

Entrenamiento en entorno virtual para la teleoperación segura de Brazos Robóticos

Realidad Virtual - Facultad de Ingeniería UNCuyo

**Juan Ignacio Quiroga
Francisco Castel**

Octubre 2025

Contents

1 Resumen	2
2 Motivación y justificación	2
3 Objetivos	2
3.1 Objetivo general	2
3.2 Objetivos específicos	2
4 Alcance y exclusiones	3
5 Requisitos	3
5.1 Funcionales	3
5.2 No funcionales	4
6 Estado del arte (breve)	4
7 Metodología y tecnologías	4
7.1 Motor gráfico y XR	4
7.2 Arquitectura	4
7.3 Hardware de interfaz: Joystick RPi Pico	5
7.4 Simulación del robot	6
7.5 Teleoperación y seguridad	7
8 Plan de evaluación	7
8.1 Métricas	7
8.2 Diseño experimental	7
9 Entregables	7
10 Riesgos y mitigaciones	7
11 Consideraciones éticas y de seguridad	8
12 Plan de bibliografía	8

1 Resumen

Este anteproyecto propone el desarrollo de un **entorno virtual (VR)** para **entrenar a operarios** en el uso de un **brazo robótico** y la posterior **teleoperación** con un joystick diseñado ad hoc sobre *Raspberry Pi Pico*. El sistema combina simulación en *Unity*, medición de desempeño y un pipeline que facilite la transferencia desde el entrenamiento en VR al control del robot real.

2 Motivación y justificación

La teleoperación es pertinente cuando existen *riesgos ambientales*, se requiere *precisión manual*, hay *alta variabilidad* en la tarea o se busca *transferir expertise* humana. La VR reduce costos y riesgos de entrenamiento, habilita *iteración rápida* y define métricas objetivas (tiempo, trayectorias, colisiones, suavidad del movimiento).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un entorno VR y un esquema de control que permitan entrenar y luego teleoperar un brazo robótico mediante un joystick propio, priorizando seguridad, usabilidad y desempeño.

3.2 Objetivos específicos

1. Implementar un **simulador** de brazo robótico en Unity con interacción XR.
2. Diseñar el **mapeo de controles** del joystick (RPi Pico) a los grados de libertad del robot.
3. Instrumentar **métricas de entrenamiento**: tiempo, errores, colisiones, suavidad/jerk.
4. Diseñar y validar **modos de teleoperación**: velocidad limitada, asistencia, seguimiento de path.

5. Incorporar **mecanismos de seguridad**: e-stop, zonas prohibidas, límites de torque/velocidad.
6. Realizar una **evaluación** con usuarios: usabilidad (SUS), aprendizaje y transferencia a robot real/simulador de mayor fidelidad.

4 Alcance y exclusiones

Alcance

- Entrenamiento VR de tareas representativas (p.ej., pick&place, posicionamiento preciso).
- Teleoperación con joystick RPi Pico (prototipo funcional).
- Integración de comunicación (serial/UDP/TCP) y capa de seguridad básica.

Fuera de alcance (por ahora)

- Retroalimentación háptica avanzada.
- *Motion planning* autónomo o visión por computadora compleja.
- Certificación normativa industrial.

5 Requisitos

5.1 Funcionales

- Control en tiempo real del robot (simulado) desde el joystick.
- Escenarios VR con objetivos, *checkpoints* y feedback.
- Registro de métricas y generación de reportes.
- Modo teleoperado con límites de seguridad (e-stop, zonas).

5.2 No funcionales

- **Latencia** end-to-end < 60–100 ms (objetivo inicial).
- **Usabilidad:** SUS ≥ 70 .
- **Compatibilidad:** Windows y *headset VR* objetivo.
- **Mantenibilidad:** arquitectura modular y documentación.

6 Estado del arte (breve)

Se revisarán enfoques de simulación de robots en motores 3D, bibliotecas XR, estándares de seguridad en teleoperación y soluciones de *joysticks* personalizados.

7 Metodología y tecnologías

7.1 Motor gráfico y XR

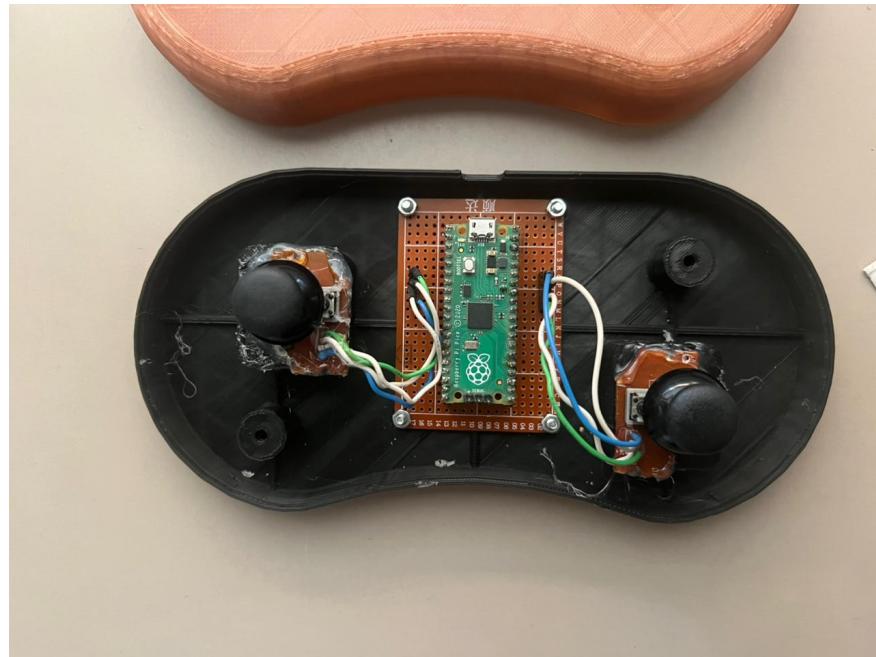
Unity (render pipeline apropiado) y sistema de *input*.

7.2 Arquitectura

- **Capa de Dispositivos:** joystick RPi Pico → PC (USB/serial/UDP).
- **Capa de Control:** mapeo joystick → comandos (velocidad/posición).
- **Capa de Simulación:** cinemática/dinámica y colisiones.
- **Capa de VR/UX:** escenas, HUD, feedback, tutoriales.
- **Teleoperación:** canal de comunicación + *safety layer*.

7.3 Hardware de interfaz: Joystick RPi Pico

- **Estado actual:** primer prototipo impreso 3D y firmware básico (PWM/ADC/USB HID o serial).
- **Plan:** iteraciones de ergonomía, *deadband*, *debounce*, vibración opcional.





INDEX	CONNECTED	MAPPING	TIMESTAMP	VIBRATION															
0	Yes	n/a	28575.00000	n/a															
B0	0.00	B1	0.00	B3	0.00	B4	0.00	B5	0.00	B6	0.00	B7	0.00	B8	0.00				
B9	0.00	B10	0.00	B11	0.00	B12	0.00	B13	0.00	B14	0.00	B15	0.00	B16	0.00	B17	0.00		
B18	0.00	B19	0.00	B20	0.00	B21	0.00	B22	0.00	B23	0.00	B24	0.00	B25	0.00	B26	0.00		
B27	0.00	B28	0.00	B29	0.00	B30	0.00	B31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
AXIS 0	-0.43307	AXIS 1	-0.40157	AXIS 2	-0.45669	AXIS 3	0.00000	AXIS 4	0.00000	AXIS 5	0.00000	AXIS 6	0.00000	AXIS 7	0.00000	AXIS 8	0.00000	AXIS 9	1.00000

Figure 1: Se utilizó la librería TinyUSB para implementar el protocolo HID

7.4 Simulación del robot

Cinemática directa/inversa, límites articulares, velocidad y *soft stops*. Opcional: exportar URDF y/o puente ROS2 para escalabilidad futura.

7.5 Teleoperación y seguridad

Modos de control (velocity/position), *rate limiting*, filtros, geofencing, e-stop físico/virtual, *watchdog* de conexión.

8 Plan de evaluación

8.1 Métricas

Tiempo por tarea, tasa de errores/collisiones, suavidad (jerk promedio), # de reintentos, aprendizaje (*pre/post*), SUS.

8.2 Diseño experimental

$N \approx 8\text{--}12$ participantes (piloto), ensayo de 2–3 tareas con y sin asistencia, análisis de normalidad y comparaciones (p.ej., Wilcoxon/ttest).

9 Entregables

- Demo VR funcional (entrenamiento).
- Prototipo de joystick RPi Pico (STL/FW).
- Módulo de teleoperación con *safety layer*.
- Informe con resultados y repositorio con código/documentación.

10 Riesgos y mitigaciones

- Latencia alta → *rate limiting*, compresión, simplificación de escena.
- Inestabilidad de control → saturaciones, *low-pass*, límites articulares.
- Fatiga del usuario → sesiones cortas, ergonomía del joystick, tutoriales progresivos.

11 Consideraciones éticas y de seguridad

Privacidad de datos de uso, seguridad funcional (e-stop), ergonomía y prevención de mareo en VR (pausas, locomoción adecuada).

12 Plan de bibliografía

Se incluirán trabajos de teleoperación, entrenamiento en VR, cinemática de robots y guías de HMI/seguridad.