



## Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

### Carrera de Mecatrónica

#### Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

“Diseño e implementación de una celda robotizada didáctica para el control de trayectorias en brazo robótico antropomórfico mediante programación offline con software educativo, para la aplicación al empaquetado de productos, en el laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe Sede Latacunga”

**Autores:** Dacto Yanza, Mayra Fernanda y Medina Medina, Ney Andrés

**Director:** Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

**Latacunga, 2023**



# CONTENIDO

**01** Introducción

**02** Diseño de Concepto

**03** Implementación de la celda

**04** Desarrollo de la programación fuera de línea

**05** Implementación de la programación fuera de línea

**06** Pruebas y Análisis de Resultados

**07** Conclusiones y Recomendaciones



# Introducción

## Planteamiento del Problema



Programación offline



Pruebas



Laboratorio de Robótica Industrial



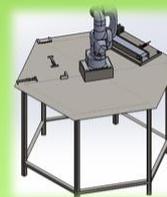
Celda didáctica

23/8/2023

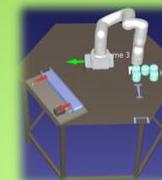
# Introducción

## Descripción Resumida del Proyecto

Etapa 1:  
Diseño CAD



Etapa 2:  
Entorno virtual offline



Etapa 3:  
Pruebas con celda



VERSIÓN: 1.0



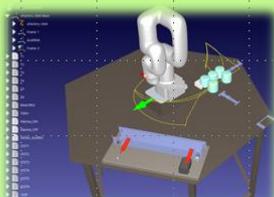
# Introducción

## Justificación, Importancia, Alcance

Justificación:  
Nuevas tecnologías



Importancia:  
Programación Offline



Alcance:  
Celda robotizada



23/8/2023

VERSIÓN: 1.0

# Introducción

## Objetivos, Hipótesis

### Objetivos

Diseñar e implementar una celda robotizada didáctica para el control de trayectorias en un brazo robótico antropomórfico mediante programación offline con software educativo, para la aplicación empacado de productos, en el Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Investigar las necesidades del laboratorio de robótica industrial y los sistemas robóticos didácticos existentes.

Realizar el análisis del estado del arte en relación a nuevos modelos de robots antropomórficos y sus aplicaciones.

Contrastar los programas compatibles con el brazo robótico seleccionado para programación offline, en función de la existencia de librerías necesarias para el funcionamiento del robot, y su posterior adquisición.

Diseñar y construir la estructura mecánica de la celda robotizada, sus dimensiones y disposición de los elementos para su aplicación.

Diseñar la estructura y control de la banda transportadora en función del producto seleccionado para la aplicación de empacado.

Ensamblar el brazo robótico adquirido con la estructura mecánica para la obtención de la celda robotizada planteada.

Configurar el sistema de comunicaciones entre los accesorios de la celda y el robot colaborativo.

Programar utilizando la metodología off-line para el control de trayectorias en el brazo robótico, en el desarrollo de empacado de productos, en el software seleccionado con anterioridad.

Exportar el código de programación off-line al controlador del brazo robótico seleccionado y realizar pruebas paralelas de configuración y funcionalidad de dispositivos.

Validar la hipótesis mediante pruebas de funcionalidad total de la aplicación.

### Hipótesis

¿El diseño e implementación de una celda robotizada didáctica integrada con software de programación off-line permitirá controlar las trayectorias del brazo robótico antropomórfico, en una aplicación de empacado de productos?



VERSIÓN: 1.0

# Introducción

## Planteamiento del Problema



**Programación  
offline**



**Pruebas**



**Laboratorio  
de Robótica  
Industrial**



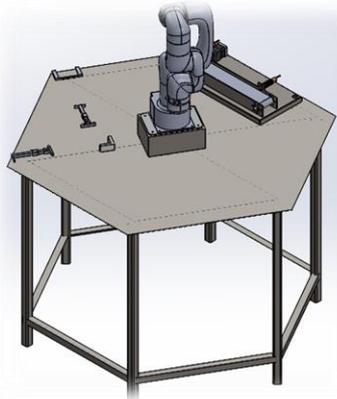
**Celda  
didáctica**

**Planteamiento  
del Problema**

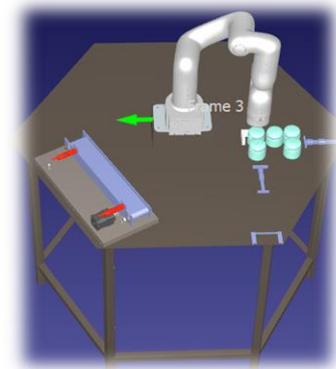
# Introducción

## Descripción Resumida del Proyecto

### Etapa 1: Diseño CAD



### Etapa 2: Entorno virtual offline



### Etapa 3: Pruebas con celda



Descripción  
Resumida



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Introducción

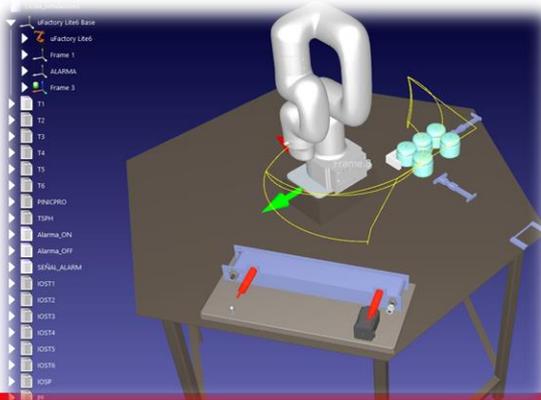
## Justificación, Importancia, Alcance

Justificación,  
Importancia,  
Alcance

**Justificación:**  
Nuevas  
tecnologías



**Importancia:**  
Programación  
Offline



**Alcance:**  
Celda  
robotizada



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Objetivos, Hipótesis

## Objetivos, Hipótesis

### Objetivos

Diseñar e implementar una celda robotizada didáctica para el control de trayectorias en un brazo robótico antropomórfico mediante programación offline con software educativo, para la aplicación al empaquetado de productos

### Hipótesis

¿El diseño e implementación de una celda robotizada didáctica integrada con software de programación off-line permitirá controlar las trayectorias del brazo robótico antropomórfico, en una aplicación de empaquetado de productos?

Investigar las necesidades del laboratorio de robótica industrial.

Ensamblar el brazo robótico adquirido con la estructura mecánica.

Realizar el análisis del estado del arte.

Configurar el sistema de comunicaciones.

Contrastar programas compatibles con el brazo robótico.

Programar utilizando la metodología off-line.

Diseñar y construir la estructura mecánica.

Exportar el código de programación off-line al controlador.

Diseñar la estructura y control de la banda transportadora.

Validar la hipótesis.

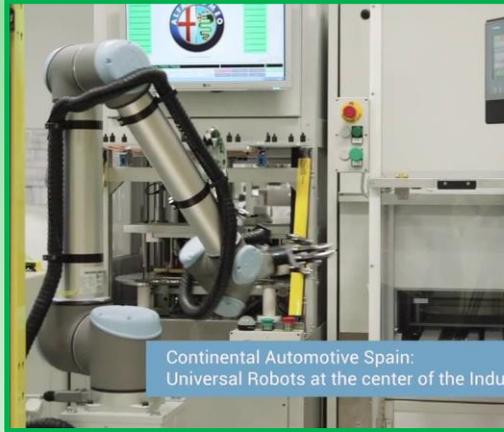


# Introducción

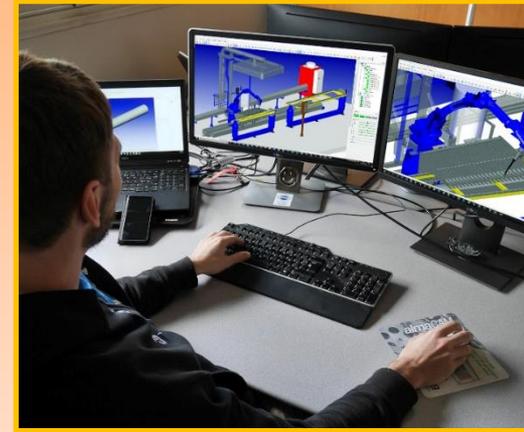
## Fundamentación Teórica



Robótica



Celdas Robotizadas



Programación



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Sistemas y subsistemas

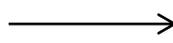
Sistema	Subsistema	Función
Celda robotizada	Diseño y construcción de la estructura de la celda	Soporte del cobot y de sus componentes
	Distribución de los componentes de la celda	Brindar seguridad y origen para la programación fuera de línea
	Diseño y construcción de la banda transportadora	Transporte de objetos
Cobot	Selección del cobot	Aplicación de empaquetado de productos
	Selección del software educativo	Programación fuera de línea del cobot
Control	Tarjeta de control de la banda	Control de los sistemas, adquisición de datos, y envío de señales.
	Control Trayectorias	Aplicación de empaquetado



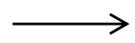
# Diseño de Concepto

## Componentes de la Celda

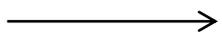
### COBOT



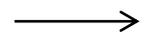
**Alcance:** 440 mm  
**GDL:** 6  
**Peso:** 9 Kg



**Velocidad:** 500 mm/s  
**Carga Útil:** 1 Kg  
**Repetibilidad:** 0.2 mm



**Carga Útil:** 0.5 Kg  
**Peso:** 171.5 g



**Funcionamiento:** Eléctrico  
**Alimentación:** 24 VDC



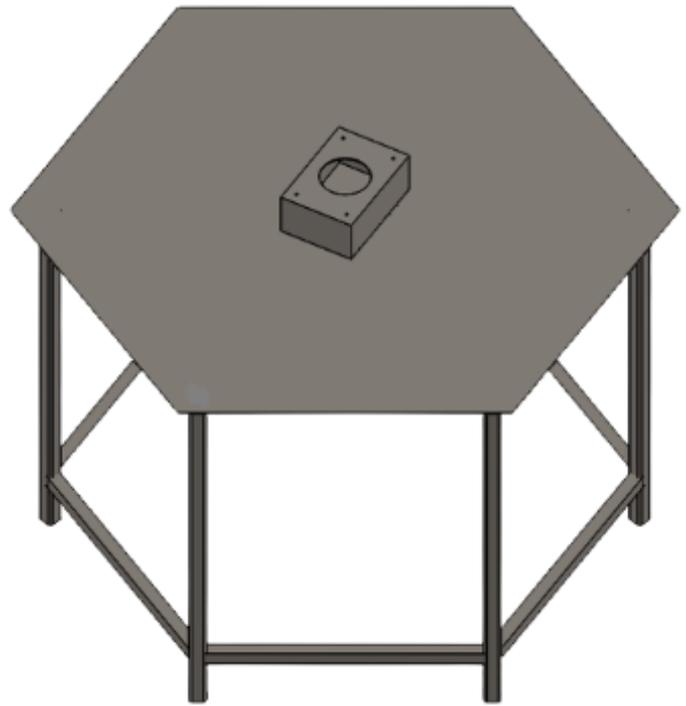
- Simulación de robots y cobots.
- Programación fuera de línea.
- Amplia biblioteca de componentes.
- Interfaz gráfica intuitiva.



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Componentes de la Celda

### Mesa



### Diseño

Norma NTE INEN  
1 641



Altura e  $740 \pm 20$  mm

### Construcción

Norma NTE INEN  
1 649:95

### Métodos de ensayo

Norma NTE INEN  
1 648:95



# Implementación de la celda

## Diseño de la Celda Robotizada

Norma NTE  
INEN 1 648:95



Material ASTM  
A36 Acero



Perfil cuadrado de  
30 x 30 x 2 mm



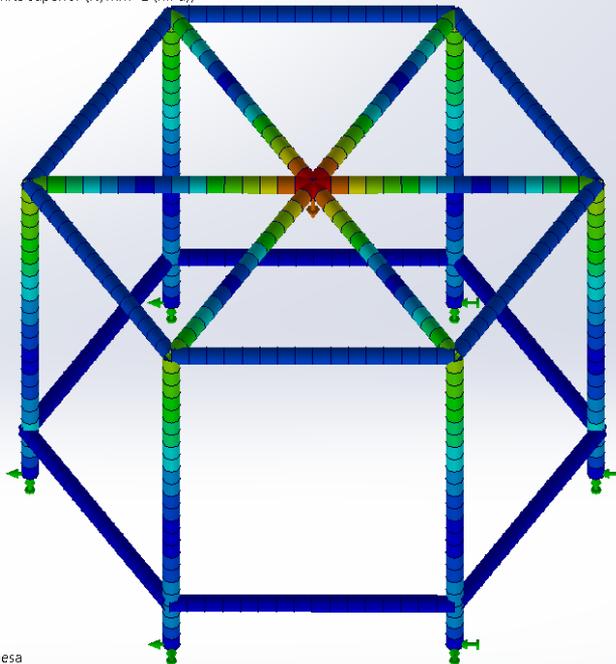
Ángulo de  
30 x 30 x 3 mm

### Análisis estático en la estructura de la mesa para carga vertical

Tensión axial y de flexión en el límite superior (N/mm<sup>2</sup> (MPa))



▶ Límite elástico: 2,500e+02



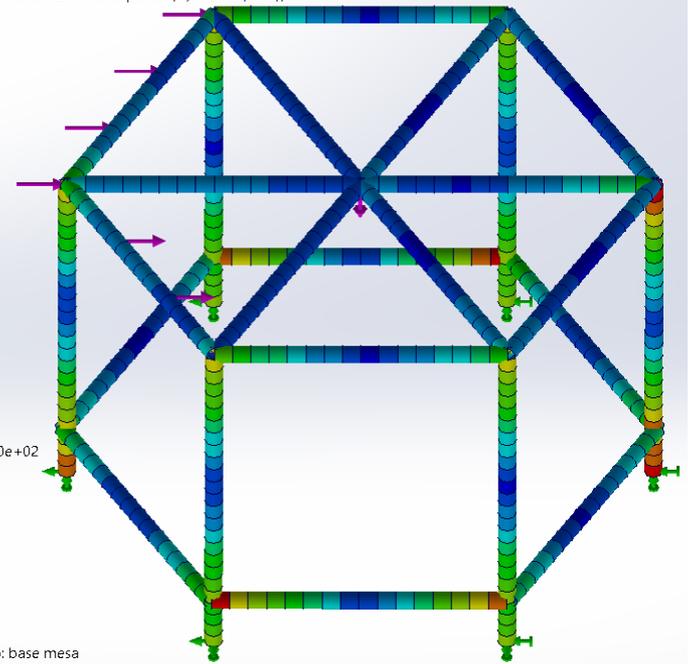
Nombre del modelo: base mesa  
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado<Como mecanizada>-)  
Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones1  
Escala de deformación: 1

### Análisis estático en la estructura de la mesa para carga horizontal

Tensión axial y de flexión en el límite superior (N/mm<sup>2</sup> (MPa))



▶ Límite elástico: 2,500e+02



Nombre del modelo: base mesa  
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado<Como mecanizada>-)  
Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones1  
Escala de deformación: 1

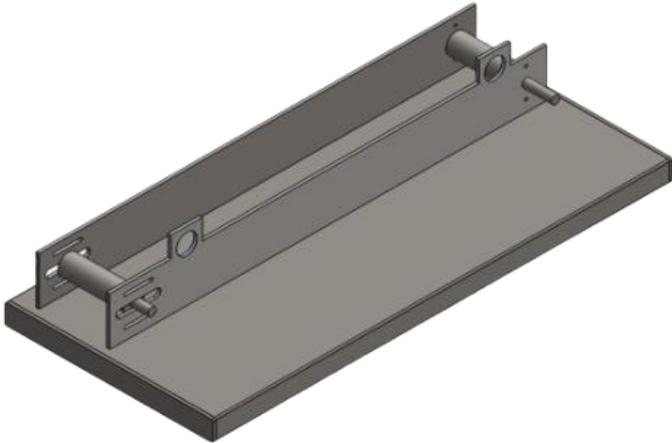


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Diseño de Concepto

## Componentes de la Celda

Banda



Longitud útil: 360 mm

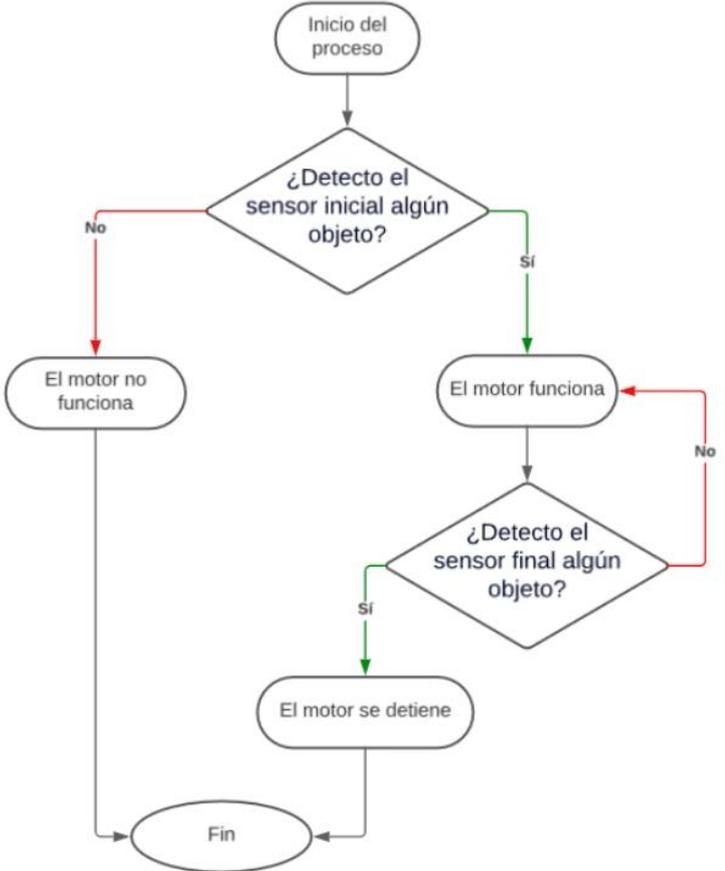
Tipo de recorrido: en línea recta.

Ancho Útil: 65 mm

Material: Acero ASTM A36

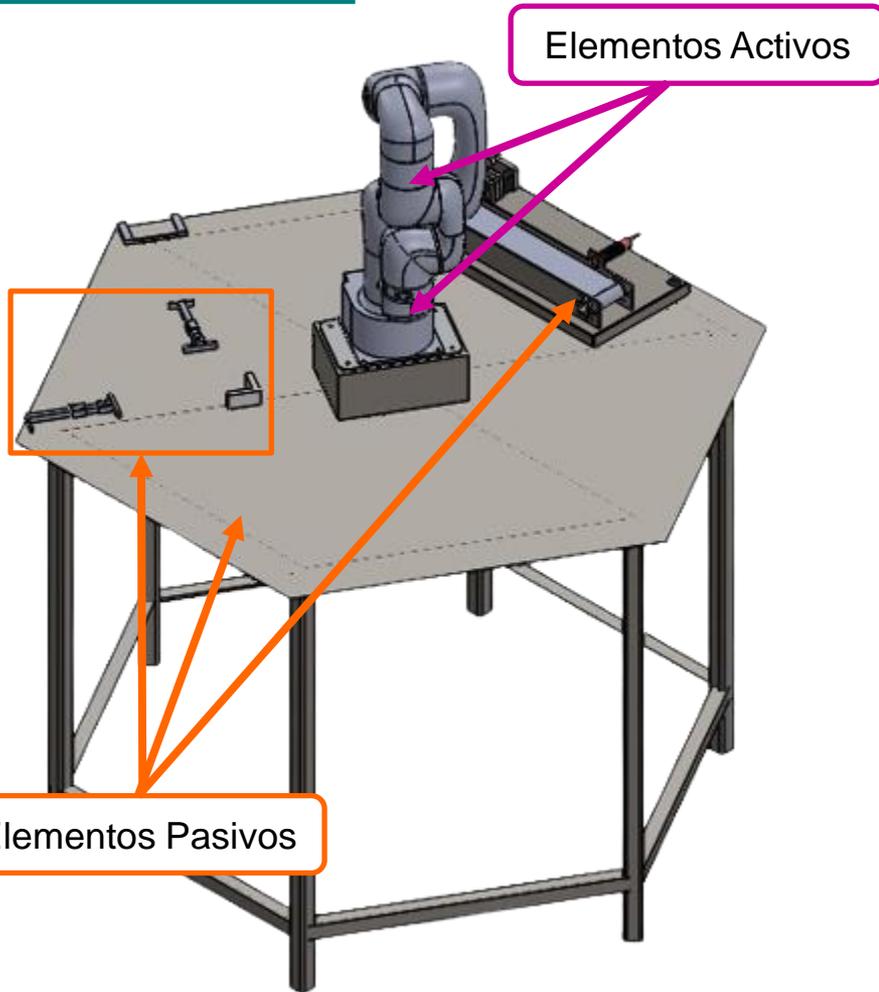


Control

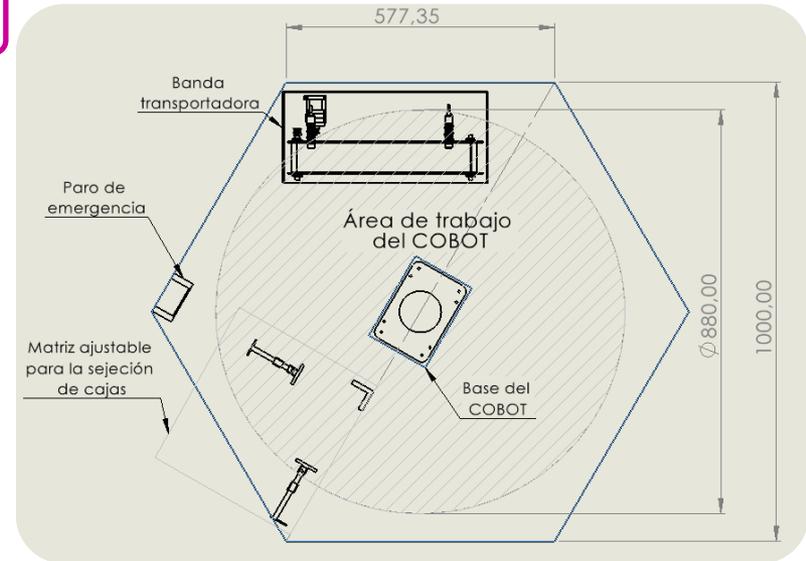


# Implementación de la celda

## Diseño de la Celda Robotizada



## Disposición de la celda



## Sistema de Control



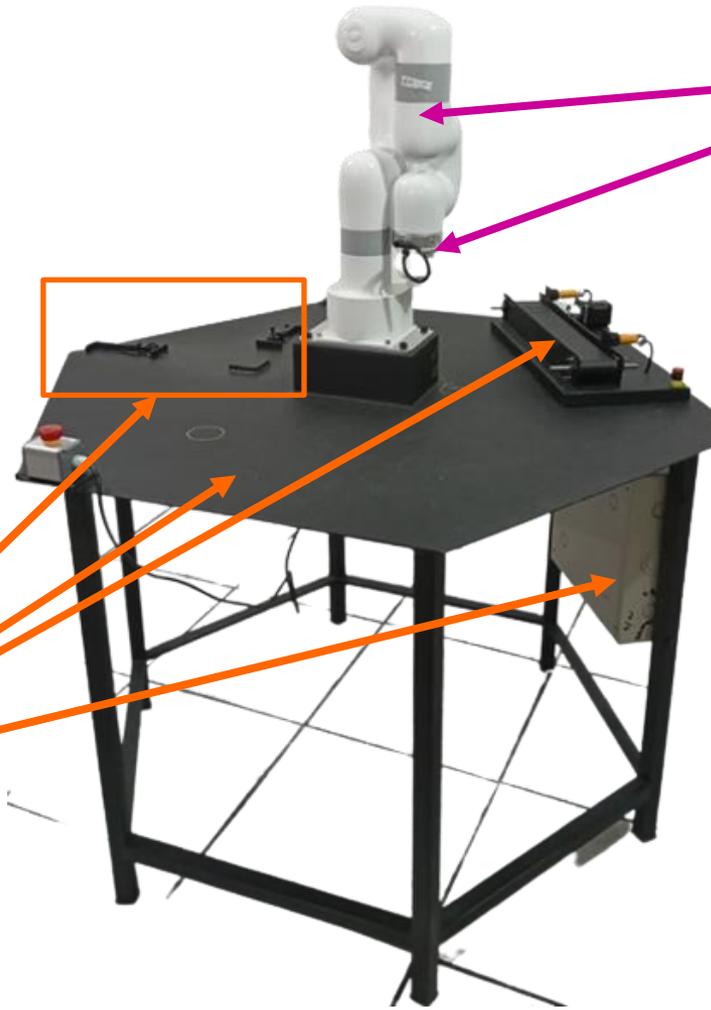
# Implementación de la celda

## Construcción de la Celda Robotizada

Disposición centralizada

Elementos Activos

Elementos Pasivos



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

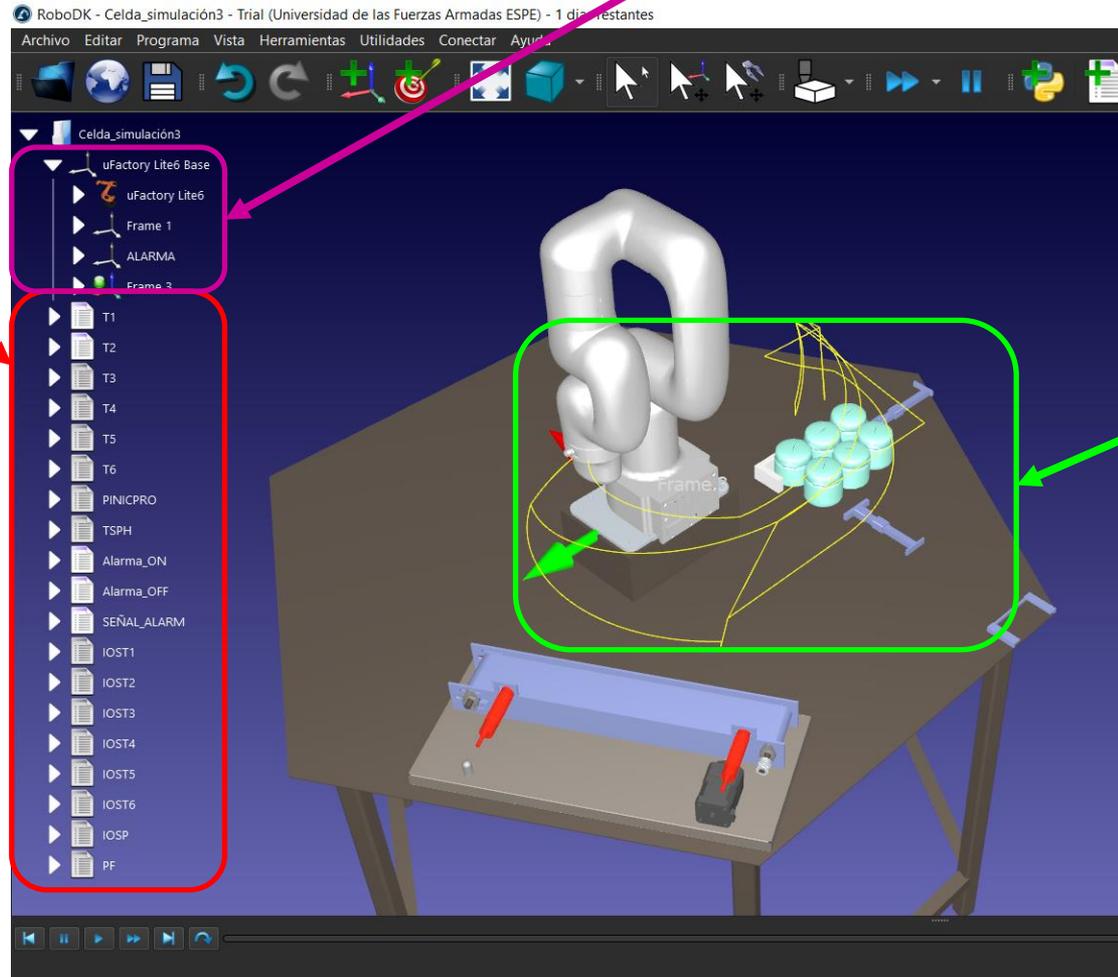
# Desarrollo de la programación fuera de línea

## Generación de Trayectorias

Programas

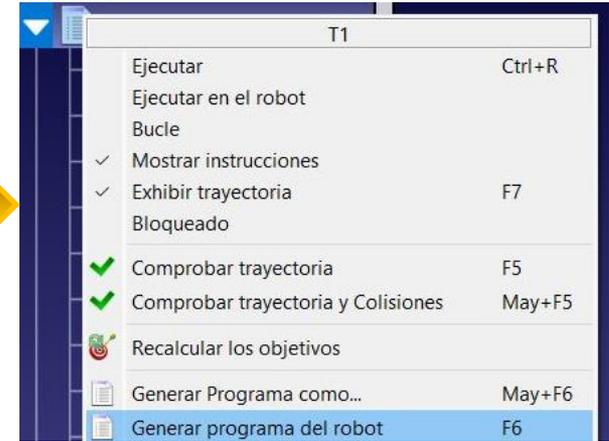
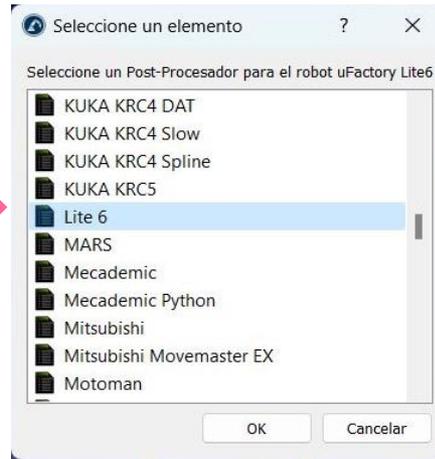
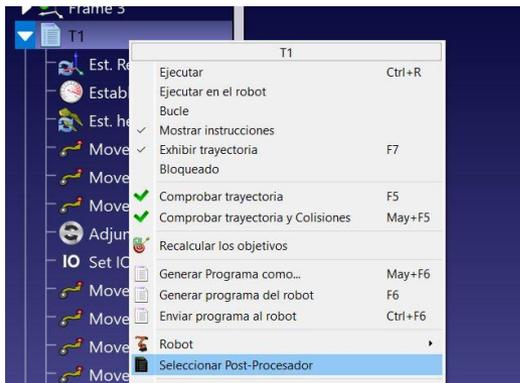
Sistemas de referencia

Trayectorias

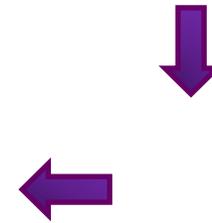


# Desarrollo de la programación fuera de línea

## Obtención de código y Post-procesado



```
1 import sys
2 import math
3 import time
4 import queue
5 import datetime
6 import random
7 import traceback
8 import threading
9 from xarm import version
10 from xarm.wrapper import XArmAPI
11
12
13 class RobotMain(object):
14     """Robot Main Class"""
15     def __init__(self, robot, **kwargs):
16         self.alive = True
17         self.xarm = robot
18         self.top_speed = 100
19         self.top_acc = 2000
20         self._angle_speed = 20
21         self._angle_acc = 500
22         self._vars = {}
23         self._funcs = {}
24         self._robot_init()
25         self._gpio.digital_callbacks = []
26         self._gpio.state = None
27         self._callback_in_thread = kwargs.get('callback_in_thread', True)
28         self._callback_queue = queue.Queue()
29         gpio_t = threading.Thread(target=self._listener_gpio_thread, daemon=True)
30         gpio_t.start()
31         callback_t = threading.Thread(target=self._event_callback_handle_thread, daemon=True)
32         callback_t.start()
33
34     def _event_callback_handle_thread(self):
35         while self.alive:
36             try:
37                 callback = self._callback_queue.get(timeout=1)
```

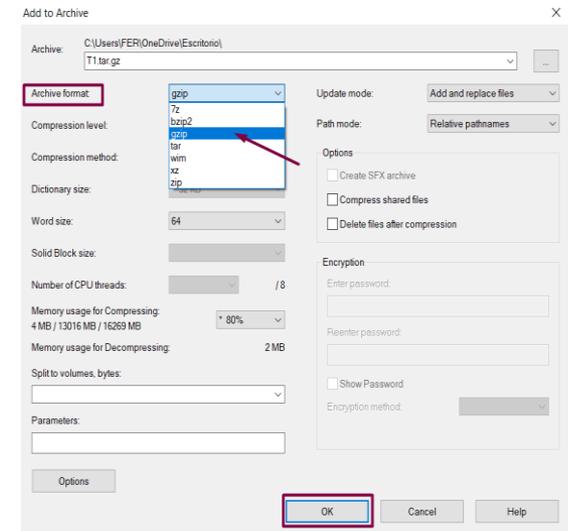
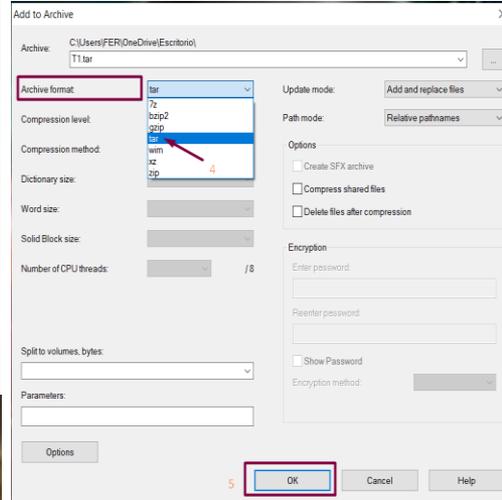
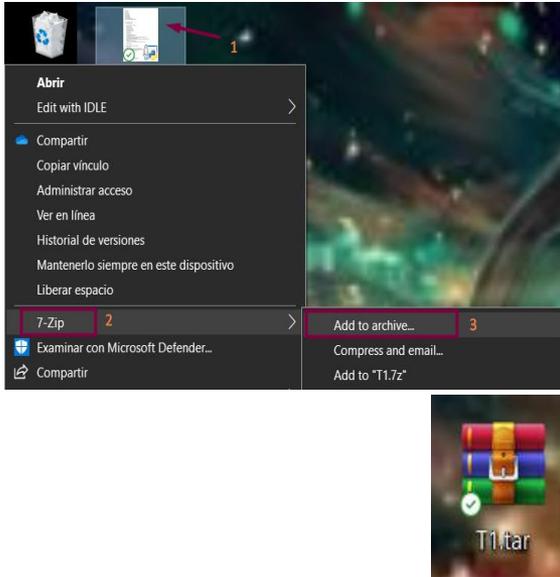


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Implementación de la programación fuera de línea

## Carga del archivo al controlador

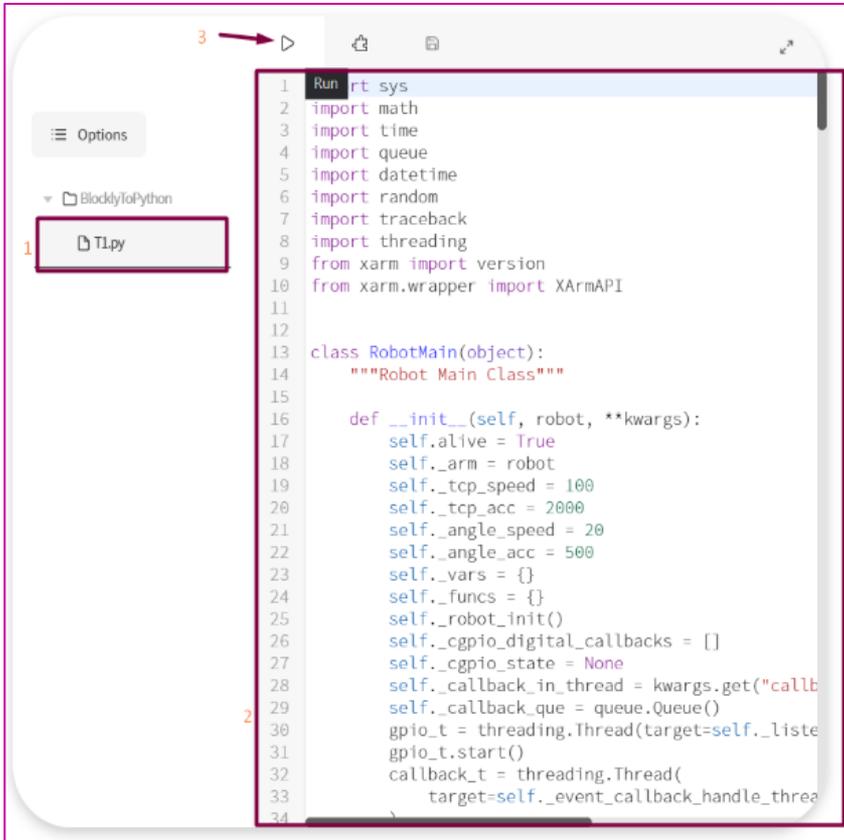
### Creación del archivo para el controlador



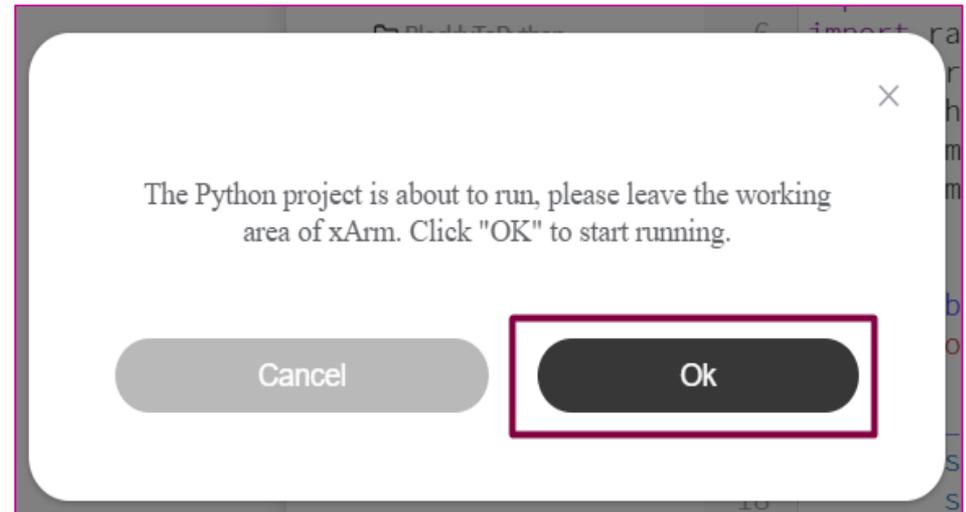
# Implementación de la programación fuera de línea

## Carga del archivo al controlador

## Ejecución del programa en el controlador

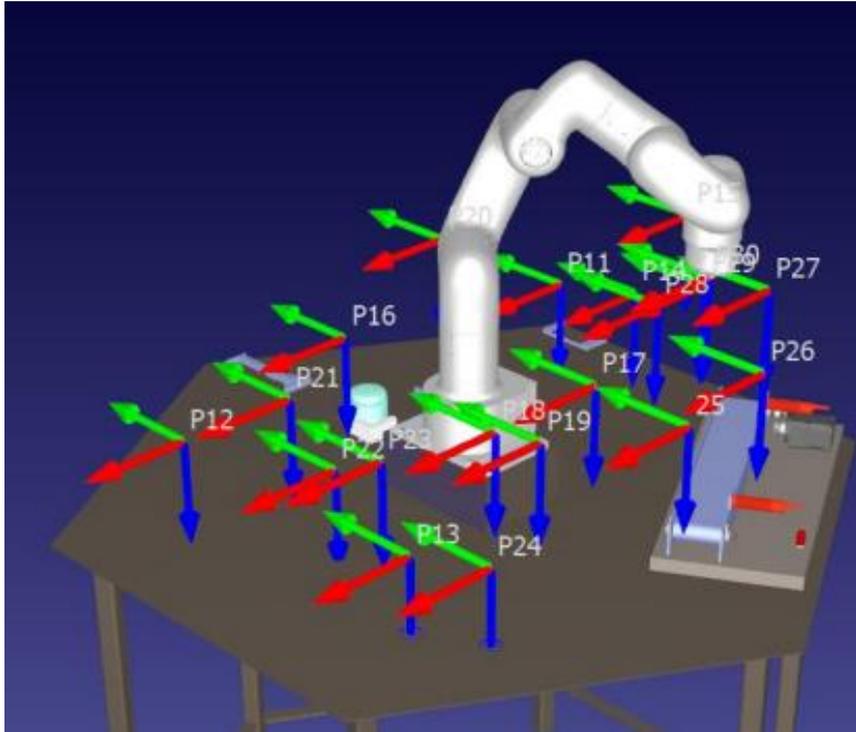


```
1 Run rt sys
2 import math
3 import time
4 import queue
5 import datetime
6 import random
7 import traceback
8 import threading
9 from xarm import version
10 from xarm.wrapper import XArmAPI
11
12
13 class RobotMain(object):
14     """Robot Main Class"""
15
16     def __init__(self, robot, **kwargs):
17         self.alive = True
18         self._arm = robot
19         self._tcp_speed = 100
20         self._tcp_acc = 2000
21         self._angle_speed = 20
22         self._angle_acc = 500
23         self._vars = {}
24         self._funcs = {}
25         self._robot_init()
26         self._cgpio_digital_callbacks = []
27         self._cgpio_state = None
28         self._callback_in_thread = kwargs.get("callback_in_thread")
29         self._callback_que = queue.Queue()
30         gpio_t = threading.Thread(target=self._list_gpio_t)
31         gpio_t.start()
32         callback_t = threading.Thread(target=self._event_callback_handle_thread)
33         callback_t.start()
34
```



# Pruebas y Resultados

## Pruebas de posición X Y Z



### Norma EN-ISO 9283

Robots manipuladores industriales  
Criterios de análisis de  
prestaciones y métodos de prueba  
relacionados.

	X	Y	Z
Error prom.	0.17	0.17	0.27

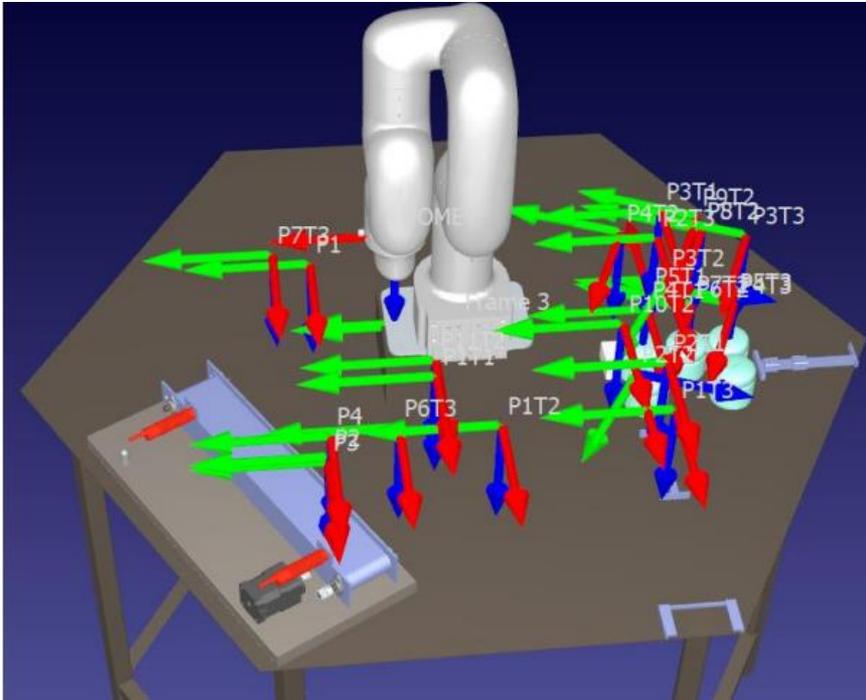
	X	Y	Z
Error	0 – 0.3	0 – 0.3	0 – 0.4



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Pruebas y Resultados

## Pruebas de posición X Y Z compensado



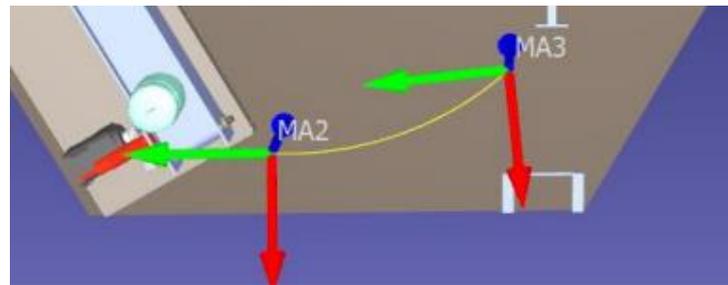
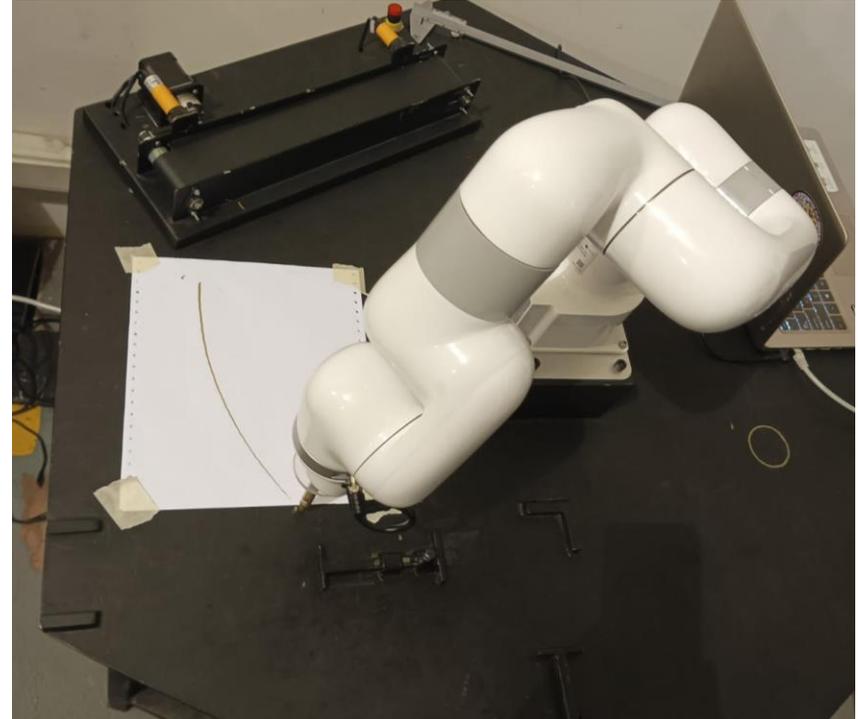
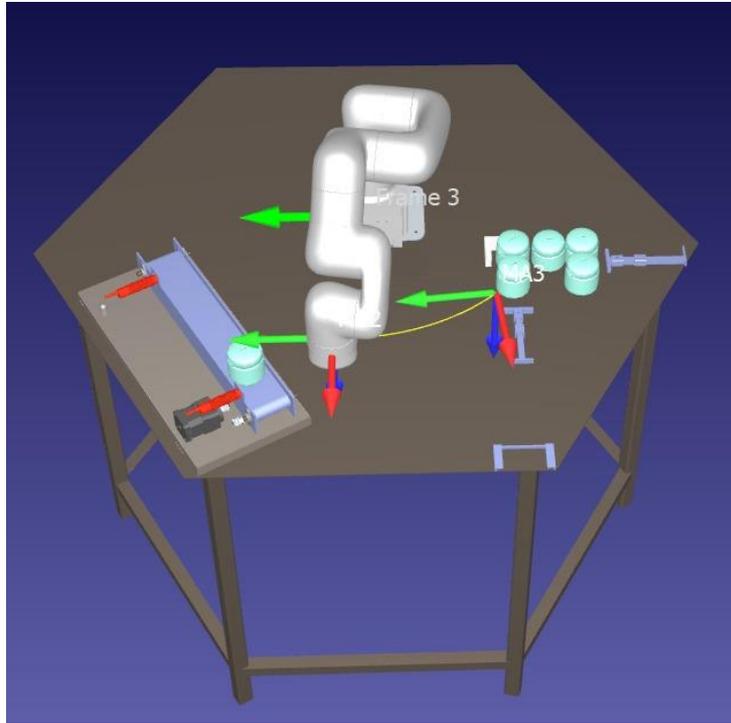
	X	Y	Z
Error prom.	0.13	0.15	0.24

	X	Y	Z
Error	0 – 0.2	0 – 0.2	0 – 0.3



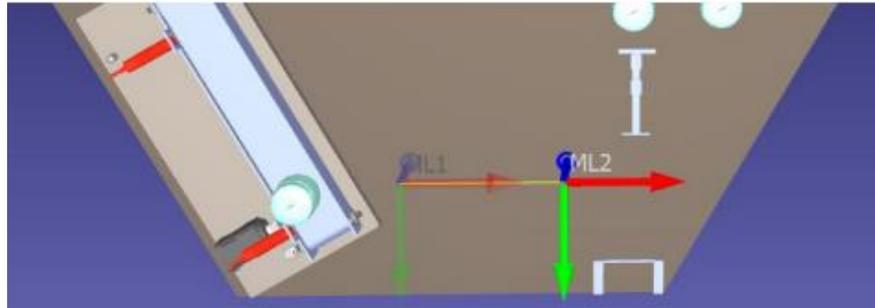
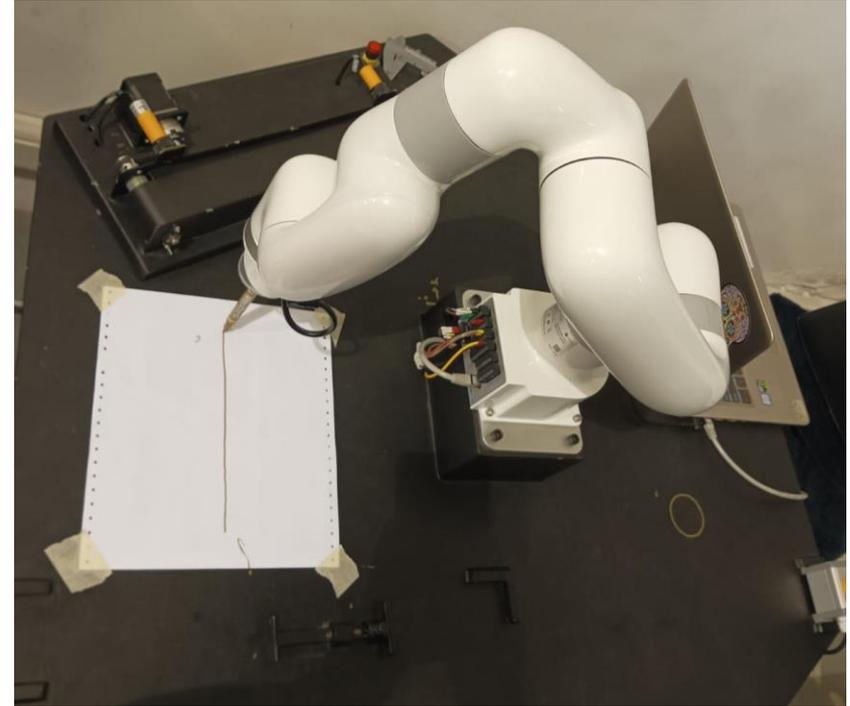
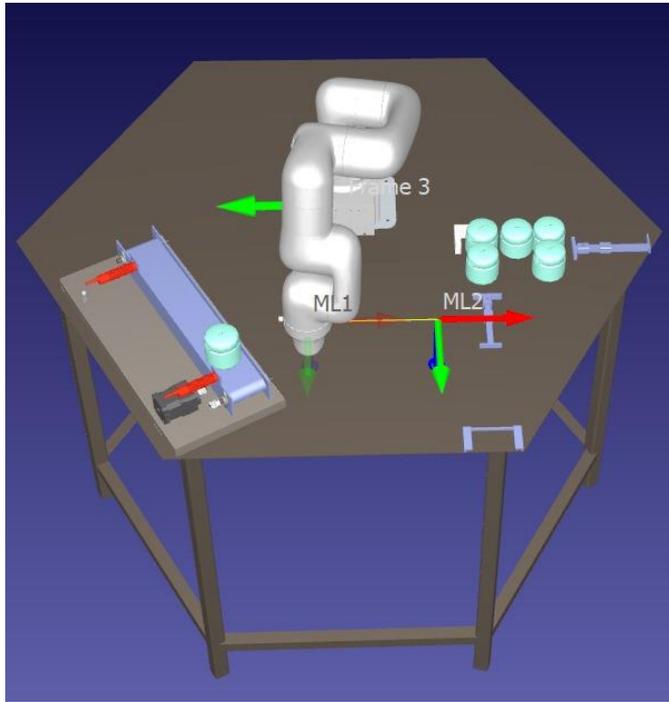
# Pruebas y Resultados

## Trayectoria Articular



# Pruebas y Resultados

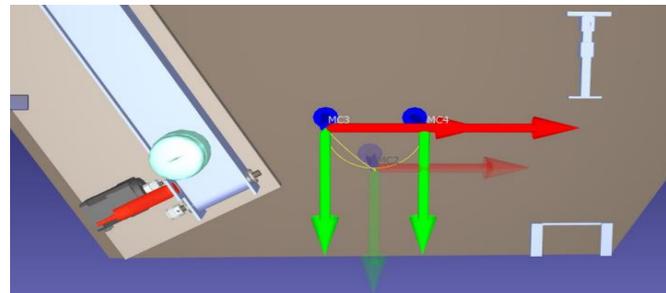
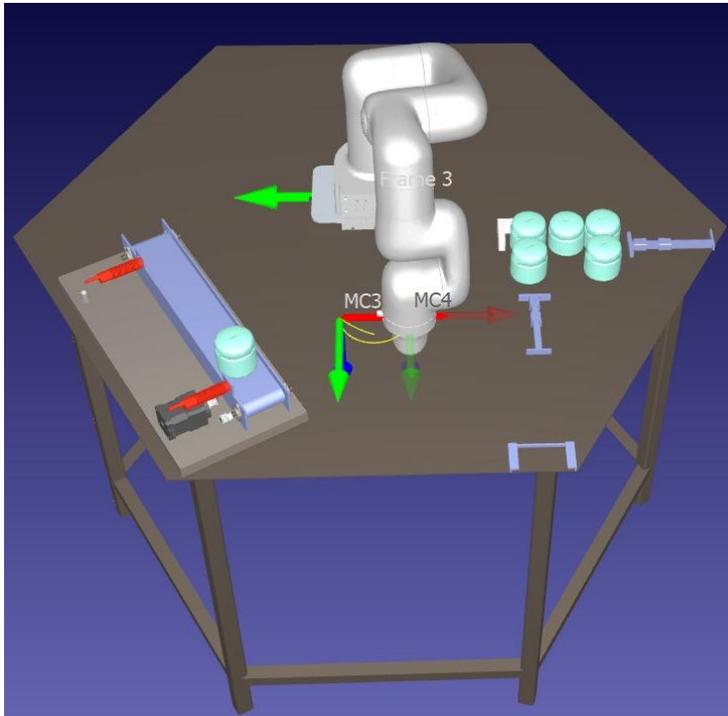
## Trayectoria Lineal



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Pruebas y Resultados

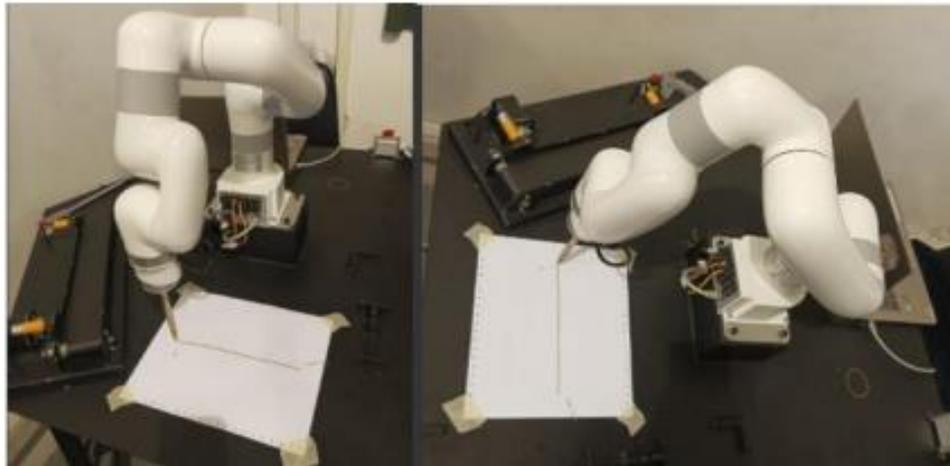
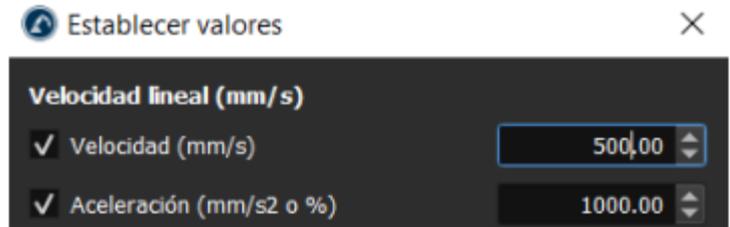
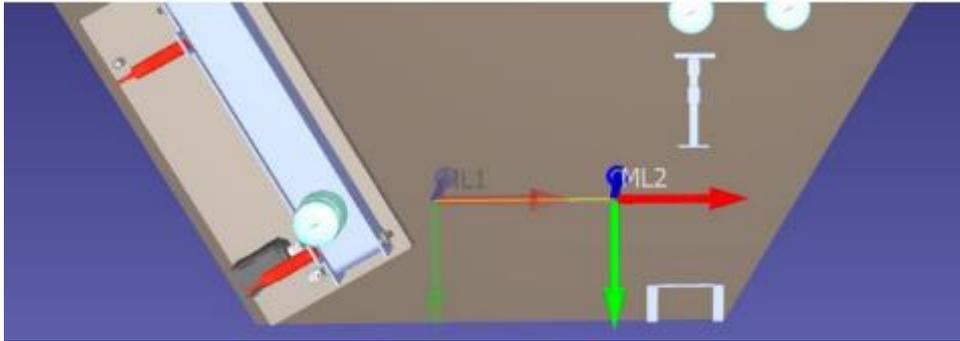
## Trayectoria Circular



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Pruebas y Resultados

## Prueba de Velocidad y Repetibilidad



**Distancia:** 500 mm

**Velocidad:** 500 mm/s

**Repetividad promedio:** 0.06 mm

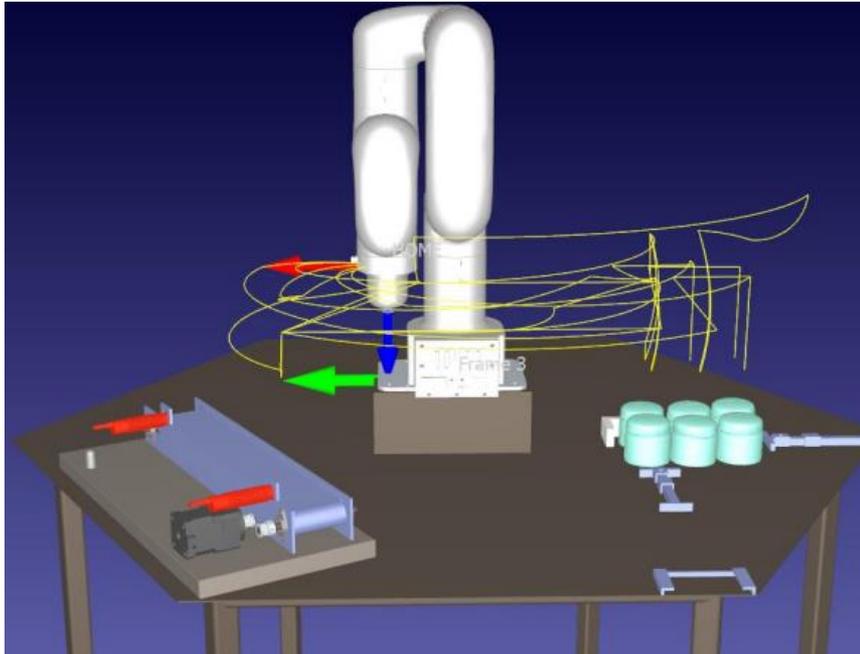
**Velocidad promedio:** 498.97 mm/s



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Pruebas y Resultados

## Trayectoria Completa de empaquetado

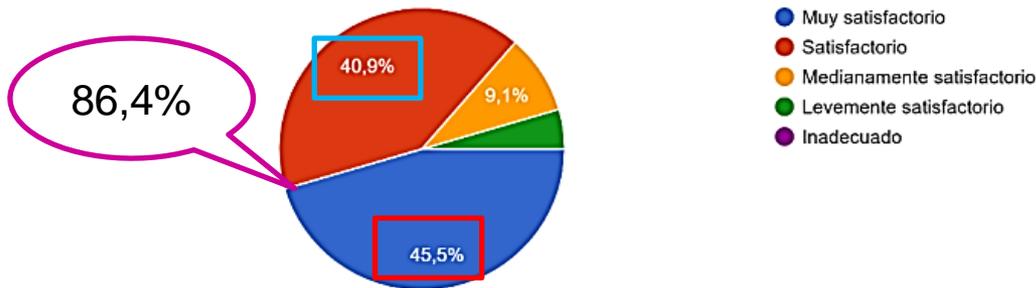


# Pruebas y Resultados

## Resultados de las Encuestas

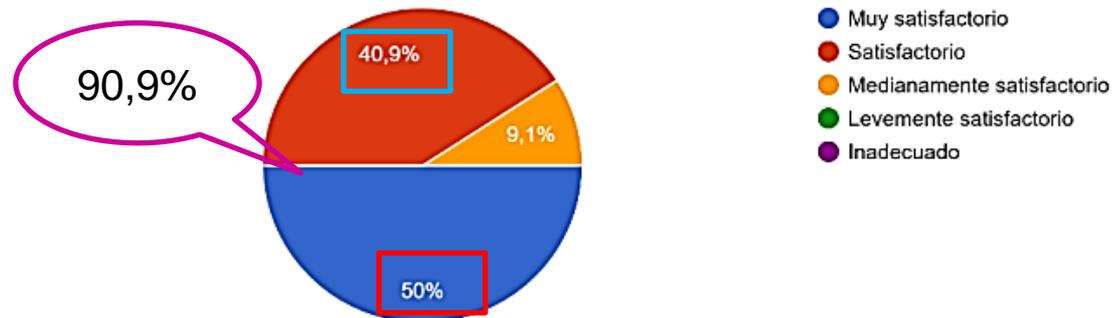
1. ¿Cree usted qué con el uso del brazo robótico y accesorios de la celda robotizada para trabajar la robótica industrial en el ámbito educativo, permiti...a investigación y el diseño de celdas robotizadas?

22 respuestas



2. ¿La celda robotizada puede considerarse como una herramienta para el proceso de enseñanza en el método de programación offline?

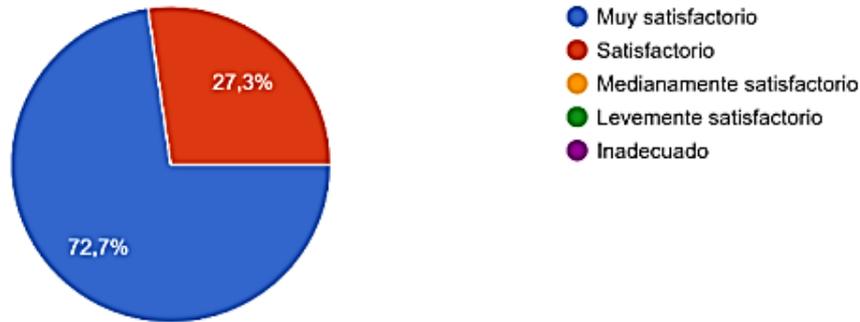
22 respuestas



# Pruebas y Resultados

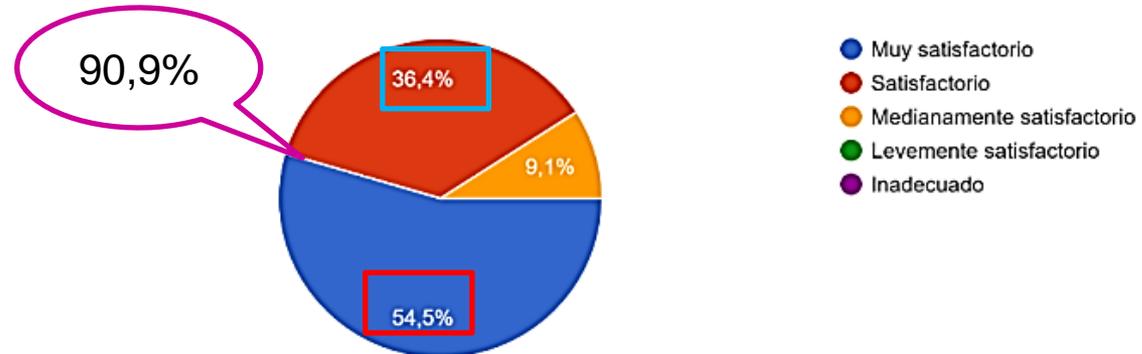
3. ¿Considera que es de utilidad elaborar una guía sobre la enseñanza de la programación offline en la celda robotizada como un recurso de aprendizaje?

22 respuestas



4. ¿Con la manipulación de la celda robotizada al alumno le resulta fácil entender el desarrollo de las actividades relacionados con robótica industrial?

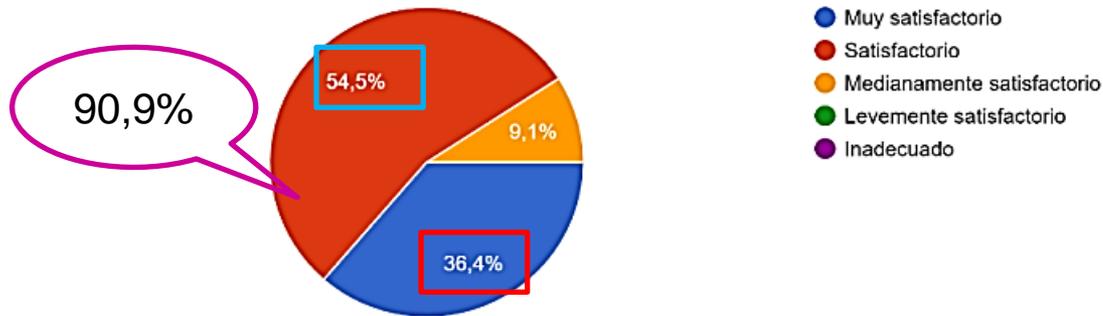
22 respuestas



# Pruebas y Resultados

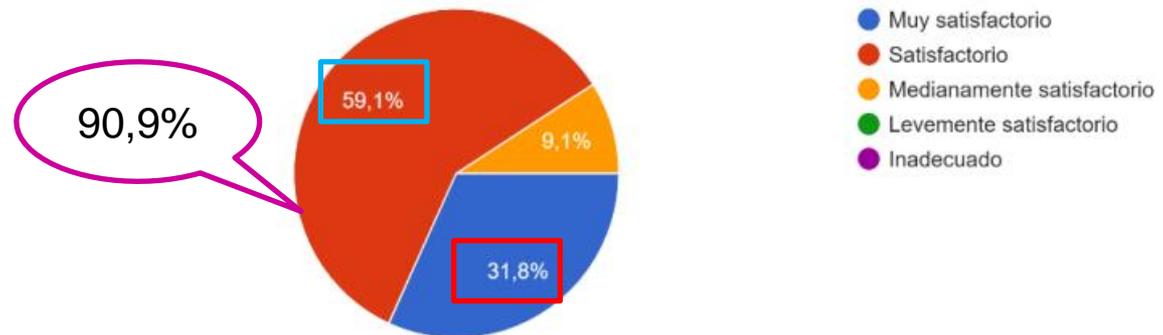
5. ¿La celda robotizada con programación offline permite el alcance de los objetivos curriculares de la etapa de educación?

22 respuestas



6. ¿La celda robotizada es una herramienta útil para el desarrollo del pensamiento lógico y matemático en los alumnos?

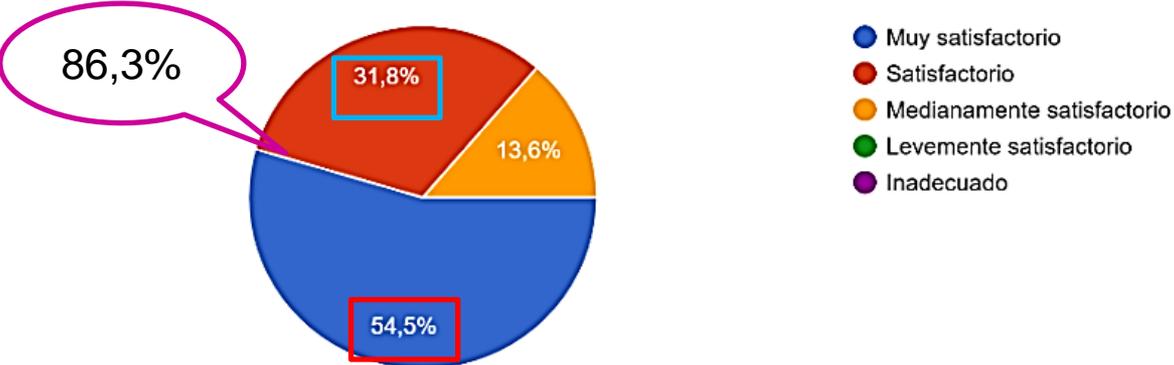
22 respuestas



# Pruebas y Resultados

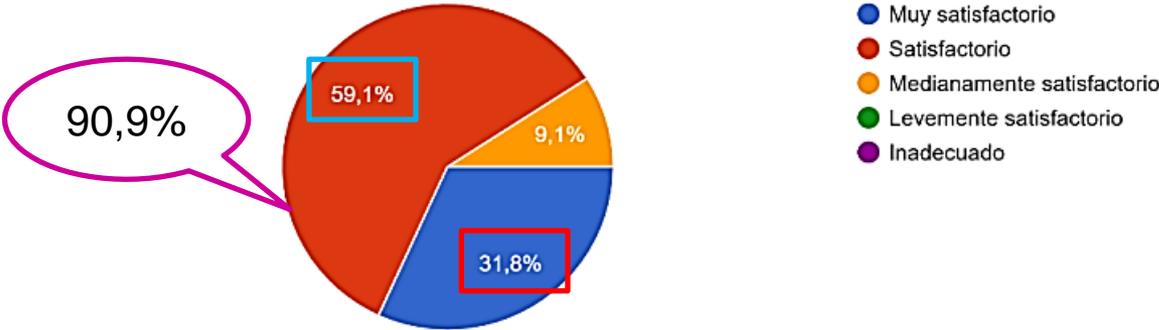
7. ¿La celda robotizada permite evidenciar el trabajo cooperativo entre el operario y el brazo robótico?

22 respuestas



8. ¿Existe un alto nivel de satisfacción en cuanto a los resultados obtenidos con la implementación de la celda robotizada para programación offline?

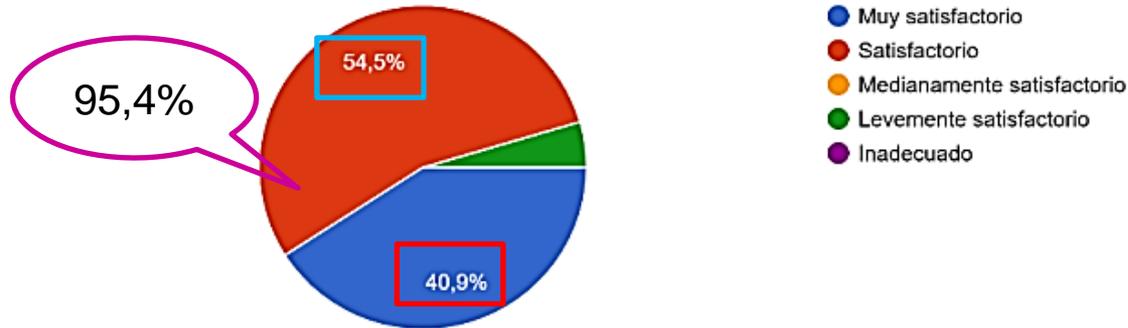
22 respuestas



# Pruebas y Resultados

9. ¿Considera que la implementación de la celda robotizada para programación offline influye positivamente en la mejora del rendimiento académico del alumnado?

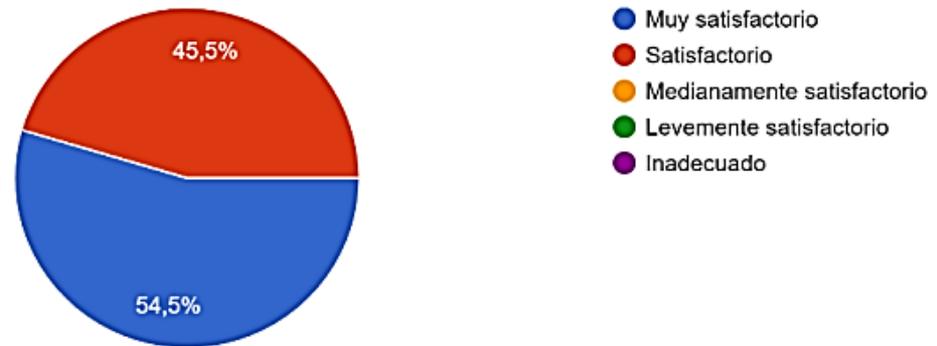
22 respuestas



10. ¿La celda robotizada para programación offline es una herramienta atractiva que motiva al alumnado en el aprendizaje?

22 respuestas

92,26 %



# Pruebas y Resultados

## Validación de la Hipótesis

Ítem	Descripción	Satisfactorio	Bueno	Regular	# Pruebas
1	Posicionamiento XYZ	13	6	11	30
2	Trayectoria Lineal	8	10	12	30
3	Trayectoria circular	9	10	11	30
4	Velocidad	15	9	6	30
5	Repetibilidad	12	10	8	30
<b>Total</b>		57	45	48	150

Datos	$f_o$	$f_t$	$(f_o - f_t)$	$(f_o - f_t)^2$	$\frac{(f_o - f_t)^2}{f_t}$
Satisfactorio 1	13	11,4	1,6	2,56	0,2246
Satisfactorio 2	8	11,4	-3,4	11,56	1,0140
Satisfactorio 3	9	11,4	-2,4	5,76	0,5053
Satisfactorio 4	15	11,4	3,6	12,96	1,1368
Satisfactorio 5	12	11,4	0,6	0,36	0,0316
Bueno 1	6	11,2	-5,2	27,04	2,4143
Bueno 2	13	11,2	1,8	3,24	0,2893
Bueno 3	16	11,2	4,8	23,04	2,0571
Bueno 4	9	11,2	-2,2	4,84	0,4321
Bueno 5	12	11,2	0,8	0,64	0,0571
Regular 1	11	5,55	5,45	29,7025	5,3518
Regular 2	9	5,55	3,45	11,9025	2,1446
Regular 3	5	5,55	-0,55	0,3025	0,0545
Regular 4	6	5,55	0,45	0,2025	0,0365
Regular 5	6	5,55	0,45	0,2025	0,0365
<b>Total</b>					16,7497



# Pruebas y Resultados

## Validación de la Hipótesis

Grados de libertad	Áreas en la cola superior							0
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	
1	0.000	0.000	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	0
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	0
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	0
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	1
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	1
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	1
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	1
8	1.344	1.647	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	1
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	1



# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

Diseño e implementación - celda robotizada didáctica - software RoboDK - programación fuera de línea - control de trayectorias en el cobot UFACTORY Lite 6 - aplicación de empaquetado de productos.

Robot - 6 GDL – articular - 1kg - alcance de 440 mm – compacto - aplicaciones en lenguaje Python - programación por guiado y textual.

UFACTORY Lite 6 - movimientos: lineal, articular y circular - velocidad máxima de 500 mm/s en el TCP - repetibilidad de  $\pm 0.2$  mm.



# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

Investigación bibliográfica - visión actualizada de las tendencias y avances -selección del cobot UFACTORY Lite 6.

Programas fuera de línea compatibles con el brazo robótico – RoboDK - licencia estudiantil - gama de librerías para robots industriales y robots colaborativos - compatibilidad técnica y operativa del robot.

Programación fuera de línea - RoboDK - error promedio absoluto entre los valores simulados y reales de: 0.13 mm, 0.15 mm y 0.24 mm en los ejes X, Y y Z - valida la trayectoria angular, lineal y circular – comparación de velocidad programada y real - validación del control de trayectorias generadas en RoboDK - aplicación de empaquetado.



# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

RoboDK - Post-procesadores - robots industriales y cobots.

Diseño y construcción - estructura mecánica de la celda robotizada (NTE INEN 1 641). Layout centralizado - aplicación de empaquetado - parámetros de seguridad.

Banda transportadora - transporte - 50 mm/s - aplicación de empaquetado – dimensionamiento - espacio de trabajo disponible - control ON-OFF que – sincronización - ritmo de producción, garantizando un proceso fluido y efectivo.



# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

Ensamblaje - cobot UFACTORY Lite 6 - estructura mecánica - celda robotizada - parámetros - entorno de trabajo virtual – RoboDK - configurar sistema de comunicaciones - control descentralizado.

Chi cuadrado - aceptación de la hipótesis alternativa. Encuestas - alumnado de Robótica Industrial - celda robotizada didáctica – 92,26% de aceptación



# Conclusiones y Recomendaciones

## Recomendaciones

Aplicaciones educativas de investigación y colaborativas - cobot UFACTORY Lite 6 - facilidad de programación - seguridad en el entorno de trabajo colaborativo - operación intuitiva del controlador - compatibilidad RoboDK - programación fuera de línea.

Lectura del manual de usuario del robot UFACTORY Lite 6 del fabricante.

Software RoboDK - librerías para robots industriales y robots colaborativos - entorno intuitivo - programación fuera de línea - lectura de documentación técnica del software RoboDK.



# Conclusiones y Recomendaciones

## Recomendaciones

Depuración del código en el editor de Python del software RoboDK - eliminación de espacios en blanco y comentarios generados; la omisión de esta sugerencia no permite la ejecución de la aplicación desarrollada.

Cortar la alimentación principal -  
Botón STOP vs paro de emergencia  
físico.

Anomalías, actualización de software y firmware - contacto con servicio técnico UFACTORY (<https://www.ufactory.cc/contact-us/>)

Manipulación del robot y accesorios de la celda robotizada - lectura previa del manual de operación.



*¡Gracias!*



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA