



UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA (UOC)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA DE DATOS (*DATA SCIENCE*)

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ÁREA: 4

Aprendizaje por refuerzo multiagente en entornos competitivos Atari: Transferencia de conocimiento de Pong a Quadrapong

Autor: Juan Manuel Camacho Lugo

Tutor: Luis Esteve Elfau

Profesor: Ismael Benito Altamirano

Barcelona, 6 de junio de 2025

Créditos/Copyright



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 España de CreativeCommons.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Aprendizaje por refuerzo multiagente en entornos competitivos Atari: Transferencia de conocimiento de Pong a Quadrapong.
Nombre del autor:	Juan Manuel Camacho Lugo
Nombre del colaborador/a docente:	Luis Esteve Elfau
Nombre del PRA:	Ismael Benito Altamirano
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2025
Titulación o programa:	Máster Universitario en Ciencia de Datos
Área del Trabajo Final:	Área 4
Idioma del trabajo:	Español
Palabras clave	Reinforcement learning, Multi-Agent, Knowledge transfer

Abstract

In the context of Multi-Agent Reinforcement Learning ([MARL](#)), the ability of agents to learn from their interactions and adapt to dynamic environments is crucial. This study is based on the paper "Multiagent Cooperation and Competition with Deep Reinforcement Learning", with the aim of expanding its scope.

In this work, agent training is conducted in the classic Atari Pong game, optimizing the learning process to investigate how acquired knowledge can be effectively transferred to a more complex environment (Quadrabpong), where players must coordinate in teams of two. This research explores how agents balance competition and cooperation.

The findings of this study contribute to the understanding of how knowledge transfer can enhance multi-agent learning in more complex environments.

Keywords: Reinforcement learning, Multi-Agent, Knowledge transfer

Resumen

En el contexto del Aprendizaje por Refuerzo Multiagente (MARL), la capacidad de los agentes para aprender de sus interacciones y adaptarse a entornos dinámicos es fundamental. Este estudio toma como referencia el paper "Multiagent Cooperation and Competition with Deep Reinforcement Learning", con el propósito de expandir su alcance.

En este trabajo se toma el entrenamiento de agentes en el clásico juego de Atari Pong, optimizando su proceso de aprendizaje, con el objetivo de investigar cómo el conocimiento adquirido, puede transferirse eficazmente a un entorno más complejo (Quadrabpong), donde los jugadores deben coordinarse en equipos de dos. Esta investigación explora cómo los agentes equilibran la competencia y la cooperación.

Los resultados de esta investigación contribuyen a la comprensión de cómo la transferencia de conocimiento puede mejorar el aprendizaje multiagente en entornos más complejos.

Palabras clave: Aprendizaje por refuerzo, Multiagente, Transferencia de conocimiento

Índice general

Abstract	III
Resumen	IV
Índice	V
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas	IX
Lista de Ecuaciones	1
1 Introducción	2
1.1 Contexto	2
1.2 Justificación	3
1.3 Motivación	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Enfoque y metodología	5
1.6 Sostenibilidad, diversidad y desafíos ético/sociales	6
1.6.1 Sostenibilidad	6
1.6.2 Diversidad, género y derechos humanos	7
1.6.3 Comportamiento ético y responsabilidad social	7
1.7 Planificación	7
1.7.1 FASE 1 (19/02 - 09/03) Introducción.	7
1.7.2 FASE 2 (10/03 - 30/03) Estado del arte.	8
1.7.3 FASE 3 (31/03 - 04/05) Diseño e implementación.	8
1.7.4 FASE 4 (05/05 - 18/05) Presentación de resultados.	8
1.7.5 FASE 5 (19/05 - 25/05) Conclusiones y trabajo futuro.	8
1.7.6 FASE 6 (26/05 - 06/06) Finalización del proyecto.	8
2 Estado del arte	10

2.1	Introducción al Aprendizaje por Refuerzo	10
2.1.1	Proceso	11
2.1.2	Evolución	13
2.1.3	Enfoques y Métodos	15
2.2	Aprendizaje por refuerzo en entornos multiagente (MARL)	19
2.2.1	Aprendizaje individual vs. aprendizaje multiagente	19
2.2.2	Enfoques y Métodos	20
2.2.3	Retos y Desafíos	21
2.3	Transferencia de conocimiento	23
2.3.1	Transferencia de conocimiento a entornos multiagentes	23
2.3.2	Técnicas de transferencia de conocimiento	24
2.3.3	Retos y Desafíos	25
2.4	Líneas de investigación previas	26
2.5	Aplicaciones reales y Tendencias emergentes	28
3	Diseño e implementación	30
3.1	Herramientas de desarrollo y recursos utilizados	30
3.2	Establecer el entorno de Pong	32
3.3	Definir los agentes y sus modelos	33
3.4	Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Pong	35
3.4.1	Estructura del entrenamiento	35
3.4.2	Ciclo de aprendizaje de los agentes	36
3.4.3	Configuración del entrenamiento en Pong	38
3.5	Establecer el entorno de Quadrapong	38
3.6	Transferencia de conocimiento a Quadrapong	41
3.6.1	Técnica empleada	41
3.6.2	Asignación de agentes y equipos	42
3.7	Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Quadrapong.	43
3.7.1	Estructura del entrenamiento desde cero	43
3.7.2	Ciclo de aprendizaje de los agentes en entrenamiento Quadrapong desde cero	43
3.7.3	Estructura del entrenamiento después de transferencia de conocimiento .	44
3.7.4	Ciclo de aprendizaje de los agentes en entrenamiento Quadrapong con Transfer Learning y Fine-tuning	44
3.7.5	Configuración del entrenamiento en Quadrapong	45
3.8	Recolección de datos y métricas	45
3.9	Pruebas y ajustes	45

4 Presentación de resultados	47
4.1 Análisis de recompensas en Pong	47
4.2 Análisis de impactos de la pelota en Pong	48
4.3 Análisis de partidas múltiples en diferentes etapas	49
4.4 Comparación entre entrenamiento con y sin transferencia de conocimiento	50
4.4.1 Análisis de recompensas por equipos en Quadrapong	50
4.4.2 Análisis de impactos a la pelota por agentes en Quadrapong	52
4.4.3 Análisis de impactos a la pelota por equipos en Quadrapong	54
5 Conclusiones y trabajo futuro	56
Glosario	61
Bibliografía	62
A Detección de objetos con Label Studio y YOLOv8	67
A.1 Etiquetado manual de datos con Label Studio	67
A.2 Entrenamiento de un modelo YOLOv8	68

Índice de figuras

1.1	Entorno Pong y Quadrapong [1] [2]	3
1.2	Diagrama de Gantt con la planificación	9
2.1	Tipos de aprendizajes automáticos	11
2.2	Elementos del aprendizaje por refuerzo	13
2.3	Tipos de enfoques para resolver problemas de aprendizaje por refuerzo	15
3.1	Espacio de observaciones	32
3.2	Red neuronal convolucional	34
3.3	Diagrama del ciclo de entrenamiento de un agente en Pong	37
3.4	Entorno Quadrapong [2]	38
3.5	Diagrama del ciclo de entrenamiento de un agente en Quadrapong con transferencia de conocimiento	44
4.1	Evolución de recompensas por rondas en Pong	47
4.2	Evolución de impactos por rondas en Pong	48
4.3	Impactos durante cinco partidas de cada agente en Pong	49
4.4	Victorias durante cinco partidas de cada agente en Pong	50
4.5	Evolución de recompensas por Rondas y Equipos (Sin transferencia de conocimiento)	51
4.6	Evolución de recompensas por Rondas y Equipos (Con transferencia de conocimiento)	52
4.7	Evolución individual de impactos por Rondas (Sin transferencia de conocimiento)	53
4.8	Evolución individual de impactos por Rondas (Con transferencia de conocimiento)	53
4.9	Evolución por equipos de impactos por Rondas (Sin transferencia de conocimiento)	54
4.10	Evolución por equipo de impactos por Rondas (Con transferencia de conocimiento)	55
A.1	Fotogramas del entorno de juego de Pong con las cajas delimitadoras[3]	68
A.2	Fotogramas del entorno de juego de Quadrapong con las cajas delimitadoras[3]	68
A.3	Detección de palas y pelota en Pong	69
A.4	Detección de palas y pelota en Quadrapong	69

Índice de Tablas

2.1	Importancia de las recompensas según valor de descuento	13
3.1	Comparativa entre los entornos Pong y Quadrapong en PettingZoo.	40
3.2	Asignación de agentes y transferencia de pesos desde Pong a Quadrapong.	42
5.1	Comparativa de huella de carbono entre estrategias de entrenamiento	59

Listado de Ecuaciones

2.1	Función de valor del estado $v(s)$	12
2.2	Función de valor de una acción $q(s, a)$	13
2.3	Ecuación de Bellman (Q-learning)	16
2.4	Término de entropía	17
2.5	Clipping	18
2.6	Función de pérdida del crítico	18
2.7	Término de entropía	18
2.8	Función objetivo para el algoritmo PPO	18

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

El Aprendizaje por Refuerzo en entornos multiagente ha demostrado ser clave en el desarrollo de sistemas inteligentes para juegos, robótica y vehículos autónomos entre otros. Pong [1] es un entorno ampliamente utilizado en la investigación de Aprendizaje por Refuerzo debido a su simplicidad y carácter competitivo. Sin embargo, la aplicación del conocimiento adquirido en Pong a entornos más complejos como Quadrapong [2] presenta nuevos desafíos, como la coordinación entre agentes y la adaptación a dinámicas de equipo.

En este trabajo se explorará el entrenamiento de agentes en el clásico juego de Atari Pong, y nos centraremos en la optimización del aprendizaje y la transferencia de conocimiento a entornos más complejos. En particular, se estudiará la aplicación de las estrategias aprendidas en Pong al entorno Quadrapong, un juego similar donde los jugadores deben coordinarse en equipos de dos. Podemos apreciar las características básicas de ambos entornos en la [Figura 1.1](#). En el nuevo entorno, se analizará la evolución del comportamiento de los agentes en función de diferentes configuraciones de entrenamientos. Contaremos con dos modelos, uno donde los agentes serán entrenados desde cero un cierto número de pasos, y otro donde utilizaremos los modelos preentrenados en Pong y completaremos el entrenamiento el mismo número de pasos que en el caso anterior para adaptar el conocimiento al nuevo entorno. El estudio tomará como referencia el paper "Multiagent Cooperation and Competition with Deep Reinforcement Learning" [4] y buscará expandirlo con nuevas estrategias.

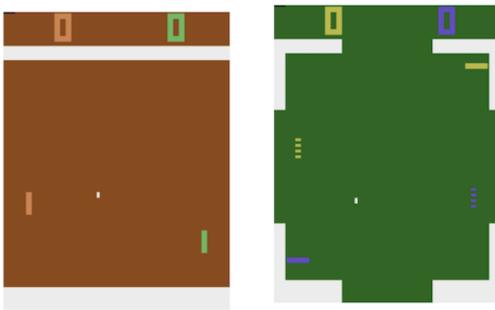


Figura 1.1: Entorno Pong y Quadrapong [1] [2]

1.2. Justificación

Este Trabajo Final de Máster pretende contribuir al Aprendizaje por Refuerzo Multiagente (MARL) estudiando la transferencia de conocimiento desde un entorno simple a otro más complejo. Se explorará cómo los agentes pueden mejorar su rendimiento en Quadrapong basándose en la experiencia previa adquirida en Pong y se analizará la capacidad de los modelos de aprendizaje para adaptarse a nuevos escenarios con un reentrenamiento mínimo. Además, se pretende evaluar el impacto de diferentes configuraciones de recompensa en la cooperación y competitividad entre agentes.

En la mayoría de sistemas reales la interacción entre agentes no se limita únicamente a la competencia directa, sino que involucra colaboración y coordinación. En este sentido, la transición desde Pong a un entorno más complejo como Quadrapong introduce desafíos adicionales, como la necesidad de comunicación entre compañeros de equipo y la toma de decisiones coordinadas.

De esta manera se podría contribuir al desarrollo de sistemas inteligentes que sean capaces de generalizar habilidades adquiridas en un contexto y aplicarlas en otros más complejos. En este ámbito, se podrían encontrar aplicaciones en la planificación de movimientos de robots autónomos, así como facilitar la toma de decisiones de vehículos autónomos o señalización en intersecciones, donde los agentes deben equilibrar competencia y cooperación.

1.3. Motivación

Mi interés en el Aprendizaje por Refuerzo Multiagente (MARL) surge de la creciente importancia de la inteligencia artificial en la resolución de problemas complejos que requieren la interacción entre múltiples agentes. Este tipo de aprendizaje ha demostrado ser una herramienta clave para desarrollar estrategias eficientes en entornos donde sea un requerimiento principal

la cooperación y la competencia.

El desafío de optimizar el aprendizaje de agentes y estudiar su capacidad de adaptación a nuevos entornos ha sido una de las principales motivaciones. La posibilidad de transferir conocimientos adquiridos en un entorno a otro me resulta interesante, debido a que, permitirá reutilizar y generalizar el aprendizaje sin necesidad de un entrenamiento desde cero.

Por otro lado, desde siempre los videojuegos han sido una de mis aficiones, no solo en el aspecto lúdico, sino que también me ha llamado la atención la complejidad de sus mecánicas y la toma de decisiones continuas que requieren. A medida que he ido estudiando el mundo de la inteligencia artificial, he visto como la aplicación del aprendizaje por refuerzo en este campo ha obtenido resultados impresionantes. Por este motivo, me despierta bastante interés estudiar cómo los agentes encuentran estrategias eficientes y la posibilidad de aplicarlas en diferentes circunstancias.

Por último, me gustaría tener la posibilidad de contribuir en este campo y explorar nuevas estrategias de aprendizaje, ya que, representa un reto apasionante que me permitirá ampliar mis conocimientos en aprendizaje profundo, optimización y transferencia de conocimiento.

1.4. Objetivos

Son varios los objetivos que se plantea alcanzar. Los cuales, se pueden diferenciar en dos categorías:

Objetivo principal:

Investigar la transferencia de conocimiento desde Pong a Quadrapong, y evaluar el impacto en la cooperación y competencia de los agentes.

Objetivos secundarios:

1. Entrenar agentes en Pong utilizando Aprendizaje por Refuerzo Multiagente.
2. Aplicar la política aprendida en Pong a Quadrapong y analizar su rendimiento.
3. Explorar diferentes configuraciones de recompensa (competitivas y colaborativas) para mejorar la coordinación entre agentes en Quadrapong.
4. Evaluar la evolución del comportamiento de los agentes en términos de estrategias y comunicación en equipos.
5. Optimizar el proceso de entrenamiento para reducir el consumo computacional manteniendo o mejorando el rendimiento.

1.5. Enfoque y metodología

Se empleará un enfoque experimental y comparativo, basado en simulaciones en entornos de PettingZoo [5] (plataforma estandarizada para entornos multiagente) y análisis cuantitativo del desempeño de los agentes. Se evaluarán distintos algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo:

Estrategia de Investigación:

1. Deep Q-Network ([DQN](#)): Redes neuronales similares, entrenadas independientemente. El entrenamiento incluiría actualizar las redes neuronales con las recompensas que se obtienen de las acciones del agente.
2. Proximal Policy Optimization ([PPO](#)): Equilibrar exploración y explotación.
3. Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient ([MADDPG](#)): Permitir que los agentes colaboren o compitan dependiendo del estado del juego y sus objetivos.

Técnicas de Optimización:

1. **Parameter Sharing:** Múltiples agentes comparten los mismos parámetros de red neuronal.
2. **Transfer Learning / Parameter Transfer:** Aplicar modelos entrenados en un entorno a otro diferente, minimizando la necesidad de entrenamiento desde cero.
3. **Fine-tuning:** Aplicar un proceso de optimización a modelos preentrenados, para facilitar su adaptación a nuevos entornos o mejorar su rendimiento en tareas específicas.

Herramientas:

1. **Entornos PettingZoo:**
 - Pong.
 - Quadrapong.
2. **Librerías / paquetes:**
 - Stable-Baselines3 [6].
 - NumPy ¹.
 - Gymnasium [7].
 - Supersuit [8].

¹Numpy, 2005. <https://numpy.org/es/>

- Pytorch ².
- OpenCV ³.
- TensorBoard ⁴.
- Codecarbon [9].

Posteriormente en el apartado 3.1, se describirán en detalle las herramientas de "software" y recursos "hardware" empleados en el desarrollo del proyecto.

1.6. Sostenibilidad, diversidad y desafíos ético/sociales

1.6.1. Sostenibilidad

Aunque este proyecto no tiene un impacto directo y grave en la sostenibilidad en términos de contaminación o agotamiento de recursos físicos, sí tiene un impacto indirecto en el consumo de energía y, por tanto, en la huella de carbono.

1. **Consumo de energía:** El entrenamiento de agentes, especialmente cuando se utilizan técnicas como DQN, PPO o MADDPG, puede ser muy demandante en términos de computación. Esto implica el uso de Graphics Processing Unit (**GPU**), para acelerar el proceso de aprendizaje, lo que aumenta el consumo de energía.
2. **Desperdicio y uso de recursos:** Dado que el proyecto se desarrolla en un entorno digital, no genera desechos físicos ni implica consumo directo de materias primas.

Para reducir la huella ecológica, se tomarán una serie de medidas como:

- Reducir el tiempo de entrenamiento en Quadrapong utilizando transfer learning.
- Utilizar GPUs optimizadas para Inteligencia Artificial (**IA**).

Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (**ODS**) ⁵:

- **ODS 7:** Energía asequible y no contaminante.
- **ODS 9:** Industria, innovación e infraestructura.
- **ODS 12:** Producción y consumo responsables

²Pytorch documentation, 2002. <https://pytorch.org>

³Opencv, 1999. <https://opencv.org>

⁴Tensorboard, 2015. <https://www.tensorflow.org/tensorboard?hl=es-419>

⁵ODS, 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- **ODS 13:** Acción por el clima.

Una vez se realicen los entrenamientos, se analizará en detalle la huella de carbono para comprobar si se alcanzan los objetivos de eficiencia energética.

1.6.2. Diversidad, género y derechos humanos

Este proyecto tiene un impacto nulo o mínimo en términos de género, diversidad y derechos humanos, ya que:

1. No maneja datos humanos ni toma decisiones que afecten a personas.
2. No introduce barreras de accesibilidad.
3. No tiene riesgos en seguridad de la información.

1.6.3. Comportamiento ético y responsabilidad social

El impacto ético y social de este proyecto es mínimo en su estado actual, ya que se centra en el entrenamiento de agentes en entornos simulados sin implicaciones en datos privados, decisiones críticas o sesgos sociales. Sin embargo, si se aplicara a otras áreas más sensibles, podrían surgir desafíos éticos relacionados con la privacidad y la seguridad de los datos.

Por lo tanto, el proyecto no representa un riesgo ético o social directo y no se aprecia impacto relacionado con el género, la diversidad y los derechos humanos, aunque posibles aplicación futura fuera del contexto de este trabajo, podrían requerir un análisis más detallado para garantizar su uso responsable.

1.7. Planificación

La planificación del proyecto se basa en la consecución de una serie de hitos, los cuales se han adaptado a las entregas y fechas que a continuación se detallan y que se pueden observar en detalle en la [Figura 1.2](#).

1.7.1. FASE 1 (19/02 - 09/03) Introducción.

En esta fase se da contexto al proyecto a la vez que se expone la justificación y motivación que han llevado al desarrollo del mismo. Por otro lado, se marcan una serie de objetivos a cumplir y se presenta la metodología a seguir.

1.7.2. FASE 2 (10/03 - 30/03) Estado del arte.

Se realiza un estudio del aprendizaje por refuerzo multiagente (MARL) y transferencia de aprendizaje, aplicados a videojuegos. Se analizan ciertos algoritmos claves, así como su uso en entornos competitivos y cooperativos. Además, se revisan técnicas de transferencia de aprendizaje para evaluar cómo el conocimiento adquirido en Pong puede aplicarse en Quadrapong.

1.7.3. FASE 3 (31/03 - 04/05) Diseño e implementación.

- Herramientas de desarrollo y recursos utilizados.
- Establecer el entorno de Pong.
- Definir los agentes y sus modelos.
- Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Pong.
- Establecer el entorno de Quadrapong.
- Transferencia de conocimiento a Quadrapong.
- Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Quadrapong.
- Recolección de datos y métricas.
- Pruebas y ajustes.

1.7.4. FASE 4 (05/05 - 18/05) Presentación de resultados.

Llegados a este punto se analizan los resultados y se comprueba si se han alcanzados los objetivos marcados.

1.7.5. FASE 5 (19/05 - 25/05) Conclusiones y trabajo futuro.

Una vez analizados los resultados, estaremos en disposición de exponer las conclusiones más reseñables. A su vez, se establecen unas líneas de trabajo futuro.

1.7.6. FASE 6 (26/05 - 06/06) Finalización del proyecto.

Completadas todas las fases del proyecto, estamos en disposición de finalizar el trabajo con la entrega de la memoria definitiva.

1.7. Planificación

9

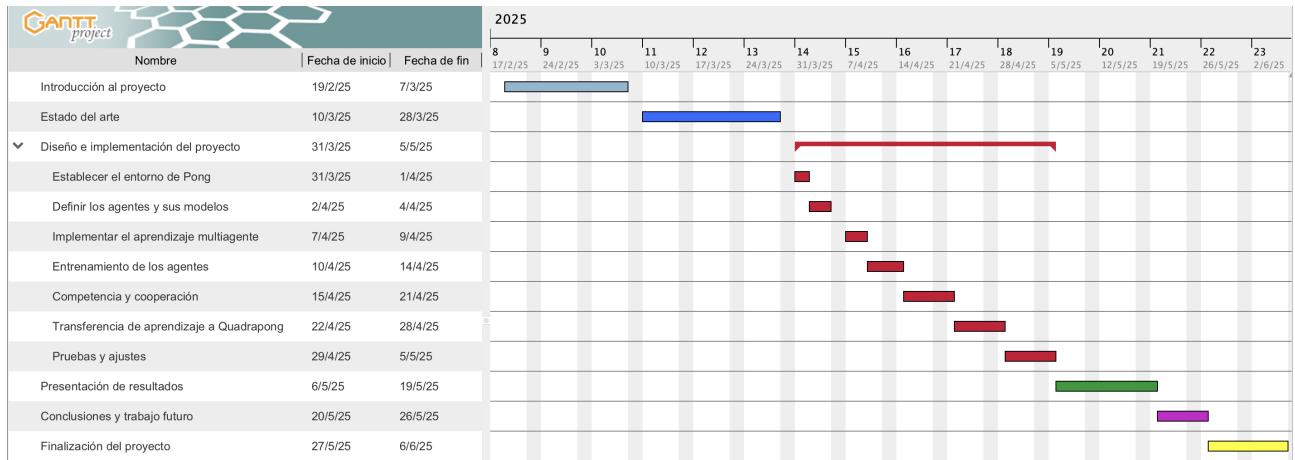


Figura 1.2: Diagrama de Gantt con la planificación

En el [capítulo 2](#), que se presenta a continuación, se detallará el estado del arte. Aquí, se introducirá el concepto de aprendizaje por refuerzo, se mostrarán las líneas de investigación previas, continuaremos con la aplicación del aprendizaje por refuerzo en entornos multiagente, nos centraremos en la transferencia de conocimiento entre entornos y señalaremos posibles tendencias o trabajos futuros. Una vez definido el estado del arte, pasaremos al [capítulo 3](#) donde detallaremos el diseño e implementación del trabajo. En este capítulo, estableceremos el entorno Pong, se definirán los agentes y sus modelos, se implementará el aprendizaje multiagente y se entrenarán los agentes. Después se establecerá el entorno Quadrapong, se entrenará un modelo desde cero sin transferencia de conocimiento y otro realizando la transferencia de conocimiento entre entornos y se realizarán las pruebas y ajustes pertinentes. Para finalizar lo relativo al estudio, en el [capítulo 4](#), se presentarán los resultados obtenidos durante el trabajo. Por último, en el [capítulo 5](#), se expondrán las conclusiones acorde a los resultados obtenidos y se indicarán posibles trabajos futuros.

Todo el código fuente, gráficos, documentación y demás materiales relacionados con este trabajo están disponibles públicamente en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/JCAMLUG/TFM.git>

También se encuentran disponibles almacenado en la nube en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1WiRmXNif80B9APu3GXb487u9nRun0NGY?usp=drive_link

Estos recursos permiten consultar, reproducir y ampliar los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción al Aprendizaje por Refuerzo

En el campo de la IA la rama encargada del desarrollo de los algoritmos y modelos que permiten a las máquinas aprender, es el aprendizaje automático ó Machine Learning ([ML](#)). Este se lleva a cabo a partir de datos, los cuales permiten identificar patrones, hacer predicciones o tomar decisiones. De esta manera, se mejora el rendimiento en las diferentes tareas y se evita la necesidad de una programación previa. Cómo podemos observar en la [Figura 2.1](#), se pueden destacar varios tipos de aprendizajes automáticos:

- **Aprendizaje Supervisado:** En este caso, el modelo se entrena utilizando un conjunto de datos etiquetados, es decir, se le indica al modelo cuáles son las respuestas correctas. El modelo aprenderá a predecir la etiqueta o salida correcta de datos que no ha visto previamente gracias a los ejemplos que se le han proporcionado.
- **Aprendizaje No Supervisado:** A diferencia del caso anterior, el modelo recibe datos sin etiquetas. El modelo buscará patrones, estructuras o relaciones ocultas dentro de los datos sin la necesidad de que se le proporcionen ejemplos.
- **Aprendizaje por Refuerzo ó Reinforcement Learning ([RL](#)):** En este último tipo de aprendizaje, un agente tras interactuar con el entorno, gracias a recompensas y penalizaciones, aprende a tomar decisiones por medio de ensayo y error.

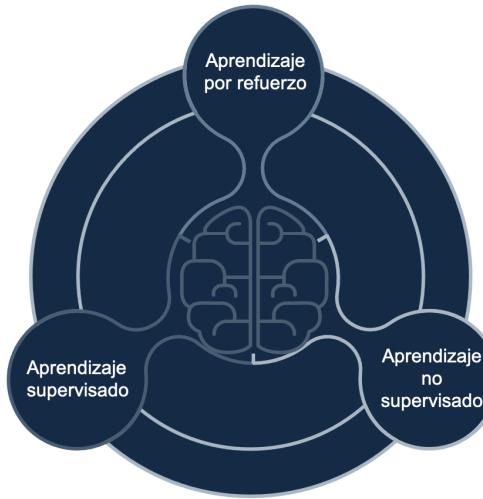


Figura 2.1: Tipos de aprendizajes automáticos

En el desarrollo del trabajo se utilizará RL para conseguir que los agentes aprendan a jugar a Pong.

2.1.1. Proceso

El aprendizaje por refuerzo sigue un proceso donde los agentes interactúan con el entorno por medio de acciones y, en función de ellas, reciben una serie de recompensas o penalizaciones que le indican cuán buena o mala ha sido la acción tomada. El objetivo es maximizar la recompensa acumulada a lo largo del tiempo, de esta manera se aprenderá cuál es la mejor estrategia o política para dicho entorno.

En el proceso se ven involucrados una serie de elementos, los cuales se reflejan en la Figura 2.2 y, que se detallan a continuación:

- **Agente.**

Es el ente que toma decisiones en un entorno determinado con el fin de alcanzar un objetivo y para ello se puede ayudar de diferentes elementos que se definen más adelante.

- **Acción (A_t).**

Corresponde con las decisiones que toma el agente en un determinado estado y que le permitirán evolucionar al siguiente estado. Es la manera que tiene el agente de interactuar con el entorno, repercutiendo en el próximo estado y en la próxima recompensa.

- **Recompensa / penalización.**

Se trata de la retroalimentación que el agente recibe al realizar cada acción. Esta señal escalar (R_t) puede ser positiva y por lo tanto, conllevar una recompensa, o negativa y

generar una penalización. En ambos casos, el agente contará con una información que le permitirá saber si sus acciones son correctas o no, y en consecuencia, aportar una influencia directa en las decisiones futuras del agente.

- **Entorno.**

Es el contexto en el que el agente se desenvuelve e interactúa. A medida que el agente ejecuta sus acciones, el entorno va cambiando su estado y generando una recompensa / penalización que ayudarán al agente a tomar nuevas decisiones.

- **Estado (S_t).**

Representa la situación actual del entorno en cada momento, la cual es observada por el agente, y contiene toda la información relevante del entorno necesaria para la toma de decisiones de este.

Entre los elementos que ayudan a los agentes a tomar decisiones podemos señalar la **política**, función que define el comportamiento del agente a la hora de seleccionar la acciones en cada estado, y puede ser determinista (cuando la acción viene determinada directamente por el estado) o estocástica (cuando pueden existir más de una acción a seleccionar en cada estado). En el segundo caso, se asignan probabilidades a las acciones, lo que ayuda a explorar el entorno. Esto se debe a que, en caso de volver a encontrarnos en un estado ya visitado, el agente puede escoger una acción diferente a la anterior que le permita avanzar a nuevos estados. Otro elemento que puede ayudar en la toma de decisiones del agente es la **función de valor**, que muestra lo óptimo que es un estado (o acción) acorde a las recompensas futuras que pueden obtenerse. Cuando hablamos de función de valor podemos diferenciar entre **función de valor del estado ($v(s)$)** y **función de valor de una acción $q(s,a)$** . La función de valor del estado, definida por la [Ecuación 2.1](#), se encarga de estimar la recompensa que el agente puede obtener en un estado (s), siguiendo una determinada política (π).

$$v(s) = \mathbb{E}_\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_{t+1} \mid S_0 = s \right] \quad (2.1)$$

Ecuación 2.1: Función de valor del estado $v(s)$

Donde $\gamma \in [0,1]$, es el factor de descuento y determina la importancia de las recompensas futuras como podemos ver en la [Tabla 2.1](#). \mathbb{E}_π es el promedio de todas las posibles recompensas futuras que puede recibir el agente siguiendo la política. R_{t+1} la recompensa recibida en el paso $t+1$ tras haber realizado una acción en el paso previo. Todo ello, condicionado a que el agente tome como estado inicial (S_0) al estado (s).

Valor de γ	Interpretación 2	Comportamiento del agente
$\gamma=0$	Solo importa la recompensa inmediata.	Decisiones cortoplacistas
$0<\gamma<1$	Recompensas futuras valen menos cuanto más lejos estén	Balance entre corto y largo plazo
$\gamma=1$	Las recompensas futuras valen lo mismo que la actual	Decisiones a largo plazo

Tabla 2.1: Importancia de las recompensas según valor de descuento

Y la función de valor de una acción, definida por la [Ecuación 2.2](#), estima el valor esperado (recompensa total futura) al tomar una acción (a) en un estado (s) siguiendo la política (π) a partir de ese momento.

$$q(s, a) = \mathbb{E}_\pi \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_{t+1} \mid S_0 = s, A_0 = a \right] \quad (2.2)$$

Ecuación 2.2: Función de valor de una acción $q(s, a)$

A diferencia de la función de valor del estado, en este caso todo está condicionado a que el agente se encuentre como estado inicial (S_0) al estado (s) y ejecute como acción inicial (A_0) la acción (a).

Por último, el agente puede contar con un **modelo**, que es una perspectiva del entorno, y le permite predecir el comportamiento de este para actuar en consecuencia. De esta manera, el agente puede predecir el próximo estado o el valor de la próxima recompensa.

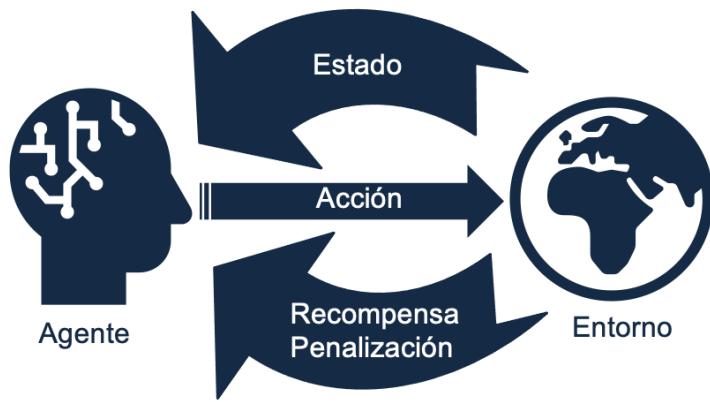


Figura 2.2: Elementos del aprendizaje por refuerzo

2.1.2. Evolución

Como describen Sutton and Barto [10] en su libro *Reinforcement Learning: An Introduction* (2018), el aprendizaje por refuerzo surge de la combinación de tres hilos independientes. El primer hilo, se centra en la psicología del aprendizaje animal, siguiendo el principio de ensayo

y error. Las primeras formulaciones en este campo fueron obra de Edward Thorndike ¹, quién mediante recompensas y castigos, observó la tendencia de los animales a seleccionar acciones. Uno de los primeros en pensar en la posibilidad de aplicar este método de aprendizaje a una computadora fue Alan Turing ², describiendo sistemas capaces de aprender mediante retroalimentación. El segundo hilo, está enfocado en el control óptimo y la programación dinámica, donde destacó la figura de Richard Bellman ³, quién definió una ecuación capaz de relacionar el valor de un estado con los posibles valores de estados futuros (*ecuación de Bellman* [11]), que junto al uso de procesos de decisión de Markov o Márkov Decision Process (MDP) [11], consiguió una base sólida para la toma de decisiones secuenciales. El tercer hilo, relacionado con el aprendizaje por diferencia temporal, se caracteriza por la actualización de predicciones a partir de cambios sucesivos en el tiempo. Siendo Arthur Samuel ⁴ el primero en aplicar un método de aprendizaje que incluía ideas de diferencia temporal al juego de damas. Pero, no fue hasta el desarrollo del Q-learning [12] por Chris Watkins ⁵, cuando se integraron los trabajos previos de los tres hilos para constituir el eje central del aprendizaje por refuerzo. El Q-learning puede definirse, de manera básica, como un método mediante el cual el agente aprende una política que le indica qué acción ejecutar en función del estado en que se encuentra con el objetivo de maximizar las recompensas futuras acumuladas.

La convergencia de estos tres enfoques dio lugar a una nueva generación de algoritmos capaces de aprender de manera autónoma a través de la interacción con el entorno. En este enclave, la combinación del aprendizaje por refuerzo con las redes neuronales profundas, ha dado lugar al aprendizaje por refuerzo profundo o Deep Reinforcement Learning (DRL). Un hito clave fue el desarrollo del algoritmo DQN por DeepMind ⁶ [13][14], que permitió entrenar agentes capaces de superar el rendimiento humano en videojuegos clásicos, utilizando únicamente píxeles como entrada. Este avance demostró la capacidad de los agentes para generalizar a partir de experiencias previas, y marcó el comienzo de una nueva etapa. Desde entonces, se han propuesto múltiples opciones entre las que se podrían señalar, Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) [15], PPO [16] o Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) [17], cada una con enfoques específicos para entornos continuos, políticas deterministas o estabilidad en el entrenamiento. Estas técnicas han sido fundamentales consolidando el aprendizaje por refuerzo

¹Edward Lee Thorndike (1874-1949), psicólogo y pedagogo estadounidense. https://es.wikipedia.org/wiki/Edward_Thorndike

²Alan Mathison Turing (1912-1954), matemático, lógico, informático teórico, criptógrafo, filósofo y biólogo teórico británico. https://es.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing

³Richard Ernest Bellman (1920-1984), matemático aplicado estadounidense. https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Bellman

⁴Arthur L. Samuel (1901-1990), pionero estadounidense en el campo de los juegos informáticos y la inteligencia artificial. https://es.wikipedia.org/wiki/Arthur_L._Samuel

⁵Christopher J.C.H. Watkins, Professor in Computer Science, Royal Holloway. <https://scholar.google.com/citations?user=v8Qhi0wAAAAJ&hl=es>

⁶DeepMind, compañía inglesa de investigación y desarrollo de inteligencia artificial, fundada en 2010 por Demis Hassabis. <https://deepmind.google/>

como una herramienta poderosa para la inteligencia artificial moderna.

2.1.3. Enfoques y Métodos

En la actualidad, el aprendizaje por refuerzo se ha consolidado como un área en constante evolución dentro de la inteligencia artificial. Como se aprecia en la [Figura 2.3](#), dependiendo del enfoque en el que nos basemos (función de valor, política o una combinación de ambos), existen diversos métodos que permiten abordar problemas complejos en entornos dinámicos e inciertos.

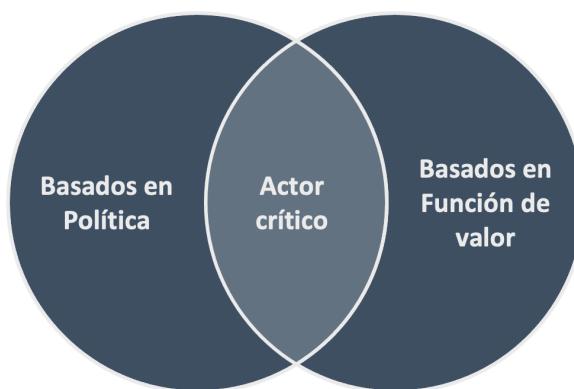


Figura 2.3: Tipos de enfoques para resolver problemas de aprendizaje por refuerzo

A continuación, presentamos algunos de esos métodos:

- **Basados en funciones de valor.**

El objetivo es estimar una función que permita al agente tomar decisiones sin necesidad de una política y para ello solo tendrá en cuenta el valor (recompensa esperada si toma una acción determinada en un estado específico) de las acciones. De esta manera, conseguirá una estimación de la recompensa futura esperada desde un estado y la política se obtendrá a partir de estos valores. Los métodos basados en funciones de valor pueden diferenciarse según cuándo y cómo actualizan sus estimaciones:

- **Actualizan la función de valor solo al final de un episodio.**

Este tipo de métodos pertenecen a los Monte Carlo methods ([MC](#)) y requieren una experiencia completa, es decir, la actualización de la función de valor se realiza una vez finalizado el episodio, basándose en el promedio de los retornos observados para cada estado. Estos métodos son adecuados para problemas episódicos, donde no se requiere una respuesta inmediata después de cada acción y se puede esperar a la finalización del episodio para realizar la actualización del valor.

- **Actualizan la función de valor en cada paso.**

Estos métodos se encuentran dentro de la familia Temporal Difference methods ([TD](#)), se trata de una combinación de los métodos de Montecarlo y la programación dinámica. A diferencia de los métodos de Montecarlo la actualización de la función de valor se lleva a cabo con estimaciones futuras y no se realiza al completar la experiencia completa. Son muy empleados en entornos en línea o continuos, donde es necesaria una actualización rápida después de cada acción. Entre los más destacados se pueden señalar:

- **DQN**

Los métodos DQN son una extensión del Q-learning, algoritmo de Aprendizaje por Refuerzo basado en valores. Durante el empleo de Q-learning, el agente aprende una función de valor $q(s,a)$ que estima la recompensa esperada acumulada al tomar la acción (a) en el estado (s) y posteriormente seguir una política óptima. La función se actualiza por medio de la ecuación de Bellman que se muestra en la [Ecuación 2.3](#).

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (2.3)$$

Ecuación 2.3: Ecuación de Bellman (Q-learning)

donde:

- α es la tasa de aprendizaje,
- γ es el factor de descuento,
- r_t es la recompensa inmediata.

- **Basados en políticas.**

Este enfoque se centra en aprender una política que maximice la recompensa esperada sin la necesidad de obtener una función de valor. Para ello, el agente realiza la elección de las acciones según la política que sigue y no el valor de dichas acciones. Podemos destacar:

- **REINFORCE**

Su comportamiento se centra en realizar la actualización de la política al final del proceso. El objetivo es ir ajustando la política para que aumente la posibilidad de que se produzcan las acciones que llevan a las mejores recompensas.

- **Actor-Critic ([AC](#)).**

Por último, nos quedaría la combinación de los dos enfoques anteriores, donde se empleará la función de valor y la política para que el agente seleccione la acción que sea mejor en

cada estado. Para ello, utiliza dos redes neuronales una para el actor (basada en la política y decidirá que acción se toma en cada estado) y otra para el crítico (basada en la función de valor y evaluará lo buena o mala que ha sido la acción seleccionada para ese estado). Existen ciertas variaciones que señalamos a continuación:

- **Advantage Actor-Critic (A2C).**

En este caso, el crítico al evaluar la acción dada, no sólo indicará lo buena o mala que es, sino que también mostrará cuanto mejor puede ser, esto genera buena estabilidad.

- **Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C).**

Se realiza el mismo procedimiento que en A2C pero se entrena en paralelo a muchos agentes que interactúan con copias independientes del entorno, lo que permite explorar el entorno de manera más efectiva y eficiente.

- **PPO**

Este algoritmo de aprendizaje por refuerzo, desarrollado en 2017 por John Schulman⁷, entrena la red de política de un agente, o lo que es lo mismo, la función que el agente utiliza para tomar decisiones. Esto evita actualizaciones agresivas de la política, realizando pequeñas actualizaciones por bloques o rondas y no al final del proceso. Esta manera de trabajar garantiza que la política actualizada no sea demasiado diferente a la anterior para que se produzcan mínimas varianzas en el entrenamiento.

La manera de evitar las actualizaciones agresivas es por medio de una función de perdida que se encarga de poner límites a la magnitud del cambio en la política en cada paso del entrenamiento. Esta función, también llamada función objetivo, está definida por una serie de términos, los cuales se describen a continuación, y que aseguran la maximización de la política mientras se mantienen la estabilidad y se favorece la exploración.

- **Ratio de probabilidad ($r_t(\theta)$):**

Como se aprecia en la Ecuación 2.4, se trata del cociente entre la probabilidad que asigna la nueva política π_θ y la política anterior $\pi_{\theta_{\text{old}}}$ a la acción a_t tomada en el estado s_t .

$$r_t(\theta) = \frac{\pi_\theta(a_t|s_t)}{\pi_{\theta_{\text{old}}}(a_t|s_t)} \quad (2.4)$$

Ecuación 2.4: Término de entropía

Este ratio indica cuánto ha cambiado la política en cuanto a la probabilidad de la acción ejecutada.

⁷John Schulman, Doctor en Ciencias de la Computación en la Universidad de California Berkeley. <http://joschu.net>

- **Estimación de la ventaja (\hat{A}_t):**

Representa cuánto mejor (o peor) es la acción a_t en el estado s_t comparada con la expectativa general para ese estado. Se encarga de guiar la actualización, acciones con ventaja positiva deberían aumentar su probabilidad, y con ventaja negativa disminuirla.

- **Clipping (recorte)**

El recorte como se aprecia en la [Ecuación 2.5](#), limita el ratio para evitar que su valor se desvíe demasiado de 1, es decir, para prevenir cambios grandes en la política.

$$\text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) \quad (2.5)$$

Ecuación 2.5: Clipping

Donde ϵ es un valor pequeño.

- **Función de pérdida del crítico ($L^{VF}(\phi)$)**

El crítico, que estima la función de valor $V_\phi(s_t)$, se entrena minimizando el error cuadrático medio entre su predicción y el retorno observado R_t como muestra la [Ecuación 2.6](#).

$$L^{VF}(\phi) = \mathbb{E}_t[(V_\phi(s_t) - R_t)^2] \quad (2.6)$$

Ecuación 2.6: Función de pérdida del crítico

- **Término de entropía ($S[\pi_\theta](s_t)$)**

Está definido por la [Ecuación 2.7](#) y su objetivo es fomentar la exploración, manteniendo la política suficientemente aleatoria y evitando que el agente se estanque.

$$S[\pi_\theta](s_t) = - \sum_a \pi_\theta(a|s_t) \log \pi_\theta(a|s_t) \quad (2.7)$$

Ecuación 2.7: Término de entropía

La función objetivo combina todos estos términos como se muestran en la [Ecuación 2.8](#)

$$L(\theta, \phi) = \mathbb{E}_t[\min(r_t(\theta)\hat{A}_t, \text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon)\hat{A}_t) - c_1(V_\phi(s_t) - R_t)^2 + c_2S[\pi_\theta](s_t)] \quad (2.8)$$

Ecuación 2.8: Función objetivo para el algoritmo PPO

Donde:

- El primer término es el objetivo de la política con recorte para estabilidad.
- El segundo término es la pérdida del crítico para mejorar la función de valor.
- El tercero es el término de entropía para mantener exploración.
- Los coeficientes c_1 y c_2 balancean la importancia de cada término durante el entrenamiento.

La función objetivo está diseñada para maximizar el rendimiento mientras previene actualizaciones inestables, y fomenta la exploración mediante la entropía. Estas características hacen de PPO un algoritmo robusto y flexible, adecuado para problemas complejos, incluyendo entornos multiagente y tareas con espacios de acción continuos.

2.2. Aprendizaje por refuerzo en entornos multiagente (MARL)

El aprendizaje por refuerzo multiagente tiene como objetivo estudiar cómo se comportan varios agentes mientras comparten el mismo entorno. Cada agente puede contar con metas individuales o colectivas, lo que puede afectar a las dinámicas en la toma de decisiones surgiendo la aparición de escenarios donde prime la competitividad o sea necesaria la cooperación. Este nuevo contexto gana relevancia cuando barajamos posibles aplicaciones como el control de tráfico, robótica colaborativa o gestión de recursos.

2.2.1. Aprendizaje individual vs. aprendizaje multiagente

Como hemos visto anteriormente, en el aprendizaje por refuerzo individual un solo agente aprende en un entorno estacionario, el cual, responde con cierta predictibilidad a las acciones del agente. Si ahora ese mismo entorno lo compartimos con más agentes, la respuesta que reciba cada uno no dependerá sólo del entorno, puesto que, las acciones de todos los agentes están interrelacionadas. Esto implicará ciertos aspectos relevantes:

- Como las respuestas, además de depender del entorno, también lo harán de las acciones del resto de agentes, el entorno dejará de ser estacionario y pasará a ser no estacionario desde la perspectiva de cada agente. Esto puede ocasionar que las reglas, recompensas o dinámicas varíen, como consecuencia de que los agentes también están aprendiendo.
- Es necesario considerar que el escenario puede tomar diferentes aspectos, nos podemos encontrar en uno competitivo, donde un agente solo consigue su objetivo a expensas de

otros agentes y por lo tanto, las recompensas serán totalmente opuestas, es decir, si un agente recibe una recompensa el resto será penalizado. Podemos encontrarnos en un escenario de cooperación, donde todos los agentes obtendrán las mismas recompensas. Y también podría darse el caso en el que nos situásemos en un escenario mixto, donde contemos tanto con elementos de competencia como de cooperación, y dependiendo de la situación, obtengamos recompensas opuestas o iguales.

- En este nuevo enfoque, como se debe tener en cuenta lo que hará cada uno de los agentes, el objetivo de aprendizaje no es siempre maximizar una recompensa individual. Aquí, lo ideal es encontrar un equilibrio de los agentes, es decir, una situación estable en la que ningún agente tenga incentivo para cambiar su estrategia. De esta manera, aprenderán a convivir y coordinarse con otros buscando situaciones estables que beneficien al conjunto o aprenderán a competir contra otros buscando ventajas que beneficien a sí mismos.

2.2.2. Enfoques y Métodos

En el aprendizaje por refuerzo multiagente condiciona la elección del enfoque y la técnica de entrenamiento más adecuada. A continuación se describen algunos métodos relevantes para este trabajo, agrupados según el tipo de escenario.

- **Métodos para entornos competitivos.**

En los entornos competitivos, donde los agentes tienen objetivos contrapuestos es fundamental desarrollar estrategias robustas que maximicen la recompensa de un agente en detrimento de los demás.

- **Self-Play**

Permite a un agente mejorar progresivamente al jugar contra versiones anteriores de sí mismo. Es especialmente útil cuando no se dispone de un oponente externo o cuando se desea generar oponentes con niveles de habilidad crecientes.

- **Minimax-Q**

El agente considera el peor escenario posible (estrategia óptima del oponente) y ajusta su comportamiento para maximizar su rendimiento bajo esa condición.

- **Métodos para entornos cooperativos.**

En entornos cooperativos, todos los agentes comparten el mismo objetivo y recompensa. La clave está en la coordinación y el aprendizaje conjunto.

- **PPO**

Permite aprender políticas estables en entornos complejos. En MARL, puede utilizarse de forma descentralizada o coordinada entre agentes que comparten políticas o recompensas.

- **QMIX**

Descompone la función de valor conjunta en funciones de valor individuales de los agentes, asegurando que las políticas individuales contribuyen al objetivo global. Utilizará una red neuronal para combinar los valores individuales de forma coherente.

- **Métodos para entornos mixtos.**

En escenarios mixtos, los agentes deben aprender cuándo cooperar y cuándo competir. Aquí se requiere un equilibrio entre adaptabilidad y estabilidad, ya que las recompensas pueden estar parcialmente alineadas.

- **MADDPG**

Cada agente aprende su propia política, pero el entrenamiento se realiza de manera centralizada teniendo en cuenta las acciones de los demás. Esto permite modelar comportamientos diferenciados y adaptativos en entornos con interacciones mixtas.

- **Win or Learn Fast Policy Hill Climbing ([WoLF-PHC](#))**

Adapta la tasa de aprendizaje del agente dependiendo de si está “ganando” o “perdiendo”, favoreciendo la exploración en momentos de bajo rendimiento y la estabilidad cuando se están obteniendo buenos resultados.

Es importante tener en cuenta que en los escenarios competitivos se priorizan métodos que permitan a los agentes ser robustos frente a oponentes que intentan minimizar su rendimiento. En cambio, en los entornos cooperativos, el objetivo principal es lograr una coordinación eficiente entre agentes para maximizar el desempeño colectivo. Por último, los entornos mixtos requieren métodos que sean capaces de adaptarse a situaciones cambiantes, manteniendo al mismo tiempo cierta estabilidad, ya que los agentes deben aprender a colaborar o competir según el contexto.

2.2.3. Retos y Desafíos

Cuando trabajamos con un aprendizaje por refuerzo multiagente tenemos que enfrentarnos a una serie de desafíos, más allá de los que nos encontrábamos con un solo agente. A continuación destacamos los más relevantes:

- **Escalabilidad.**

Al aumentar el número de agentes en un entorno, crece el tamaño del espacio de estados

y acciones haciéndolo más complejo, esto complica la actualización de la función de valor y de la política, y por consiguiente, dificulta un aprendizaje eficiente y una toma de decisiones óptimas.

- **No estacionariedad.**

En un entorno multiagente, los diferentes agentes están aprendiendo al mismo tiempo en el mismo entorno. Esto alterará constantemente la dinámica desde la perspectiva de cada agente, complicando la toma de decisiones de cada uno.

- **Competencia.**

Encontrarnos en un escenario competitivo puede derivar en comportamientos inestables, los agentes pueden centrarse en maximizar sus propias recompensas y no atender al perjuicio que están causando al rendimiento global del sistema.

- **Coordinación.**

En escenario cooperativos, es necesario que los agentes tomen decisiones compatibles para lograr un comportamiento conjunto eficiente. Si no hay coordinación, puede que incluso tomando buenas decisiones por separado, el equipo no logre el objetivo o lo haga de forma ineficiente.

- **Selección de equilibrios.**

Lograr un equilibrio entre competencia y cooperación resulta fundamental en el contexto del aprendizaje multiagente. En entornos mixtos, donde los intereses de los agentes están parcialmente alineados, siendo necesario implementar mecanismos que promuevan la colaboración cuando sea beneficiosa, sin comprometer la eficacia individual de cada agente.

- **Robustez.**

Puede darse el caso que se asuman observaciones perfectas del entorno y de las acciones de los demás, lo cual es poco realista cuando lo aplicamos al mundo real.

- **Diseño del objetivo de aprendizaje.**

Definir objetivos que equilibren estabilidad y adaptabilidad continua sin una solución clara que permita dicho equilibrio.

- **Rendimiento.**

En escenarios prácticos, es deseable garantizar un buen rendimiento y además, un comportamiento aceptable durante el proceso de aprendizaje.

Abordar estos desafíos exige combinar distintos tipos de herramientas, algunas que permiten manejar la incertidumbre, otras que simplifican las tareas, otras que permiten aproximar soluciones cuando los cálculos exactos no son viables, y también aprovechar todo el conocimiento previo que se tenga sobre el entorno o la tarea.

2.3. Transferencia de conocimiento

Cuando hacemos referencia a la transferencia de conocimiento entre entornos, nos referimos a la capacidad de reutilizar información aprendida en un entorno relativamente simple, para mejorar el rendimiento o acelerar el aprendizaje en otro entorno más complejo. Su uso puede aportar múltiples beneficios como la reducción del tiempo de entrenamiento, la mejora en la exploración del entorno, aplicación en entornos donde es difícil encontrar información como es el mundo real o fomentar la generalización que le ayude a evitar el sobreajuste.

2.3.1. Transferencia de conocimiento a entornos multiagentes

Como ya hemos mencionado anteriormente, la transición de entornos de un solo agente a entornos multiagente introduce varios retos. Uno de los principales es que pasaremos de entornos estacionarios a no estacionarios, ya que los agentes modifican constantemente la dinámica del entorno. Por lo tanto, ya sea con un enfoque colaborativo o competitivo, adaptarnos a un entorno donde contaremos con un número mayor de agentes conllevará un costo en todos los aspectos. Pero, para evitar dicho coste, tendremos que tener en cuenta qué tipo de transferencia vamos a realizar para saber qué técnicas de transferencia de conocimiento será mejor aplicar.

- Si la transferencia es entre entornos, se transferirá el conocimiento del entorno origen hacia otro entorno objetivo diferente. En este caso, se modificarán las dinámicas, el número de agentes y la estructura espacial del entorno.
- Por otro lado, si la transferencia es entre agentes, se transferirá el conocimiento aprendido por un agente a otros agentes, pero manteniendo el mismo entorno.
- También se puede dar el caso que un mismo agente aplique conocimiento previamente adquirido en un contexto a un nuevo contexto, pero asumiendo un rol diferente.
- Otra situación que puede surgir es que todos los agentes compartan la misma arquitectura y roles, por lo que la transferencia sería directa.
- O por el contrario, que los agentes tengan roles u observaciones distintas, por lo que la transferencia debe adaptarse.

Teniendo en cuenta el contexto del presente trabajo, podríamos necesitar una transferencia entre entornos, puesto que el entorno Pong es diferente al entorno Quadrapong. Además, también podríamos necesitar una transferencia entre agentes, ya que se transferiría el conocimiento de los agentes entrenados en el entorno Pong a los agentes que conforman los diferentes equipos en el entorno Quadrapong. Pero, podríamos entender que los agentes tengan observaciones o roles distintos. Lo que se daría en el entorno Quadrapong, para los agentes que se encuentren en la parte superior e inferior de la pantalla, el desplazamiento será a izquierda y derecha a diferencia del aprendido en el entorno Pong que es arriba y abajo.

Por lo tanto, sería de mucha utilidad aplicar la transferencia de conocimiento a este trabajo, porque gracias a ella, los agentes no necesitarán aprender desde cero cómo interactuar con la pelota, reduciendo coste temporal y computacional. Y pueden centrarse en aprender cómo coordinarse con su compañero de equipo o cómo adaptarse al nuevo entorno, y/o a nuevos roles u oponentes.

2.3.2. Técnicas de transferencia de conocimiento

Existen múltiples técnicas para realizar la transferencia de conocimiento entre entornos, el uso de estas dependerá del tipo de transferencia que vayamos a realizar (entre entornos, entre agentes, ...), a continuación presentamos algunos de ellas.

■ Parameter Sharing.

Útil especialmente cuando los agentes cuentan con el mismo espacio de acciones y observaciones. En nuestro caso, los agentes de Quadrapong comparten inicialmente los mismos parámetros, durante el entrenamiento se introducirán mecanismos de especialización para que cada agente aprenda su rol, esto repercutirá en que:

- Reduce el número de parámetros.
- Facilita la coordinación.
- Mejora la eficiencia de entrenamiento.

■ Policy Distillation.

Enfoque en el que un agente experto actúa como profesor de los agentes inexpertos, los cuales aprenderán imitando. Tendremos agentes expertos en jugar a Pong y los agentes de Quadrapong aprenderán a imitarlos inicialmente realizándose los ajustes necesarios progresivamente.

■ Transfer Learning / Parameter Transfer.

Esta técnica reutilizará los parámetros aprendidos (pesos) en una red neuronal de origen

(Pong) para acelerar el aprendizaje de nuevas tareas en entornos más complejos (Quadrapong). Los parámetros podrán mantenerse fijos (congelados) o continuar ajustándose mediante entrenamiento adicional (Fine-tuning).

- **Fine-tuning.**

Después de transferir los pesos de una red entrenada en Pong, se realiza entrenamiento adicional en Quadrapong para adaptarse a la nueva tarea sin partir de cero, en el caso de Quadrapong para los agentes situados en la parte superior e inferior, adaptación de su dirección de movimiento.

- **Meta-learning.**

El objetivo es que el agente aprenda una política base que pueda adaptarse rápidamente a nuevas tareas con pocos datos. En MARL, puede ayudar a que los agentes adapten sus estrategias al comportamiento de otros agentes, incluso si estos cambian.

- **Feature Extraction Transfer.** Es ideal para cambios de perspectivas o rol, consiste en reutilizar capas intermedias de una red entrenada para extraer características relevantes (pelota, palas, ...), y conectar nuevas capas de decisión adaptadas al nuevo entorno (nuevas posiciones de los agentes).

2.3.3. Retos y Desafíos

Es importante considerar que para que una transferencia de conocimiento se lleve a cabo de manera óptima, sería conveniente que se cumpliesen una serie de condiciones. Por un lado, sería interesante que las tareas de aprendizaje sean lo más similares posibles en términos de objetivos, dinámica o estructura. Por otro lado, que las observaciones, las transiciones o recompensas entre el entorno de origen y el de destino no difieran excesivamente. Y también, que sea posible aplicar un modelo comparable o compatible en ambos entornos, de modo que las condiciones aprendidas en el entorno original puedan reutilizarse de forma efectiva en el nuevo entorno.

Entre los principales desafíos que presenta la transferencia de conocimiento podemos señalar:

- **Cambio en la dimensionalidad del espacio de observaciones y acciones.**

Contar con más agentes implica que las observaciones incorporen información de todos ellos. Esto puede requerir una reestructuración del modelo original.

- **Naturaleza no estacionaria del entorno.**

Como ya se ha mencionado, el comportamiento de múltiples agentes afecta directamente a la dinámica del entorno. Por ello, el conocimiento aprendido en un entorno estacionario puede no ser estable en un entorno no estacionario.

- **Desalineamiento de objetivos.**

La función de recompensa en el entorno de origen puede ser muy diferente a la del entorno objetivo, lo que obliga a adaptarla, al igual que le ocurrirá a las estrategias aprendidas.

- **Transferencia negativa.**

En algunos casos, el conocimiento transferido puede ser contraproducente si no se adapta adecuadamente al nuevo entorno, especialmente si las dinámicas estratégicas cambian drásticamente. Esto puede ralentizar el aprendizaje o impedir que se adopten nuevas conductas más eficientes.

A pesar de estos desafíos, un uso adecuado de las técnicas de transferencia que aseguren el cumplimiento de las condiciones señaladas anteriormente, puede acelerar significativamente el aprendizaje en entornos complejos, facilitar la generalización y permitir una exploración más eficiente del entorno, algo crucial dado que el espacio de búsqueda es exponencialmente mayor.

2.4. Líneas de investigación previas

En este trabajo se ha tomado como eje una serie de estudios centrados en el aprendizaje por refuerzo y su extensión a entornos multiagente, con un enfoque especial en la cooperación, competencia y transferencia de conocimiento entre entornos. A continuación, se resumen las principales líneas de investigación consultadas y su aporte al diseño del proyecto.

1. El artículo **Multiagent Cooperation and Competition with Deep Reinforcement Learning** [4] constituye la base fundamental del proyecto, en él se exploran las dinámicas de cooperación y competencia entre dos agentes autónomos, entrenados por medio de DQN en el entorno del videojuego Pong. Se ha empleado una metodología basada en la modificación del esquema de recompensas para inducir comportamientos cooperativos o competitivos. Esto ha servido de inspiración directa para los apartados iniciales, [apartado 3.2](#) y [apartado 3.3](#), donde se establece el entorno de Pong, se definen los agentes y sus modelos.
2. Por otro lado, el trabajo **Playing Atari Ball Games with Hierarchical Reinforcement Learning** [13], explora el uso de instrucciones de manuales de usuario o de expertos para acelerar el aprendizaje y mejorar el rendimiento en entornos como Pong. Este enfoque destaca el valor de las representaciones de alto nivel y del conocimiento previo, lo cual se relaciona estrechamente con la parte final de la implementación, [apartado 3.6](#) dedicado a la transferencia de conocimiento desde un entorno previamente dominado (Pong) a otro más complejo (Quadraball).

3. La comparativa presentada en **Investigation of independent reinforcement learning algorithms in multi-agent environments** [18], proporciona un análisis de algoritmos independientes en entornos cooperativos, competitivos y mixtos. Este trabajo se alinea con la metodología del proyecto, donde se utilizará inicialmente agentes que aprenden de manera independiente a explorar sus limitaciones y ventajas. Esta tarea será llevada a cabo en la parte de entrenamiento y aprendizaje [apartado 3.4](#), y posteriormente se introducirán mecanismos de interacción para observar cómo evolucionan los comportamientos adaptativos.
4. Llegado el momento de considerar varios agentes interactuando, el artículo **A Comprehensive Survey of Multiagent Reinforcement Learning** [19], ofrece una visión exhaustiva del aprendizaje por refuerzo multiagente, permitiendo situar el presente trabajo en el contexto más amplio de este campo. Incluye los objetivos que persiguen los agentes (estabilidad del aprendizaje o capacidad de adaptación al comportamiento de otros agentes) o los diferentes tipos de entornos (cooperativos, competitivos o mixtos).
5. Asimismo, el método propuesto en **Actor-Mimic: Deep Multitask and Transfer Reinforcement Learning** [20], introduce una método capaz de aprender múltiples tareas de forma simultánea y transferir conocimiento a nuevas tareas sin supervisión experta. Este enfoque apoya la transición entre Pong y Quadrapong, abriendo la posibilidad de acelerar el aprendizaje en entornos nuevos.
6. Finalmente, en cuanto a la transferencia entre dominios, los artículos **Visual Transfer Between Atari Games Using Competitive Reinforcement Learning** [21] y **Knowledge Transfer in Deep Reinforcement Learning via an RL-Specific GAN-Based Correspondence Function** [22], abordan distintas estrategias para reutilizar políticas aprendidas en un entorno inicial a un entorno nuevo. Estos trabajos refuerzan la viabilidad y relevancia de la fase de transferencia a Quadrapong, explorando cómo los modelos preentrenados pueden ser ajustados o adaptados, con el objetivo de reducir el tiempo de entrenamiento y mejorar la generalización.

En conjunto, estos estudios permiten enmarcar el trabajo final de máster entre el aprendizaje multiagente y la transferencia de conocimiento a entornos más complejos, estableciendo una base tanto teórica como práctica para explorar la evolución de comportamientos colaborativos y competitivos, así como la reutilización eficiente de conocimientos aprendidos a nuevos contextos de juego.

2.5. Aplicaciones reales y Tendencias emergentes

La transferencia de conocimiento entre entornos de aprendizaje por refuerzo, especialmente en escenarios multiagente, está adquiriendo un papel clave en el desarrollo de sistemas inteligentes más generalizables, adaptativos y escalables. A partir de este proyecto, se pueden identificar diversas aplicaciones directas en problemas reales, tendencias emergentes y líneas de trabajo futuro.

■ Aplicaciones reales.

Los avances en entornos como PettingZoo permiten desarrollar, probar y analizar dinámicas multiagente con gran control y bajo coste. Aun así, un paso natural es la transferencia hacia entornos reales, lo que implica desafíos añadidos. Las técnicas desarrolladas en este trabajo, como la reutilización del conocimiento adquirido, son aplicables en ámbitos como:

- **Robótica colaborativa**, donde múltiples robots deben coordinarse para mover objetos, ensamblar piezas, dar asistencia o explorar entornos. En el siguiente artículo **Multi-agent Collaborative Perception for Robotic Fleet: A Systematic Review** [23], se presentan los hallazgos de varios artículos de investigación sobre percepción colaborativa en flotas multirobóticas.
- **Sistemas de vehículos autónomos**, donde los coches deben interactuar con el entorno u otros vehículos en tiempo real, para hacer eficientes sus desplazamientos. Atendiendo al artículo **Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems** [24], se muestra un enfoque de control predictivo para controlar un sistema de dirección delantera en un vehículo autónomo.
- **Logística multiagente** (almacenamiento, reparto, ...), donde drones o vehículos comparten recursos, rutas y objetivos. Según el artículo **Evaluating city logistics measures using a multi-agent model** [25], podemos encontrar una metodología que mediante un modelo multiagente permite evaluar medidas logísticas urbanas considerando el comportamiento de diversos actores involucrados en el transporte urbano de mercancías.

■ Tendencias emergentes.

Las tendencias actuales en transferencia de conocimiento se orientan hacia una mayor generalización y adaptación flexible a contextos nuevos o cambiantes. Entre ellas destacan:

- **Meta-aprendizaje**, donde se desarrollan agentes capaces de adaptarse rápidamente a nuevos roles, reglas o compañeros de equipo. En el artículo **Meta-Learning in Neural Networks: A Survey** [26], se describe el panorama actual del meta-aprendizaje.

- **Aprendizaje curricular**, en el que los agentes se entrena de forma progresiva en tareas de dificultad creciente, facilitando así la obtención de habilidades transferibles. Podemos observar en el artículo **Evolutionary Population Curriculum for Scaling Multi-Agent Reinforcement Learning** [27], como el aprendizaje curricular escala el aprendizaje por refuerzo multiagente incrementando progresivamente la población de agentes durante el entrenamiento.

En definitiva, la transferencia de conocimiento a entornos multiagente representa un paso fundamental hacia el desarrollo de sistemas más robustos, colaborativos y eficientes. A medida que los algoritmos de aprendizaje por refuerzo evolucionan, se espera que estas técnicas se apliquen cada vez más en situaciones reales, donde la capacidad de aprender de forma continua, adaptarse a cambios y cooperar con otros agentes será crucial. Este trabajo constituye un punto de partida para futuras investigaciones centradas en la mejora de técnicas de transferencia de conocimiento a entornos multiagente complejos y con aplicaciones en entornos reales.

Capítulo 3

Diseño e implementación

Como ya se ha mencionado, en este trabajo se realiza el entrenamiento de agentes en el clásico juego de Atari Pong, en concreto se selecciona el entorno pong_v3 proporcionado por PettingZoo. Posteriormente, se ha realizado la transferencia del conocimiento adquirido al entorno quadrapong_v4 de Atari, también proporcionado por PettingZoo, un entorno más complejo donde aumenta el número de agentes participantes.

3.1. Herramientas de desarrollo y recursos utilizados

Para el desarrollo de este proyecto se han empleado diversas herramientas de "software" y "hardware" que han permitido implementar, entrenar y evaluar los agentes de manera eficiente:

- **Herramientas de software**

- **Python:**

Lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado en proyectos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje por Refuerzo. Se ha empleado la versión 3.10.16, aprovechando su compatibilidad con las principales librerías de Deep Learning y entornos multiagente.

- **PettingZoo:**

Librería estándar para entornos de Aprendizaje por Refuerzo Multiagente. Proporciona interfaces consistentes y entornos como pong_v3 y quadrapong_v5 utilizados en este proyecto.

- **SuperSuit:**

Colección de "wrappers" para el preprocessamiento de entornos en PettingZoo, incluyendo reducción de color, redimensionamiento de imágenes y apilado de frames, esenciales para preparar los datos de entrada a las redes neuronales.

- **PyTorch:**

Librería de aprendizaje profundo utilizada para implementar las redes neuronales de los agentes. Permite la construcción de arquitecturas convolucionales personalizadas y el entrenamiento eficiente sobre "hardware" acelerado.

- **NumPy:**

Librería para operaciones numéricas, utilizada tanto para gestionar los datos de experiencia de los agentes como para el almacenamiento y análisis de métricas de entrenamiento.

- **Matplotlib y Pandas:**

Herramientas auxiliares para la representación gráfica de resultados (recompensas, impactos, victorias) y la gestión de datos para su análisis posterior.

- **TensorBoard:**

Se ha utilizado TensorBoard para una visualización más estructurada de métricas durante el entrenamiento.

- **Recursos de hardware**

El proyecto se ha desarrollado utilizando un equipo MacBook Pro M4 con las siguientes especificaciones:

- **Central Processing Unit (CPU):** 14 núcleos
- **GPU:** 20 núcleos
- **Neural Engine:** 16 núcleos
- **Memoria unificada:** 24GB
- **Almacenamiento:** 1 TB Solid State Drive ([SSD](#))

El uso del motor Metal Performance Shaders ([MPS](#)) de Apple ha permitido aprovechar la aceleración por GPU disponible en el MacBook para entrenar los modelos de aprendizaje profundo de manera más eficiente, especialmente en la etapa de entrenamiento de agentes en entornos de alta carga computacional como Pong y Quadrapong.

Estas herramientas de "software" y recursos "hardware" han sido seleccionados cuidadosamente para garantizar la compatibilidad, la eficiencia de entrenamiento y la correcta implementación de los métodos de Aprendizaje por Refuerzo Multiagente que constituyen la base del presente proyecto.

3.2. Establecer el entorno de Pong

Pong es un videojuego clásico de Atari en el que dos jugadores controlan unas paletas en lados opuesto de la pantalla, el objetivo de ambos es devolver una pelota evitando que esta sobrepase su paleta. Es un juego de carácter competitivo donde el vencedor es aquel que consigue sobrepasar la paleta rival en mayor número de ocasiones, siendo 21 la máxima puntuación alcanzable.

Las características principales que presenta este entorno son:

- **Espacio de acciones**

Se cuenta con un espacio de acción discreto con 6 acciones posibles.

- **0:** no hacer nada.
- **1:** disparar / "sacar o servir" la pelota.
- **2:** mover la paleta hacia la derecha (según su perspectiva).
- **3:** mover la paleta hacia la izquierda (según su perspectiva).
- **4:** mover la paleta hacia la derecha mientras se saca la pelota.
- **5:** mover la paleta hacia la izquierda mientras se saca la pelota.

- **Espacio de observaciones**

Cada agente recibe como observación una imagen RGB¹ del entorno cuyas dimensiones son (210, 160, 3). Esto significa que la imagen cuentan con una altura de 210 píxeles, un ancho de 160 píxeles y está representada por los canales de color (rojo, verde, azul) como se aprecia en la Figura 3.1.

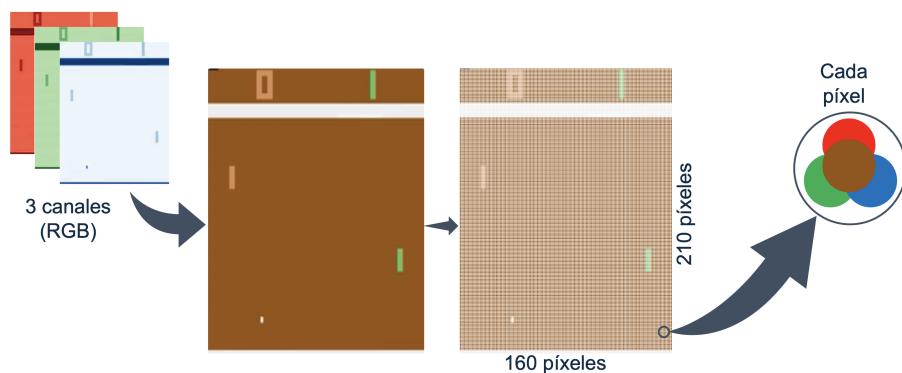


Figura 3.1: Espacio de observaciones

¹Red, Green, Blue (RGB). <https://es.wikipedia.org/wiki/RGB>

- **Agentes**

Son dos los agentes presentes en el entorno, y están definidos de manera simétrica con el mismo espacio de observaciones y acciones. Lo único que los diferencia es la posición en el entorno, (first_0) controla la paleta del jugador de la izquierda y (second_0) controla la paleta del jugador de la derecha.

- **Recompensas**

Son el principal mecanismo para que los agentes aprendan y se reparten asignando +1 para el agente que anota y -1 para el que recibe el punto. Los saques se cronometran y si el jugador no saca en los 2 segundos siguientes a recibir la pelota, recibe -1 punto.

Para facilitar el entrenamiento de los agentes, Supersuit proporciona para los entornos de PettingZoo "wrappers" o capas intermedias. Estos "wrappers" aplicados a un entorno de entrenamiento permiten transformar las observaciones para evitar problemas con el tamaño de la resolución, prescindir de información redundante y proporcionan la información necesaria sobre movimiento y velocidad. En este trabajo se aplican los siguientes "wrappers":

- **Reducción de color (color_reduction_v0)²**. Se convierte la imagen RGB en escala de grises, el color no es relevante y por ello, se reduce de 3 canales a 1.
- **Redimensión (resize_v1)³**. Se redimensiona la imagen a 84x84 píxeles, este tamaño nos ahorra costes computacionales.
- **Apilamiento (frame_stack_v1)⁴**. Apila los últimos 4 frames consecutivos, esto nos añade información temporal, algo inexistente en imágenes fijas.

Con este tratamiento podemos capturar además del estado actual, el movimiento de los objetos en pantalla. Este preprocesamiento es esencial para mejorar la eficiencia y estabilidad del entrenamiento.

3.3. Definir los agentes y sus modelos

Como ya hemos mencionado, contamos con dos agentes denominados first_0 y second_0, que se entrena de manera independiente utilizando el algoritmo PPO. Cada agente dispone de un modelo propio basado en una red neuronal convolucional (CNN, convolutional neural

²color_reduction_v0. https://pettingzoo.farama.org/api/wrappers/supersuit_wrappers/#color_reduction_v0

³resize_v1. https://pettingzoo.farama.org/api/wrappers/supersuit_wrappers/#resize_v1

⁴frame_stack_v1. https://pettingzoo.farama.org/api/wrappers/supersuit_wrappers/#frame_stack_v1

network) para procesar las observaciones visuales del entorno y decidir sus acciones. Esta separación asegura que cada agente aprende exclusivamente a partir de su experiencia local, sin compartir directamente los parámetros con el adversario.

Arquitectura de la política (CnnPolicy))

La política de cada agente está implementada mediante una red neuronal convolucional profunda que podemos apreciar en la [Figura 3.2](#), diseñada para extraer características relevantes de las imágenes procesadas del entorno.

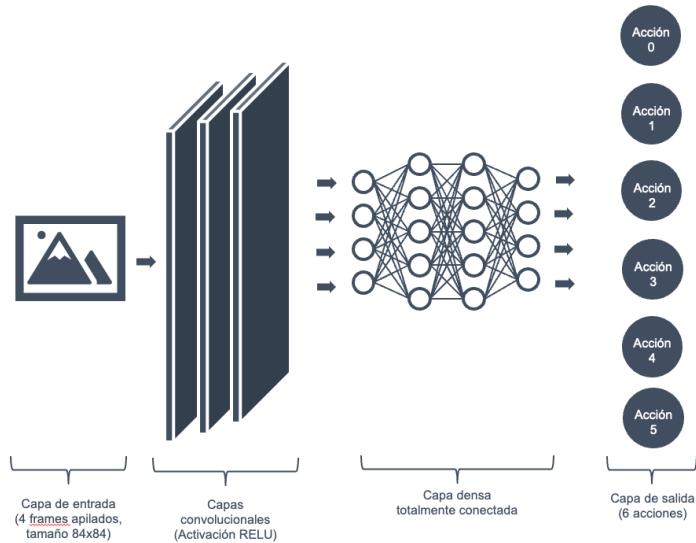


Figura 3.2: Red neuronal convolucional

El flujo típico de la red es:

- **Entrada:**

Cuatro frames consecutivos en escala de grises de tamaño 84x84 píxeles, apilados para capturar información temporal y dinámica.

- **Bloques convolucionales:**

Varias capas convolucionales con activación RELU⁵ o unidad lineal rectificada. Se trata de una función que ayuda a que la red aprenda representaciones más complejas, esto le permite detectar patrones visuales complejos, tales como movimientos y trayectorias de la pelota y las palas.

- **Capas totalmente conectadas:**

Transforman la representación convolucional en un vector de características denso.

⁵Rectified Linear Unit (RELU). [https://es.wikipedia.org/wiki/Rectificador_\(redes_neuronales\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Rectificador_(redes_neuronales))

- **Salida:**

Una capa que genera la distribución de probabilidades sobre las acciones posibles (6 acciones discretas en Pong), modelando la política estocástica $\pi_\theta(a|s)$.

El uso de una política estocástica permite al agente explorar el espacio de acciones durante el entrenamiento y mejorar la robustez frente a entornos dinámicos.

3.4. Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Pong

Como ya se ha mencionado, el entrenamiento de los agentes en este proyecto sigue un enfoque basado en aprendizaje por refuerzo profundo en entornos multiagente, utilizando la arquitectura PPO. Se ha implementado para cada agente de forma independiente, pero se utiliza la API paralela de PettingZoo, que permite que ambos agentes interactúen simultáneamente con el entorno.

3.4.1. Estructura del entrenamiento

Para entrenar cada agente, se utiliza la librería Stable Baselines3, que proporciona una implementación optimizada de PPO⁶ con soporte para políticas basadas en CNN. El entorno se vectoriza con DummyVecEnv⁷ y se adapta para que las imágenes sean correctamente interpretadas mediante VecTransposeImage⁸.

El entrenamiento ha sido diseñado para ser incremental, se ha decidido separar los entrenamientos en rondas para tener un mayor control sobre estos, permitiéndonos guardar "checkpoints" periódicos. Esto nos proporciona la garantía de poder pausar y reanudar el entrenamiento sin perdida de información, y así poder realizar los ajustes que sean necesarios, evitando la repetición de entrenamientos innecesarios. También nos ha facilitado la evaluación o monitoreo en fases intermedias, obteniendo una visualización del entrenamiento que nos permita detectar problemas. Además, al trabajar con imágenes el consumo de recursos es mucho mayor, las imágenes ocupan bastante espacio en memoria y si entrenamos durante millones de pasos sin parar, la memoria puede saturarse poco a poco. El empleo de rondas de entrenamiento facilita la liberación de recursos, evitando que la memoria se sobrecargue. El proceso de entrenamiento se ha organizado en bloques de 1.000 rondas, las cuales cuentan con 5.000 pasos de interacción con el entorno. Se han alcanzando un total de 5.000 rondas de entrenamiento, lo que equivale a 25.000.000 de pasos de interacciones con el entorno.

⁶ Implementación optimizada de PPO. <https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master/modules/ppo.html>

⁷ DummyVecEnv. https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master/guide/vec_envs.html

⁸ VecTransposeImage. https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master/_modules/stable_baselines3/common/vec_env/vec_transpose.html

El entrenamiento se realiza bajo un enfoque simétrico y competitivo, donde ambos agentes alternan su entrenamiento enfrentándose al modelo actualizado del adversario (self-play). En cada ronda, primero se entrena al agente first_0 en un entorno donde el agente second_0 actúa con su política fija actual (modelo PPO previamente entrenado) en caso de existir o aleatorio si no hubiese modelo previo. Posteriormente, el agente second_0 se entrena enfrentándose al modelo actualizado de first_0. Este enfoque simétrico permite que ambos agentes evolucionen de manera competitiva y equilibrada, adaptándose continuamente a las tácticas del adversario.

Características importantes del enfoque PPO utilizado:

- **Política estocástica:**

Utilizando modelos basados en PPO se aprende directamente una política probabilística que permite balancear exploración y explotación.

- **Actualización estable:**

El algoritmo limita las actualizaciones agresivas de la política mediante su función objetivo con "clipping", lo que mejora la estabilidad del entrenamiento.

- **Capacidad multiagente:**

Gracias a los "wrappers" y a la estructura de entrenamiento alternado, los agentes aprenden a adaptarse dinámicamente a un oponente en constante evolución.

- **Preprocesamiento visual:**

Se aplica reducción de color, redimensionamiento y apilamiento de frames para facilitar el aprendizaje eficiente de la política.

Durante el entrenamiento, cada agente actualiza su política para maximizar la función objetivo de PPO, que incluye mecanismos para garantizar actualizaciones estables y controladas. El agente aprende a mapear observaciones visuales a acciones mediante una política estocástica, balanceando exploración y explotación.

Esta organización ha facilitado controlar el progreso del aprendizaje de manera segmentada, facilitar evaluaciones intermedias y detectar posibles problemas de convergencia o estabilidad.

3.4.2. Ciclo de aprendizaje de los agentes

Durante el entrenamiento con PPO, cada agente sigue un ciclo de aprendizaje iterativo y autónomo basado en la interacción continua con el entorno, que podemos apreciar en la Figura 3.3.

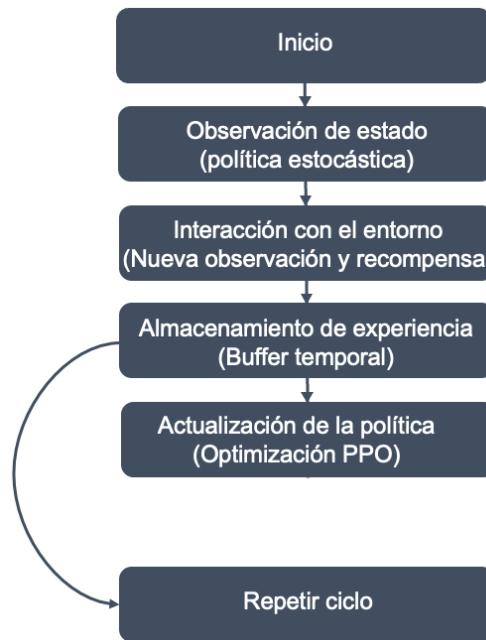


Figura 3.3: Diagrama del ciclo de entrenamiento de un agente en Pong

Las diferentes etapas del ciclo de aprendizaje son:

1. Observación del estado:

El agente recibe como entrada una representación visual procesada del entorno, consistente en un conjunto de frames apilados que capturan la dinámica temporal.

2. Selección de acción:

La política estocástica del agente, genera una distribución de probabilidad sobre las acciones posibles. La acción a ejecutar se muestrea de esta distribución, permitiendo un balance entre exploración y explotación.

3. Interacción con el entorno:

Tras ejecutar la acción seleccionada, el entorno devuelve la nueva observación, la recompensa obtenida, y señales que indican si el episodio ha terminado o fue truncado.

4. Almacenamiento de la experiencia:

PPO utiliza las experiencias recientes recolectadas durante la interacción secuencial con el entorno, almacenándolas en un buffer temporal para ser usadas en la actualización posterior.

5. Actualización de la política:

Tras recopilar un conjunto suficiente de transiciones (experiencias), el agente actualiza los parámetros de su política y función de valor optimizando la función objetivo de PPO.

6. Repetición de ciclo:

El proceso se repite iterativamente, permitiendo que el agente mejore progresivamente su política, ajustándose tanto a las dinámicas del entorno como al comportamiento del adversario.

Este ciclo garantiza un entrenamiento estable y eficiente, aprovechando las ventajas de PPO para adaptar las políticas en entornos visuales complejos y multiagente.

3.4.3. Configuración del entrenamiento en Pong

Inicialmente, los agentes han sido entrenados en un entorno estrictamente competitivo replicando el escenario clásico de Pong. No existe comunicación o coordinación entre agentes y se aplica la siguiente función de recompensa:

- Si un agente consigue anotar un punto (la pelota sobrepasa al rival), recibe +1.
- Si un agente falla (la pelota le sobrepasa), recibe -1.
- En caso de "stalling" (no servir tras dos segundos), el agente inactivo recibe -1.

Esta función de recompensa refuerza estrategias puramente competitivas, orientadas a maximizar la ventaja sobre el oponente.

3.5. Establecer el entorno de Quadrapong

Quadrapong es un videojuego que extiende el juego Pong a cuatro agentes, organizados en dos equipos de dos jugadores cada uno como se aprecia en la [Figura 3.4](#).



Figura 3.4: Entorno Quadrapong [2]

Este entorno exige mayor coordinación, ya que cada equipo debe controlar dos paletas, pero en esta ocasión además de los lados opuestos de la pantalla, también hay que defender la

parte superior e inferior de la misma. El objetivo, al igual que en Pong, es que ambos equipos devuelvan una pelota evitando que esta sobrepase las dos paletas que conforman su equipo. También es un juego de carácter competitivo donde el equipo vencedor es aquel que consigue sobrepasar las paletas rivales en mayor número de ocasiones, siendo 21 la máxima puntuación al igual que en Pong.

Las características principales que presenta este entorno son:

■ Espacio de acciones

Se cuenta con un espacio de acción discreto con 6 acciones posibles.

- **0:** no hacer nada.
- **1:** disparar / "sacar o servir" la pelota.
- **2:** mover la paleta hacia arriba en la pantalla.
- **3:** mover la paleta hacia la derecha en la pantalla.
- **4:** mover la paleta hacia la izquierda en la pantalla.
- **5:** mover la paleta hacia abajo en la pantalla.

Al contar con espacios de acciones diferentes entre Pong y Quadrapong, es conveniente hacer un mapeo de acciones para que los agentes eviten aprender comportamientos incoherentes y no se vea afectada negativamente la transferencia de conocimiento. Es decir, transferir las acciones "Move up", "Move down" de Pong, a las acciones "Move up", "Move down", "Move left", "Move right" de Quadrapong, según la posición del jugador en pantalla.

■ Espacio de observaciones

Cada agente también recibe como observación una imagen RGB del entorno con las mismas dimensiones (210, 160, 3).

■ Agentes

En este entorno contamos con 4 agentes, definidos de manera simétrica con los mismos espacios de observaciones y de acciones. Lo único que los diferencia es la posición en el entorno, (first_0) controla la paleta del jugador de la izquierda, (second_0) controla la paleta del jugador de la derecha, (third_0) controla la paleta del jugador superior y (fourth_0) controla la paleta del jugador inferior.

■ Recompensas

Al contar con una dinámica de equipos, anotar un punto le da al equipo +1 de recompensa y a al oponente -1 de recompensa. Los saques son cronometrados y si el jugador no saca dentro de los 2 segundos posteriores a recibir la pelota, su equipo recibe -1 punto.

Al ser el espacio de observación de cada agente una imagen de 210x160x3 píxeles (RGB) del área de juego, como ocurre en el entorno Pong, para estandarizar las observaciones y hacerlas compatibles con la arquitectura de los agentes de Pong, se aplican los mismos "wrappers" de procesamiento:

- Reducción de color (`color_reduction_v0`).
- Redimensión (`resize_v1`).
- Apilamiento (`frame_stack_v1`).

Este procesamiento permite mantener la consistencia con los modelos de Pong y facilita la transferencia de conocimiento.

La configuración inicial para entrenamiento en Quadrapong sigue el siguiente orden:

- Se crean 4 agentes PPO independientes (uno por jugador).
- Se transfiere conocimiento desde los modelos de Pong entrenados previamente.
- Se estructuran equipos de dos jugadores para estudio de comportamiento.
- Se configuran los mismos tipo de entrenamiento que en Pong para asegurar la comparabilidad inicial.

El entorno Quadrapong amplía el desafío de Pong al introducir múltiples agentes simultáneos, interacciones más complejas y nuevas dinámicas emergentes. Gracias al uso de "wrappers" consistentes y una API paralela, se facilita la transferencia de conocimiento y la continuación del entrenamiento de los agentes. En la [Tabla 3.1](#) se resaltan las diferencias clave entre los dos entornos utilizados en el trabajo.

Característica	Pong (<code>pong_v3</code>)	Quadrapong (<code>quadrapong_v5</code>)
Número de agentes	2 (uno frente a otro)	4 (uno en cada lado de la pantalla)
Equipos	No (competencia individual)	Sí (equipos de 2 jugadores)
Espacio de acciones	6 acciones (discretas)	6 acciones (discretas)
Tipo de observación	Imagen 210x160x3 (RGB)	Imagen 210x160x3 (RGB)
Procesamiento de observaciones	Resize (84x84), FrameStack (4)	Resize (84x84), FrameStack (4)
Dinámica de juego	1 pelota, 2 líneas de defensa	1 pelota, 4 líneas de defensa
Interacciones	Simple: uno contra uno	Complejas: múltiples rebotes
Función de recompensa	+1 al anotar, -1 al encajar, -1 si tarda en sacar	+1 al anotar, -1 al encajar, -1 si tarda en sacar
Dificultad estratégica	Media (predicción y reacción)	Alta (coordinación y anticipación)
Entorno en PettingZoo	<code>pong_v3</code>	<code>quadrapong_v5</code>
Tipo de API	ParallelEnv (acciones simultáneas)	ParallelEnv (acciones simultáneas)

Tabla 3.1: Comparativa entre los entornos Pong y Quadrapong en PettingZoo.

3.6. Transferencia de conocimiento a Quadrapong

Con el objetivo de acelerar el proceso de aprendizaje en entornos de mayor complejidad, se ha implementado una estrategia de transferencia de conocimiento desde los agentes entrenados en el entorno Pong hacia el entorno Quadrapong.

Teniendo en cuenta que el entorno Quadrapong comparte reglas y dinámicas físicas similares a Pong (mismo tipo de pelota, rebote, paletas,...), y que los agentes deben realizar acciones parecidas como mover las paletas y anticipar trayectorias. Se considera que el conocimiento aprendido (detectar la pelota, reaccionar, devolver, ...) es reutilizable y relevante.

Este proceso busca demostrar que se puede aprovechar la experiencia previa aprendida en una tarea más simple, para acelerar el aprendizaje en la nueva tarea, mejorar el rendimiento inicial y comparar la eficiencia frente a agentes que parten desde cero.

Para ello, se utilizan los pesos aprendidos por los agentes en el entorno de Pong (origen), y se aplican como punto de partida en el nuevo entorno Quadrapong (destino), lo que nos permite:

- No reiniciar el aprendizaje desde cero.
- Reutilizar lo aprendido en una tarea similar.
- Continuar el entrenamiento en una nueva tarea más compleja.

3.6.1. Técnica empleada

Una vez alcanzado un comportamiento adecuado de los agentes entrenados en el entorno origen, se aplica la técnica de "Transfer Learning / Parameter Transfer" para transferir los pesos de las redes neuronales previamente entrenadas al entorno destino. En concreto, se reutilizan los pesos del entrenamiento de los agentes de Pong, siendo asignados a los nuevos agentes de Quadrapong.

A partir de esta base, los agentes continúan su proceso de entrenamiento en el nuevo entorno por medio de "Fine-tuning", esta transferencia no implica compartir parámetros durante el entrenamiento a diferencia de "Parameter Sharing", sino que actúa como una inicialización de los agentes en un entorno más complejo.

El conocimiento aprendido (por ejemplo, seguir la pelota, devolverla con precisión, ...) se reutiliza de forma eficiente en el nuevo entorno, acelerando el aprendizaje y permitiendo estudiar cómo se comportan distintos estilos en el nuevo escenario. Esta estrategia evita la necesidad de entrenar las redes desde cero, proporcionando a los agentes una base de conocimiento previo que acelera su adaptación a la nueva dinámica de juego.

3.6.2. Asignación de agentes y equipos

Teniendo en cuenta que la dinámica de juego se basa en "Batalla por equipos de dos jugadores", donde, el equipo 1 está formado los agentes (first_0 y third_0) y el equipo 2 por los agentes (second_0 y fourth_0). Para estructurar de manera lógica la transferencia de conocimiento, se ha realizado una asignación específica de los pesos entrenados en Pong a los diferentes agentes de Quadrapong. La estrategia ha consistido en que los miembros de cada equipo de Quadrapong compartan los pesos aprendidos por un mismo agente de Pong, como se puede apreciar en la [Tabla 3.2](#).

Equipo	Agentes	Pesos transferidos desde
Equipo 1	first_0 + third_0	first_0 (Pong)
Equipo 2	second_0 + fourth_0	second_0 (Pong)

Tabla 3.2: Asignación de agentes y transferencia de pesos desde Pong a Quadrapong.

La motivación para asignar el conocimiento de esta manera se debe, a la idea de mantener una serie de principios:

- **Consistencia de estilos de juego**

Al compartir pesos, los agentes de un mismo equipo parten de una base estratégica común, lo que favorece la aparición de comportamientos coordinados.

- **Comparabilidad**

Permite comparar el desempeño de dos equipos con estilos inicialmente diferenciados (por ejemplo, competitivos vs colaborativos si los agentes de Pong son entrenados bajo distintas modalidades).

- **Facilidad de análisis**

Resulta sencillo hacer un seguimiento de la evolución de cada equipo en función del tipo de conocimiento transferido, identificando patrones en su comportamiento.

- **Adaptabilidad espacial**

Al asignar un agente a posiciones laterales (first_0, second_0) y otro a posiciones verticales (third_0, fourth_0), se maximiza la cobertura de todo el campo de juego, permitiendo observar cómo los agentes adaptan su estrategia a diferentes ubicaciones físicas en el entorno.

3.7. Entrenamiento y aprendizaje de los agentes en Quadrapong.

Este apartado describe los procesos y estructuras de entrenamiento implementados para los agentes en el entorno de Quadrapong, incluyendo el entrenamiento desde cero y el entrenamiento con Parameter Transfer y Fine-tuning. Se explica también el ciclo de aprendizaje de los agentes para ambos casos.

3.7.1. Estructura del entrenamiento desde cero

Se ha seguido la misma línea de entrenamiento que se ha empleado para el entrenamiento de Pong pero adaptada a un entorno con 4 agentes. Se vuelve a utilizar la librería Stable Baselines3 con su implementación optimizada de PPO que cuenta con soporte para políticas basadas en CNN. Se ha vuelto a vectorizar el entorno con DummyVecEnv y se han adaptado las imágenes para que VecTransposeImage las interprete correctamente. En este caso se han alcanzando un total de 1.000 rondas de entrenamiento, lo que equivale a 5.000.000 de pasos de interacciones con el entorno.

3.7.2. Ciclo de aprendizaje de los agentes en entrenamiento Quadrapong desde cero

Durante el entrenamiento, al igual que se realizaba en Pong, cada agente sigue un ciclo de aprendizaje iterativo y autónomo, descrito en la [Figura 3.3](#) y que presenta las etapas siguientes:

- Observación del estado
- Selección de acción
- Interacción con el entorno
- Almacenamiento de la experiencia
- Actualización de la política
- Repetición de ciclo

3.7.3. Estructura del entrenamiento después de transferencia de conocimiento

En este caso el entrenamiento se inicia con la carga de los modelos preentrenados (Transfer Learning), estos modelos ya cuentan con un entrenamiento de 5000 rondas. A continuación serán adaptándose mediante un mapeo de acciones para alinear con el espacio de acciones de Quadrapong. A partir de ahí, se sigue la misma línea de entrenamiento durante 2.000 rondas más(Fine-tuning).

3.7.4. Ciclo de aprendizaje de los agentes en entrenamiento Quadrapong con Transfer Learning y Fine-tuning

Si observamos la [Figura 3.5](#), el ciclo de aprendizaje durante cada ronda de entrenamiento se diferencia de los anteriores tan solo, en la carga de los pesos de los modelos preentrenados.

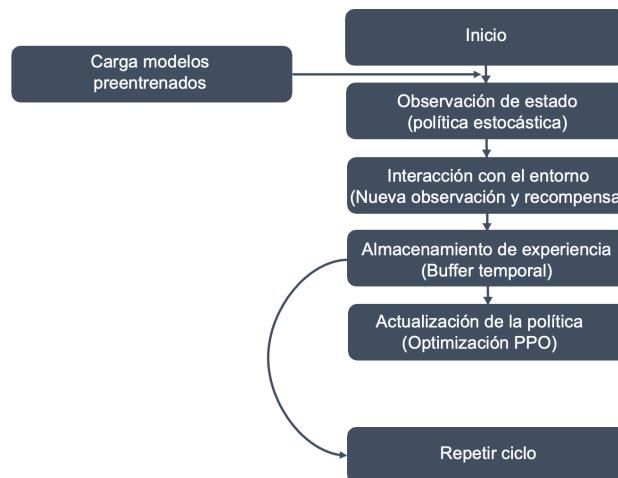


Figura 3.5: Diagrama del ciclo de entrenamiento de un agente en Quadrapong con transferencia de conocimiento

En este caso, antes de la observación del estado habría que añadir la siguiente etapa adicional:

- **Carga modelos preentrenados**

En la ronda 1, los modelos para cada agente se inicializan cargando los pesos de los modelos preentrenados de Pong para las capas convolucionales mediante transferencia de conocimiento, adaptando la política al nuevo entorno (mapeo de acciones).

3.7.5. Configuración del entrenamiento en Quadrapong

En Quadrapong, seguimos manteniendo un entrenamiento en un entorno estrictamente competitivo para los agentes. No existe comunicación o coordinación entre agentes y se aplica la misma función de recompensa que en Pong, pero a nivel de equipos y no de agentes.

3.8. Recolección de datos y métricas

Durante los entrenamientos, se registran una serie de métricas de interés que nos permiten analizar la evolución de la política de los agentes, la calidad del aprendizaje y poder realizar comparaciones entre agentes.

Las diferentes métricas que se registran por cada agente en los diferentes entornos son:

- **Pérdidas promedio:**

Se registran la pérdida para evaluar la convergencia y estabilidad del entrenamiento. Estas métricas permiten detectar posibles problemas como sobreajuste, falta de convergencia o políticas demasiado deterministas.

- **Recompensa acumulada:**

Se registra la suma de recompensas obtenidas por cada agente para evaluar su rendimiento a lo largo del entrenamiento.

- **Impactos por agente:**

Los impactos de la pelota en las palas de cada agente se monitorean como una métrica específica que refleja la interacción directa con el entorno. En el [Apéndice A](#), se detalla como ha sido el proceso que nos ha permitido obtener los impactos de la pelota en cada pala.

- **Checkpoint y registros para análisis:**

Cada 100 rondas, se guardan los modelos (checkpoints) para preservar el progreso.

Esta recopilación de métricas garantiza un seguimiento detallado y profundo del aprendizaje, facilitando tanto la evaluación del desempeño como la identificación temprana de posibles problemas durante el entrenamiento.

3.9. Pruebas y ajustes

Con el objetivo de validar el aprendizaje de los agentes, se han llevado a cabo diversas pruebas tanto en el entorno Pong como en Quadrapong, que nos permitan analizar las recompensas obtenidas, los impactos realizados con la pelota y las victorias totales en una serie de partidas.

En concreto, se han ejecutando partidas simples de enfrentamientos en condiciones controladas cada 100 rondas de entrenamiento para observar la progresión de las políticas a lo largo del tiempo. En cada evaluación se registraron:

- La recompensa obtenida por durante la partida, que refleja su capacidad para ganar puntos y controlar el juego.
- El número de impactos de la pelota contra la pala de cada agente, métrica que permite analizar la interacción directa y la capacidad defensiva/ofensiva de los agentes.

También se ha realizado cada 500 rondas de entrenamiento, evaluación durante partidas múltiples (5 en total), con el objetivo de ver que capacidad tiene cada agente o equipo de imponerse a su rival, y de que manera lo hace, para ello hemos registrado:

- El número de victorias conseguidas durante las cinco partidas, así comprobamos cuál de los agentes o equipo está alcanzando una política más efectiva.
- El número de impactos acumulados en las 5 partidas de cada agente con la pelota, esto nos permite comprobar la evolución del aprendizaje.

Estas pruebas permiten entender mejor cómo influye el aprendizaje previo y su naturaleza en la dinámica multiagente compleja.

Las pruebas implementadas han permitido no solo analizar el aprendizaje de los agentes en Pong, sino también, comparar en Quadrapong las diferencias entre un entrenamiento con transferencia de conocimiento y otro sin ella.

Capítulo 4

Presentación de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras el entrenamiento de los agentes utilizando el algoritmo Proximal Policy Optimization (PPO) en el entorno competitivo de Pong y Quadrapong.

4.1. Análisis de recompensas en Pong

La [Figura 4.1](#) muestra la evolución de las recompensas obtenidas por ambos agentes a lo largo del entrenamiento. La gráfica muestra que las recompensas de los dos agentes están altamente relacionadas de forma inversa. Cuando uno de los agentes obtiene una recompensa alta, el otro suele tener una recompensa negativa equivalente. Esto refleja la naturaleza competitiva del entorno, donde un agente solo puede ganar a costa del otro.

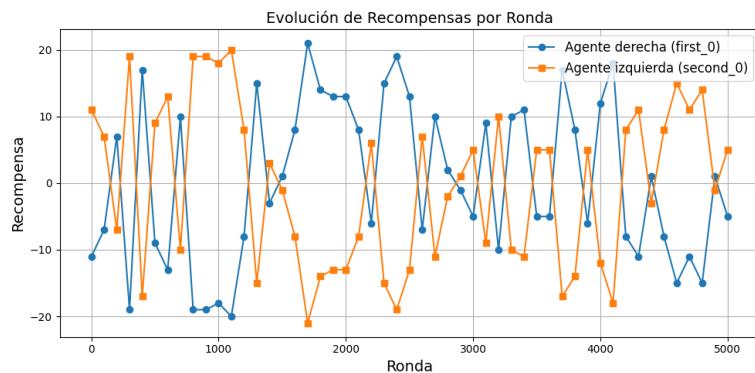


Figura 4.1: Evolución de recompensas por rondas en Pong

A lo largo de las rondas, se observa una tendencia a la alternancia entre agentes en el dominio de los episodios. No hay un agente que sistemáticamente supere al otro en todas las rondas, lo cual sugiere que ambos están aprendiendo y adaptándose en paralelo.

En las primeras rondas se aprecia una mayor dispersión y variabilidad en las recompensas, lo que podría indicar una fase inicial de exploración o aprendizaje inestable. A medida que avanza el entrenamiento, aparecen algunos patrones donde encontramos alternancia de recompensas positivas y negativas, lo cual podría sugerir que el entrenamiento comienza a mostrar señales de cierto equilibrio competitivo y algo de convergencia.

4.2. Análisis de impactos de la pelota en Pong

La Figura 4.2 presenta el número de impactos de la pelota con las palas de cada agente por ronda. El conteo de impactos de la pelota contra las palas de los agentes ofrece una perspectiva complementaria al desempeño basado en recompensas. Un mayor número de impactos sugiere una mayor capacidad para controlar la pelota y mantener el intercambio durante el juego.

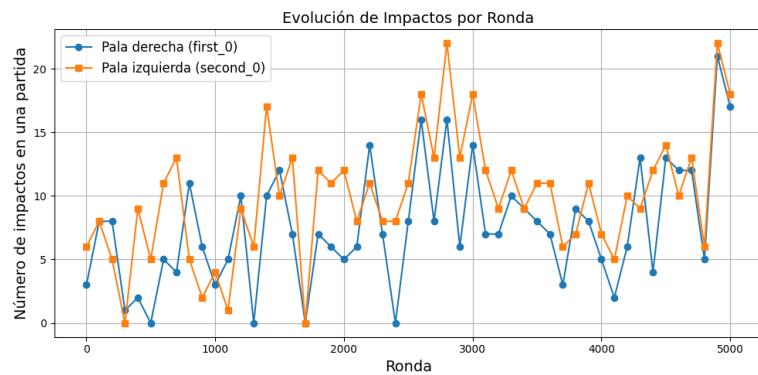


Figura 4.2: Evolución de impactos por rondas en Pong

Se observa una tendencia ascendente en el número total de impactos conforme avanzan las rondas, esto puede interpretarse como un progreso en el aprendizaje. Los agentes van adquiriendo habilidades para golpear la pelota, lo que alarga los intercambios de golpes.

Esta gráfica también refuerza la idea de que los agentes están aprendiendo y adaptándose de forma conjunta y simétrica.

Aunque hay picos y caídas ocasionales, el comportamiento parece presentar algo de regularidad y estabilidad en las últimas rondas. Esto nos indica que un entrenamiento más extenso, generaría un crecimiento paulatino de los impactos, que sería una consecuencia de una mejora en el aprendizaje.

4.3. Análisis de partidas múltiples en diferentes etapas

El número total de impactos con la pelota registrados por cada agente durante la ejecución de 5 partidas de evaluación en ciertas etapas del entrenamiento, se presenta en la [Figura 4.3](#).

En ella, podemos observar una tendencia general al aumento del número total de impactos a medida que avanza el entrenamiento, especialmente notable a partir de la ronda 1000. Este comportamiento sugiere que los agentes han mejorado su capacidad para predecir y reaccionar a los movimientos de la pelota, lo que permite intercambios más prolongados y menos errores no forzados.

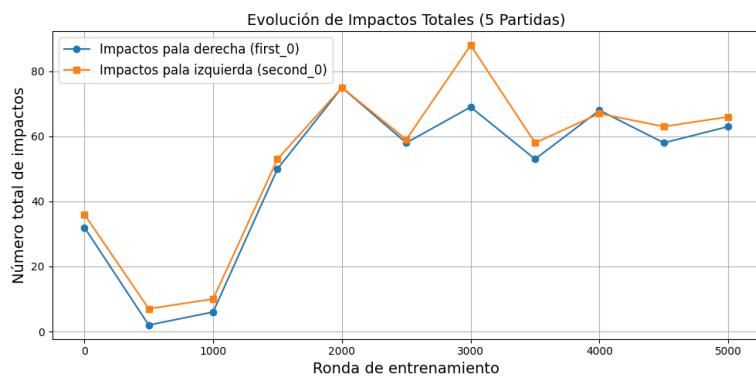


Figura 4.3: Impactos durante cinco partidas de cada agente en Pong

En las primeras rondas, los valores son significativamente bajos, lo cual refleja un desempeño limitado por parte de los agentes. Esto es consistente con el inicio del entrenamiento, donde los agentes aún están en fase de exploración y prueba de estrategias, siendo los errores frecuentes y los intercambios de golpes muy breves.

Aunque hay ligeras fluctuaciones, ambas palas muestran un número de impactos similar en cada conjunto de partidas, lo que es coherente con la naturaleza del juego Pong, en el que los intercambios suelen mantener simetría y solo difieren ligeramente en función del desenlace del punto.

En las rondas finales, el número de impactos por partida tiende a estabilizarse, manteniéndose en valores altos y relativamente constantes. Esta estabilización puede interpretarse como cierta convergencia del aprendizaje, y se intuye que aplicando un entrenamiento más prolongado, la curva seguiría en crecimiento rumbo a una política óptima.

La evolución del número de victorias obtenidas por cada agente que muestra la [Figura 4.4](#), presenta un patrón de oscilación en las victorias entre ambos agentes a lo largo de las rondas, especialmente a partir de la ronda 3000, cuando los agentes parecen adaptarse el uno al otro, y se van turnando en la victoria total o parcial. Este comportamiento sugiere indicios de adaptación o evolución.

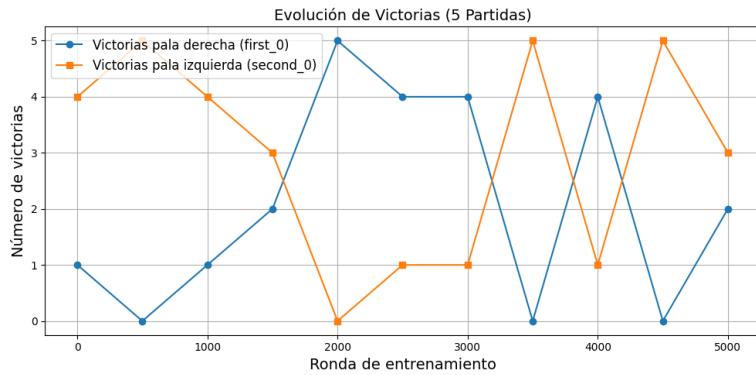


Figura 4.4: Victorias durante cinco partidas de cada agente en Pong

A lo largo del entrenamiento, el reparto total de victorias parece bastante equilibrado. Esta simetría global sugiere que los agentes están alcanzando un nivel de habilidad comparable, algo que se va vislumbrando en la fase final del entrenamiento con la aparición de alternancia entre agentes a la hora de ganar el mayor computo de partidas.

4.4. Comparación entre entrenamiento con y sin transferencia de conocimiento

Se realiza un análisis comparativo entre dos estrategias de entrenamiento en Quadrapong, una que utiliza transferencia de conocimiento desde los modelos entrenados en Pong y otra que entrena los agentes desde cero en Quadrapong sin preentrenamiento.

No se observa un agente claramente dominante durante todo el proceso, sino que ambos se alternan en la obtención de la mayoría de victorias en diferentes fases del entrenamiento.

4.4.1. Análisis de recompensas por equipos en Quadrapong

En esta sección se examinan las recompensas obtenidas por cada equipo en el entorno Quadrapong atendiendo a si es un modelo con Transfer Learning y Fine-tuning o es un modelo entrenado desde cero.

- **Modelo entrenado desde cero.**

Como se aprecia en la Figura 4.5, en las primeras rondas, ambos equipos oscilan en torno a valores cercanos a cero, lo que es coherente con un comportamiento inicial aleatorio propio de las primeras fases de aprendizaje.

4.4. Comparación entre entrenamiento con y sin transferencia de conocimiento 51

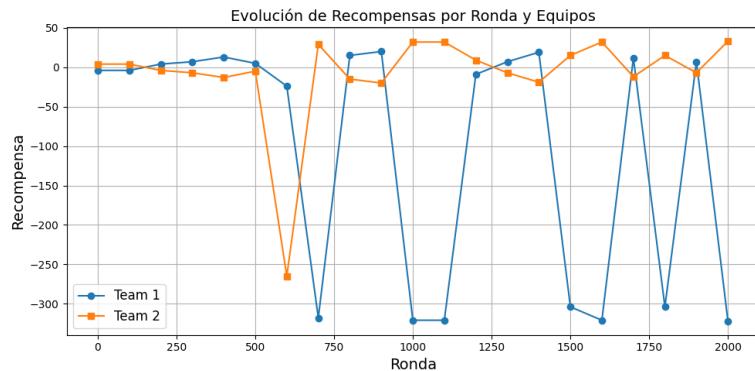


Figura 4.5: Evolución de recompensas por Rondas y Equipos (Sin transferencia de conocimiento)

Sin embargo, a partir de la ronda 600, se observa inestabilidad en el rendimiento del equipo 1, las recompensas caen drásticamente a valores negativos muy altos. Este patrón se repite de forma intermitente. Tras un análisis detallado de los episodios, se identificaron patrones de comportamientos poco funcionales que explican este fenómeno:

- **Intercambios repetitivos entre agentes rivales sin movimiento:**

Dos agentes posicionados frente a frente mantienen un intercambio constante de impactos con la pelota sin moverse ni alterar la trayectoria, generando un bucle de actividad inútil desde el punto de vista estratégico.

- **Rebotes prolongados contra las paredes:**

En este caso, la pelota quedaba atrapada entre un agente y una pared, provocando un patrón repetitivo de rebotes sin que se produjera ningún tipo de progresión o interacción significativa.

El entorno Quadrapong define varias condiciones para truncar (finalizar) un episodio:

- **Duración máxima del episodio:**

Límites de pasos que impiden bucles infinitos o estancamiento si los agentes no interactúan con la pelota.

- **Reinicio por inactividad o no interacción:**

- La pelota no ha sido golpeada por ningún jugador en un número prolongado de frames.
- La pelota ha salido del área de juego y no se puede reiniciar correctamente.
- El marcador no ha cambiado tras muchos pasos (estancamiento).

- **Condiciones de juego injusto:**

Agentes completamente inactivos (evita comportamiento degenerado).

Es muy probable que el entorno esté usando un límite de pasos para truncar el episodio automáticamente, especialmente porque los agentes no muestran señales claras de aprendizaje ni coordinación y el episodio dura demasiado sin progresos reales.

Este tipo de comportamiento explica los descensos significativos en la recompensa del equipo 1. Además de una falta significativa de aprendizaje debido a que, Quadrapong es un entorno mucho más complicado que Pong, y por lo tanto, el número de pasos de entrenamiento aplicado se considera insuficiente, siendo conveniente aumentar el período de entrenamiento.

- **Modelo con Transfer Learning y Fine-tuning.**

En la [Figura 4.6](#), podemos intuir una evolución mucho más estable y progresiva de las recompensas. Estos inicio de estabilidad sugieren que los agentes se han beneficiado en cierto modo de la transferencia de conocimiento desde el entorno Pong, partiendo de una política ya parcialmente adaptada a tareas similares. Gracias a ello, consiguen evitar comportamientos extraños que le lleven a recompensas con altos valores negativo o al truncamiento del episodio, como ocurría en la gráfica anterior.

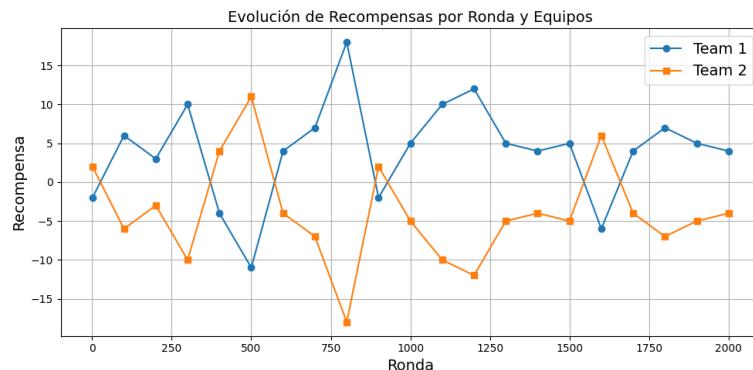


Figura 4.6: Evolución de recompensas por Rondas y Equipos (Con transferencia de conocimiento)

El uso de políticas previamente entrenadas en Pong no solo ayuda en el aprendizaje en Quadrapong, sino que también proporciona una base sobre la que afinar comportamientos específicos del nuevo entorno. Esto nos hace mantener cierto optimismo sobre la efectividad del aprendizaje por transferencia en contextos multiagente.

4.4.2. Análisis de impactos a la pelota por agentes en Quadrapong

En este apartado se estudia la frecuencia y distribución de los impactos de la pelota en las palas de cada agente, información clave para comprender la interacción física y el control del

4.4. Comparación entre entrenamiento con y sin transferencia de conocimiento 53

juego en Quadrapong.

- **Modelo entrenado desde cero.**

En la [Figura 4.7](#), se observa una gran variabilidad e inestabilidad en el número de impactos, con episodios en los que al menos tres de las cuatro palas alcanzan valores extremadamente altos, alineados con los comportamientos irregulares detectados. Esto sugiere que el aprendizaje aún no ha generado una coordinación eficiente entre los agentes.

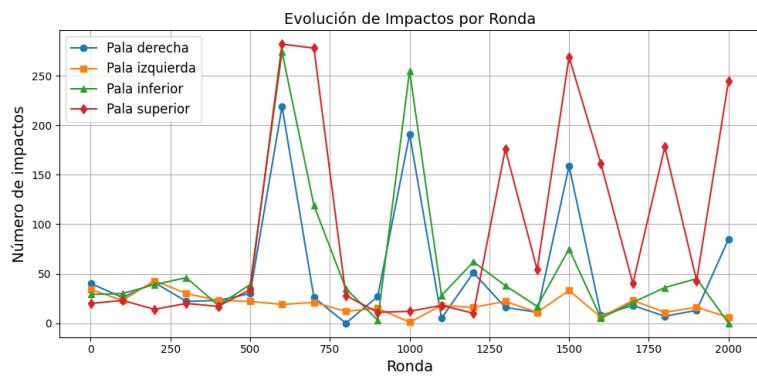


Figura 4.7: Evolución individual de impactos por Rondas (Sin transferencia de conocimiento)

- **Modelo con Transfer Learning y Fine-tuning.**

Analizando la [Figura 4.8](#), se observan algunos patrones con cierto equilibrio y la ausencia de picos inestables similares a los de la anterior gráfica. El número de impactos va estabilizándose a lo largo del tiempo, y en el comportamiento de las palas al final del entrenamiento se vislumbra algo de equilibrio.

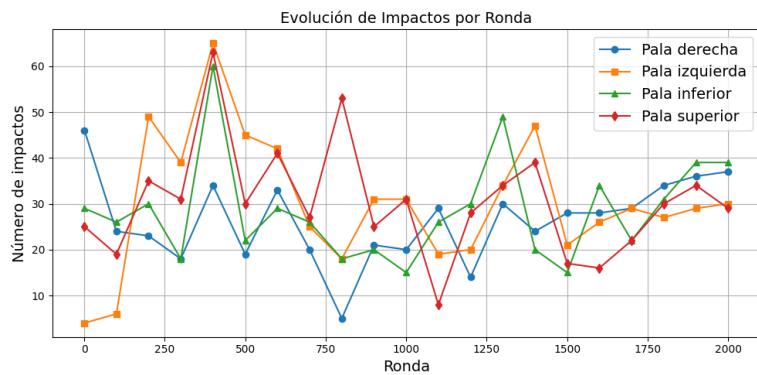


Figura 4.8: Evolución individual de impactos por Rondas (Con transferencia de conocimiento)

En la gráfica del modelo con transferencia, se intuye que este comienza a enfilar el camino

adecuado, pero aún está en una fase temprana del proceso y seguramente en un periodo más largo el equilibrio y la estabilidad sean las señas predominantes en las gráficas.

4.4.3. Análisis de impactos a la pelota por equipos en Quadrapong

En esta ocasión, se estudia la frecuencia y distribución de los impactos de la pelota en las palas a nivel de equipos, facilitando el estudio de la evolución de las estrategias de los equipos durante el juego en Quadrapong.

- **Modelo entrenado desde cero.**

Observando la [Figura 4.9](#), se aprecia un comportamiento inestable en cuanto al número de impactos registrados por equipo. Se observan picos extremos, seguidos de caídas pronunciadas. Este patrón indica que las estrategias aún no están consolidadas y que el control del juego es muy irregular. El final del entrenamiento si se podría interpretar como algo más cercano a un proceso de aprendizaje, pero aún lejos de lo deseable.

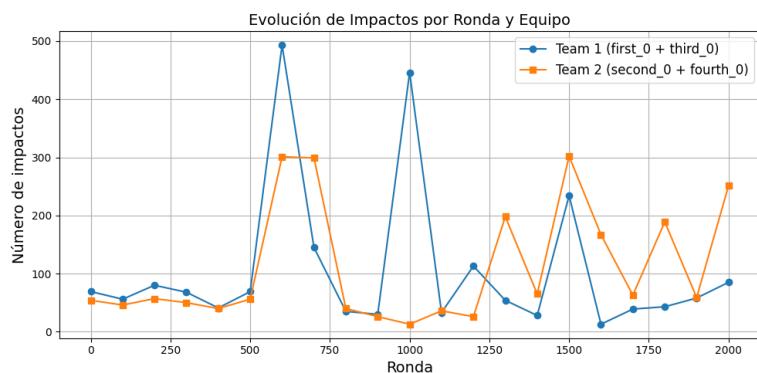


Figura 4.9: Evolución por equipos de impactos por Rondas (Sin transferencia de conocimiento)

- **Modelo con Transfer Learning y Fine-tuning.**

La [Figura 4.10](#) describe una distribución con algo de estabilidad y uniformidad de impactos entre los equipos. Ambos conjuntos parecen describir una evolución más controlada, sin picos extremos ni caídas pronunciadas.

A partir de la ronda 1000, aparentemente se aprecia un comportamiento parejo de ambos equipos. Esto nos podría estar indicando que se empieza a converger hacia una política aceptable.

Este atisbo de regularidad sugiere que los equipos pueden estar aprendiendo a desenvolverse en el entorno, favoreciendo intercambios más sostenidos y menos errores.

4.4. Comparación entre entrenamiento con y sin transferencia de conocimiento 55

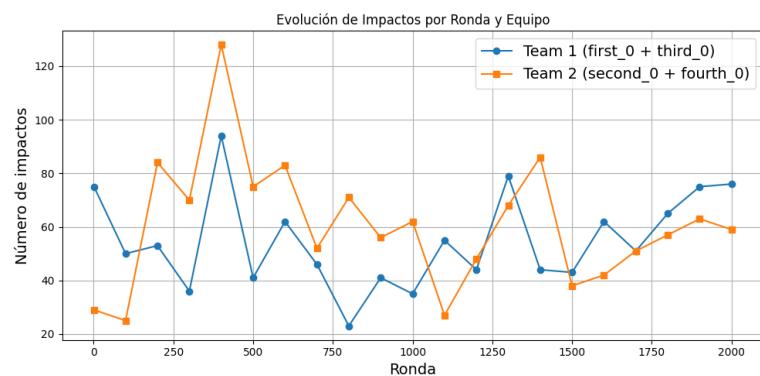


Figura 4.10: Evolución por equipo de impactos por Rondas (Con transferencia de conocimiento)

La transferencia desde Pong podría haber otorgado a los agentes habilidades básicas, que comienzan a consolidarse a medida que se produce el afinamiento específico en Quadrapong.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

■ Conclusiones del trabajo

Tras completar las diferentes evaluaciones a los modelos con los que se ha trabajado, se han alcanzado las siguientes conclusiones.

En el entorno Pong, los resultados obtenidos muestran cierto aprendizaje. La gráfica de recompensas, nos deja intuir patrones que indican correlación. Además, se observa una tendencia hacia el equilibrio en el rendimiento y una mejora técnica en el número y calidad de los impactos con la pelota, lo que indica que, los agentes no solo compiten, sino que se adaptan mutuamente y convergen hacia políticas con cierta solidez.

El entorno Quadrapong, por su parte, presenta una mayor complejidad al introducir dinámicas de equipo y la necesidad de coordinación entre múltiples agentes. El entrenamiento desde cero ha demostrado ser más problemático, con signos de inestabilidad y falta de estrategias eficaces, especialmente en las fases iniciales. En contraste, el uso de políticas previamente entrenadas en Pong ha permitido una mejora parcial, aportando cierta estabilidad y balance en el juego, aunque sin llegar a una coordinación completamente efectiva entre los agentes.

Estas observaciones sugieren que la transferencia de conocimiento puede ser útil en entornos complejos, pero su eficacia depende en gran medida del grado de similitud entre tareas y de la duración y calidad del proceso de fine-tuning.

■ Evaluación crítica del grado de logro de los objetivos iniciales y de la planificación y metodología

Si nos centramos en el objetivo principal, que consistía en investigar la transferencia de conocimiento desde Pong a Quadrapong, evaluando el impacto en la competencia de los agentes. Tenemos que decir, que los resultados obtenidos no permiten confirmar con contundencia la eficacia de la transferencia de conocimiento. Aunque en algunas gráficas se

observan indicios de mejora en estabilidad, equilibrio entre palas y rendimiento general del equipo, estos resultados no son lo suficientemente consistentes ni generalizables como para validar plenamente la hipótesis inicial.

Las recompensas, impactos y victorias no evidencian un salto significativo entre los agentes entrenados desde cero y aquellos que partieron de una política preentrenada en Pong. En algunos casos se observan mejoras puntuales en las fases finales del entrenamiento, pero no se alcanza una ventaja sostenida ni un comportamiento coordinado robusto que permita atribuir los resultados exclusivamente al proceso de transferencia.

Por tanto, se puede concluir que el objetivo inicial se ha abordado, pero no se ha cumplido completamente, ya que los datos obtenidos no permiten validar de forma sólida la utilidad de la transferencia en este contexto específico.

Además, ha quedado pendiente algún objetivo secundario, la exploración de diferentes configuraciones de recompensa (competitivas y colaborativas) podrían potenciar una mejor coordinación y colaboración entre agentes en Quadrapong.

Por otro lado, hubiera sido valioso profundizar en la experimentación con arquitecturas heterogéneas, entrenando inicialmente un agente en Pong con un modelo específico (por ejemplo, DQN o PPO) y otro agente con un modelo distinto. Posteriormente, durante la transferencia de conocimiento a Quadrapong, se podrían haber asignado estos modelos diferentes a equipos distintos o incluso mezclarlos dentro de un mismo equipo. Este planteamiento permitiría analizar de forma más detallada cómo la diversidad de políticas y algoritmos afecta la dinámica competitiva y cooperativa, y qué combinaciones resultan más efectivas en entornos multiagente.

Dadas las circunstancias, serían necesarios un número de rondas de entrenamiento más elevado para consolidar el aprendizaje pero que no se han podido llevar a cabo por falta de tiempo.

Pero hay que tener en cuenta que este trabajo final del máster se inició a mediados de febrero de 2025, con un enfoque inicial basado en el uso del algoritmo Deep Q-Network (DQN). Sin embargo, tras varias semanas de entrenamiento (con intentos de hasta 35 millones de pasos) sin obtener resultados funcionales ni lograr identificar con certeza la causa de dichos fallos, se tomó la decisión crítica de cambiar al algoritmo Proximal Policy Optimization (PPO).

Esta elección se fundamentó en las ventajas conocidas de PPO, mayor estabilidad, mejor gestión de entornos con espacios de acción discretos y continuos, y una convergencia más robusta en tareas complejas.

Una vez establecido PPO como algoritmo principal, se inició el nuevo ciclo de entrenamiento, que, debido a las condiciones computacionales disponibles, implicó tiempos prolongados. Cada bloque de 1000 rondas de entrenamiento requería aproximadamente 7 días de ejecución, lo que supuso un factor limitante importante. En total, se realizaron:

- 5000 rondas en el entorno Pong,
- 2000 rondas en Quadrapong desde cero,
- 2000 rondas adicionales en Quadrapong con transferencia de conocimiento (fine-tuning).

Dado los plazos de entrega del trabajo, no fue viable extender el entrenamiento más allá de estas fases, a pesar de que habría sido deseable para consolidar los resultados obtenidos, especialmente en el caso del fine-tuning.

En este sentido, la planificación inicial debió adaptarse a las circunstancias y limitaciones encontradas, tanto en términos de tiempo como de recursos computacionales. La decisión de cambiar de algoritmo y ajustar la metodología fue acertada y permitió avanzar con un enfoque más viable. Sin embargo, los plazos disponibles no fueron suficientes para realizar entrenamientos más largos o repeticiones sistemáticas.

Este apartado crítico pone de manifiesto que, aunque no se han logrado los objetivos iniciales con el nivel de evidencia esperado, el trabajo ha servido como una aproximación y al problema de la transferencia de conocimiento en entornos multiagente.

Además, ha permitido identificar barreras relevantes como:

- Entrenamientos extremadamente lentos
- Alta demanda de recursos
- Dificultad para realizar repeticiones

lo cual constituye en sí mismo una aportación útil de cara a futuros trabajos en esta línea.

- **Desafíos de sostenibilidad, diversidad y ético-sociales vinculados al proyecto**
Durante el desarrollo del presente trabajo, se ha prestado especial atención a los aspectos de sostenibilidad, diversidad y responsabilidad ética y social. Estos factores, aunque en principio presentan una influencia mínima debido al enfoque simulado del entorno, no deben ser ignorados dadas las implicaciones indirectas que pueden tener, especialmente en el consumo energético.

- **Sostenibilidad**

Durante el desarrollo del proyecto, se ha evaluado la huella de carbono generada en

dos estrategias distintas de entrenamiento de agentes multiagente. El objetivo era comparar la eficiencia energética entre:

1. Enfoque con transferencia de conocimiento

- Entrenamiento previo en el entorno Pong con 2 agentes durante 5000 rondas, seguido de
- Entrenamiento en Quadrapong con 4 agentes durante 2000 rondas, utilizando los pesos aprendidos en Pong.

2. Enfoque sin transferencia de conocimiento

- Entrenamiento desde cero directamente en Quadrapong con 4 agentes durante 2000 rondas.

Resultados de la medición y estimación de huella de carbono:

Estrategia	Entorno(s)	Rondas totales	Huella CO ₂ (kg)	Potencia CPU estimada (W)
Con transferencia	Pong + Quadrapong	5000 + 2000	8,7810 ⁻⁸	60,24
Sin transferencia	Solo Quadrapong	2000	3,9110 ⁻⁸	26,83

Tabla 5.1: Comparativa de huella de carbono entre estrategias de entrenamiento

Si estudiamos la [Tabla 5.1](#), a primera vista el enfoque sin transferencia parece más eficiente por generar una huella menor. Sin embargo, esta impresión es engañosa si se analiza el número de agentes entrenados y la escalabilidad del entorno. El entrenamiento en Pong involucra solo 2 agentes, mientras que Quadrapong entrena simultáneamente 4 agentes. La transferencia permite reutilizar conocimiento previo, reduciendo significativamente el número de rondas necesarias en el entorno más complejo. En términos de huella de carbono por agente y por ronda efectiva, el enfoque con transferencia resulta más favorable.

• Trabajo futuro

Para continuar y ampliar los resultados obtenidos en este proyecto, se plantean varias líneas de trabajo que podrían mejorar la efectividad y la aplicabilidad de agentes preentrenados en entornos simples, a entornos multiagentes complejos.

En primer lugar, ampliar el número de pasos o rondas de entrenamiento podría permitir que los agentes alcancen un nivel de conocimiento más sólido y estable, especialmente en entornos con alta complejidad y dinámica cambiante como Quadrapong. Un mayor tiempo de entrenamiento facilitaría la consolidación de estrategias más robustas y generalizables.

Además, se plantea la exploración de diferentes configuraciones de función de recompensa. Ajustar y diseñar recompensas alternativas podría favorecer comportamientos

más óptimos, incentivando no solo la competitividad sino también la colaboración o la especialización dentro del equipo (atacante / defensor), según el contexto del entorno.

Otra línea interesante es investigar el uso de modelos o algoritmos diferentes para cada agente dentro del mismo entorno. Esta heterogeneidad permitiría estudiar cómo agentes con distintas capacidades y enfoques de aprendizaje interactúan y se adaptan en escenarios competitivos o cooperativos, aportando conocimiento sobre la diversidad de estrategias y su impacto en la dinámica grupal.

Finalmente, se sugiere extender la aplicación de estos métodos a entornos fuera del dominio de los videojuegos, pero que comparten características similares en cuanto a la estructura del espacio de acción y la interacción multiagente. Esto abriría la puerta a casos prácticos en robótica, logística, sistemas de tráfico y otros ámbitos donde el aprendizaje coordinado y competitivo entre agentes autónomos resulta clave.

Estas líneas futuras ofrecen un marco prometedor para profundizar en el aprendizaje por refuerzo multiagente, ampliando su alcance y eficacia en aplicaciones reales.

Glosario

IA Inteligencia Artificial

MARL Multi-Agent Reinforcement Learning

DQN Deep Q-Network

PPO Proximal Policy Optimization

MADDPG Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient

GPU Graphics Processing Unit

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

ML Machine Learning

RL Reinforcement Learning

MDP Márkov Decision Process

DRL Deep Reinforcement Learning

DDPG Deep Deterministic Policy Gradient

SARSA State-Action-Reward-State-Action

MC Monte Carlo methods

TD Temporal Difference methods

AC Actor-Critic

A2C Advantage Actor-Critic

A3C Asynchronous Advantage Actor-Critic

SAC Soft Actor-Critic

WoLF-PHC Win or Learn Fast Policy Hill Climbing

RGB Red, Green, Blue

CNN Convolutional Neural Network

RELU Rectified Linear Unit

MPS Metal Performance Shaders

CPU Central Processing Unit

SSD Solid State Drive

IID Independent and Identically Distributed

Bibliografía

- [1] PettingZoo - Atari Environment - Pong, 2024. URL <https://pettingzoo.farama.org/environments/atari/pong/>. Último acceso: 1 de marzo de 2025.
- [2] PettingZoo - Atari Environment - Quadrapong, 2024. URL <https://pettingzoo.farama.org/environments/atari/quadrapong/>. Último acceso: 1 de marzo de 2025.
- [3] Label Studio. Label studio: Data labeling platform, 2024. URL <https://labelstud.io>. Último acceso: 22 de mayo de 2025.
- [4] Tampuu A, Matiisen T, Kodelja D, Kuzovkin I, Korjus K, Aru J, et al. Multiagent cooperation and competition with deep reinforcement learning. *PLoS ONE*, 12(4):e0172395, 2017. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172395>. Último acceso: 1 de marzo de 2025.
- [5] PettingZoo - An API standard for multi-agent reinforcement learning., 2024. URL <https://pettingzoo.farama.org/index.html#>. Último acceso: 1 de marzo de 2025.
- [6] Stable-Baselines3 Docs - Reliable Reinforcement Learning Implementations, 2019. URL <https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master/>. Último acceso: 1 de marzo de 2025.
- [7] Mark Towers, Ariel Kwiatkowski, Jordan Terry, John U Balis, Gianluca De Cola, Tristán Deleu, Manuel Goulão, Andreas Kallinteris, Markus Krimmel, Arjun KG, et al. Gymnasium: A standard interface for reinforcement learning environments. *arXiv preprint arXiv:2407.17032*, 2024. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
- [8] J. K Terry, Benjamin Black, and Ananth Hari. Supersuit: Simple microwrappers for reinforcement learning environments. *arXiv preprint arXiv:2008.08932*, 2020. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
- [9] Benoit Courty, Victor Schmidt, Sasha Luccioni, Goyal-Kamal, MarionCoutarel, Boris Feld, Jérémie Lecourt, LiamConnell, Amine Saboni, Inimaz, supatomic, Mathilde Lé-

- val, Luis Blanche, Alexis Cruveiller, ouminasara, Franklin Zhao, Aditya Joshi, Alexis Bogroff, Hugues de Lavoreille, Niko Laskaris, Edoardo Abati, Douglas Blank, Ziyao Wang, Armin Catovic, Marc Alencon, Michał Stęchły, Christian Bauer, Lucas Otávio N. de Araújo, JPW, and MinervaBooks. mlco2/codecarbon: v2.4.1, May 2024. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.11171501>.
- [10] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, Cambridge, MA, 2 edition, 2018. URL <http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html>. Último acceso: 14 de marzo de 2025.
 - [11] Richard Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
 - [12] Christopher J.C.H. Watkins. *Learning from Delayed Rewards*. Ph.d. thesis, University of Cambridge, Cambridge, England, 1989. URL <https://www.cs.rhul.ac.uk/~chrisw/thesis.html>.
 - [13] Hua Huang and Adrian Barbu. Playing atari ball games with hierarchical reinforcement learning, 2019. URL <https://arxiv.org/abs/1909.12465>. Último acceso: 16 de marzo de 2025.
 - [14] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, and other. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518:529–533, 2015. URL <https://doi.org/10.1038/nature14236>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
 - [15] Volodymyr Mnih, Adria Puigdomenech Badia, Mehdi Mirza, Alex Graves, Timothy Lillicrap, Tim Harley, David Silver, and Koray Kavukcuoglu. Asynchronous methods for deep reinforcement learning. In Maria Florina Balcan and Kilian Q. Weinberger, editors, *Proceedings of The 33rd International Conference on Machine Learning*, volume 48 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 1928–1937, New York, New York, USA, 20–22 Jun 2016. PMLR. URL <https://proceedings.mlr.press/v48/mnih16.html>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
 - [16] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, and Oleg Klimov. Proximal policy optimization algorithms, 2017. URL <https://arxiv.org/abs/1707.06347>. Último acceso: 16 de marzo de 2025.
 - [17] Timothy P. Lillicrap, Jonathan J. Hunt, Alexander Pritzel, Nicolas Heess, Tom Erez, Yuval Tassa, David Silver, and Daan Wierstra. Continuous control with deep reinforcement learning, 2019. URL <https://arxiv.org/abs/1509.02971>. Último acceso: 16 de marzo de 2025.

- [18] Ken Ming Lee, Sriram Ganapathi Subramanian, and Mark Crowley. Investigation of independent reinforcement learning algorithms in multi-agent environments. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, 2022. ISSN 2624-8212. doi: 10.3389/frai.2022.805823. URL <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2022.805823>. Último acceso: 16 de marzo de 2025.
- [19] Lucian Busoniu, Robert Babuska, and Bart De Schutter. A comprehensive survey of multiagent reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 38(2):156–172, 2008. URL <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.913919>. Último acceso: 19 de marzo de 2025.
- [20] Emilio Parisotto, Lei Jimmy Ba, and Ruslan Salakhutdinov. Actor-mimic: Deep multitask and transfer reinforcement learning. In Yoshua Bengio and Yann LeCun, editors, *4th International Conference on Learning Representations, ICLR 2016, San Juan, Puerto Rico, May 2-4, 2016, Conference Track Proceedings*, 2016. URL <http://arxiv.org/abs/1511.06342>. Último acceso: 19 de marzo de 2025.
- [21] Akshita Mittel and Purna Sowmya Munukutla. Visual transfer between atari games using competitive reinforcement learning. In *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pages 499–501, 2019. URL <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00071>. Último acceso: 19 de marzo de 2025.
- [22] Marko Ruman and Tatiana V. Guy. Knowledge transfer in deep reinforcement learning via an rl-specific gan-based correspondence function. *IEEE Access*, 12:177204–177218, 2024. URL <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3497589>. Último acceso: 19 de marzo de 2025.
- [23] Apoorv Singh, Gaurav Raut, and Alka Choudhary. Multi-agent collaborative perception for robotic fleet: A systematic review, 2024. URL <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.15777>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
- [24] Paolo Falcone, Francesco Borrelli, Jahan Asgari, Hongtei Eric Tseng, and Davor Hrovat. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(3):566–580, 2007. doi: 10.1109/TCST.2007.894653. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4162483>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
- [25] Dai Tamagawa, Eiichi Taniguchi, and Tadashi Yamada. Evaluating city logistics measures using a multi-agent model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3):6002–6012, 2010. ISSN 1877-0428. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.014>. URL <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.014>.

- //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810010670. The Sixth International Conference on City Logistics.
- [26] Timothy Hospedales, Antreas Antoniou, Paul Micaelli, and Amos Storkey. Meta-learning in neural networks: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(9):5149–5169, 2022. doi: 10.1109/TPAMI.2021.3079209. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9428530>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.
- [27] Qian Long, Zihan Zhou, Abhibav Gupta, Fei Fang, Yi Wu, and Xiaolong Wang. Evolutionary population curriculum for scaling multi-agent reinforcement learning, 2020. URL <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.10423>. Último acceso: 29 de marzo de 2025.

Apéndice A

Detección de objetos con Label Studio y YOLOv8

Para detectar y rastrear los objetos relevantes en el entorno del juego Pong, como las palas y la pelota, se utilizó un enfoque basado en visión por computador apoyado en técnicas de aprendizaje profundo supervisado. Este proceso constó de dos fases principales:

- **Etiquetado manual de datos con Label Studio¹**
- **Entrenamiento de un modelo YOLOv8²**

A.1. Etiquetado manual de datos con Label Studio

El primer paso fue la recopilación y anotación de los datos visuales. Para ello, se extrajeron los fotogramas del entorno de juego (frames) y se utilizaron como imágenes base para la anotación. El etiquetado se realizó utilizando Label Studio, una herramienta de código abierto diseñada para facilitar la creación de datasets anotados.

Se definieron cinco clases de objetos que se utilizaron en los diferentes entornos Pong y Quadrapong:

- **ball (pelota)**
- **paddle_left (pala izquierda)**
- **paddle_right (pala derecha)**
- **paddle_upper (pala superior), en el caso de Quadrapong**

¹Label Studio. <https://labelstud.io>

²Explore Ultralytics YOLOv8. <https://yolov8.com>

- **paddle_lower (pala inferior), en el caso de Quadrapong**

Como se aprecia en la Figura A.1 y la Figura A.2, a través de la interfaz gráfica de Label Studio, se dibujaron manualmente las cajas delimitadoras sobre cada objeto en los distintos frames. Una vez completado el proceso de anotación, se exportaron los datos en formato YOLOv8, generando un conjunto de archivos .txt, uno por imagen, donde cada línea representa un objeto detectado mediante su clase y su caja normalizada (x_center, y_center, width, height).

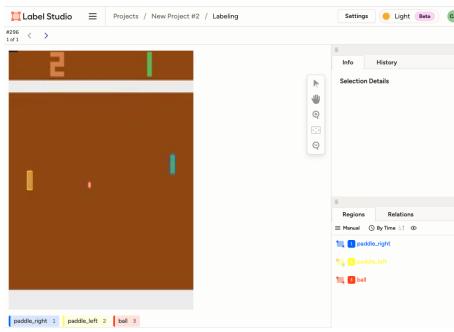


Figura A.1: Fotogramas del entorno de juego de Pong con las cajas delimitadoras[3]

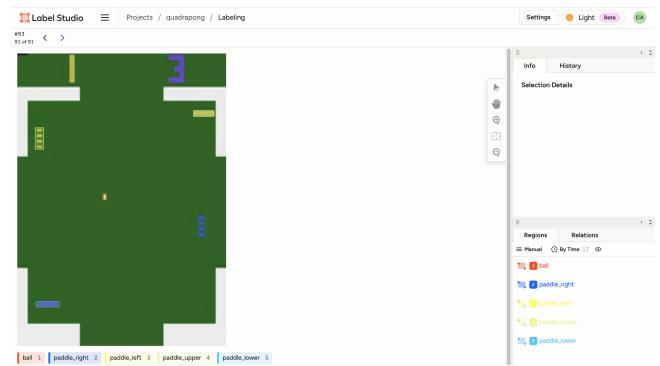


Figura A.2: Fotogramas del entorno de juego de Quadrapong con las cajas delimitadoras[3]

A.2. Entrenamiento de un modelo YOLOv8

Con los datos anotados, se procedió al entrenamiento de un modelo de detección utilizando la arquitectura YOLOv8 de Ultralytics³, conocida por su eficiencia en tareas de detección en tiempo real. Para ello, se organizó el dataset en carpetas de entrenamiento (train) y validación (val), tanto para las imágenes como para sus respectivas anotaciones.

El entrenamiento se realizó con el siguiente comando:

```
yolo task=detect mode=train model=yolov8n.pt data=dataset/data.yaml epochs=50 imgsz=416
```

Donde:

- **yolov8n.pt**

Es la versión ligera del modelo (YOLOv8n).

- **data.yaml**

Define la ruta del dataset y las clases.

- **epochs=50**

Especifica el número de épocas de entrenamiento.

³Ultralytics. <https://www.ultralytics.com/es>

- **imgsz=416**

Define la resolución de las imágenes de entrada.

En la [Figura A.3](#) y la [Figura A.4](#), se puede comprobar como tras el entrenamiento, el modelo aprendió a detectar las palas y la pelota con una precisión aceptable. Estos modelos se utilizaron posteriormente para detectar objetos frame a frame durante partidas reales de Pong y Quadrapong, lo que permitió la recolección automática de métricas como los impactos en las palas.

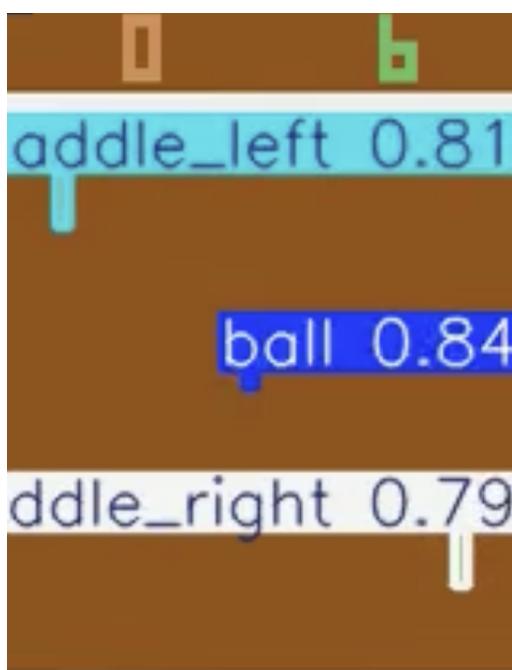


Figura A.3: Detección de palas y pelota en Pong



Figura A.4: Detección de palas y pelota en Quadrapong