

Entrenamiento de robot caminante por imitación y RL usando ZMP como generador de datos de referencia

Autor:

Ing. Francisco Antonio Cofré Villalón

Director:

Título y Nombre del director (pertenencia)

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar | 5 |
| 2. Identificación y análisis de los interesados | 6 |
| 3. Propósito del proyecto | 6 |
| 4. Alcance del proyecto | 6 |
| 5. Supuestos del proyecto | 6 |
| 6. Product Backlog | 7 |
| 7. Criterios de aceptación de historias de usuario | 8 |
| 8. Fases de CRISP-DM | 9 |
| 9. Desglose del trabajo en tareas | 9 |
| 10. Planificación de Sprints | 11 |
| 11. Diagrama de Gantt (sprints) | 13 |
| 12. Gobernanza de datos | 15 |
| 13. Gestión de riesgos | 15 |
| 14. Sprint Review | 18 |
| 15. Sprint Retrospective | 20 |

Registros de cambios

| Revisión | Detalles de los cambios realizados | Fecha |
|----------|---|-------------------------|
| 0 | Creación del documento | 21 de octubre de 2025 |
| 1 | Se completa hasta el punto 5 inclusive | 5 de noviembre de 2025 |
| 2 | Se completa hasta el punto 9 inclusive | 12 de noviembre de 2025 |
| 3 | Se completa hasta el punto 12 inclusive | 23 de noviembre de 2025 |

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 21 de octubre de 2025

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Francisco Antonio Cofré Villalón que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Inteligencia Artificial se titulará “Entrenamiento de robot caminante por imitación y RL usando ZMP como generador de datos de referencia” y consistirá en la simulación de un robot caminante y el entrenamiento de las políticas de control de su marcha aplicando aprendizaje por refuerzo. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar estimado de **600** horas y un costo estimado de **\$ XXX**, con fecha de inicio el 21 de octubre de 2025 y fecha de presentación pública en **junio de 2026**.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Nombre del cliente
Empresa del cliente

Título y Nombre del director
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

El proyecto consiste en diseñar y entrenar en simulación un sistema de desplazamiento para un robot caminante destinado a realizar tareas en obras de construcción. El objetivo técnico es obtener una política de control de la marcha capaz de andar de forma estable frente a perturbaciones, mientras que el objetivo de negocio es explorar tecnologías que, en una etapa posterior, permitan automatizar tareas físicamente exigentes y peligrosas de una empresa constructora.

Como consecuencia de terrenos irregulares, cambios diarios en el entorno, obstáculos imprevisibles, desniveles y riesgo de caídas, la automatización ha avanzado más lentamente en el sector de la construcción. Muchos procesos que requieren desplazamiento y manipulación en estos entornos son difíciles de automatizar con métodos tradicionales de control. Sin embargo, a mayor nivel de automatización de tareas repetitivas, mayor es el potencial de reducir costos para los clientes finales sin sacrificar calidad, además de disminuir la exposición de los operarios a condiciones peligrosas.

Este proyecto utiliza el ZMP (Zero Moment Point) como generador de datos de referencia. El ZMP es un criterio de estabilidad: si el punto donde la resultante de las fuerzas de reacción del suelo tiene un momento nulo (el ZMP) permanece dentro del polígono de apoyo, se garantiza la estabilidad en superficies planas. Proporciona una condición suficiente de estabilidad y permite el cálculo de trayectorias expertas de forma determinista, pero es inadecuado frente a perturbaciones externas y es energéticamente ineficiente.

El estado del arte combina aprendizaje profundo y aprendizaje por refuerzo (DRL) desde cero. Aquí el agente puede descubrir autónomamente estrategias de control a través de prueba y error, y adaptarse a escenarios imprevistos, pero es computacionalmente costoso.

Como se observa en la figura 1, no se utiliza ZMP como controlador final, sino como un generador de datos de referencia, o de demostraciones expertas para iniciar la política de RL. Esto puede reducir el costo de la exploración aleatoria inicial. El agente no empieza ciego, sino que ya sabe cómo caminar de forma estable, luego el RL se utiliza solo para robustecer el comportamiento ante posibles perturbaciones.

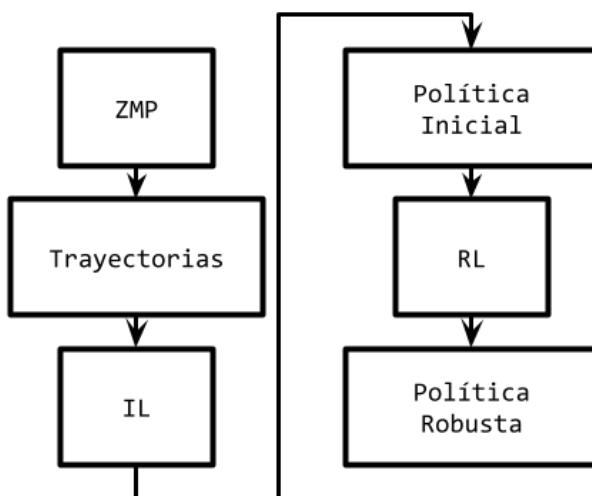


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema.

2. Identificación y análisis de los interesados

| Rol | Nombre y Apellido | Organización | Puesto |
|-------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Cliente | Nombre del cliente | Empresa del cliente | - |
| Responsable | Ing. Francisco Antonio Cofré Villalón | FIUBA | Alumno |
| Orientador | Título y Nombre del director | pertenencia | Director del Trabajo Final |

3. Propósito del proyecto

El problema que abordará el proyecto es la automatización en entornos difíciles de predecir. A diferencia de una planta industrial, un sitio de construcción es dinámico, caracterizado por terreno irregular, escombros, obstáculos imprevistos y la necesidad de navegar en múltiples niveles. Este dominio de problema justifica el enfoque del proyecto en la locomoción bípeda. Soluciones robóticas más simples, como las plataformas con ruedas o los brazos robóticos estacionarios, son inadecuadas para la navegación y movilidad requeridas.

4. Alcance del proyecto

El proyecto incluye:

- El diseño de un modelo 3D del robot bípedo.
- La configuración de un entorno de simulación física que modele la dinámica, las colisiones y las fuerzas de reacción del suelo.
- El algoritmo de generación de trayectorias basado en el Zero Moment Point (ZMP) y el registro de las demostraciones (estados, acciones) generadas en la simulación.
- Código necesario para el entrenamiento de la política.
- Pruebas para validar la política de locomoción final.

El proyecto no incluye:

- El diseño, fabricación o costo de componentes.
- La simulación del torso, brazos y manos.
- La transferencia de la política a un robot físico.

5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se supone que:

- Se dispondrá de suficientes horas semanales para cumplir el cronograma estimado del proyecto y completar las aproximadamente 600 horas totales previstas.

- NVIDIA Isaac Sim, Isaac Lab, PyTorch y los frameworks de RL utilizados permanecerán disponibles durante toda la duración del proyecto, sin cambios de licencia ni compatibilidad.
- Se asume que el simulador podrá representar de manera suficientemente realista la dinámica del robot, los contactos y las fuerzas del suelo como para producir datos útiles para IL y RL.
- Se asume que el diseño del robot y su modelo 3D podrán integrarse sin errores graves al entorno de simulación.
- La disponibilidad del tiempo de cómputo será suficiente para las múltiples iteraciones requeridas por el entrenamiento de las políticas de IL y RL en el entorno de simulación física.
- Se contará con suficiente memoria para ejecutar simulaciones físicas y entrenar modelos de IL y RL sin bloqueos críticos.

6. Product Backlog

Para obtener los Story Points (SP) de cada historia de usuario se evalúan tres factores:

Dificultad (D): cantidad de trabajo estimado.

Complejidad (C): nivel técnico requerido.

Incertidumbre (I): grado de riesgo o novedad.

Cada dimensión se puntúa en una escala de uno a diez, se suman y luego se redondea hacia el número superior más próximo de la serie de Fibonacci:

1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34...

■ Épica 1: Modelo 3D y entorno de simulación

- HU1: Como responsable de simulación, quiero un modelo 3D del robot bípedo para poder ajustar dimensiones, masas, calcular trayectorias y entrenar agentes.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.
- HU2: Como responsable de simulación, quiero un entorno de simulación para calcular trayectorias y entrenar agentes.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.

■ Épica 2: Generación de trayectorias expertas con ZMP

- HU3: Como responsable de control, quiero que el sistema genere trayectorias de marcha estables usando ZMP para poder utilizarlas como demostraciones expertas en el entrenamiento por imitación.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.
- HU4: Como responsable de control, quiero poder ver indicados el ZMP, el centro de masa y los contactos con el suelo durante la marcha para confirmar que las trayectorias cumplen las condiciones de estabilidad.

- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.

▪ **Épica 3: Entrenamiento por imitación y RL de la marcha bípeda**

- HU5: Como responsable de ML, quiero entrenar una política inicial a partir de las demostraciones generadas con ZMP para obtener un caminante estable en pocas iteraciones.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.
- HU6: Como responsable de ML, quiero mejorar la rapidez, definida como la distancia recorrida en simulación dividida por el tiempo transcurrido en simulación, y la estabilidad frente a perturbaciones, definida como la razón entre caídas causadas por perturbaciones y el número total de perturbaciones aplicadas, utilizando RL.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.

▪ **Épica 4: Experimentación y análisis de resultados**

- HU7: Como responsable de ML, quiero evaluar el progreso de la política para medir la mejora del agente durante el entrenamiento.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.
- HU8: Como responsable de ML, quiero ver gráficos que resuman la estabilidad, rapidez y que comparan ZMP e IL+RL.
- D: 3, C: 3, I: 3, SP: 13.

7. Criterios de aceptación de historias de usuario

▪ **Épica 1: Modelo 3D y entorno de simulación**

- HU1: URDF/USD con articulaciones (cadera, rodilla, tobillo) y masa superior. El modelo se exporta e integra sin errores en el entorno de simulación seleccionado. En una prueba estática, el robot se mantiene de pie.
- HU2: El mundo simula contacto, fricción y colisión. Se pueden salvar y reproducir series de acciones.

▪ **Épica 2: Generación de trayectorias expertas con ZMP**

- HU3: Generador de trayectorias funciona. Se exporta dataset con N pasos. Dataset se puede cargar sin errores.
- HU4: Se muestra polígono de soporte, centro de masa y ZMP en tiempo real.

▪ **Épica 3: Entrenamiento por imitación y RL de la marcha bípeda**

- HU5: Entrena política inicial. Logra caminar X metros sin caídas en entorno base. Secuencia es reproducible.
- HU6: Supera la política inicial en caídas, rapidez y energía dividida por distancia.

▪ **Épica 4: Experimentación y análisis de resultados**

- HU7: Pruebas de tasa de caídas, velocidad, trayectorias CoM/ZMP, energía/distancia. Pruebas con perturbaciones, rugosidad, obstáculos.
- HU8: Metodología, registros, videos, gráficos.

8. Fases de CRISP-DM

De acuerdo con la metodología CRISP-DM, el desarrollo del proyecto se organizará en las siguientes fases:

1. **Comprensión del negocio:** En esta etapa se analiza el problema de movilidad autónoma en obras de construcción, identificando actores, restricciones y objetivos de valor para la empresa constructora. Se define con claridad el objetivo del proyecto (obtener una política de marcha estable y robusta en simulación) y los criterios de éxito tanto técnicos (estabilidad, velocidad, eficiencia energética) como de negocio (potencial reducción de riesgos operativos y de costos en futuros desarrollos robóticos).
2. **Comprensión de los datos:** Aquí se estudian en detalle las fuentes de datos disponibles en el simulador: estados del robot, fuerzas de contacto, trayectorias generadas con ZMP y registros de episodios de entrenamiento. Se evalúan su calidad, volumen, cobertura de escenarios y posibles sesgos, verificando que resulten adecuados para entrenar políticas mediante aprendizaje por imitación (IL) y aprendizaje por refuerzo (RL).
3. **Preparación de los datos:** En esta fase se construye el conjunto de demostraciones expertas a partir de las trayectorias ZMP y se generan los conjuntos de episodios para RL. Se realizan tareas de selección de variables (posiciones, velocidades, fuerzas relevantes), limpieza de registros, normalización de magnitudes, etiquetado de eventos (caídas, perturbaciones) y particionado en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, de modo de asegurar datos consistentes para el modelado.
4. **Modelado:** A partir de los datos preparados se diseñan e implementan los modelos de control: la política inicial obtenida por aprendizaje por imitación y la política refinada mediante aprendizaje por refuerzo. Esta fase incluye la elección de arquitecturas de redes neuronales, el diseño de la función de recompensa, la selección de algoritmos específicos de RL y la definición de los hiperparámetros clave del entrenamiento, considerando el compromiso entre desempeño y complejidad computacional.
5. **Evaluación del modelo:** En esta etapa se analiza el desempeño de las políticas entrenadas mediante métricas cuantitativas: distancia recorrida sin caídas, velocidad media, energía consumida por unidad de distancia y tasas de caídas ante perturbaciones y variaciones del terreno. Se comparan sistemáticamente los resultados del controlador basado en ZMP frente a las políticas IL+RL y se revisa si las prestaciones alcanzadas se encuentran en un rango razonable respecto del estado del arte reportado en la literatura. Cuando los resultados no cumplen los criterios de éxito, se retroalimenta el proceso revisando fases previas de preparación de datos o modelado.
6. **Despliegue:** Aunque el proyecto se limita a la simulación, la última fase es la documentación del entorno, de los modelos entrenados y la provisión de código para entrenamiento y evaluación. Esto permitirá que otros investigadores puedan replicar los experimentos, extender la simulación a nuevos escenarios, entrenar la parte superior del robot y, en etapas posteriores, la transferencia de las políticas a un prototipo físico.

9. Desglose del trabajo en tareas

| Historia de usuario | Tarea técnica | Estimación | Prioridad |
|---------------------|--|------------|-----------|
| HU1 | Determinar y especificar componentes. | 6 h | Alta |
| HU1 | Modelo 3D sensores actuadores vínculos (URDF/USD). | 8 h | Alta |
| HU2 | Configurar una escena base en simulador. | 5 h | Media |
| HU2 | Cargar y validar robot en simulador. | 6 h | Alta |
| HU3 | Calcular ZMP. | 6 h | Alta |
| HU3 | Implementar el generador de trayectorias. | 8 h | Alta |
| HU4 | Mostrar ZMP, centro de masa y sus trayectorias en la simulación. | 5 h | Media |
| HU4 | Mostrar polígono de apoyo en la simulación. | 6 h | Alta |
| HU5 | Entrenar la política por imitación con el dataset de demostraciones. | 6 h | Alta |
| HU5 | Integrar la política entrenada en el simulador. | 8 h | Alta |
| HU6 | Configurar y ejecutar el algoritmo de RL elegido. | 5 h | Media |
| HU6 | Irregularidades, cambios de velocidad objetivo. | 6 h | Alta |
| HU7 | Registrar evolución de métricas. | 6 h | Alta |
| HU7 | Automatizar registro y almacenamiento de métricas y logs. | 8 h | Alta |
| HU8 | Definir escenarios, perturbaciones, métricas y formato de registros y videos. | 5 h | Media |
| HU8 | Implementar notebooks generen gráficos de estabilidad y rapidez, y que comparan ZMP e IL+RL. | 6 h | Alta |

10. Planificación de Sprints

| Sprint | HU o fase | Tarea | SP | Responsable | % Completado |
|----------|---------------|--|-------------|-------------|--------------|
| Sprint 0 | Planificación | Definir alcance y cronograma. | 10 h | Alumno | X % |
| Sprint 0 | Planificación | Reunión con el tutor/cliente. | 5 h | Alumno | X % |
| Sprint 0 | Planificación | Ajuste de los entregables. | 6 h | Alumno | X % |
| Sprint 1 | HU1 | Determinar y especificar componentes, parámetros físicos y sensores. | 6 h / 3 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 1 | HU1 | Modelo 3D con sensores, actuadores y vínculos (URDF/USD). | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 2 | HU2 | Configurar una escena base en el simulador (mundo, gravedad, suelo). | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 2 | HU2 | Cargar y validar el robot bípedo en el simulador. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 3 | HU3 | Implementar cálculo del ZMP a partir de fuerzas de contacto. | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 3 | HU3 | Implementar el generador de trayectorias de marcha basadas en ZMP. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 4 | HU4 | Visualizar ZMP, polígono de soporte y centro de masa en tiempo real. | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |

| Sprint | HU o fase | Tarea | SP | Responsable | % Completado |
|-----------|-----------|---|--------------|-------------|--------------|
| Sprint 4 | HU4 | Integrar visualización en la escena de simulación ya configurada. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 5 | HU5 | Entrenar la política inicial por imitación (behavior cloning). | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 5 | HU5 | Integrar la política entrenada en el simulador y validar marcha base. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 6 | HU6 | Configurar y ejecutar el algoritmo de RL elegido. | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 6 | HU6 | Entrenar robustez a irregularidades y cambios de velocidad objetivo. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 7 | HU7 | Diseñar y registrar métricas (caídas, velocidad, energía/distancia). | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 7 | HU7 | Automatizar registro y almacenamiento de métricas. y logs | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 8 | HU8 | Desarrollar notebooks para generación de gráficos y tablas. | 7 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 8 | HU8 | Integrar dashboards/notebooks en el flujo de experimentación. | 10 h / 5 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 9 | Escritura | Redacción memoria. | 50 h / 34 SP | Alumno | 0 % |
| Sprint 10 | Defensa | Preparación de la exposición. | 20 h / 13 SP | Alumno | 0 % |

11. Diagrama de Gantt (sprints)

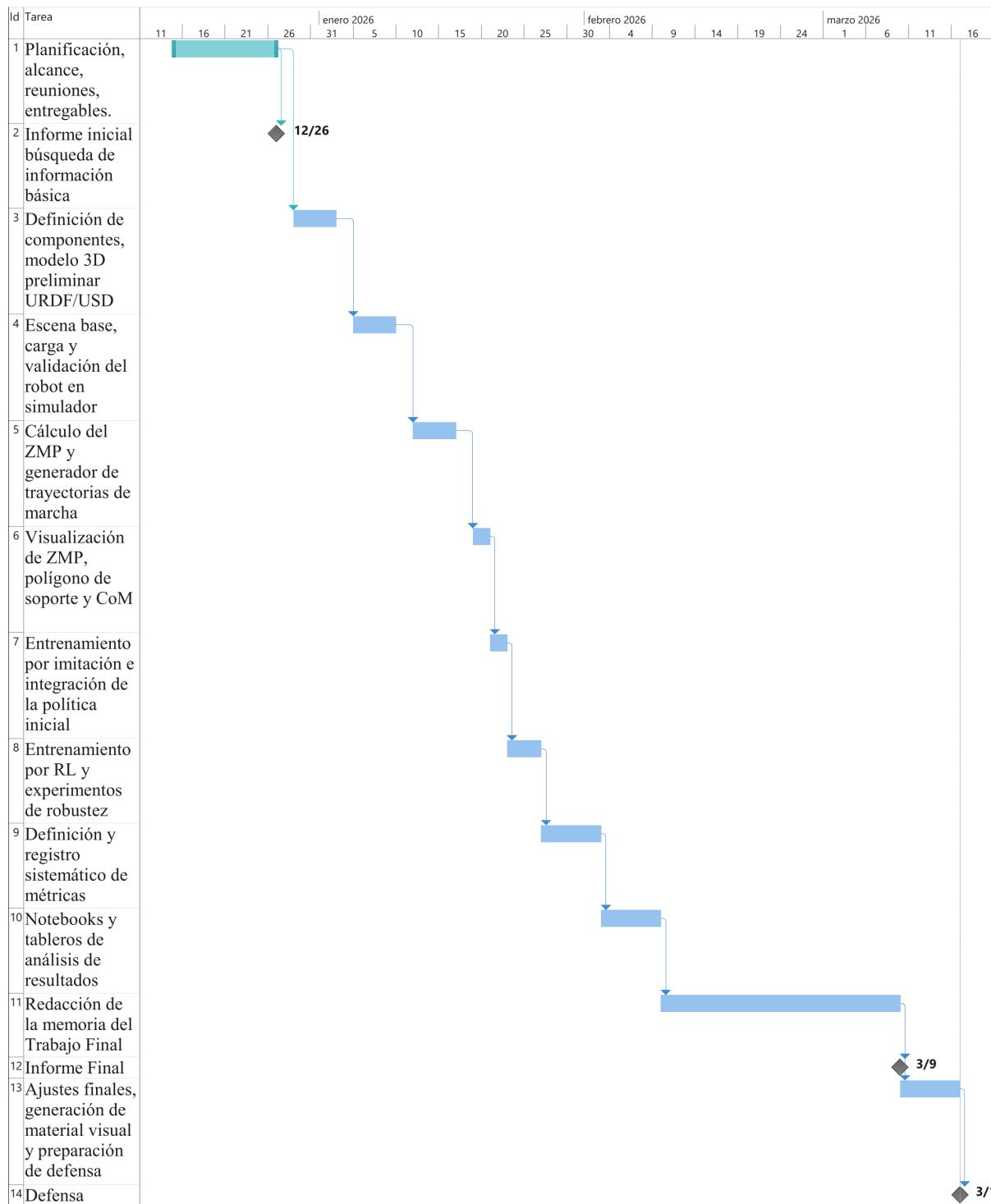


Figura 2. Diagrama de Gantt.

12. Gobernanza de datos

No se capturan ni procesan datos personales de individuos ni información sensible; todo el comportamiento del agente se entrena sobre entornos sintéticos. El único material que se prevé publicar de forma abierta son el código fuente y las políticas entrenadas, junto con scripts de evaluación y documentación del experimento.

12.1. Cumplimiento normativo

El simulador y los entornos asociados (NVIDIA Isaac Sim e Isaac Lab) se utilizarán bajo sus licencias de desarrollador, exclusivamente con fines académicos y no productivos. No se redistribuirán escenas ni assets propietarios.

Las bibliotecas de aprendizaje automático como PyTorch, frameworks de RL y arquitecturas tipo ResNet-18 se emplearán bajo sus licencias open source (BSD-3, MIT, Apache-2.0). En el repositorio del proyecto se incluirá un apartado con licencias y avisos correspondientes.

12.2. Ética en el uso de inteligencia artificial

El objetivo del proyecto es mejorar la autonomía de robots caminantes para tareas de construcción, un entorno en el que una caída o movimiento inapropiado podría implicar riesgos para personas y bienes. Este trabajo se desarrolla sólo en simulación: no se recomienda el uso de las políticas resultantes en robots físicos sin medidas de seguridad. Desde una perspectiva social, el proyecto busca automatizar tareas físicamente demandantes que son realizadas en entornos riesgosos. Al disminuir la exposición directa de los operarios a estas condiciones peligrosas, se contribuye significativamente a mejorar su seguridad.

13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos y estimación de sus consecuencias, con probabilidad y severidad graduadas de menor a mayor en escala de 1 a 10:

Riesgo 1: El robot bípedo no logra una marcha estable a pesar de las trayectorias generadas con ZMP, lo que podría impedir cumplir el objetivo principal del proyecto.

- Severidad (S): 9. Si el robot no consigue caminar establemente, el propósito central del proyecto no se alcanzaría, por lo que el impacto sobre el proyecto es muy alto. .
- Probabilidad de ocurrencia (O): 5. Existe una probabilidad moderada, dado que la generación de trayectorias con ZMP es compleja y podrían surgir factores imprevistos (como limitaciones del modelo o simplificaciones en la simulación) que dificulten la estabilidad.

Riesgo 2: El entrenamiento por Reinforcement Learning (RL) no converge o no mejora sustancialmente el andar obtenido por imitación, causando retrasos o resultados inferiores a lo esperado.

- Severidad (S): 8. Un bajo rendimiento de la fase de RL reduciría el valor del proyecto, aunque el robot haya aprendido a caminar por imitación (el impacto es serio pero podría

subsistir un resultado parcial).

- Probabilidad de ocurrencia (O): 6. Es relativamente probable; los algoritmos de RL pueden requerir muchos episodios y ajustes de hiperparámetros. Dado el tiempo limitado del proyecto y la naturaleza estocástica del RL, existe riesgo de que la mejora sea más lenta de lo previsto.

Riesgo 3: Dificultades de integración entre los distintos módulos del proyecto (modelo 3D, cálculo de ZMP, simulador, algoritmo de RL), provocando retrasos en el desarrollo.

- Severidad (S): 6. Problemas de integración podrían detener el progreso temporalmente y requerir reprocesos, retrasando el avance del proyecto. Se espera que se puedan resolver con trabajo adicional.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 7. Es bastante probable; integrar componentes de simulación, control e IA se asocia a problemas como incompatibilidad de formatos y errores de comunicación entre herramientas.

Riesgo 4: Limitaciones de rendimiento o recursos de cómputo durante las simulaciones y entrenamientos, que impliquen tiempos de ejecución elevados o la necesidad de reducir el alcance del entrenamiento.

- Severidad (S): 7. Si las simulaciones o entrenamientos toman demasiado tiempo, podría reducirse la cantidad de experimentos y ajustes posibles, impactando la calidad de los resultados y la capacidad de iteración.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 6. Es probable en caso de usar entornos de simulación pesados o algoritmos complejos. Si no se puede usar la GPU local o no es suficiente ni se logra optimizar el proceso, el entrenamiento podría volverse lento.

Riesgo 5: Calidad o cantidad insuficiente de datos de demostración generados con ZMP para el entrenamiento por imitación, lo que podría degradar el desempeño inicial de la política de control.

- Severidad (S): 5. Un conjunto pobre de demostraciones podría llevar a una política inicial deficiente, aunque el agente luego podría mejorarse con RL. El impacto existe pero podría mitigarse en fases posteriores.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 4. Es moderadamente probable; depende del generador de ZMP. Si las trayectorias generadas no cubren suficientes variaciones o presentan errores, la calidad del dataset se verá comprometida.

| Riesgo | S | O | RPN | S* | O* | RPN* |
|--|---|---|-----|----|----|------|
| Que no se logre un andar estable a pesar de las trayectorias generadas con ZMP. | 9 | 5 | 45 | 9 | 3 | 27 |
| Que RL no mejore sustancialmente el andar obtenido por IL. | 8 | 6 | 48 | 6 | 4 | 24 |
| Dificultades de integración entre los distintos módulos del proyecto. | 6 | 7 | 42 | 6 | 3 | 18 |
| Insuficiente capacidad de cómputo durante las simulaciones y entrenamientos. | 7 | 6 | 42 | 7 | 4 | 28 |
| Insuficientes datos de demostración generados con ZMP para el entrenamiento por imitación. | 5 | 4 | 20 | | | |

b) Tabla de gestión de riesgos:

Criterio adoptado:

Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a 40.

Nota: los valores marcados con (*) en la tabla corresponden luego de haber aplicado la mitigación.

c) Plan de mitigación de los riesgos que originalmente excedían el RPN máximo establecido:

Riesgo 1: El agente no logra una marcha estable a pesar de las trayectorias generadas con ZMP.

- primero validar que el robot se mantenga de pie.
- simplificación del entorno inicial.
- Ajustar parámetros físicos del modelo según sea necesario y mantener consultas periódicas con el director para validar enfoques.

Nueva asignación de S y O:

- Severidad (S*): 9. La severidad se mantiene alta porque, si el robot no logra una marcha estable, el objetivo principal del proyecto sigue comprometido.
- Probabilidad de ocurrencia (O*): 3. La probabilidad disminuye gracias al entorno en condiciones ideales, la validación temprana, ajustes de parámetros y consultas con el director.

Riesgo 2: RL no mejora sustancialmente el andar obtenido por IL.

Plan de mitigación:

- Reservar tiempo en el cronograma para ajuste de hiperparámetros y número suficiente de episodios, monitoreando métricas intermedias.
- Ajustar la función de recompensa, probar algoritmos de RL alternativos o simplificar el entorno de entrenamiento.

Nueva asignación de S y O:

- Severidad (S*): 6. El proyecto mantiene resultados presentables incluso si RL no aporta grandes mejoras.
- Probabilidad de ocurrencia (O*): 4. Disminuye al dedicar más tiempo, monitoreo y flexibilidad para cambiar de algoritmo o configuración.

Riesgo 3: Dificultades de integración entre los distintos módulos del proyecto.

Plan de mitigación:

- Integración continua y pruebas a medida que avanza el desarrollo.
- Atención al control de versiones sobre código, para poder identificar y revertir cambios.
- Utilizar formatos y herramientas estándar.
- Consultar documentación y foros.

Nueva asignación de S y O:

- Severidad (S*): 6. Se mantiene igual, ya que un fallo de integración sigue implicando retrabajo relevante.
- Probabilidad de ocurrencia (O*): 3. Se reduce al detectar y corregir problemas de compatibilidad desde etapas tempranas.

Riesgo 4: Insuficiente capacidad de cómputo durante las simulaciones y entrenamientos.

Plan de mitigación:

- Aumentar la capacidad de cómputo disponible.
- Programar entrenamientos ejecutarse durante la noche o fines de semana, aprovechando tiempo ocioso.
- Ajustar número de episodios para cumplir con el cronograma.
- Optimizar el entorno de simulación.

Nueva asignación de S y O:

- Severidad (S*): 7. La severidad no cambia, ya que retrasos por recursos seguirían impactando el cronograma.
- Probabilidad de ocurrencia (O*): 4. Disminuye gracias a la mejor planificación de entrenamientos y el aumento de capacidad.

14. Sprint Review

| HU seleccionada | Tareas asociadas | Entregable esperado | ¿Cómo sabrás que está cumplida? | Observaciones o riesgos |
|-----------------|---|---|--|---|
| HU1 | Determinar y especificar componentes, parámetros físicos y sensores. | Modelo 3D del robot integrado al entorno de simulación funcionando. | El modelo se exporta al simulador sin errores. | Problemas de integración. |
| | Modelo 3D con sensores, actuadores y vínculos. | | Se comprueba que puede mantenerse en pie. | |
| HU3 | Implementar cálculo del ZMP a partir de fuerzas de contacto. | Dataset sintético de trayectorias de marcha sin caídas. | La herramienta genera N pasos de marcha sin que el robot caiga. | Problemas en ajuste de parámetros |
| | Implementar el generador de trayectorias de marcha basadas en ZMP. | | | |
| HU5 | Entrenar la política inicial por imitación. | Política de control de la marcha entrenada por imitación. | El robot camina en el simulador con la nueva política. | Podría requerirse recopilar más demostraciones. |
| | Integrar la política entrenada en el simulador y validar marcha básica. | | Se cumplen los criterios de aceptación de estabilidad básica. | |
| HU6 | Configurar y ejecutar el algoritmo de RL. Entrenar en suelo irregular | Política de control robusta entrenada con RL. | El agente mantiene la marcha ante perturbaciones y cambios de velocidad. | Entrenamiento lento o necesidad de reajustar hiperparámetros. |
| | y cambios de velocidad objetivo. | | | |

15. Sprint Retrospective

En la siguiente tabla se sintetiza una primera aplicación de la Estrella de la Retrospectiva al proyecto. Para cada tipo de sprint se plantean prácticas a reforzar, hábitos a reducir, aspectos que conviene mantener y acciones nuevas a incorporar o abandonar. Esta esquematización ayuda a proponer ajustes concretos que faciliten el desarrollo del proyecto.

| Sprint tipo y N° | ¿Qué hacer más? | ¿Qué hacer menos? | ¿Qué mantener? | ¿Qué empezar a hacer? | ¿Qué dejar de hacer? |
|---------------------------------------|--|--|---|--|--|
| Sprint técnico 1 Modelo 3D y entorno | Bloques de trabajo concentrado para avanzar en el modelo 3D y la configuración básica del simulador. | Interrumpir el trabajo para probar herramientas nuevas que no son críticas para este sprint. | Probar el modelo en escenas simples para validar colisiones y contactos antes de complejizar. | Registrar en un log sencillo las decisiones de diseño y los problemas encontrados en cada sesión. | Empezar tareas técnicas sin revisar antes el backlog y los criterios de aceptación asociados. |
| Sprint técnico 3 ZMP y trayectorias | Ejecutar pruebas del cálculo de ZMP en patrón de marcha básico alternativo. | Ajustar parámetros de forma improvisada sin comparar con resultados anteriores. | Comparar las trayectorias obtenidas con el criterio teórico de estabilidad. | Versionar scripts de prueba y gráficos en el repositorio para poder replicar experimentos. | Modificar código directamente en el simulador sin guardar una versión previa. |
| Sprint técnico 6 Entrenamiento con RL | Monitorear métricas de recompensa, caídas, energía en corridas largas de entrenamiento. | Lanzar experimentos fijas y grandes sin pruebas preliminares en entornos reducidos. | Usar semillas fijas y configuraciones documentadas para poder reproducir resultados. | Planificar lotes pequeños de experimentos, cada uno con una hipótesis clara sobre el cambio a evaluar. | Cambiar muchos hiper-parámetros a la vez sin anotar qué se modificó ni qué se espera observar. |
| Sprint no técnico 9 Defensa | Escribir breves resúmenes al cerrar cada bloque de trabajo técnico para facilitar la redacción. | Dejar la escritura de secciones completas para los últimos días del sprint. | Revisar la guía de formato antes de redactar apartados. | Pedir feedback puntual sobre objetivos, resultados, conclusiones a una persona externa. | Acumular correcciones en notas sueltas sin integrarlas periódicamente al documento principal. |