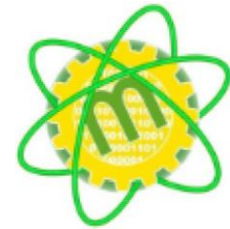




ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



TRABAJO DE TITULACIÓN

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA, CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TEMA:

Diseño e implementación de un sistema de operación off-line del brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB a través de realidad virtual no inmersiva para contribuir en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

AUTORAS:

BASTIDAS GUAYANAY DANIELA ALEXANDRA
GALLEGOS VELÁSQUEZ DAYANA ESTHER

DIRECTOR:

ING. MENDOZA CHIPANTASI, DARÍO JOSÉ

LATACUNGA - 2021



CONTENIDO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

IMPLEMENTACIÓN

PRUEBAS Y RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



RESUMEN

En el presente trabajo de titulación, contempla la implementación de un sistema de operación off-line del robot Mitsubishi Melfa RV 2SDB a través del motor de videojuegos Unity. Por medio del estudio preliminar se incorporó en el motor de juego un aula virtual, la estructura que sostiene el manipulador y el robot Mitsubishi Melfa RV 2SDB. Para la cinemática directa e inversa del robot se efectuó dos soluciones, primero resolver la configuración por medio de los parámetros de Denavit Hartenberg para hallar la matriz de transformación homogénea, segundo, la resolución por medio modelo diferencial de la jacobiana o jacobiana inversa. En el simulador se colocó 4 entradas para el movimiento del robot una de ellas el Wii Motion Plus y para la programación que realiza el usuario en el interfaz es seleccionar y configurar que tipo de trayecto ya sea punto a punto, línea, arco o círculo.

Finalmente se analiza en función a la precisión y eficiencia las trayectorias del simulador, por medio de la comunicación TCP/IP de la controladora con Matlab, y, a su vez se valida la hipótesis referente al proceso de aprendizaje con los estudiantes, midiendo el nivel de conocimiento adquirido después de su uso.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Los laboratorios convencionales, con toda su infraestructura y equipos, han sido tradicionalmente el lugar predilecto para desarrollar prácticas, pero a su vez el significado de costos mayores se hace presente.
- Un laboratorio tradicional tiene sesiones prácticas en un horario fijo programado periódicamente y con un tiempo limitado para la finalización de la actividad, en ocasiones el estudiante siente que no alcanzó todos los objetivos o que no comprendió con suficiencia todas las experiencias del laboratorio
- Para uso de robots manipuladores, dentro de las programaciones presentes se encuentra la modalidad tradicional on-line y en ella es necesario que, durante el tiempo de desarrollo del programa se disponga del robot físicamente, para ello es necesario optimizar tiempos de trabajo en las prácticas presenciales para que todos los estudiantes puedan hacer uso del manipulador y dominen las bases fundamentales.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseño e implementación de un sistema de operación off-line del brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB a través de realidad virtual no inmersiva para contribuir en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar sobre el uso e implementación de sistemas de operación off-line en robots manipuladores basados en realidad virtual no inmersiva a través de la recolección de información técnica para visualizar el tipo de control de un robot manipulador.
- Diseñar el modelo 3D y la representación cinemática del robot manipulador considerando el punto de interés como herramienta que describe el movimiento del sistema para la obtención del controlador adecuado.
- Desarrollar el entorno virtual no inmersivo de un brazo robótico y la comunicación de los datos del dispositivo del mando que genera el movimiento a partir de la programación de un software orientado a la creación de videojuegos para visualizar el comportamiento del robot de manera virtual de acuerdo al modelo real.



- Implementar el sistema de operación off-line a través de la comunicación entre el controlador del brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB y el entorno de realidad virtual para visualizar el funcionamiento de las trayectorias generadas.
- Determinar si el uso de realidad virtual en operación off-line del brazo robótico contribuye con el proceso de aprendizaje en robótica industrial mediante pruebas de funcionamiento con los estudiantes de la carrera.



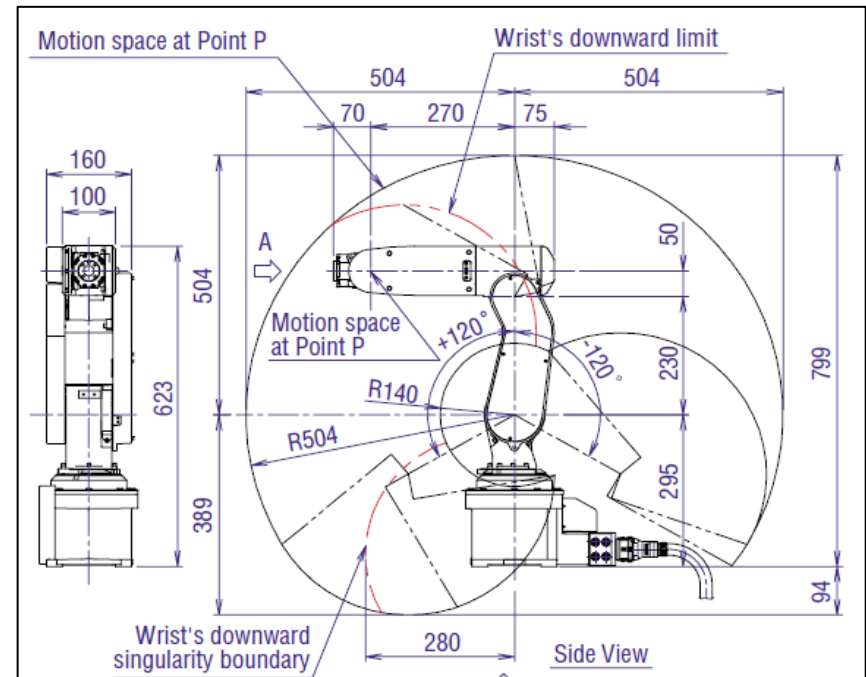
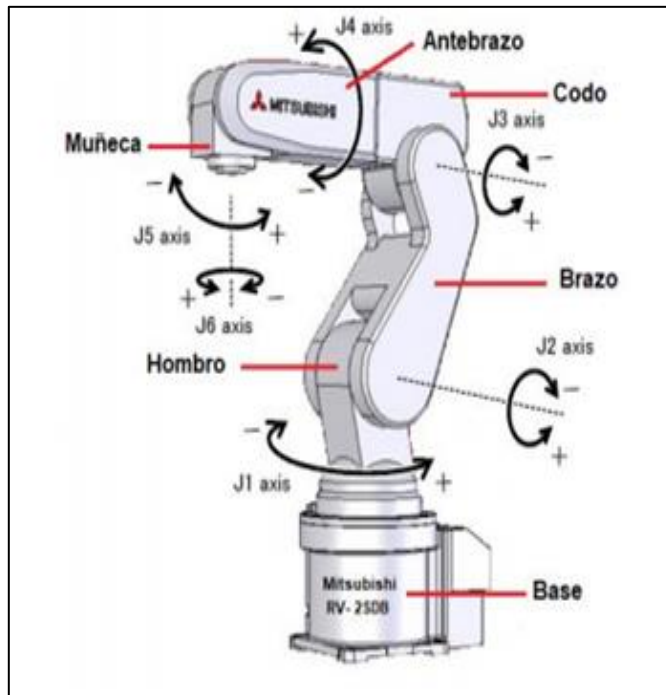
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- **Robótica industrial** : Es una ciencia aplicada, que se origina a partir de la combinación de tecnología de máquina herramienta e informática, su objetivo principal es ayudar a incrementar productividad, eficiencia y minimizar error en las cadenas de producción.
- **Espacios virtuales de aprendizaje** : Ciencia que se encarga de estudiar específicos sistemas mecánicos, denominados manipuladores, que son aparatos sustitutivos del personal humano para realizar algún trabajo, y que cuenta con amplios campos de aplicaciones, tanto en ámbitos industriales, académicos y domésticos.
- **Manipuladores Robóticos** : Un manipulador robótico consiste en una cadena de cuerpos rígidos conocidos como eslabones conectados entre sí por mecanismos de traslación o rotación que funcionan como articulaciones.



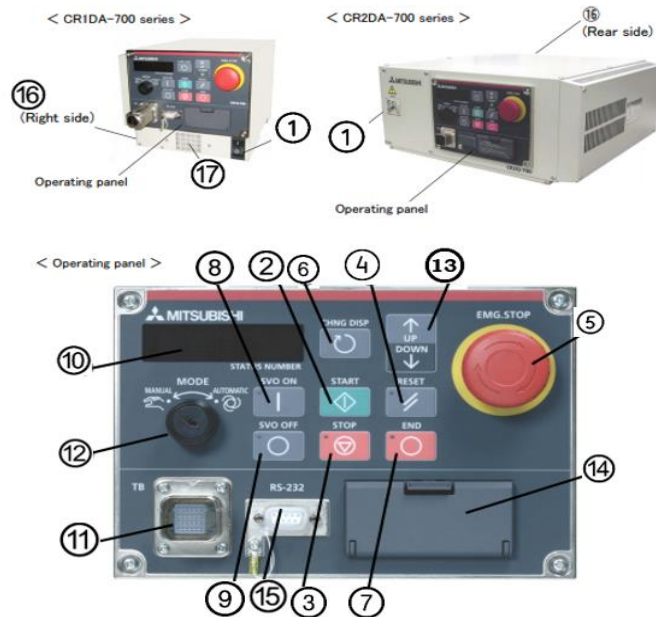
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Brazo robótico Mitsubishi MELFA RV – 2SDB



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Controlador brazo robótico RV – 2SDB (CR1DA-700)



Usa lenguaje de programación MELFA BASIC V. El aspecto de un programa es un conjunto e instrucciones propias del sistema del Robot entre sentencias ya conocidas BASIC. Se obtiene una forma de programación intuitiva de programación, sencilla incluso para aquellos usuarios con pocos conocimientos



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Herramientas de localización espacial

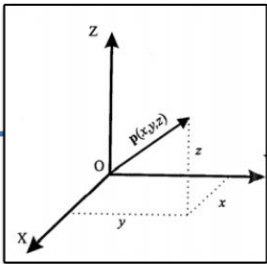
Sirven para obtener relaciones espaciales sencillas entre dos objetos

Posición

Permite identificar el lugar específico ya sea con dos o tres coordenadas, si se trabaja en un plano o en el espacio tridimensional respectivamente

Sistema Cartesiano

Describe la ubicación espacial a través del sistema de coordenadas, sea OXY en un plano o el sistema OXYZ en un plano tridimensional, la figura mostrada a continuación representa un punto en el espacio tridimensional



Orientación

Es necesario definir la orientación respecto a un sistema cuando se analiza sólidos en el espacio, para ello se dispone de un nuevo sistema al objeto y posterior a esto se define la relación espacial entre el sistema de referencia y el dado.

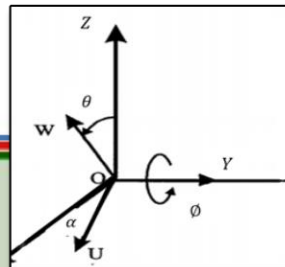
Matriz de Rotación

La matriz de rotación de 9 elementos define la orientación del sistema OUVW con respecto al sistema OXYZ conocido como matriz de cosenos directores.

La matriz de rotación de manera general es:

$$\begin{bmatrix} C\theta C\phi & -S\theta C\alpha + C\theta S\phi S\alpha & S\theta S\alpha + C\theta S\phi C\alpha \\ S\theta C\phi & C\theta C\alpha + S\theta S\phi S\alpha & -C\theta S\alpha + S\theta S\phi C\alpha \\ -S\theta & C\phi S\alpha & C\phi C\alpha \end{bmatrix}$$

Siendo C, coseno, S, seno y los ángulos θ, ϕ, α , las rotaciones respecto al eje z, y, x respectivamente.

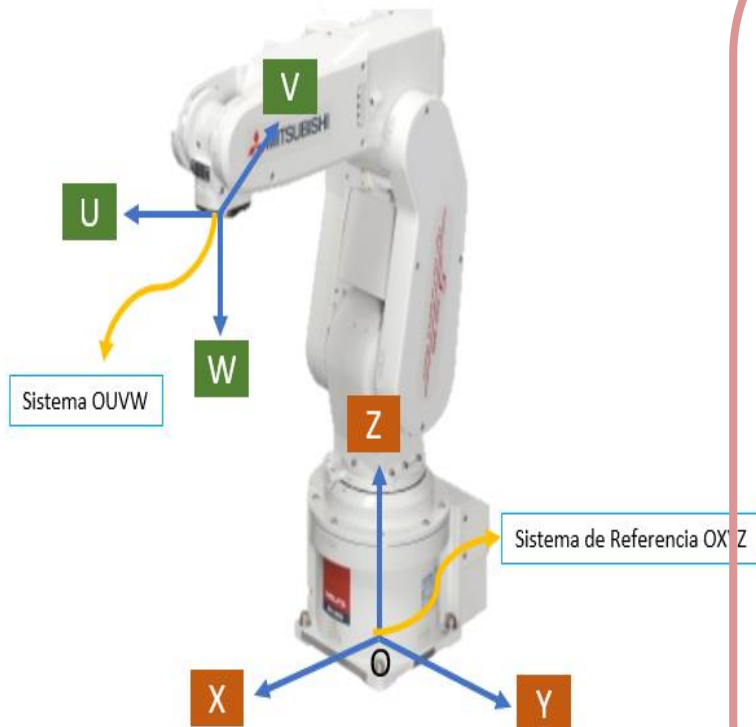


Herramientas de Localización Espacial

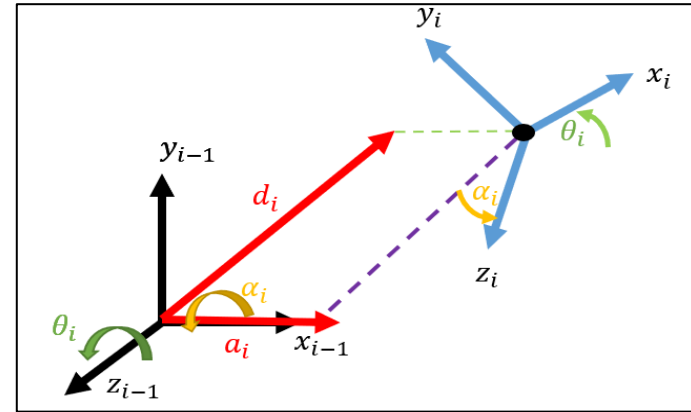


FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Control Cinemático de un robot manipulador



Matriz de transformación Homogénea



Matriz de rotación

Vector de posición

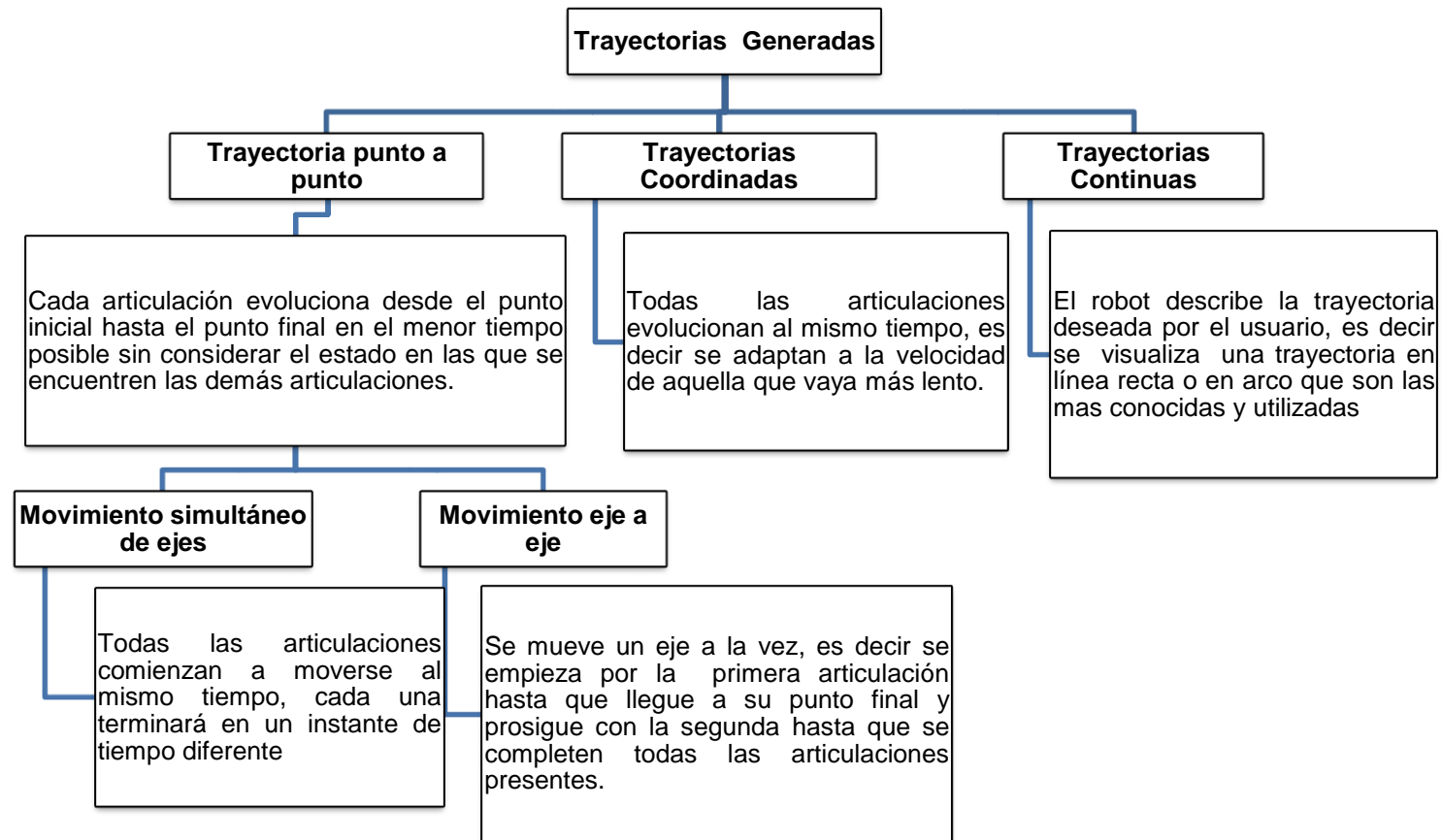
$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Vector de Perspectiva

Escalamiento



FUNDAMENTOS TEÓRICOS



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Programación off -line

La programación offline, o simulación, se utiliza más a menudo en la investigación de la robótica para asegurar que los algoritmos de control avanzado funcionan correctamente antes de pasarlos a un robot real, en base a la definición también puede ser llamado como un “GEMELO DIGITAL”. Suele usarse en la industria para reducir el tiempo de inactividad en la línea de producción, mejorar su eficiencia y predecir errores.

Realidad Virtual

- *Inmersiva*
- *No Inmersiva*



DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

El método implica asignar principales factores determinantes de una localización, para asignarle valores ponderados de peso relativo de acuerdo con la importancia que se le atribuye el criterio del investigador. Recomiendan los siguientes pasos para clasificar los factores cualitativos:

- Selección del motor de juegos para realidad virtual no inmersiva**

Factor Relevante	Peso Asignado	Lugar			
		Unreal Engine		Unity	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Numero de Formatos 3D que permite importar	0,1	9	0,9	8	0,8
Funcionalidad para junturas y fenómenos físicos	0,2	7	1,4	8	1,6
Funcionalidad para dar realismo a los gráficos	0,1	9	0,9	7	0,7
Posee tecnología en multiprocesamiento	0,1	5	0,5	9	0,9
Facilidad en enlazar con dispositivos de entrada	0,2	7	1,4	9	1,8
Documentación y Comunidad	0,3	7	2,1	10	3
Total	1		7,2		8.8
Selección			NO		SI

La alternativa ideal para el motor de juegos es Unity debido a la facilidad de uso y la integración de dispositivos de entrada que ayuda a cumplir con los requerimientos solicitados.



DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

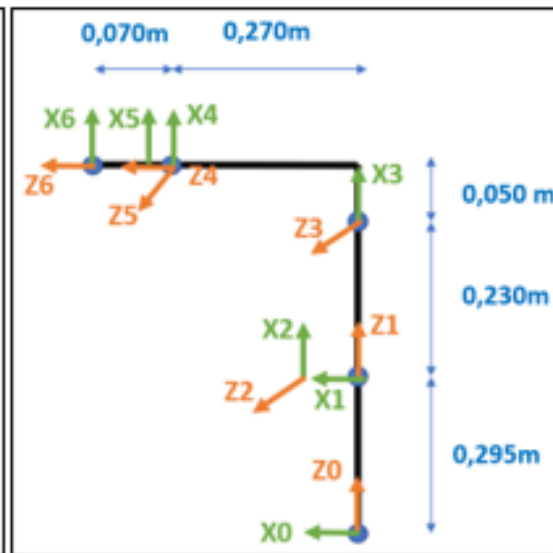
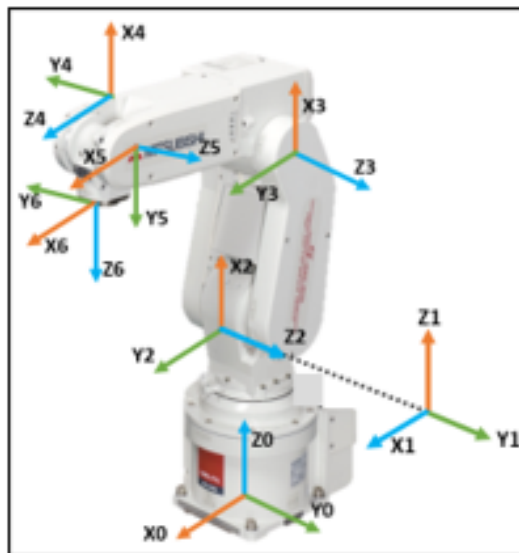
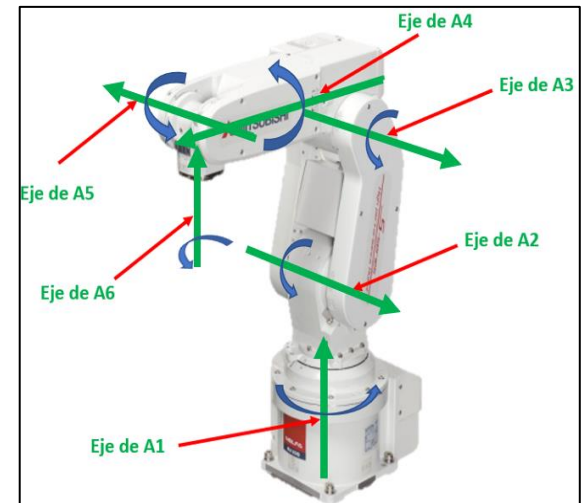
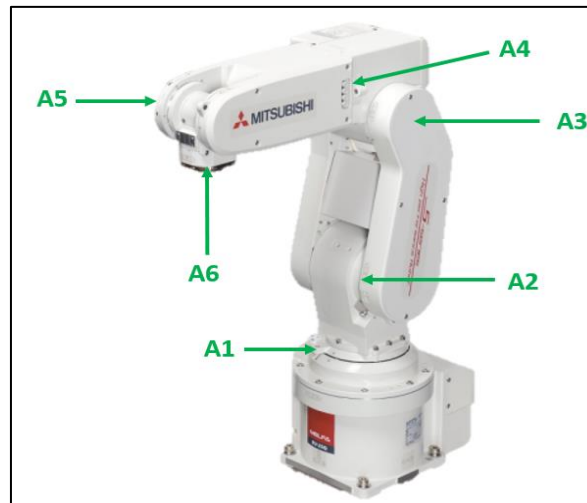
- Selección del mando para realidad virtual no inmersiva

Factor Relevante	Peso Asignado	Lugar					
		Wii Remote		Oculus Touch Controllers		HTC Vive Controllers	
		Calif	Pond	Calif	Pond	Calif	Pond
Compatibilidad con el motor de juego	0,25	9	2,25	10	2,5	10	2,5
Bajo Costo	0,25	10	2,5	8	2	7	1,75
Rapidez en Comunicación	0,2	8	1,6	7	1,4	9	1,8
Portabilidad en referencia a su Peso	0,1	9	0,9	7	0,7	8	0,8
Autonomía de Batería	0,1	9	0,9	7	0,7	8	0,8
Facilidad en uso	0,1	7	1,4	8	1,6	8	1,6
TOTAL	1		9,3		8,9		8,95
SELECCIÓN			SI		NO		NO



MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

Obtención de los parámetros D-H del brazo robótico Mitsubishi RV – 2SDB



MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

- Articulación 1

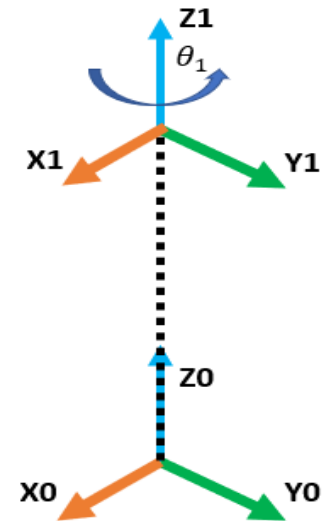
J	θ	d	a	α
1	θ_1	0.295	0	0

θ Será θ_1 por la configuración inicial del robot, por tanto, no se necesita de un ángulo de rotación en el Z1 ya que X1 Y X0 se encuentran alineados.

a Será 0, ya que este representa la distancia del X0 al X1, como se encuentran alineados, no representa ningún desplazamiento en dicho eje.

d Será 0.295, ya que este representa la distancia del Z0 al Z1, como se vio en la Figura 2, tiene un desplazamiento de 0.295 m.

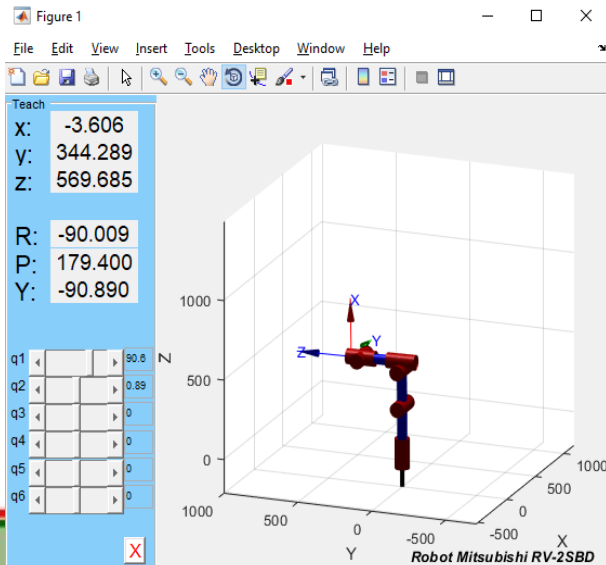
α Será 0, ya que representa el ángulo que puede rotar en el eje X0 para alinear Z1 y Z0, como se encuentran alineados el ángulo será 0° .



MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

• Matriz de transformación Homogénea

J	θ	d	a	α
1	θ_1	0.295	0	0
2	$\theta_2 - 90^\circ$	0	0	-90
3	θ_3	0	0.230	0
4	θ_4	0.270	0.5	-90
5	$\theta_5 + 90$	0	0	90°
6	θ_6	0.070	0	-90



```
Command Window

T =

-0.0002    0.9999   -0.0105   -3.6055
 0.0155    0.0105    0.9998   344.2893
 0.9999     0      -0.0155   569.6851
 0          0          0          1.0000

>> Pxyz

Pxyz =

-3.6055
344.2893
569.6851

>> Rxyz

Rxyz =

-90.8900
-0.5999
-90.0093
```



MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

- Cinemática Inversa a partir de la jacobiana inversa

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} \quad \dot{h} = J(q)\dot{q}$$

El modelo cinemático define velocidades angulares dada los valores de posición del efector final en la siguiente ecuación

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{h} \quad J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} & \frac{\partial x}{\partial q_4} & \frac{\partial x}{\partial q_5} & \frac{\partial x}{\partial q_6} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} & \frac{\partial y}{\partial q_4} & \frac{\partial y}{\partial q_5} & \frac{\partial y}{\partial q_6} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} & \frac{\partial z}{\partial q_4} & \frac{\partial z}{\partial q_5} & \frac{\partial z}{\partial q_6} \end{bmatrix}_{(3 \times 6)}$$



MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

- **Cinemática Inversa a partir de la jacobiana inversa**

Sabiendo que $J(q)$ no es una matriz cuadrada no se puede definir una matriz inversa debido a que el sistema es redundante donde posee más columnas que filas, obteniendo varias soluciones, por ende, es necesario definir la matriz como pseudoinversa “por la derecha”, viene dado por la ecuación.

$$J(q)^+ = J(q)^T_{(6 \times 3)} * \left(J(q)_{(3 \times 6)} * J(q)^T_{(6 \times 3)} \right)^{-1}$$

$$J(q) * J(q)^+ = I$$

La diferencia entre los valores de posición deseada y la real

$$h_e = h_d - h_r$$

$$\dot{q} = J(q)^+ \left(\dot{h} + K(h_e) \right)$$



$$q_{(k+1)} = q_{(k)} + \dot{q}_{(k)} dt$$

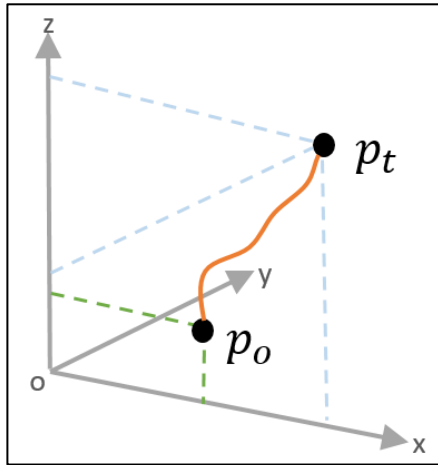
$$\dot{q}_{(k)} = J(q_{(k)})^+ K * h_e$$



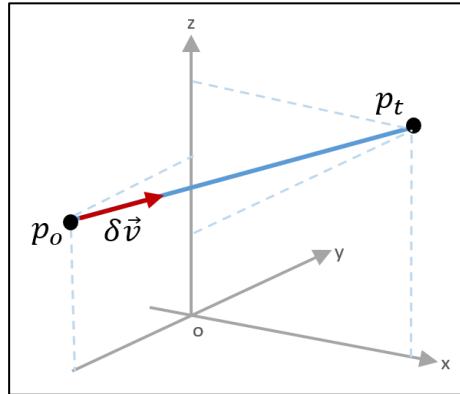
MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS DE CONTROL

TRAYECTORIAS

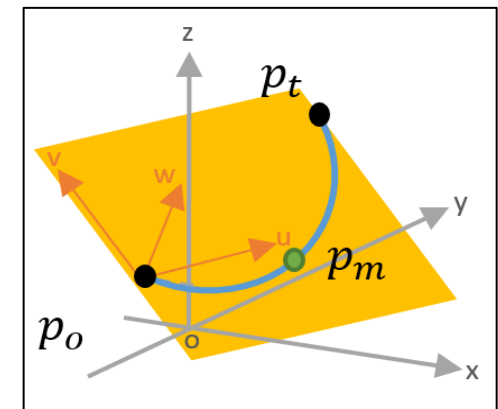
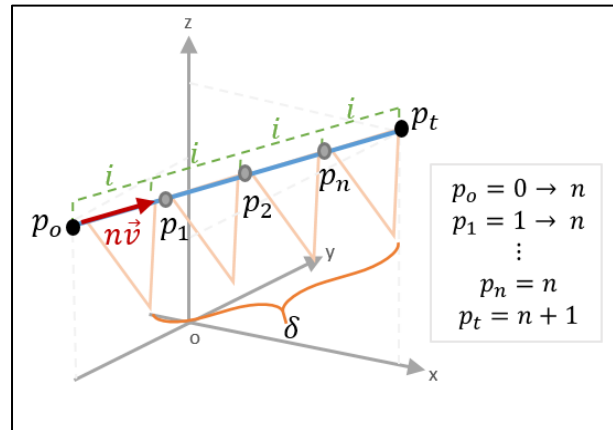
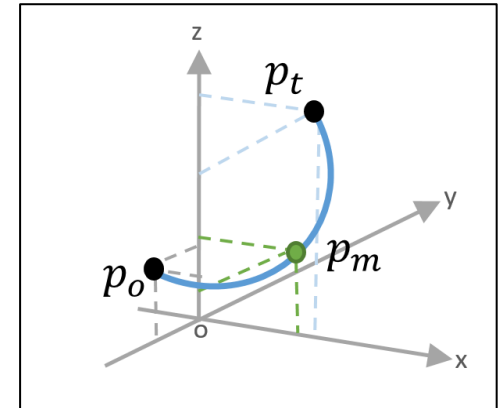
PTP



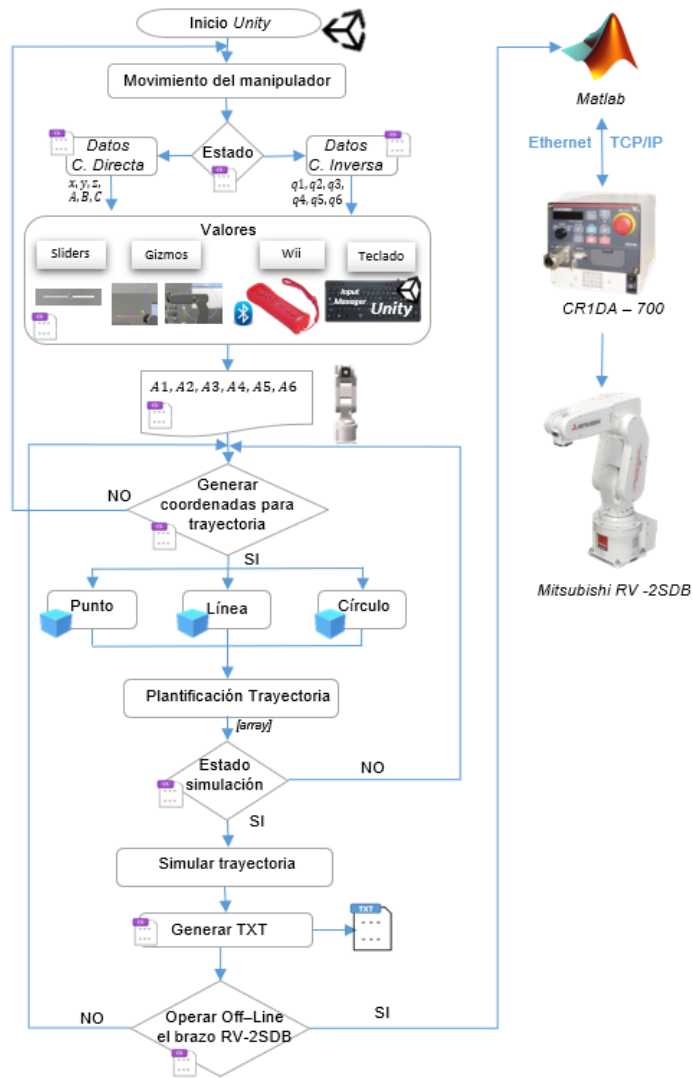
LÍNEA



CÍRCULO



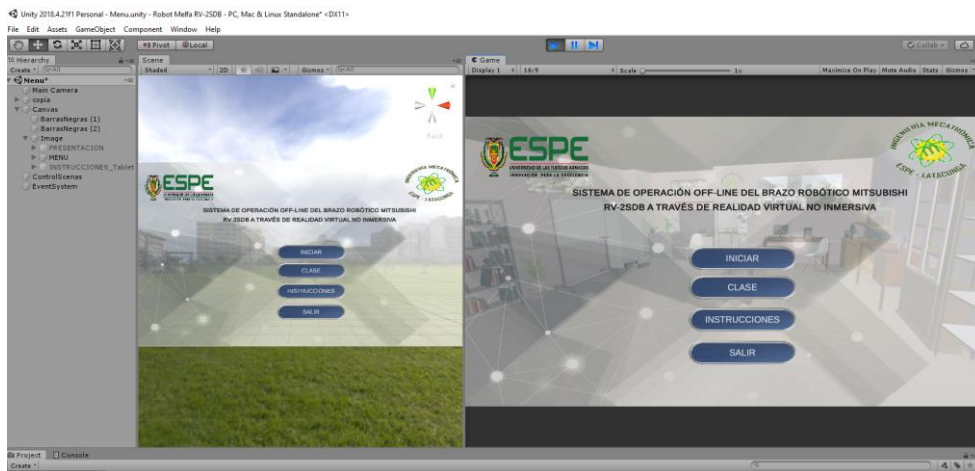
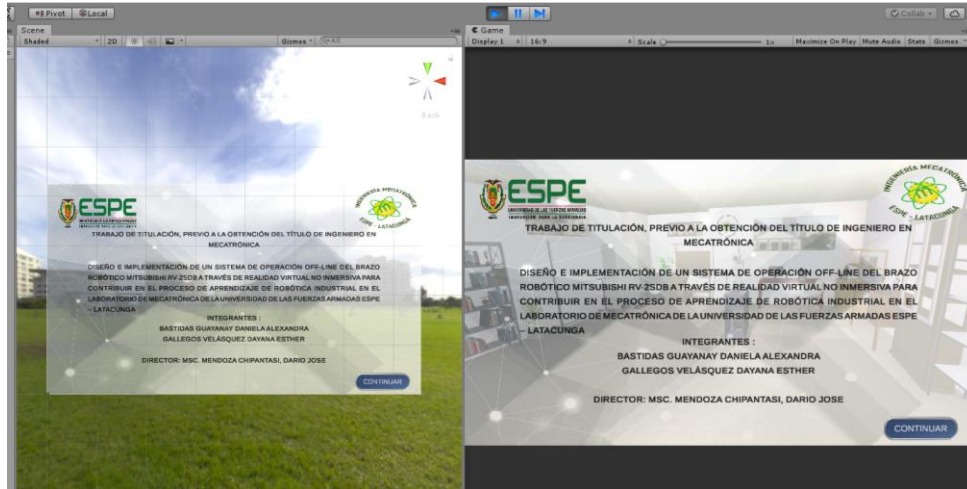
IMPLEMENTACIÓN



Para la implementación del sistema de operación Off – line se identifican dos etapas principales, la primera es la implementación del sistema de realidad virtual no inmersivo y la segunda la comunicación con la controladora del brazo RV - 2SDB para que pueda ejecutar los movimientos, en este capítulo se desarrolla las dos etapas contemplando todo el sistema, en la Figura 40 se representa el funcionamiento general.

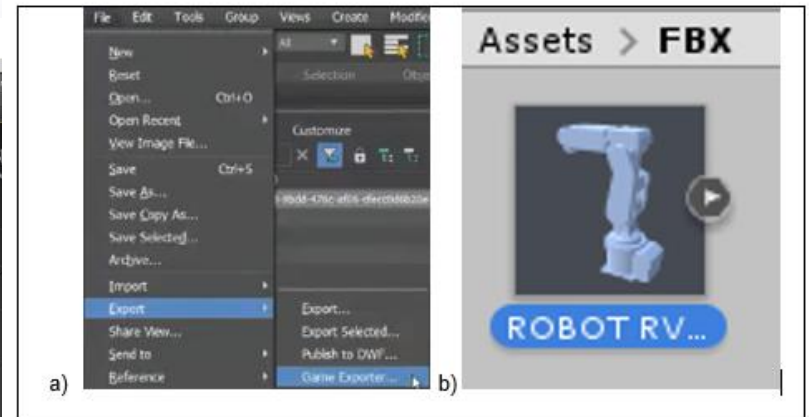
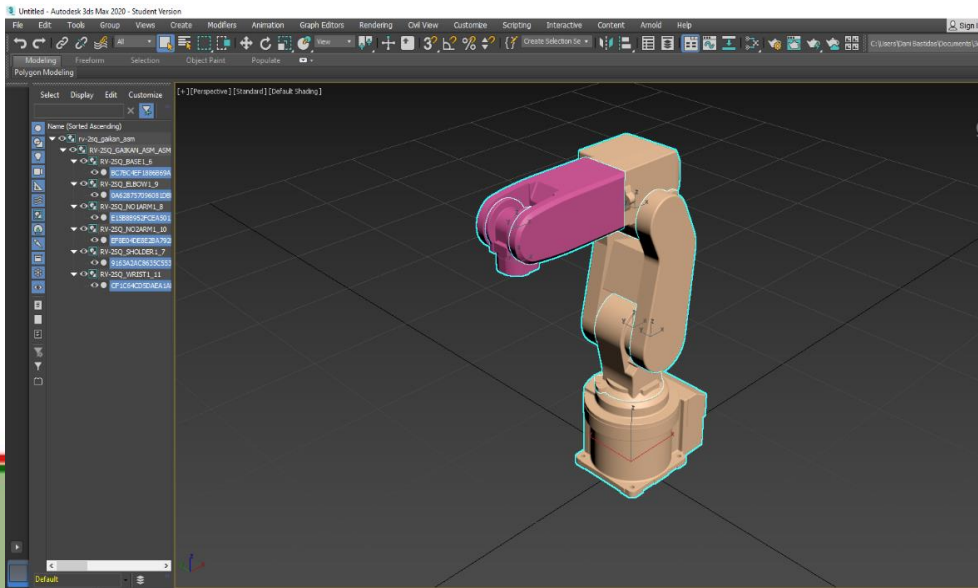
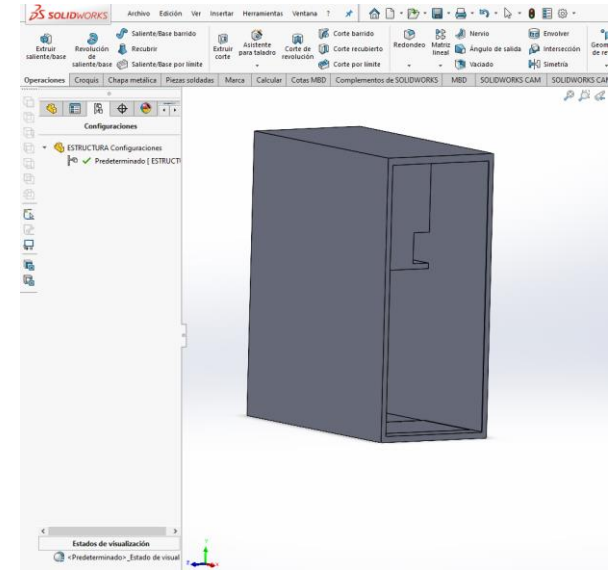
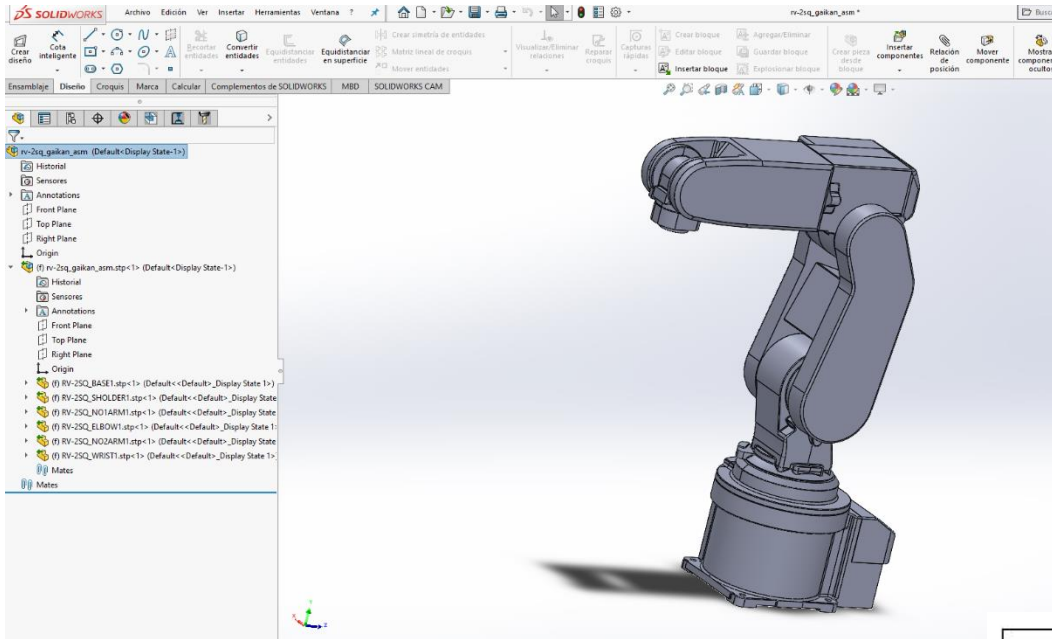
IMPLEMENTACIÓN

- Escenas y Ventanas de Realidad Virtual



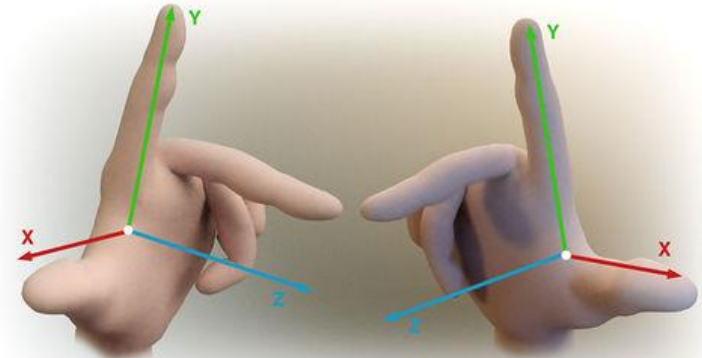
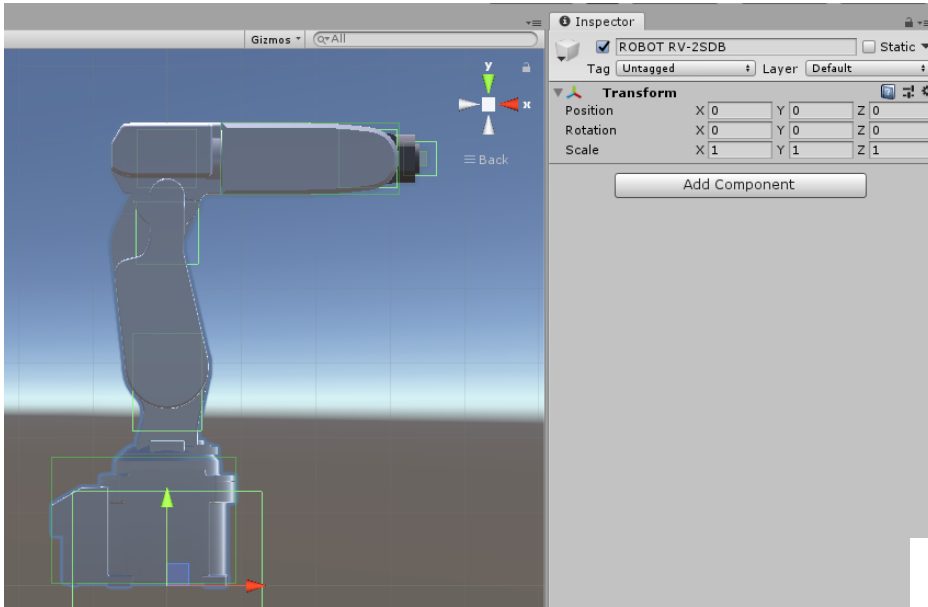
IMPLEMENTACIÓN

Modelo 3D Robot Mitsubishi Melfa RV-2SDB



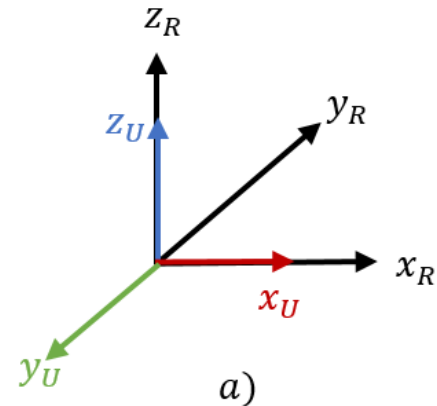
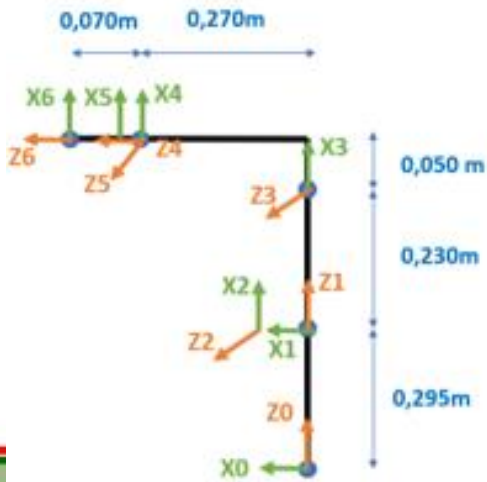
IMPLEMENTACIÓN

Ubicación, texturización y renderización de los objetos en la escena

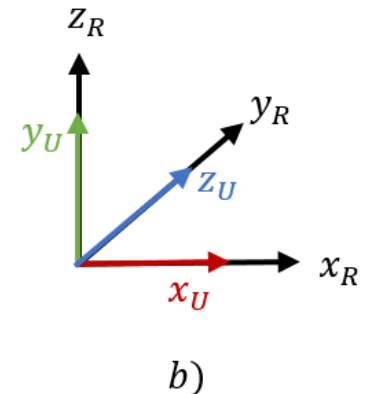


Left Handed Coordinates

Right Handed Coordinates



a)



b)



IMPLEMENTACIÓN

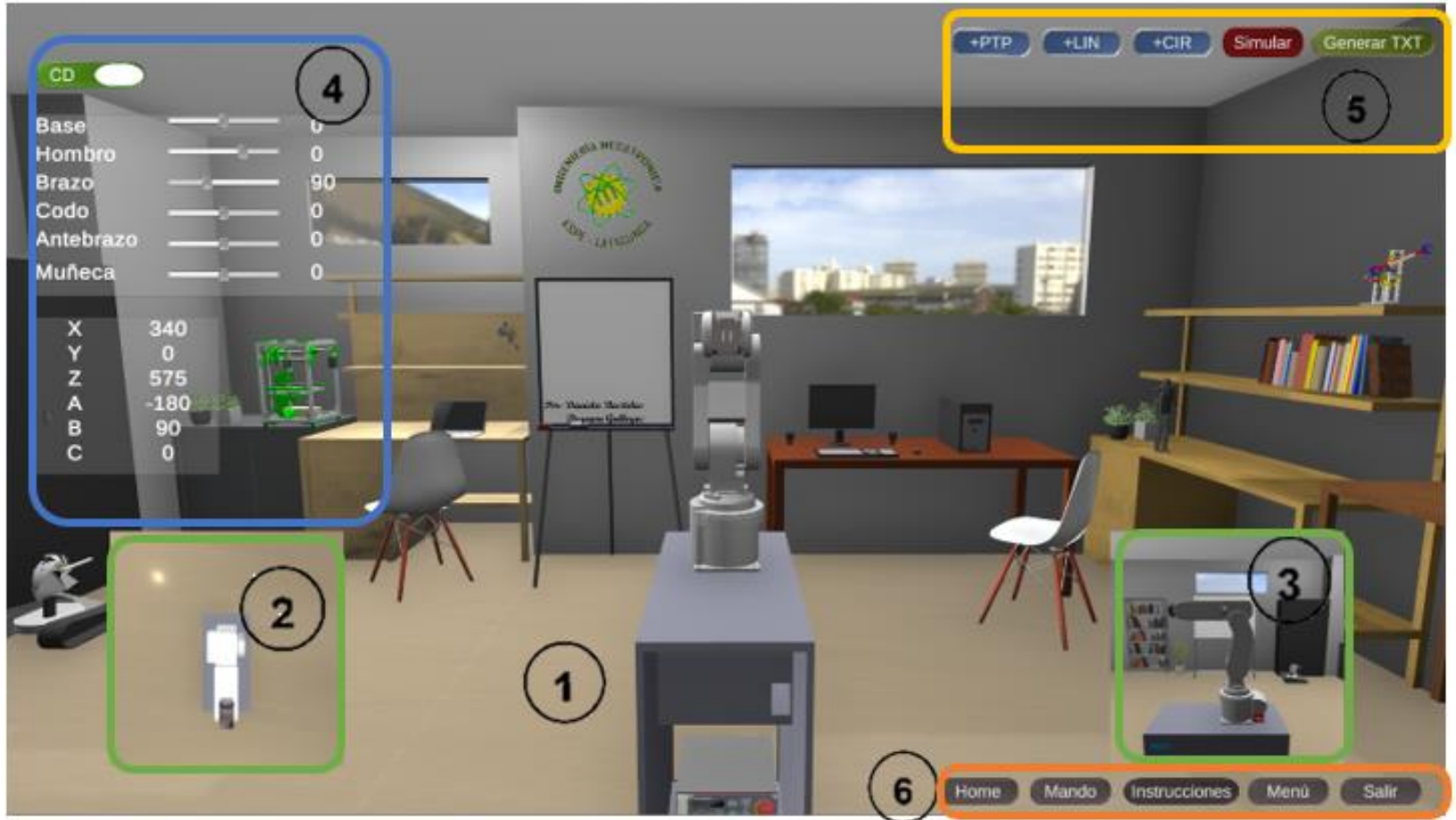
Ubicación, texturización y renderización de los objetos en la escena

Se sitúan todos los objetos en la escena y se agregan materiales y texturas en cada elemento, esto se complementa para generar ya una superficie renderizada. Para dar soporte visual en el ambiente y se puedan observar más elementos en el exterior se incluye un skybox (una imagen exterior que se relaciona con la escena de un laboratorio virtual)



IMPLEMENTACIÓN

Interfaz de Usuario



IMPLEMENTACIÓN

Instrucciones

Indicador de HMI

GO Al presionar este botón se guarda el punto actual del efector final del robot.

DELET Al presionar este botón se elimina el punto creado en el panel de trayectorias.

Los siguientes botones generan un elemento en el panel de trayectorias

+PTP Genera un punto con un botón de GO y DELET

+LIN Genera un punto con un botón de GO y DELET

+CIR Genera dos puntos, uno para el punto medio del círculo y otro para el punto final del círculo, con dos botones de GO y uno DELET

Simular Al presionar entre un estado de simulación, genera automáticamente la trayectoria que designa el panel de coordenadas a seguir, una vez concluida se guarda en un documento de texto ".txt" los movimientos generados por el manipulador. Si en el transcurso de la simulación no desea continuar se puede parar en la misma posición del botón, pero en éste está designado con **Detener**

Generar TXT Al presionar se ejecuta un archivo de texto ".txt" de las coordenadas generadas en el panel de la trayectoria. El archivo tiene el nombre de "Articulaciones"

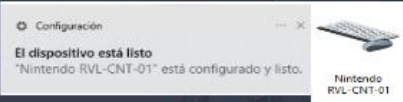
Home Indica que el manipulador debe dirigirse a la posición inicial home, puede ocuparse cuando está en estado de cinemática directa o inversa.

Mando El comando funciona únicamente cuando detecta un Wii Motion Plus y éste a su vez está conectado por bluetooth a su computadora. Dirigirse a dispositivos e impresoras en su PC. Sincronizar presionando los botones 1 y 2 del mando al mismo tiempo.

Toggle alterna entre dos estados

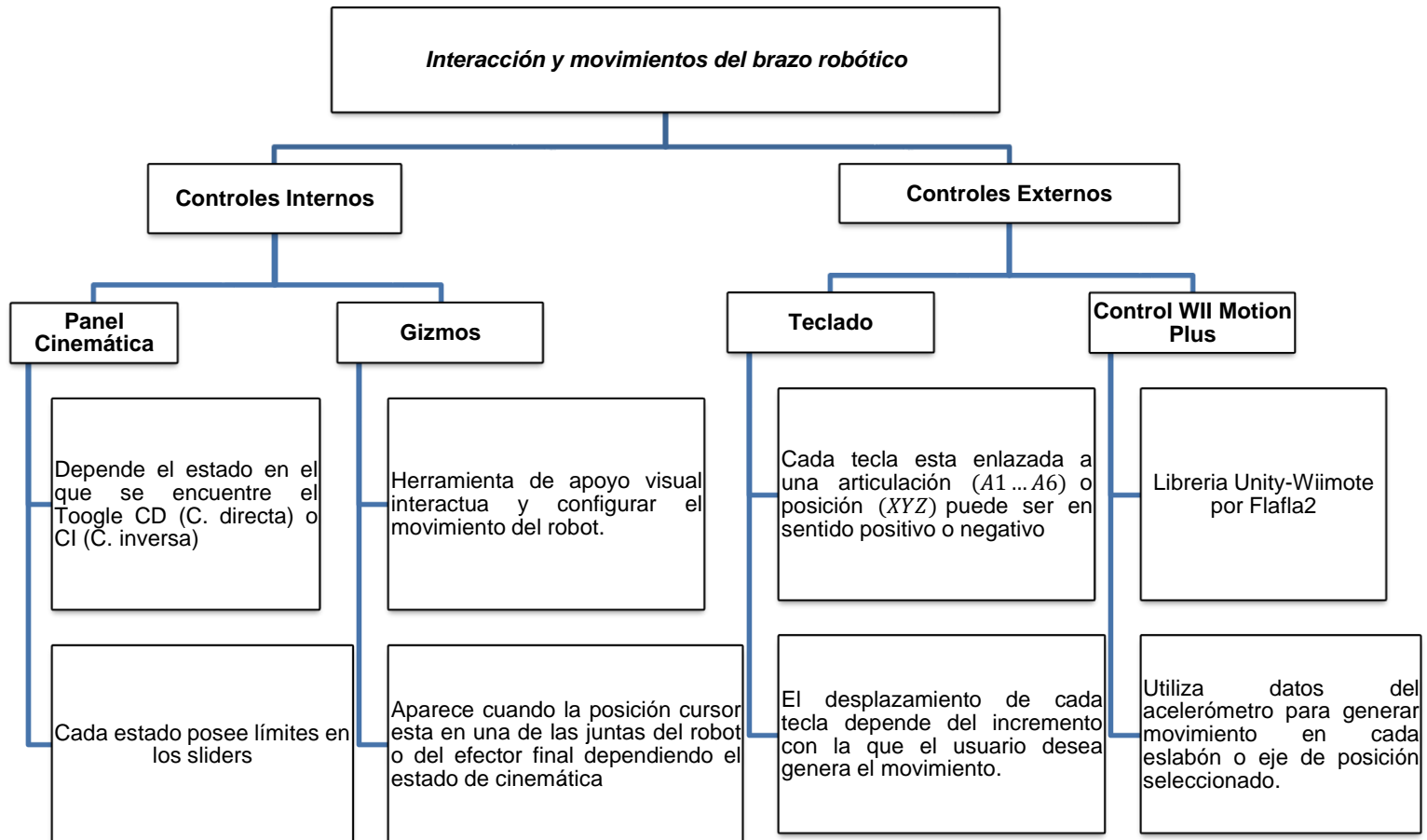
CD Cinemática Directa se puede mover las articulaciones del robot por medio de los sliders, gizmos, teclas o wii motion plus.

CI Cinemática Inversa se puede mover el efector final del robot por medio de los sliders, gizmos, teclas o wii motion plus.



IMPLEMENTACIÓN

Marco organizativo del movimiento del robot



IMPLEMENTACIÓN

Elementos de entradas para el movimiento del Robot

1 Teclado

J1 - X	Q	A
J2 - Y	W	S
J3 - Z	E	D
J4	R	F
J5	T	G
J6	Y	H

Incremento Teclado alfanumérico

x1	x2	x3
	@	#
1	2	3

2 Gizmos

Cinemática directa

Cinemática inversa

NOTA:
Se puede probar diferentes vistas, presionando las pantallas pequeñas, que se encuentran en la parte inferior de la pantalla principal.

3 Wii-Controller

Cinemática directa

Cinemática inversa

Wiiote.Left (Anterior grado de libertad)

Al presionar se selecciona el GDL anterior. Ejemplo: Si está activado A1 y se presiona el botón se activa A6 y se desactiva A1, luego se procede a mover el mando.

Wiiote.Home (Home)

El manipulador regresa a la posición Home del robot

Wiiote.B (Hombre muerto)

Mantener presionado para que se ejecuten los movimientos. Si no se presiona, no generará ninguna acción.

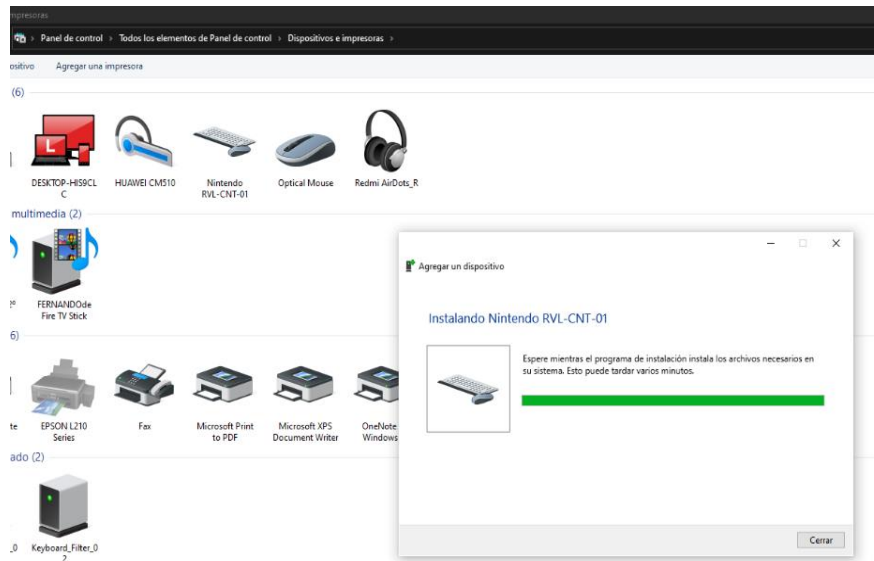
Wiiote.Right (Siguiente grado de libertad)

Al presionar se selecciona el GDL siguiente. Ejemplo: Si está activado A1 y se presiona el botón se activa A2 y se desactiva A1, luego se procede a mover el mando.

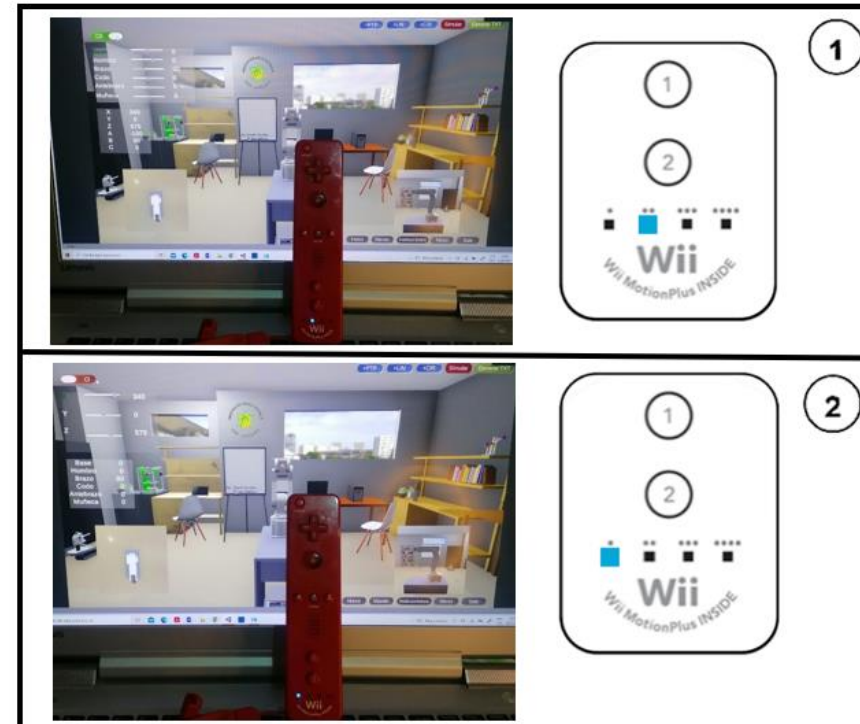
IMPLEMENTACIÓN

Control Wii Motion Plus (WMP)

- Configuración comunicación del WMP en PC



- Comunicación WMP a Unity



IMPLEMENTACIÓN

Control Wii Motion Plus (WMP)

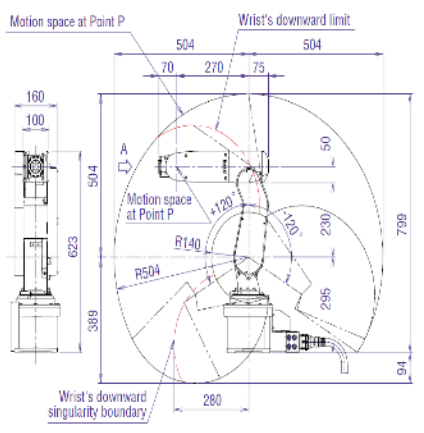
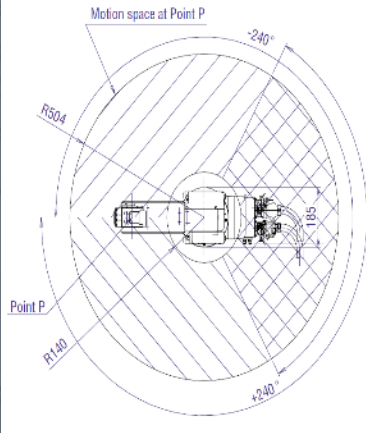
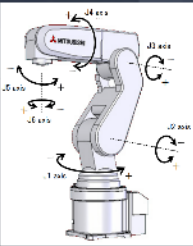
- Movimientos del manipulador con el WMP



IMPLEMENTACIÓN

Instrucciones de límites del manipulador en simulación.

Límites para el movimiento del robot MITSUBISHI RV-2SDB



A1 = Base (-120° a 120°) X (-210 a 400) mm
A2 = Hombro (-90° a 40°)
A3 = Brazo (65° a 140°) Y (-350 a 350) mm
A4 = Codo (-180° a 180°)
A5 = Antebrazo (-80° a 80°) Z (140 a 770) mm
A6 = Muñeca (-180° a 180°)

Rangos de movimiento del robot en el simulador

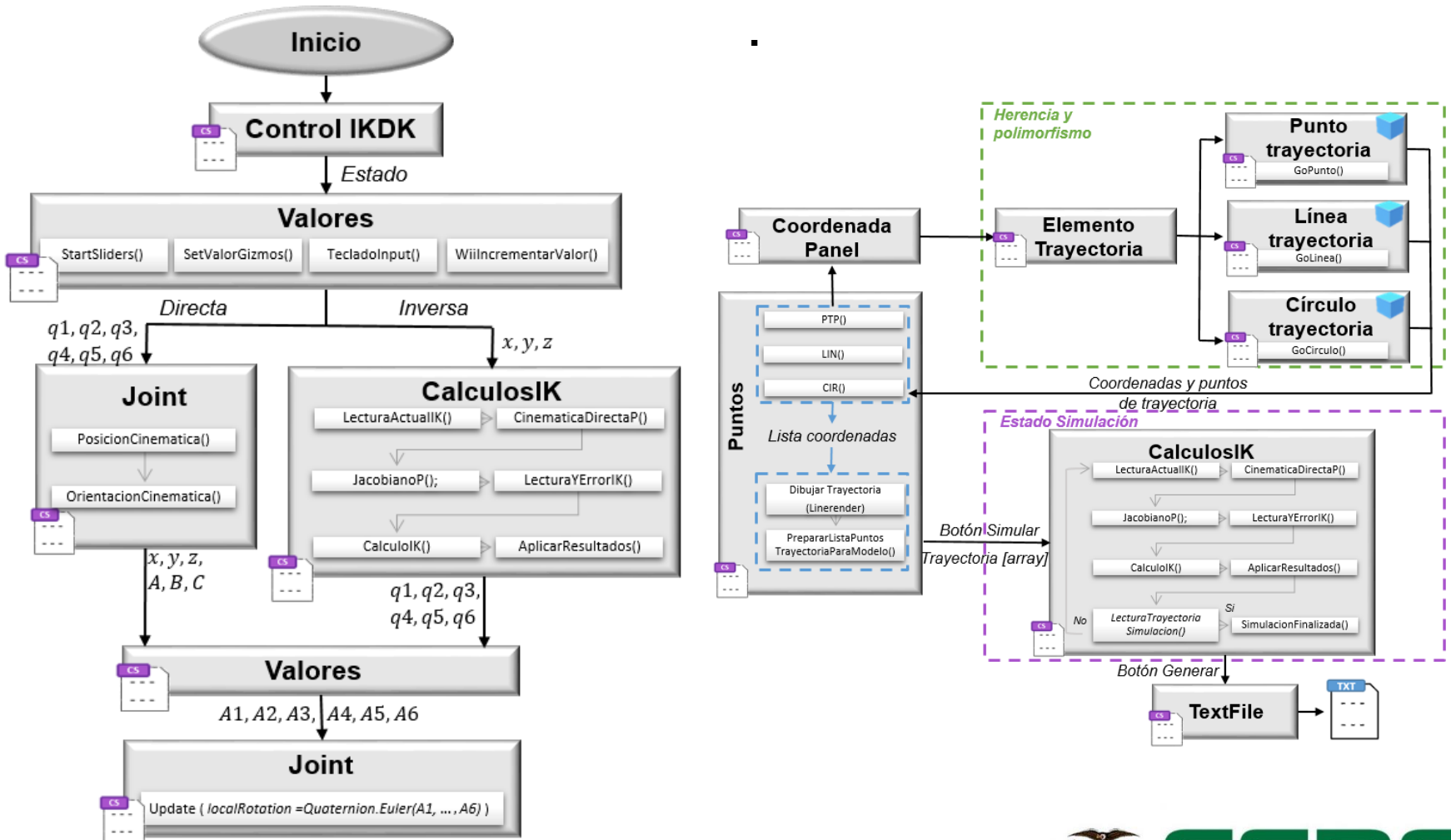
Los valores de posición en la muñeca están en milímetros. Se debe tomar en cuenta la orientación de cada eslabón con sentido anti horario (+) y sentido horario (-).

Al mover las articulaciones del robot o la posición final de la muñeca no intentar llegar a los límites mínimos ni máximos. Debido a que pueden llegar en puntos de singularidad.



IMPLEMENTACIÓN

Programación y scripting del sistema de realidad virtual no inmersivo



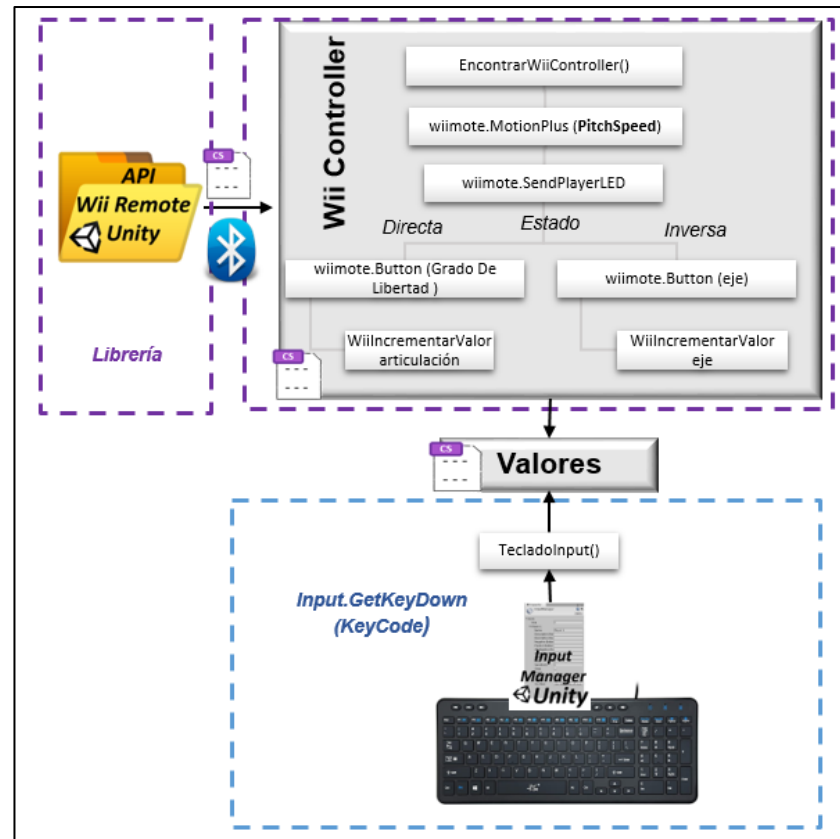
IMPLEMENTACIÓN

Programación y scripting del sistema de realidad virtual no inmersivo



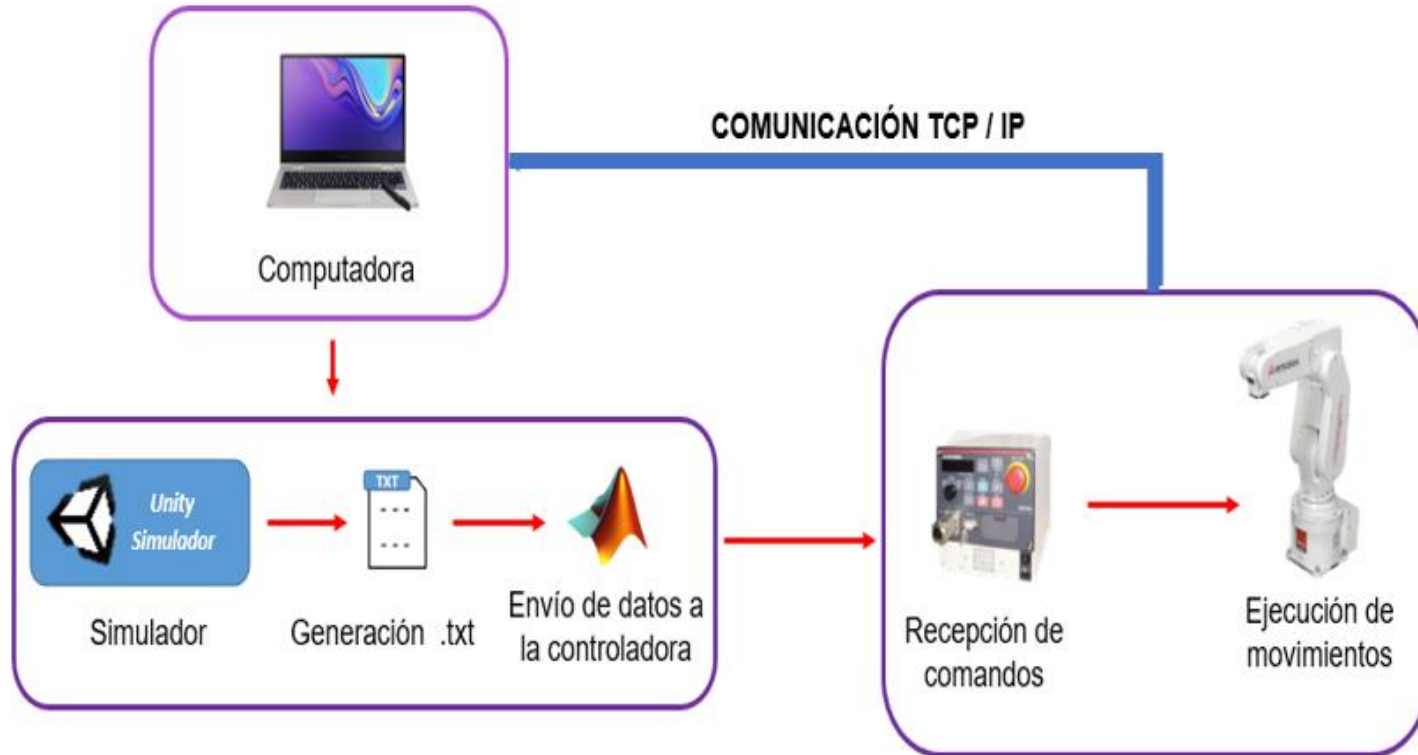
*Articulaciones: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
-19.08	4.74	100.19	-0.10	2.32	0.00
-14.52	3.64	105.11	-0.05	3.63	0.00
-9.30	3.45	109.24	0.02	4.70	0.00
-1.69	5.17	113.25	0.17	5.61	0.00
0.36	6.00	113.93	0.21	5.73	0.00
2.66	6.71	114.26	0.25	5.76	0.00
5.12	7.24	114.20	0.30	5.71	0.00
7.60	7.55	113.76	0.36	5.58	0.00
9.97	7.63	112.96	0.40	5.37	0.00
12.08	7.48	111.85	0.44	5.10	0.00
13.85	7.12	110.50	0.47	4.78	0.00
15.17	6.57	108.97	0.49	4.43	0.00
16.00	5.86	107.36	0.51	4.07	0.00
16.30	5.04	105.75	0.51	3.71	0.00
16.07	4.15	104.22	0.51	3.37	0.00
15.30	3.22	102.86	0.50	3.08	0.00
14.06	2.31	101.74	0.49	2.84	0.00



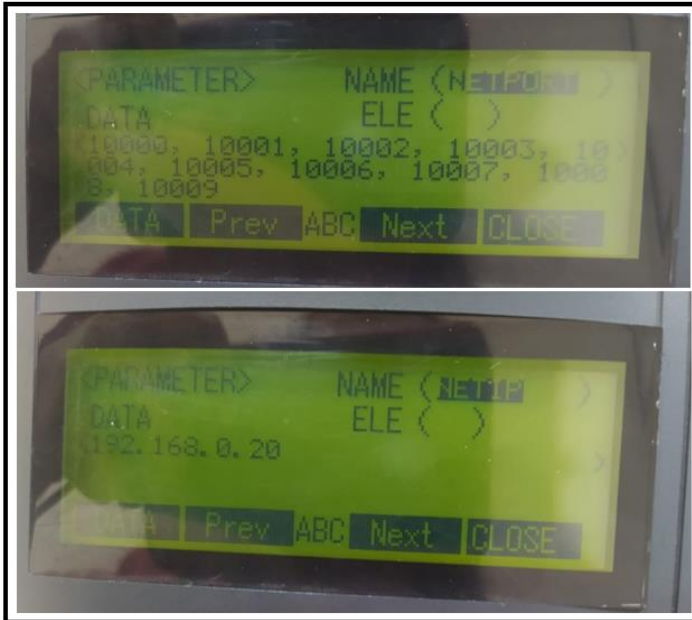
IMPLEMENTACIÓN

Comunicación con el brazo robótico Mitsubishi RV 2SDB



IMPLEMENTACIÓN

Comunicación con el brazo robótico Mitsubishi RV 2SDB



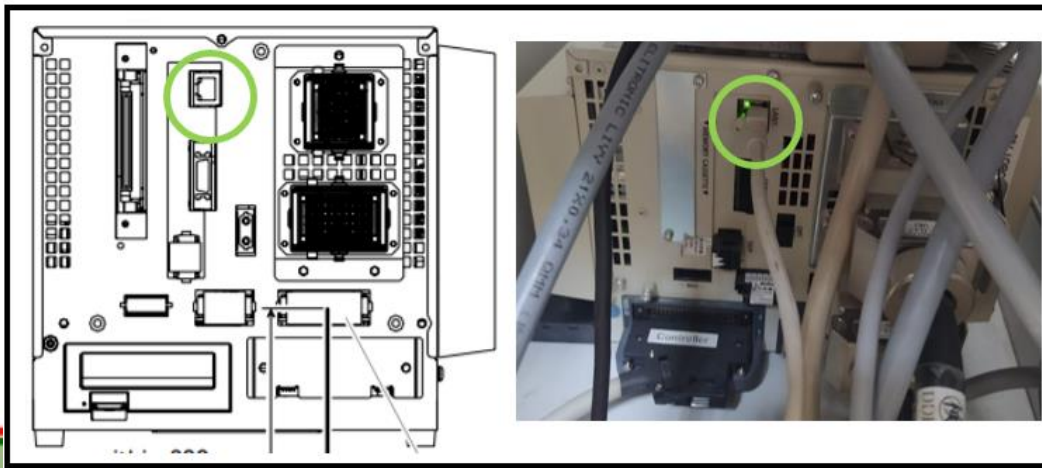
```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1165]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\davis>ping 192.168.0.20

Haciendo ping a 192.168.0.20 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.20: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.20: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.20: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.0.20: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.0.20:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
              (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
              Mínimo = 0ms, Máximo = 1ms, Media = 0ms

C:\Users\davis>
```



IMPLEMENTACIÓN

Comunicación con el brazo robótico Mitsubishi RV 2SDB

En el caso de que no se recibiera el mensaje como se muestra en la Figura 83, se procede a establecer una nueva IP estática para la computadora del usuario, para ello se realiza lo siguiente:

1. Ir a el centro de redes y recursos compartidos, seleccionar RED ETHERNET e ir a las propiedades de la misma.
2. Dar doble clic en el protocolo TCP/IPV4
3. Seleccionar “Usar la siguiente dirección IP” y se procede a ingresar los parámetros dados a continuación:

Dirección IP: 192.168.0.50

Máscara de Subred: 255.255.255.0

Puerta de Enlace predeterminada: 162.168.0.1

- **Software Matlab**

```
%Creacion de la variables en la cual almacenaremos el objeto
%de la comunicacion TCP/IP
syms t;
t=tcip("192.168.0.20",10001);
%Permite abrir el puerto de comunicación/IMPORTANTE/
fopen(t);
```



IMPLEMENTACIÓN

Comunicación con el brazo robótico Mitsubishi RV 2SDB

- Comandos de comunicación para la controladora CR1D 700

fwrite(t, 1; 1; 'Instrucción')

INSTRUCCIÓN	OPERACION
OPEN=USERTOOL	Da la apertura hacia la controladora
CNTLON	Inicializa el movimiento del brazo, indica que se enviará un dato de control
CNTLOFF	Finaliza el movimiento del brazo, indica que se cierra el envío de datos de control
SRVON	Enciende los servomotores
SRVOFF	Apaga los servomotores
RSTALRM	Resetea las alarmas
OVRD=30.0	Indica el porcentaje de la velocidad al que ejecutará los movimientos el brazo, en este caso es 30%
EXECJCOSIROP= (J1, J2, J3, J4, J5, J6)	Indica los ángulos en grados al que se desea llegar de cada junta

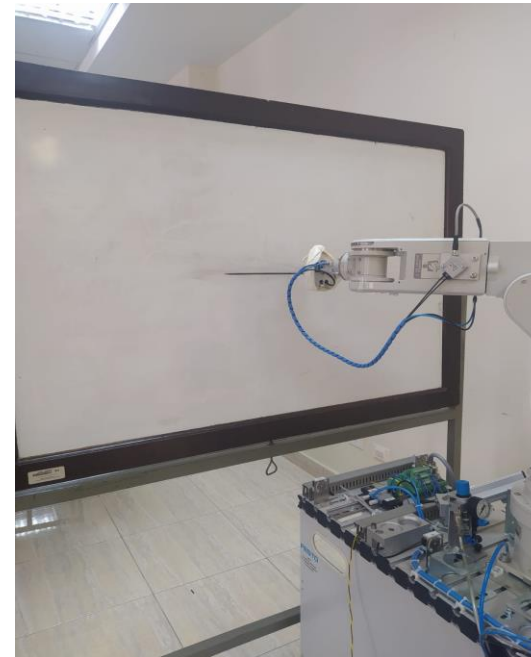


PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO (Precisión y eficiencia):

Para el análisis del correcto funcionamiento del sistema de operación off- line del brazo robótico RV 2SDB frente al funcionamiento del brazo físico es necesario validar dos variables fundamentales, precisión y eficiencia, a partir de las trayectorias generadas y midiendo los tiempos en llegar a dichos puntos respectivamente.

- **Precisión Línea**



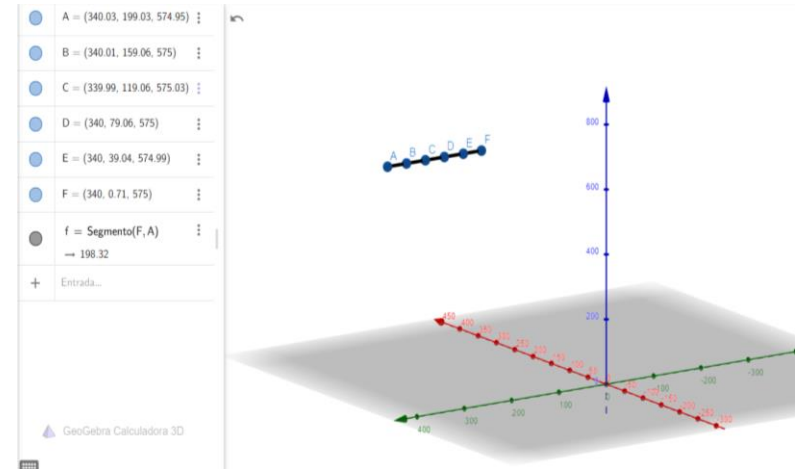
PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO (Precisión y eficiencia):

- Precisión Línea



Prueba N°	Longitud X [mm]
1	198.32
2	197.62
3	200.77
4	200.77
5	198.45



PRUEBAS Y RESULTADOS

A continuación, se analiza la validación de la hipótesis respecto a la precisión del sistema de operación off – line del brazo RV 2SDB con el método estadístico *t – student*

$H_0: \mu = 200$ (*Medida de la línea programada en el robot físico*)

$H_1: \mu \neq 200$ (*Medida de la línea programada en el robot físico*)

- H_0 No existen diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria lineal generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico.
- H_1 Existen diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria lineal generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico.



PRUEBAS Y RESULTADOS

Generalmente el nivel de significancia se define en $\alpha = 0.05$, lo que significa que la probabilidad de analizar las diferencias en los datos es de solo el 5%.

Se define el valor crítico para la prueba, dicho dato se lo encuentra en la tabla de distribución t-student de dos colas con grados de libertad.

$$t_{vc} = \pm 2.776$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s\bar{x}}$$

$$t > t_{vc} \quad \text{Rechaza } H_0$$

$$t < t_{vc}, \quad \text{Acepta } H_0$$

$$s\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$t = -1.2272$$

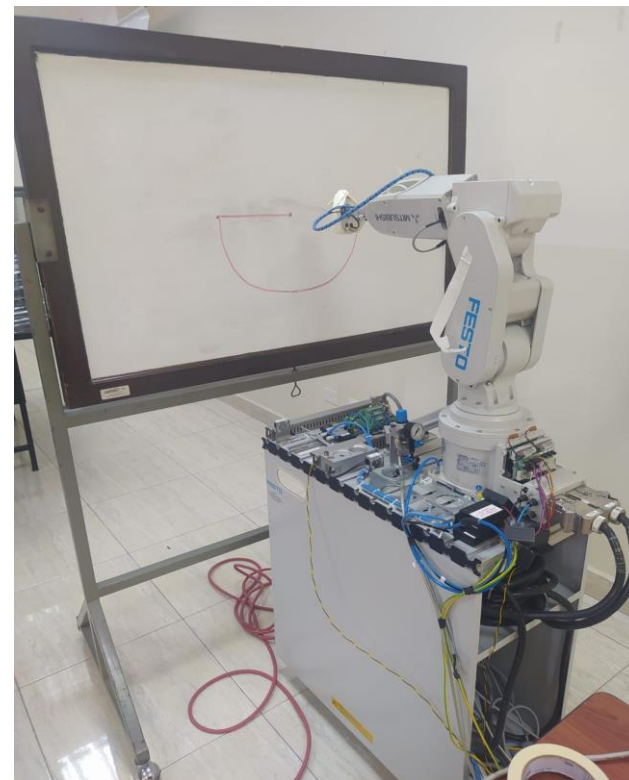
Mediante la prueba t-student de la muestra obtenida, se concluye que no se encontraron diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria lineal generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico



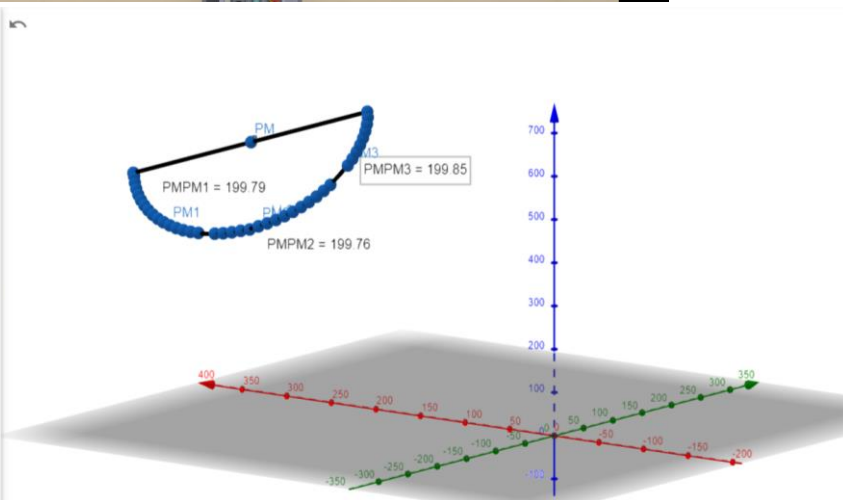
PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO (Precisión y eficiencia):

- Precisión Círculo



PM = (340, 0, 575)
distanciaPMLL = Distancia PMLL → 199.76
TextoPMLL=Nombre(PM)+ (Nombre(PM2))+ "+distanciaPMLL
distanciaPMAA = Distancia PMAA → 199.79
TextoPMAA=Nombre(PM)+ (Nombre(PM1))+ "+distanciaPMAA
distanciaPMT7 = Distancia PMT7 → 199.85
TextoPMT7=Nombre(PM)+ (Nombre(PM3))+ "+distanciaPMT7
+ Entrada...



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO (Precisión y eficiencia):

- Precisión Círculo

Pru eba N°	Punto 1	Punt o 2	Punt o 3	Radio	Pro medio \bar{x}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	199.79	199.85	199.76	199.74	198.7
2	199.42	199.28	199.65	197.66	199
3	199.58	199.46	200.16	199.73	199.7
4	199.82	199.99	200.95	199.75	200.1
5	199.2	199.35	200.33	200.52	199.8



PRUEBAS Y RESULTADOS

A continuación, se analiza la validación de la hipótesis respecto a la precisión del sistema de operación off – line del brazo RV 2SDB con el método estadístico *t – student*

$H_0: \mu = 200$ (*Medida del arco programada en el robot físico*)

$H_1: \mu \neq 200$ (*Medida del arco programada en el robot físico*)

- H_0 No existen diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria lineal generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico.
- H_1 Existen diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria lineal generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico.



PRUEBAS Y RESULTADOS

Generalmente el nivel de significancia se define en $\alpha = 0.05$, lo que significa que la probabilidad de analizar las diferencias en los datos es de solo el 5%.

Se define el valor crítico para la prueba, dicho dato se lo encuentra en la tabla de distribución t-student de dos colas con grados de libertad.

$$t_{vc} = \pm 2.776$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s\bar{x}}$$

$$t > t_{vc} \quad \text{Rechaza } H_0$$

$$t < t_{vc}, \quad \text{Acepta } H_0$$

$$s\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$t = -0,77$$

Mediante la prueba t-student de la muestra obtenida, se concluye que no se encontraron diferencias significativas entre el promedio de valores obtenidos en las pruebas de medición de una trayectoria circular generada por el simulador no inmersivo y la programada en la controladora del brazo físico.



PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO (Precisión y eficiencia):

- **Eficiencia, tiempos PTP**

Se utiliza el método estadístico t – student para analizar las dos muestras tomadas de los tiempos y determinar si existe diferencias significativas entre las mismas, para ello en la Tabla 15 se muestran los datos obtenidos.

N°	Tiempos de los puntos generados	Tiempos de los puntos programados en la
	por el simulador	controladora del brazo
	[seg]	[seg]
1	1.63	1.86
2	1.53	1.36
3	2.6	3.4
4	1.73	2.3
5	1.6	2.26
6	1.53	2.06
7	2.3	1.76
8	1.33	1.5
9	1.06	1.03
10	2.1	2.33

PRUEBAS Y RESULTADOS

Se utiliza el método estadístico t – student para analizar las dos muestras tomadas de los tiempos y determinar si existe diferencias significativas entre las mismas

H_0 : No existen diferencias significativas entre el promedio de los tiempos obtenidos entre los puntos generados por el simulador y los programados por la controladora del brazo.

H_1 : Existen diferencias significativas entre el promedio de los tiempos obtenidos entre los puntos generados por el simulador y los programados por la controladora del brazo.

n_1	n_2	\bar{x}_1	\bar{x}_2	S_1^2	S_2^2
10	10	1.74	1.98	0.2148	0.43



PRUEBAS Y RESULTADOS

Se define el valor crítico para la prueba, dicho dato se lo encuentra en la tabla de distribución t-student de dos colas con grados de libertad.

$$t_{vc} = \pm 2.10$$

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{s\sqrt{n_1^{-1} + n_2^{-1}}}$$

$$t > t_{vc} \quad \text{Rechaza } H_0$$

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$t < t_{vc}, \quad \text{Acepta } H_0$$

$$s = 0.567$$

$$t = -0.94$$

Mediante la prueba t-student de las dos muestras obtenidas, se concluye que no se encontraron diferencias significativas entre el promedio de los tiempos obtenidos entre los puntos generados por el simulador y los programados por la controladora del brazo.



PRUEBAS Y RESULTADOS

VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

- **Hipótesis**

¿El diseño e implementación de un sistema de operación off-line del brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB a través de realidad virtual no inmersiva contribuirá en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga?

Se debe tener variable dependiente e independiente en el proceso de validación de hipótesis, se muestran a continuación:

Variables de la Investigación

- Variable Independiente: Sistema de realidad virtual no inmersiva con operación off-line del brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB
- Variable dependiente: Contribución en el proceso de aprendizaje de robótica industrial

Se utiliza el método estadístico t – student para analizar la validación de hipótesis mediante la implementación de un test donde se mide el nivel de conocimiento de robótica industrial en función de conceptos generales, dicho formulario es aplicado a un grupo de estudiantes que aún no reciben la materia de robótica industrial, se segmenta en dos grupos, el primero es aquel que no recibe el sistema de operación off – line del brazo a través de realidad virtual y el segundo si logra hacer uso de él.



PRUEBAS Y RESULTADOS

VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

- Hipótesis

N°	Notas sin usar el simulador	Notas haciendo uso del simulador
	10/10	10/10
1	3	8
2	2	7
3	4	8
4	3	8
5	5	7
6	5	7
7	4	8
8	5	8
9	4	8
10	2	8



PRUEBAS Y RESULTADOS

Se utiliza el método estadístico t – student para analizar las dos muestras tomadas de los tiempos y determinar si existe diferencias significativas entre las mismas

H_0 : La utilización del sistema de operación off – line a través de realidad virtual no inmersiva no permitió contribuir en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en los estudiantes.

H_1 : La utilización del sistema de operación off – line a través de realidad virtual no inmersiva permitió contribuir en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en los estudiantes.

n_1	n_2	\bar{x}_1	\bar{x}_2	S_1^2	S_2^2
10	10	7.7	3.7	0.23	1.34



PRUEBAS Y RESULTADOS

Se define el valor crítico para la prueba, dicho dato se lo encuentra en la tabla de distribución t-student de dos colas con grados de libertad.

$$t_{vc} = \pm 2.10$$

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{s\sqrt{n_1^{-1} + n_2^{-1}}}$$

$$t > t_{vc} \quad \text{Rechaza } H_0$$

$$t < t_{vc}, \quad \text{Acepta } H_0$$

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$s = 0.886$$

$$t = -10.09$$

Acorde al análisis realizado, el valor crítico de dos colas de distribución es de 2.10 y el valor estadístico de prueba t es mayor, por ende, se rechaza la hipótesis nula H_0 , y se acepta la hipótesis alternativa, comprobando que la hipótesis planteada en la investigación es verdadera, asegurando dicha validación con una fiabilidad de 95%, se afirma que la utilización del sistema de operación off – line a través de realidad virtual no inmersiva permitió contribuir en el proceso de aprendizaje de robótica industrial en los estudiantes



CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema de operación off – line del brazo robótico Mitsubishi Melfa RV – 2SDB que contribuye en el proceso de aprendizaje de robótica industrial, mediante realidad virtual no inmersiva en el Laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.
- Se determinó que existen diferentes tipos de movimientos para el control cinemático del robot, sabiendo que para la cinemática directa se empleó los parámetros D-H conjuntamente con la matriz de transformación homogénea que ayudó a determinar los valores de posición y orientación del efector final y para la resolución del problema de la cinemática inversa por medio del método de la Jacobiana inversa.
- Para el modelo cinemático del brazo robótico se estableció un control por el método de la Jacobiana inversa o también conocida como el modelo diferencial de la jacobiana analítica, que considera la relación entre las pequeñas variaciones de las velocidades articulares con las velocidades de la localización del extremo del robot, en un intervalo de muestra, obteniendo una matriz no cuadrada que se estableció con el método de la pseudoinversa.



CONCLUSIONES

- En la investigación metódica del estado del arte del Robot Mitsubishi Melfa RV-2SDB se encontró que la página oficial de Mitsubishi Electrical contiene un apartado sobre modelos de robots desarrollados en formatos .dxf y .step para desarrolladores de manera gratuita, cosa que no fue necesario realizar diseño y modelado del robot. Sin embargo, el diseño sobre la estructura de la mesa y el aula virtual fue desarrollado por las autoras mediante los softwares como solidworks y sketch up, respectivamente. Lo cual permitió establecer una inmersión visual al simulador virtual.
- Como dispositivo de mando se escogió el Mando del Wii motion Plus esto se calificó por el método cualitativo por puntos donde el peso que conllevó al resultado fue el costo del dispositivo, la autonomía, su portabilidad, la rapidez de comunicación y al obtener el estudio de la compatibilidad con el motor de juego Unity, desarrollado por una librería externa. De igual manera se empleó otro dispositivo externo para la manipulación del brazo robótico que fue el teclado ya que también posee una librería interna en Unity.



CONCLUSIONES

- Los softwares 3D poseen sistemas de referencia, pero no todos contienen la misma arquitectura, esto es debido a que no se encuentra definido un sistema de referencia fijo y se basan en el criterio del desarrollador. Unity como motor de juego se guían mediante la regla de la mano izquierda, donde el eje +Y de la coordenada mundial se extiende hacia arriba, en consecuencia, matemáticamente al modelar el brazo robótico Mitsubishi Melfa RV- 2SDB trabaja con el sistema diestro que determina direcciones vectoriales en planos cartesianos para los parámetros D-H y definir la dirección de cada articulación cumpliendo con el criterio del producto vectorial. Por esta razón se procede a migrar del sistema zurdo al diestro. Es decir X_z, Y_z, Z_z , pasan a X_z, Z_z, Y_z .
- Para salvaguardar la integridad del robot y evitar choques se estableció que mediante el proceso de ejecución ciertos puntos generan singularidad donde limita el movimiento del manipulador aunque las configuraciones se encuentran dentro de los rangos de operación de las articulaciones del robot, por ello en el simulador se definen rangos de operación, como resultado las articulaciones varían entre: Base entre (-120° a 120°), Hombro (-90° a 40°), Brazo (65° a 140°), Codo (-180° a 180°), Antebrazo (-80° a 80°), Muñeca (-180° a 180°). Con estos datos se logra especificar un rango aproximado en las posiciones del robot, tomando en cuenta las dimensiones de sus eslabones con X (-210 a 400) *mm*, Y (-350 a 350) *mm* y Z (-140 a 770) *mm*.



CONCLUSIONES

- Se implementó el sistema de operación off – line mediante comunicación TCP / IP de la computadora y la controladora CRD1-700 del brazo robótico, se envió los datos adquiridos del simulador de cada trayectoria generada en función de sus articulaciones J1,J2,J3,J4,J5,J6, con esto se asegura ejecutarlas dentro de los límites establecidos de cada una de ellas y evitar puntos de singularidad, las instrucciones enviadas a la controladora están generadas mediante código ASCII en el software que enlaza dichos equipos.
- Las pruebas realizadas en el capítulo 6 demuestran el óptimo funcionamiento del sistema de operación off – line referente a la precisión que describen las trayectorias, ya sean circulares o lineales, mediante la ejecución de varias pruebas generadas desde el simulador virtual no inmersivo y programadas en la propia controladora del brazo físico, las diferencias de las mismas no fueron significativas, y, por otro apartado tiene una eficiencia similar a la propia controladora del brazo robótico físico RV-2SDB ya que no se visualizó diferencias significativas en los tiempos ejecutados en trayectorias punto a punto.



CONCLUSIONES

- Las pruebas aplicadas a los estudiantes de octavo nivel de la carrera de Ingeniería Mecatrónica comprueban que el sistema de operación off – line contribuyó en su proceso de aprendizaje de robótica industrial debido a la interfaz gráfica interactiva que presenta el simulador de realidad virtual no inmersivo, y, a su vez, muestra conceptos fundamentales que se aplican en la enseñanza de la temática en general, dando una alternativa innovadora de estudio para los estudiantes.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar en el simulador dentro de los límites establecidos, es decir el usuario no debe tratar de llegar hasta el límite máximo tanto en cinemática directa como en inversa, ya que podría llevar a puntos de singularidad y dar error en el control.
- Al momento de hacer la comunicación con el brazo robótico físico es necesario desactivar los paros de emergencia tanto del teach pendant como de la controladora CR1D 700 ya que podrían saltar las alarmas y los datos no puedan ser enviados como tal
- Al momento de ejecutar los comandos en el brazo físico RV 2SDB no se debe estar dentro del área de trabajo, por eso es necesario estar al menos a 1,5 metros de distancia alrededor del mismo, para precautelar la seguridad del usuario y del robot.
- Se recomienda que, al momento de comunicarse con el WMP a la PC, reconozca la configuración bluetooth como la Figura 65, para iniciar la comunicación en Unity se presiona el botón mando, cerrar, abrir la aplicación nuevamente y presionar el botón mando para conseguir una configuración efectiva.



RECOMENDACIONES

- Para seguir desarrollando este trabajo se recomienda realizar el estudio para el control de orientación del efector final en la cinemática inversa por medio de cuaterniones que independizan las rotaciones de los ejes yaw, pitch y roll, eliminando el efecto Gimbal Lock.
- Para estudios posteriores Unity ofrece el elemento de componentes físicos, con esto se puede desarrollar sistemas dinámicos del robot manipulador, ingresando parámetros inerciales, gravitacionales, masa, etc, para un mayor realismo en la simulación.

Gracias!



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA