visibles de dichos elementos y la relación entre ellos” [3].

Tomando como base los requerimientos de funcionalidad y de calidad se propone la arquitectura multicapas mostrada en la figura B.1 y la implementación contempla los módulos mostrados en el diagrama UML de la figura B.2. Esta arquitectura al ser altamente modular permite agregar y/o modificar características al sistema de simulación con relativa facilidad cumpliendo con el requerimiento de modificabilidad. Por otro lado esta misma modularidad da como resultado la posibilidad de crear diferentes instancias del mismo módulo (p. ej., el módulo genético, módulo de juego) lo que permite realizar operaciones en paralelo y ayuda a obtener un mayor rendimiento.

Con respecto a la elección de tecnología para la implementación de la arquitectura se eligió el lenguaje de programación C# perteneciente al Framework .NET versión 4.0 que incluye el Lenguaje de Consulta Integrado LINQ. Estas herramientas son fáciles de usar,

versátiles y poseen un buen rendimiento de cómputo así como librerías que facilitan el procesamiento y la fiabilidad de los datos en los experimentos.

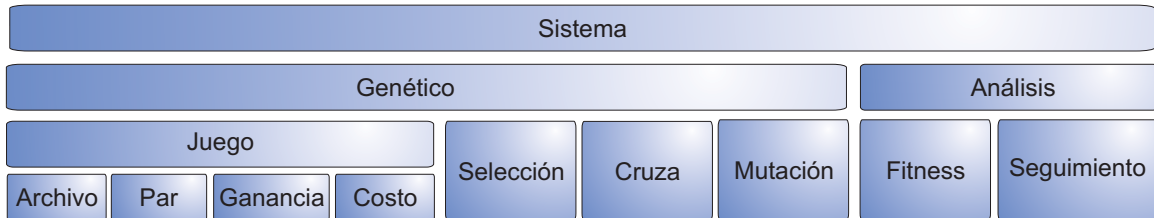


Figura B.1: Arquitectura del sistema

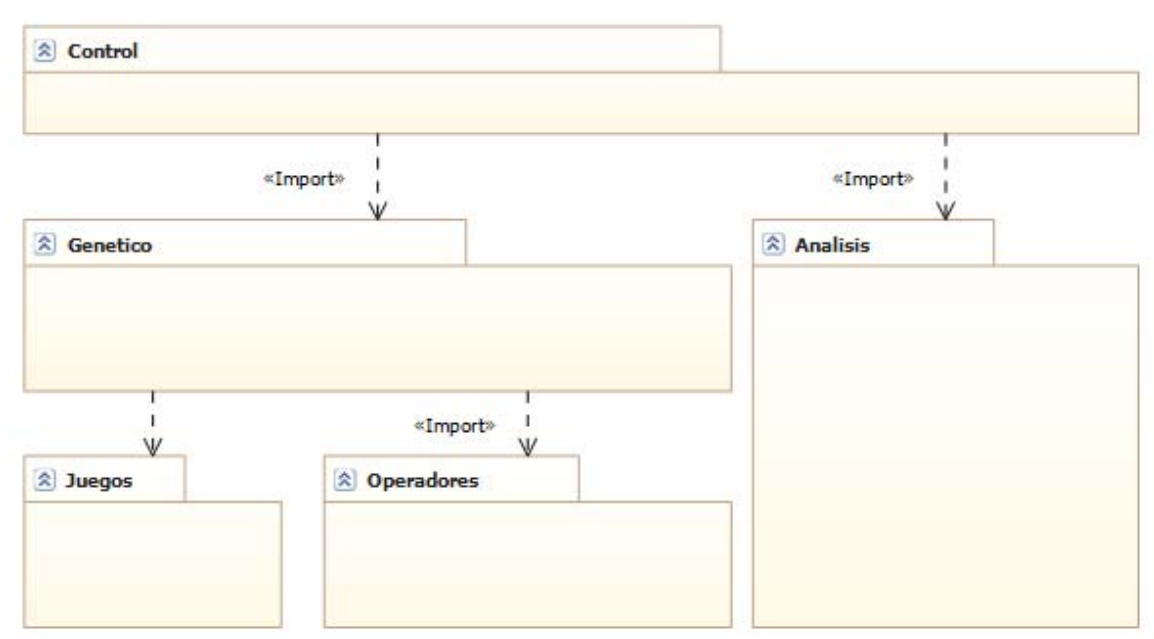


Figura B.2: Diagrama UML

B.3.1. Descripción de módulos

A continuación se presenta los módulos que integran al sistema de simulación indicando para cada uno de ellos: funcionalidad, clases que lo integran, y/o dependencias a otras clases.

B.3.1.1. Módulo de Control

El módulo de Control (B.3) es el responsable de inicializar y gestionar la ejecución de la simulación, así como de recopilar los datos resultantes de esta.

Las clases que integran este módulo son las siguientes:

- Inicio: recibe los parámetros de la línea de comandos, inicializa y ejecuta la simulación, colecta los resultados de esta y los envía al módulo encargado del análisis.

Las dependencias de este módulo con otras clases son las siguientes:

- ControlGenetico: requerido en la ejecución de la simulación.
- ControlDeAnalisis: se usa para analizar los datos obtenidos en la simulación.

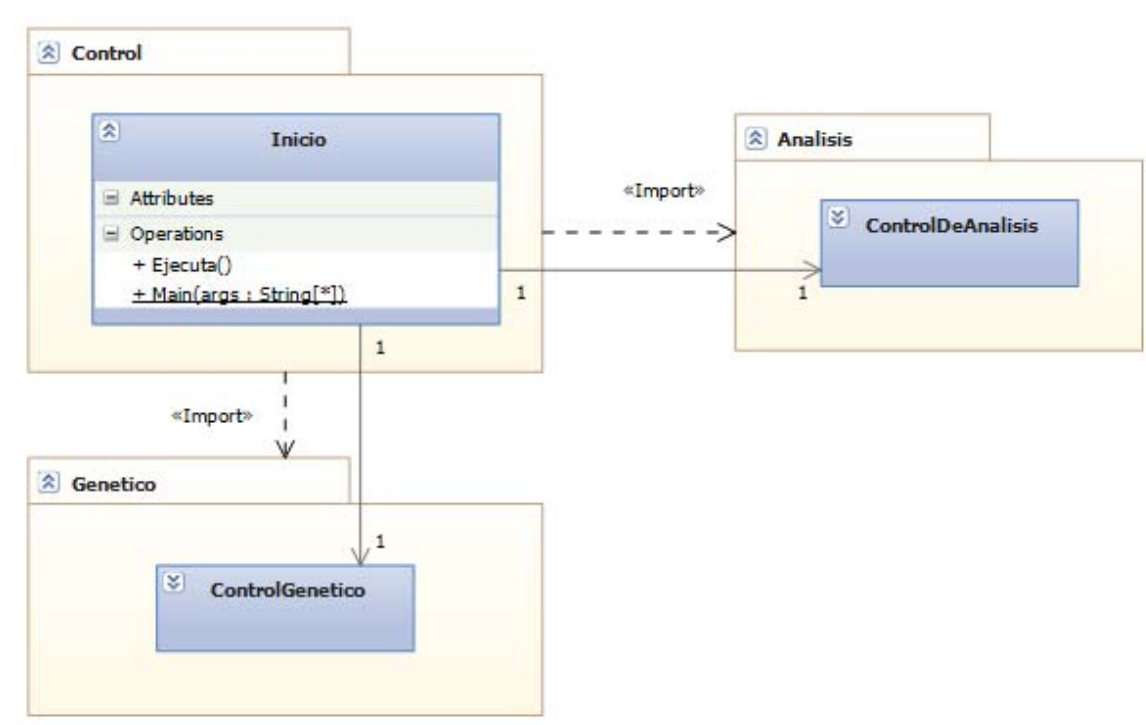


Figura B.3: Módulo de Control

B.3.1.2. Módulo Genético

El módulo Genético (figura B.4) representa una instancia de un algoritmo genético; es el encargado de coordinar los módulos de selección, cruza y mutación y de evaluar la apti-

tud de los cromosomas mediante un modelo de juego. Las clases que lo integran son las siguientes:

- **ControlGenetico**: representa al algoritmo genético y coordina el juego y la ejecución de la selección, mutación y cruzamiento.
- **Cromosoma**: representa un individuo compuesto de un número determinado de genes.
- **Generador**: permite generar un conjunto de cromosomas iniciales.

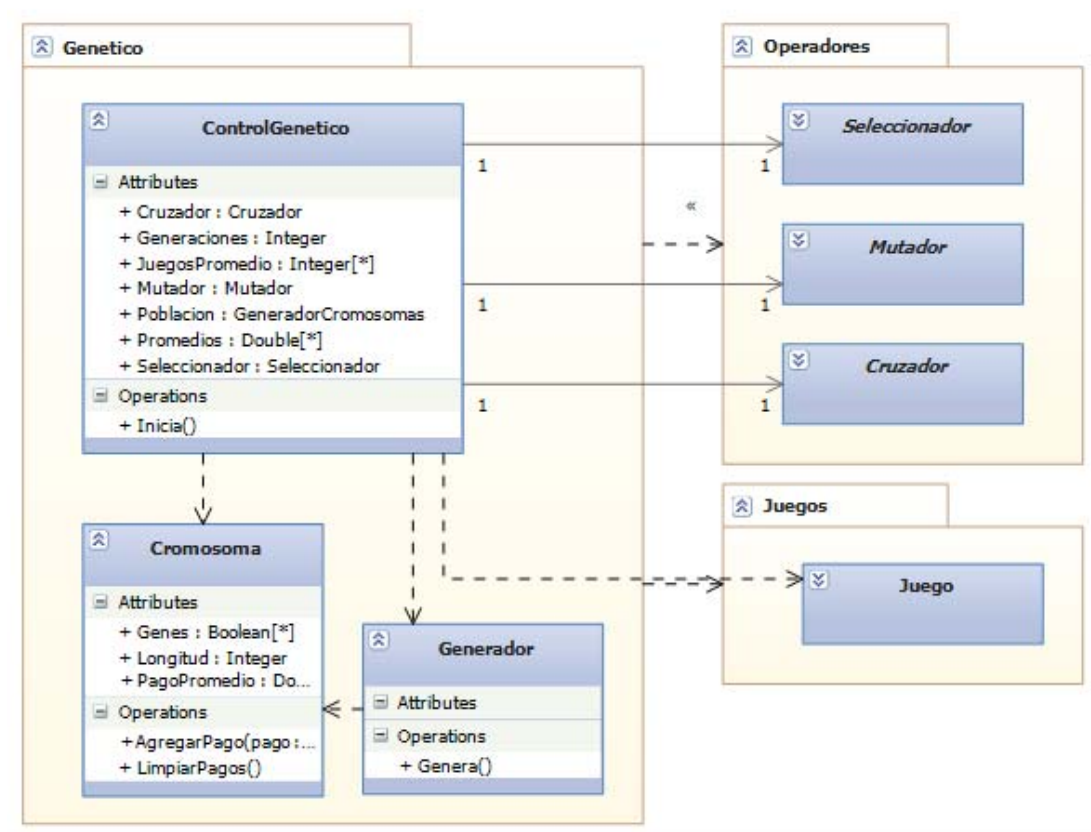


Figura B.4: Módulo Genético

B.3.1.3. Módulo Operadores

El módulo Operadores (figura B.5) contiene modelos de operadores para seleccionar, mutar y cruzar cromosomas en un algoritmo genético. Las clases que lo integran son las siguientes:

- **Cruzador**: este módulo tiene como función la creación de un nuevo cromosoma a partir de dos individuos de una población.

- **CruzadorUnPunto**: representa el tipo de cruza en un punto con una probabilidad fija.
- **Mutador**: la mutación permite modificaciones aleatorias a un individuo de la población.
- **MutadorSimple**: implementación de un mutador aleatorio para la inversión de cada bit en el cromosoma con una probabilidad fija.
- **Seleccionador**: encargado de elegir a los individuos más aptos dentro de una población de acuerdo a una aptitud o calificación obtenida durante el modelo de juego.
- **SeleccionadorAxelrod**: implementación del esquema de selección especificado en el modelo planteado por Robert Axelrod [2].

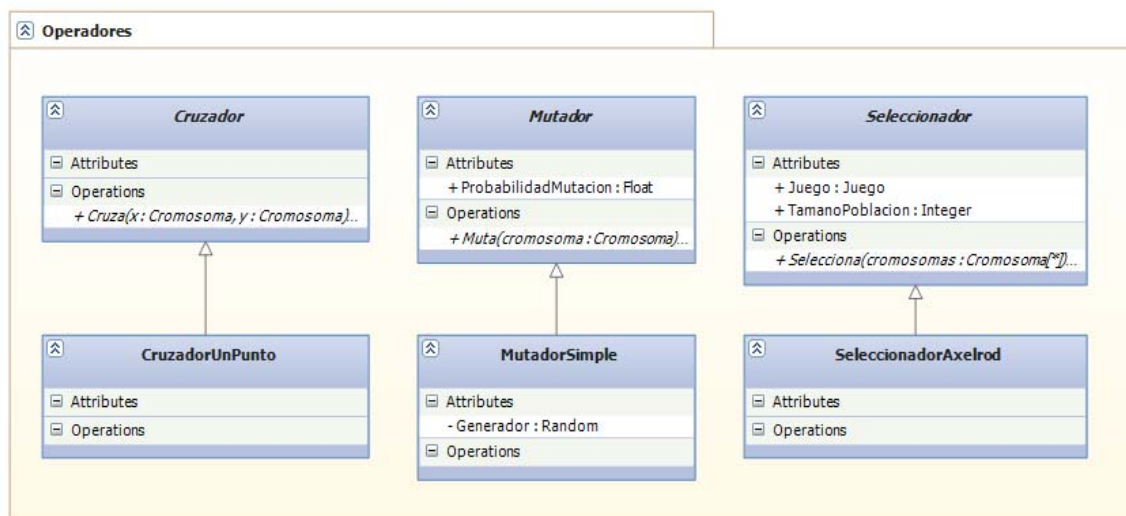


Figura B.5: Módulo Operadores

B.3.1.4. Módulo Juegos

El módulo Juegos (figura B.6) modela o representa la forma de interacción entre los individuos, es decir, las reglas del juego. Este módulo incluye lo siguiente:

- **Clase Juego**: representa las operaciones y atributos que un modelo de juego debe poseer para ser ejecutado por el simulador.
- **Módulo AnsiosoPerezoso**: implementa el modelo de juego *Ansioso – Perezoso* diseñado en el presente trabajo.

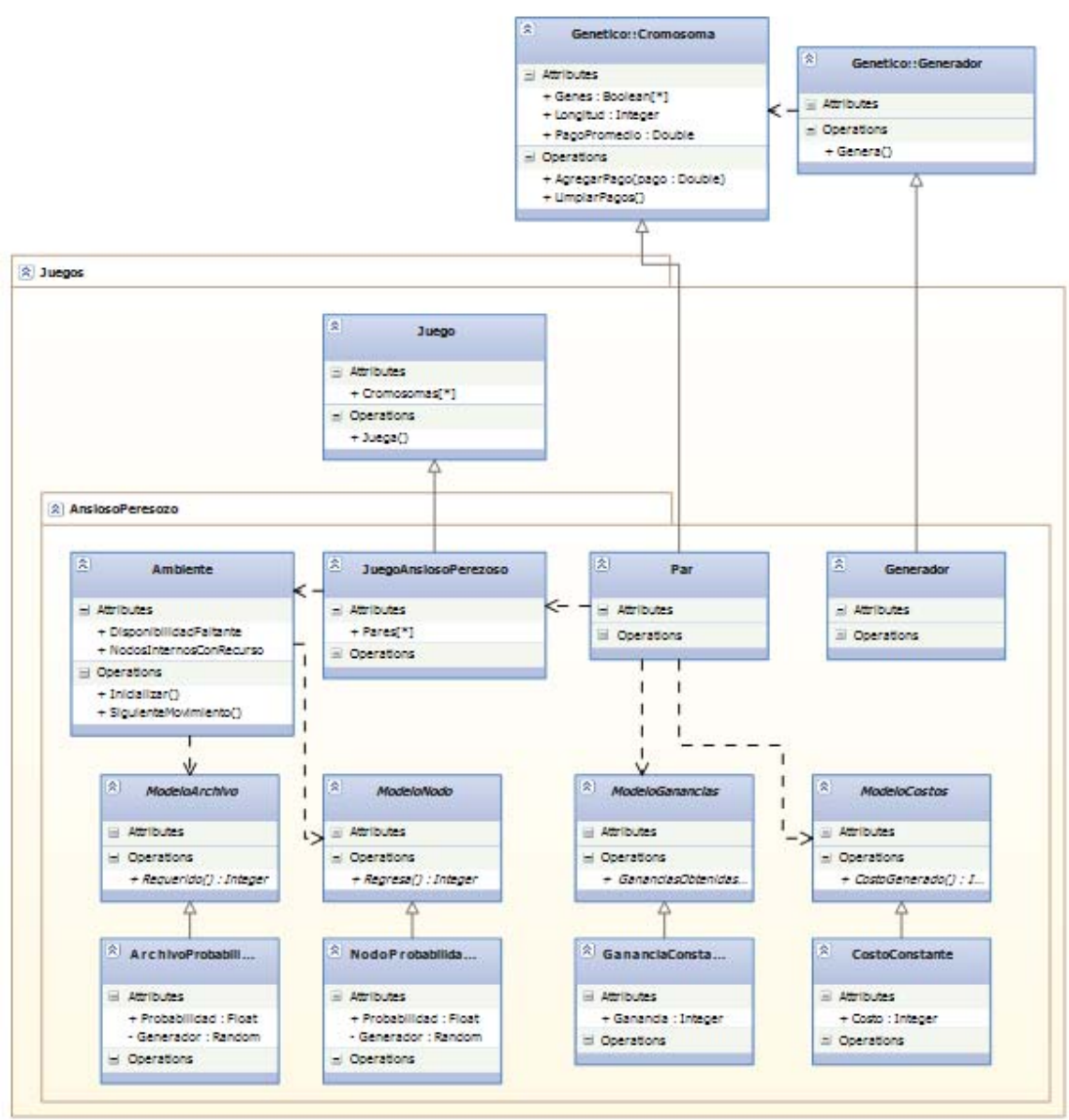


Figura B.6: Módulo Juego

Módulo AnsiosoPerezoso

El módulo AnsiosoPerezoso (figura B.6) contempla la implementación del juego *Ansioso – Perezoso* diseñado en el presente proyecto. Para ello considera las siguientes clases:

- **JuegoAnsiosoPerezoso**: implementa las operaciones específicas del Juego *Ansioso – Perezoso* y coordina la interacción entre los pares y el ambiente.
- **Par**: define el comportamiento específico de un par de acuerdo al modelo de juego *Ansioso – Perezoso* y determina el próximo movimiento ante cualquier situación que

pueda surgir, dada una historia previa. Así también, considera los modelos de costos y ganancias para determinar el pago en cada interacción del juego.

- **Ambiente:** define el comportamiento específico al ambiente con el cual los pares interactúan, determina el próximo movimiento en el juego *Ansioso – Perezoso* considerando a) el número de pares cuya participación contribuye a restablecer la disponibilidad a un nivel preestablecido, b) la disponibilidad inicial de este mismo, y c) el regreso de los pares cuya salida afectó su disponibilidad. Así también, implementa las operaciones que representan al comportamiento de los pares cuya salida repentina afecta la disponibilidad de un recurso de acuerdo a un modelo de comportamiento de la transitoriedad de los pares.
- **ModeloArchivo:** contiene las operaciones y atributos que requiere un modelo para especificar los patrones de uso de los recursos en el sistema P2P.
- **ArchivoProbabilidadConstante:** implementa el patrón de uso de un recurso basado en una probabilidad constante.
- **ModeloNodo:** especifica las operaciones y atributos que representan el comportamiento de los pares externos cuyo regreso afecta la disponibilidad de un recurso.
- **NodoProbabilidadExponencial:** representa el comportamiento de los pares que externos cuya salida afectó la disponibilidad de un recurso. El regreso de los pares se modela a través de una distribución exponencial.
- **ModeloGanancias:** clase que representa las ganancias obtenidas por un par al levantar un recurso
- **GananciaConstante:** representa una ganancia constante si el recurso fue requerido.
- **ModeloCostos:** especifica los costos asociados a levantar un recurso.
- **CostoConstante:** considera los costos de procesamiento de carga y de almacenamiento asociados a mantener un recurso en caché como costos fijos.
- **Generador:** especifica cómo generar pares iniciales particulares al modelo de juego *Ansioso – Perezoso*.

B.3.1.5. Módulo Análisis

El módulo de análisis (figura B.7) tiene a su cargo la recolección de los datos obtenidos durante el experimento con el fin de realizar un procesamiento posterior. En este trabajo se

plantea el análisis de la aptitud de los pares, el tiempo que requiere recuperar la disponibilidad del recurso así como el seguimiento de las estrategias utilizadas por los individuos.

Las clases que integran este módulo son las siguientes:

- **ControlDeAnálisis**: ejecuta y coordina los análisis especificados en el experimento. Obtiene los datos generados de la simulación del módulo de Control y ejecuta secuencialmente los análisis asignados.
- **Analizador**: especifica los atributos y operaciones para un procesamiento de los datos obtenidos en la simulación.
- **TiempoDeRecuperacion**: evalúa el número de ciclos promedio que requieren los pares para alcanzar la disponibilidad deseada a lo largo de las generaciones del experimento.
- **Aptitud**: obtiene a partir de los datos de la simulación la aptitud promedio de los pares en cada generación.
- **Seguimiento**: obtiene los patrones de comportamiento usados por los pares durante la última generación.

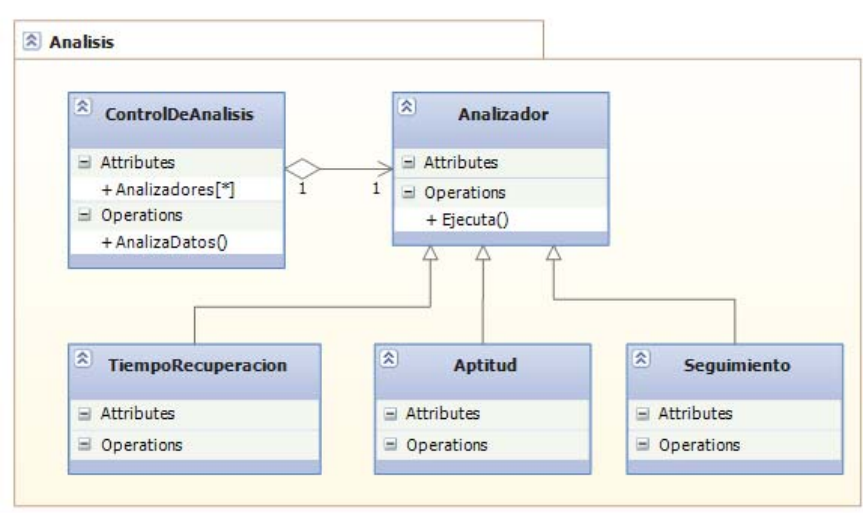


Figura B.7: Módulo Análisis

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADN	Ácido Desoxirribonucleico
BOINC	Infraestructura Abierta de Berkeley para la Computación en Red.
CAN	Red de Contenido Direccionable
CP	Computadora personal
CPU	Unidad Central de Procesamiento
DOLR	Localización y Ruteo de Objetos Distribuidos
EEE	Estrategia Evolutivamente Estable
IP	Protocolo de Internet
PAN	Redes de Uso Personal
P2P	<i>Peer to Peer</i>
P2PTV	Televisión P2P
TFT	Tit-For-Tat (estrategia)
THD	Tabla <i>Hash</i> Distribuida
UML	Lenguaje Unificado de Modelado
VoP2P	Voz sobre P2P

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representación del juego estratégico.	21
2.2	Representación del juego extensivo.	23
2.3	Simplejo S_n para $n = 2, 3$ y 4	30
2.4	Representación general del Dilema del Prisionero.	32
2.5	Dinámica micro-macro: Matriz de pagos del agente i	41
3.1	Juego “Caching” (costo de procesamiento de carga).	45
3.2	Juego “Caching” (costo de almacenamiento.)	45
3.3	Juego “Caching” considerando heterogeneidad en los pares.	45
3.4	Modelo de juego propuesto por Zhang et al.	46
3.5	Modelo de juego propuesto por Feng et al.	47
3.6	Modelo de juego “SHG” propuesto por Cho et al.	48
3.7	Modelo de juego “SG” propuesto por Cho et al.	48
3.8	Dinámica del replicador en sistemas P2P.	49
3.9	Dinámica Basada en Agentes en sistemas P2P.	50
3.10	Dinámica micro-macro en sistemas P2P.	51
4.1	Representación del juego <i>Ansioso – Perezoso</i>	66
4.2	Representación de estrategias como cadenas binarias.	73
4.3	Aptitud promedio de la población ($G = C$)	79
4.4	Aptitud promedio de la población ($G > C$)	79

4.5	Número de movimientos utilizados por los pares para la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado ($G = C$)	81
4.6	Número de movimientos utilizados en la restauración de la disponibilidad de un recurso afectado ($G > C$).	81
4.7	Patrones de comportamiento de las estrategias evolucionadas ($G = C$).	84
4.8	Patrones de comportamiento de las estrategias evolucionadas ($G > C$).	85
A.1	Juegos representativos de dilemas sociales	91
B.1	Arquitectura del sistema	95
B.2	Diagrama UML	95
B.3	Módulo de Control	96
B.4	Módulo Genético	97
B.5	Módulo Operadores	98
B.6	Módulo Juego	99
B.7	Módulo Análisis	101

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz de pagos de $n \times n$ donde el elemento a_{ij} representa el pago de la estrategia E_i al interactuar con la estrategia E_j .
A	Estrategia <i>Ansioso</i>
A_1, A_2	Acciones disponibles al agente i en la dinámica micro-macro.
$AllC$	La estrategia que siempre coopera.
$AllD$	La estrategia que siempre deserta.
α_j	Número de unidades por debajo de un umbral preestablecido (θ_{r_j}).
C	Estrategia de cooperar en el juego del Dilema del Prisionero.
C	Costo de mantener un recurso en caché.
C_c	Costo de almacenamiento.
C_l	Costo de procesamiento de carga.
D	Estrategia de desertar en el juego del Dilema del Prisionero.
$d_{inicial}$	Disponibilidad inicial del recurso r_j .
E_n	Frecuencia de individuos (tipo n) en una población.
$E(I, J)$	Pago esperado de un jugador del tipo I contra otro del tipo J .
$ExpVal_i(t)$	Valor esperado del individuo i al tiempo t .
$f(t)$	Indica el número de pares que regresan al sistema P2P al tiempo t
f_i	Aptitud del individuo i en la dinámica del replicador.
\bar{f}_i	Aptitud promedio del individuo i .
$\bar{f}(t)$	Media de la población al tiempo t .
\bar{f}^*	Aptitud promedio de la población en la dinámica del replicador.

$f_{poblacion}$	Aptitud promedio de la población en el sistema P2P.
G	Juego arbitrario con n jugadores.
G	Ganancia por crear y/o mantener un recurso en caché.
G^*	Colectivo de agentes heterogéneos.
I	Conjunto de jugadores.
I	Estrategia residente en P^* .
J	Estrategia mutante en P^* .
l_i	Lista de recursos asociada al par i .
λ	Parámetro en una distribución exponencial.
m_i	Acción disponible al jugador i .
M	Conjunto de acciones disponibles a un jugador.
$p(t)$	Estrategia poblacional en la dinámica micro-macro.
num_A	Número de pares que crearon o mantienen una réplica de un recurso.
NR	Estrategia de no requerido en el juego <i>Ansioso – Perezoso</i> .
p'	Frecuencia de jugadores para la próxima generación.
P^*	Población de jugadores.
P	El castigo en el juego del Dilema del Prisionero.
P	Estrategia <i>Perezoso</i> .
P_{cross}	Probabilidad de cruza.
P_{mut}	Probabilidad de mutación.
$P_{solicitado}$	Probabilidad de que un recurso (r_j) sea solicitado por algún otro par en el sistema P2P
r_j	Recurso j .
R	La recompensa en el juego del Dilema del Prisionero
R	Estrategia de requerido en el juego <i>Ansioso – Perezoso</i> .
S	La ingenuidad en el juego del Dilema del Prisionero.
s	Perfil de estrategias.
S_i	Conjunto de estrategias del jugador i .
S_n	Conjunto de puntos cuyas coordenadas no son negativas y cuya suma es igual a 1 (Simplex)
s_i	Estrategia del jugador i .
s_i^β	Estrategia dominada.
s_i^α	Estrategia dominante.

s^{α^*}	Equilibrio de estrategia dominante.
s_{-i}	Elección estratégica de los otros jugadores excepto la del jugador i
\hat{s}_i	Mejor Respuesta del jugador i .
s^*	Equilibrio de Nash en G.
$\sigma(t)$	Desviación estándar de la población al tiempo t .
T	La tentación en el juego del Dilema del Prisionero.
θ_i	Umbral de preferencia del individuo i en la dinámica micro-macro.
θ_{r_j}	Umbral de disponibilidad del recurso r_j .
$u_i(s)$	Utilidad del jugador i .
$u_i(s_1, \dots, s_n)$	Utilidad del jugador i
$u_i(s_i, s_{-i})$	Utilidad obtenida por el jugador i ante la elección de los otros jugadores excepto la elección de i .
u_i^j	Utilidad del jugador i en el encuentro j .
$U(I)$	Aptitud para un individuo que elige I .
\mathbf{x}	Composición de la población.
w	Probabilidad de que una ronda más ocurra en un juego.
\bar{w}	Número esperado de juegos.
x^*	Punto fijo en el simplex S_n .

LISTA DE TABLAS

2.1	Ejemplos de estrategias con base en el tamaño de la memoria.	36
2.2	2^4 posibles estrategias si se considera una ronda previa.	36
2.3	Parámetros utilizados por Axelrod para evolucionar estrategias a través del algoritmo genético.	37
3.1	Interpretación de los parámetros utilizados en el juego de Caching.	45
3.2	Interpretación de los parámetros asociados al par i (figura 3.4.)	46
3.3	Interpretación de los parámetros del juego (figura 3.5).	47
3.4	Interpretación de los parámetros utilizados en el juego SGH y SG	48
3.5	Síntesis de los trabajos expuestos	52
3.6	Características relevantes a los modelos evolutivos empleados en Sistemas P2P.	57
4.1	Interpretación de las acciones entre el <i>Par</i> y el <i>Ambiente</i>	67
4.2	Interpretación de los pagos obtenidos por el jugador <i>Par</i>	68
4.3	Ejemplos de estrategias con base en el tamaño de la memoria	69
4.4	Historias previas si se considera una memoria de tamaño 2	69
4.5	Ejemplos de estrategias considerando una historia previa de memoria 2	70
4.6	2^6 situaciones resultantes de considerar una historia previa de tres rondas . . .	70
4.7	Crecimiento exponencial en el espacio de estrategias	71
4.8	Representación binaria de historia previa de tres rondas	72
4.9	Parámetros de configuración	78

4.10 Alelos del comportamiento que se destacan por su uso en la población de pares.	83
A.1 Interpretación de las estrategias en La Caza del Ciervo, y La Ventisca.	92

REFERENCIAS

- [1] Androutsellis-Theotokis, S., Spinellis, D.: A survey of peer-to-peer content distribution technologies. *ACM Comput. Surv.* **36**(4), 335–371 (2004)
- [2] Axelrod, R.: Evolving new strategies: The evolution of strategies in the iterated prisoner’s dilemma. En: *Genetic algorithms and simulated annealing*, pp. 32–41 (1987)
- [3] Bass, L., Clements, P., Zazman, R.: *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley (2003)
- [4] Bicchieri, C., Muldoon, R.: Social norms. En: E.N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, primavera 2011 edn. (2011)
- [5] Buford, J., Yu, H., Lua, E.K.: *P2P Networking and Applications*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (2008)
- [6] Cho, S., Nguyen, T.: Modeling and dynamics analysis of p2p networks based on evolutionary games. En: *Proceedings of the 2009 First International Conference on Advances in P2P Systems*, pp. 34–38 (2009)
- [7] Feng, H., Shunyi, Z., Chao, L., Junrong, Y., Ming, Z.: P2p incentive model on evolutionary game theory. En: *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on* (2008)
- [8] Granovetter, M.: Threshold model of collective behavior. *The American Journal of Sociology* **83**(6), 1420–1443 (1978)
- [9] Güth, W., Schmittberger, R., Schwarze, B.: An experimental analysis of ultimatum bargaining. *Journal of Economic Behavior & Organization* **4**, 367–388 (1982)

- [10] Hofbauer, J., Sigmund, K.: Evolutionary games and Population Dynamics. Cambridge University Press (1998)
- [11] Hughes, D., Coulson, G., Walkerdine, J.: Free riding on gnutella revisited: The bell tolls? IEEE Distributed Systems Online **6**(6), 1– (2005)
- [12] Kuhn, S.: Game theory. En: E.N. Zalta (ed.) The Stanford Encyclopedia of Philosophy, primavera 2009 edn. (2009)
- [13] Loo, A.W.S.: Peer-to-Peer Computing: Building Supercomputers with Web Technologies (Computer Communications and Networks). Springer-Verlag New York, Inc. (2006)
- [14] Matsuda, Y., Sasabe, M., Takine, T.: Evolutionary game theory-based evaluation of p2p file-sharing systems in heterogeneous environments. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting (2010)
- [15] Maynard, J.S.: Evolution and the Theory of Games. Cambridge University Press (1982)
- [16] Maynard, J.S., Price, G.: The logic of animal conflict. Nature **246**(5427), 15–18 (1973)
- [17] McKenzie, A.: Evolutionary game theory. En: E.N. Zalta (ed.) The Stanford Encyclopedia of Philosophy, otoño 2009 edn. (2009)
- [18] Melanie, M.: An introduction to genetic algorithms. MIT Press (1998)
- [19] Morgenstern, O., von Neumann, J.: Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press (1944)
- [20] Namatame, A.: Adaptation and evolution in collective systems. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2006)
- [21] Nash, J.: Equilibrium points in n-person games. Proceedings of the National Academy of Science **36**, 48–49 (1950)
- [22] Nelson, R.: Probability, stochastic processes, and queueing theory: the mathematics of computer performance modelling. Springer - Verlag (1995)
- [23] Nowak, M.: Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life. Belknap Press (2006)
- [24] Rasmusen, E.: Games and Information: An Introduction to Game Theory, 4 edn. Blackwell (2006)
- [25] Ross, D.: Game theory. En: E.N. Zalta (ed.) The Stanford Encyclopedia of Philosophy, otoño 2010 edn. (2010)

- [26] Sasabe, M., Matsuda, Y., Takine, T.: How does user heterogeneity affect performance of p2p caching?: evolutionary game theoretic approach. En: Proceedings of the 3rd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, pp. 39:1–39:6 (2008)
- [27] Sasabe, M., Wakamiya, N., Murata, M.: A caching algorithm using evolutionary game theory in a file-sharing system. En: Computers and Communications, 2007. ISCC 2007. 12th IEEE Symposium on, pp. 631–636 (2007)
- [28] Sasabe, M., Wakamiya, N., Murata, M.: User selfishness vs. file availability in p2p file-sharing systems: Evolutionary game theoretic approach. Peer-to-Peer Networking and Applications **3**(1), 17–26 (2010)
- [29] Schollmeier, R.: A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications. En: Proceedings of the First International Conference on Peer-to-Peer Computing, series = P2P '01, pp. 101– (2001)
- [30] Shen, X., Yu, H., Buford, J., Akon, M.: Handbook of Peer-to-Peer Networking. Springer Publishing Company, Incorporated (2009)
- [31] Szabó, G., Fáth, G.: Evolutionary games on graphs. Physics Reports **446**(4-6), 97 – 216 (2007)
- [32] Taylor, P.D., Jonker, L.B.: Evolutionary stable strategies and game dynamics. Mathematical Biosciences **40**, 145–156 (1978)
- [33] Weibull, J.: Evolutionary Game Theory. MIT Press, Massachusetts (1997)
- [34] Zhang, Q., Xue, H.F., Kou, X.d.: An evolutionary game model of resources-sharing mechanism in p2p networks. En: Proceedings of the Workshop on Intelligent Information Technology Application, pp. 282–285 (2007)