



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniería Mecatrónica**

**CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO ANTROPOMÓRFICO  
DE 6GDL A TRAVÉS DE ENTORNOS EN REALIDAD VIRTUAL.**

**Autor:**

Cobo Freire Erick Bryan

Ph.D. Víctor H. Andaluz, *Tutor*



September 7 - 10, 2021

## Virtual Training System for Robotic Applications in Industrial Processes

 Erick B. Cobo<sup>ORCID</sup> and Víctor H. Andaluz

 Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador  
 {ebcobo, vhandaluz}@espe.edu.ec

**Abstract.** This work presents the development of a virtual reality training system applied to industrial robotics and oriented to the teaching-learning processes. The system considers a manipulator anthropomorphic industrial robot of 6DOF to perform autonomous object manipulation tasks in two virtual environments. The virtual environments are developed in the graphic engine Unity3D, the environment exchanges information with MATLAB by shared memory to execute position and trajectory control algorithms for the operating end of the manipulator robot. The virtual training system connects with an Android mobile app that considers the following control panel functions: articular coordinate system, velocity configuration and dead man switch. Finally, evaluations of the developed virtual environments, the mobile application and the control algorithm are carried out to guarantee the usability of the virtual training system in the teaching-learning processes.

**Keywords:** Virtual reality · Manipulator robot · Trajectory and position control · Mobile app

### 1 Introduction

Industrial processes have evolved over the years due to improvements and development in: productivity, product standardization, reduction of production costs and the application of new technologies related to the Industry 4.0 [1]. The Industry 4.0 includes different digital technologies in conventional industry in order to increase productivity and efficiency using the Internet of things to supervise industrial processes in real time to allow decentralized decision making [2]. The most relevant technologies in the Industry 4.0 are: *i) Cloud Computing*, is an intelligent and programmable tool that allows users to access to different services and repositories to obtain and share large quantities of information [3]; *ii) Big Data*, consists of the analysis of large amounts of data to transform them into information or knowledge [4]; *iii) Robotics*, is an engineering branch that combines knowledge of electronics, mechanics, mathematics and control to build machines that perform repetitive or dangerous work faster and more efficiently than humans [5]; *iv) Immersive Technologies*, these are technologies that allow user interaction with digital recreated worlds, the most important are: Augmented reality "AR" that allows to add graphic information to the real world using technologic devices [6], and

© Springer Nature Switzerland AG 2021  
 L. T. De Paolis et al. (Eds.): AVR 2021, LNCS 12980, pp. 1–18, 2021.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_52)



© Springer Nature Switzerland AG 2021  
 L. T. De Paolis et al. (Eds.): AVR 2021, LNCS 12980, pp. 1–18, 2021.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_52)



SpringerLink

Search



International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics

 AVR 2021: **Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics** pp 717–734 | Cite as

## Virtual Training System for Robotic Applications in Industrial Processes

Erick B. Cobo &amp; Víctor H. Andaluz

Conference paper | First Online: 16 September 2021

Access via your institution

Chapter

Price exclu

DOI: 10.1007/978-3-030-87595-4\_52

CrossMark



### Document is current

Any future updates will be listed below

Virtual Training System for Robotic Applications in Industrial Processes

 Crossref DOI link: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_52)

Published Online: 2021-09-16

Published Print: 2021

 Update policy: [https://doi.org/10.1007/SPRINGER\\_CROSSMARK\\_POLICY](https://doi.org/10.1007/SPRINGER_CROSSMARK_POLICY)

Authors

 Cobo, Erick B.  
 Andaluz, Víctor H.

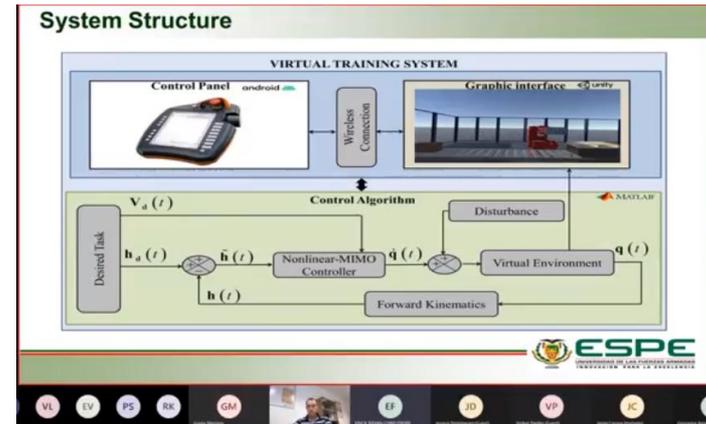



## Virtual Training System for Robotic Applications in Industrial Processes

Erick B. Cobo  
Víctor H. Andaluz

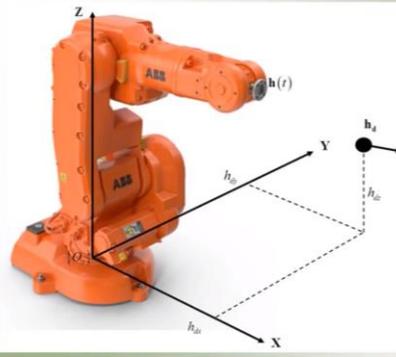


VL EV PS RK GM EF JD VP JC



### Control Algorithm (Movement Problems)

#### 1) Point stabilization



The diagram shows an orange ABB robot arm in a 3D coordinate system with axes X, Y, and Z. The end effector position is denoted as  $h(t)$ . The desired position is  $h_d$ . The error vector is  $\tilde{h}(t) = h_d - h(t)$ . The desired velocity is  $v_d(t) = \dot{\tilde{h}}(t) = 0$ .

$$\mathbf{h}_d = [h_{dx}, h_{dy}, h_{dz}, h_{d\alpha}, h_{d\beta}, h_{d\gamma}]^T$$

$$\mathbf{v}_d(t) = \dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) = 0$$


VL EV PS RK GM EF JD VP JC

### Virtual Laboratory Tests



The interface shows a 'Joint Coordinate System Velocity: 0%' control panel with a 'DEADMAN SWITCH' button. On the right, a person is shown using a laptop and a smartphone to interact with a virtual environment where a robot arm is visible.



VL EV PS RK GM EF JD VP JC



September 7 - 10, 2021

*This is to certify that*

***Erick B. Cobo***

*presented*

***"Virtual Training System for Robotic Applications in Industrial Processes"***

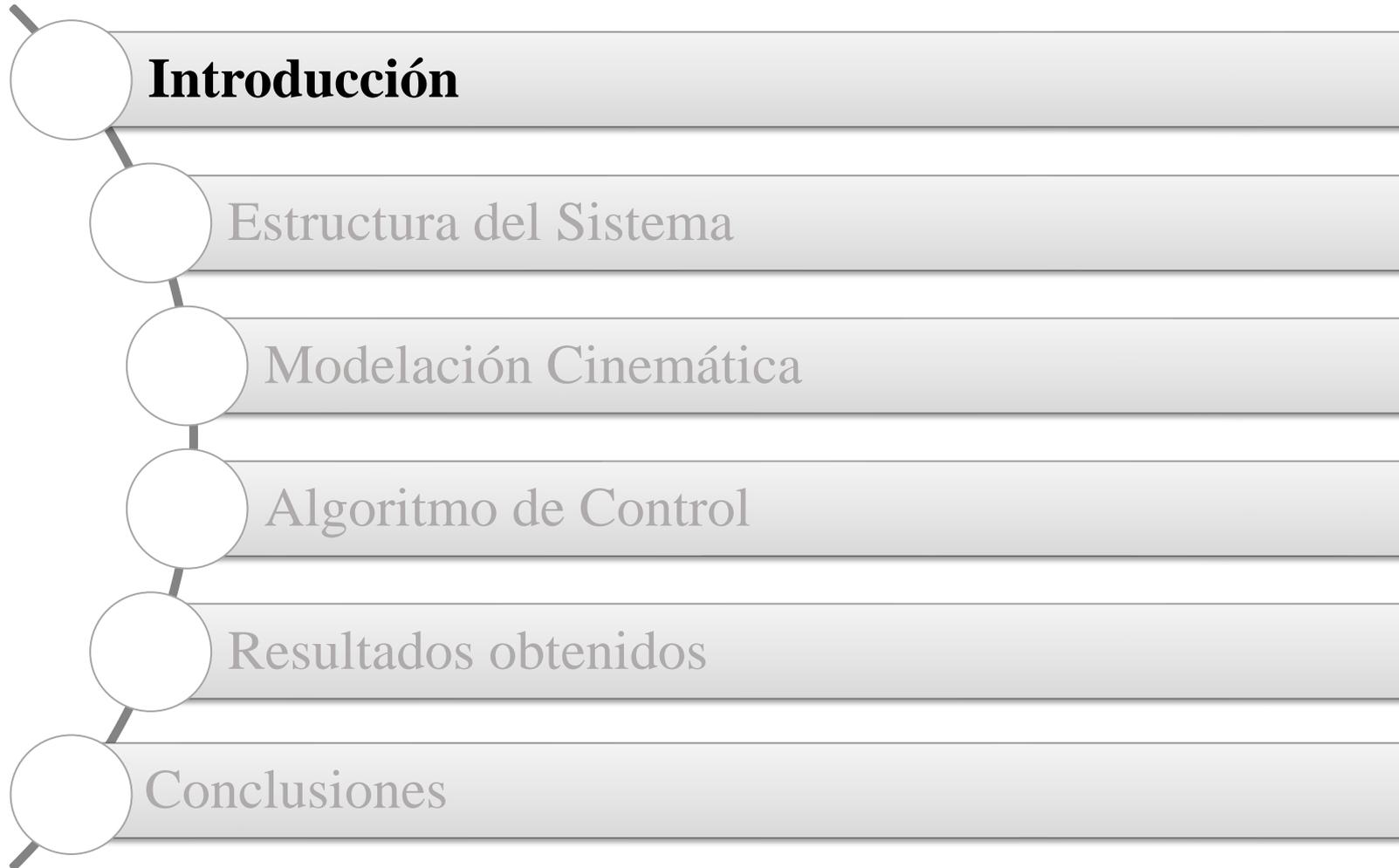
*in the 8<sup>th</sup> International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality  
and Computer Graphics*

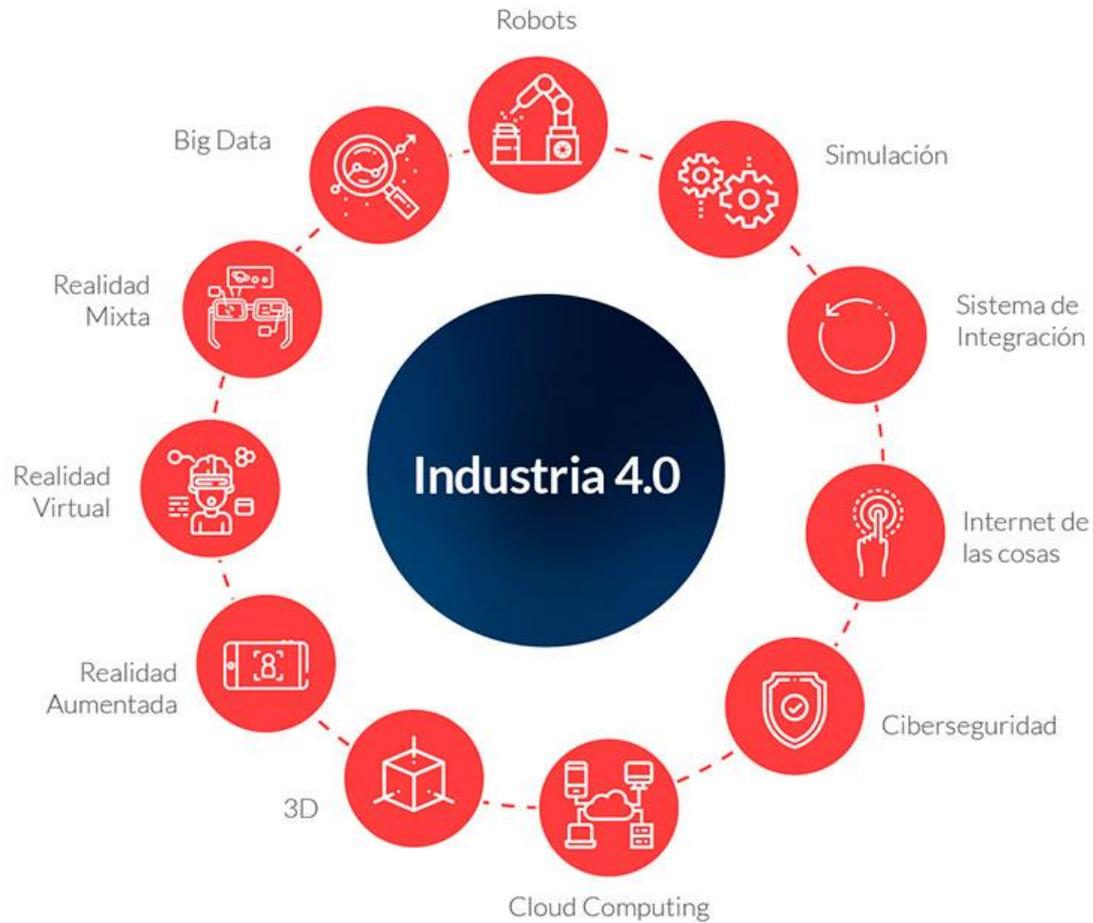
***(SALENTO AVR 2021)***

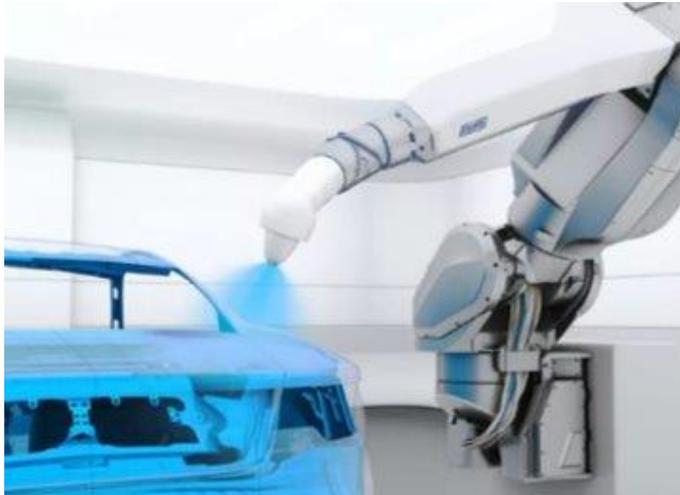
September 7 - 10, 2021

Lucio Tommaso De Paolis  
SALENTO AVR 2021 Conference Chair  

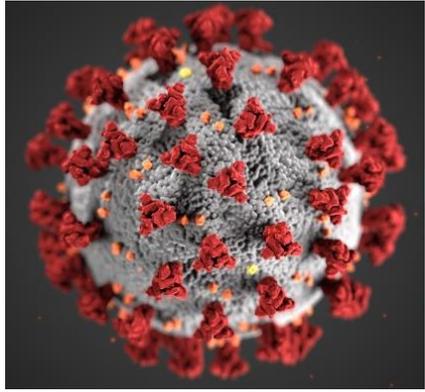


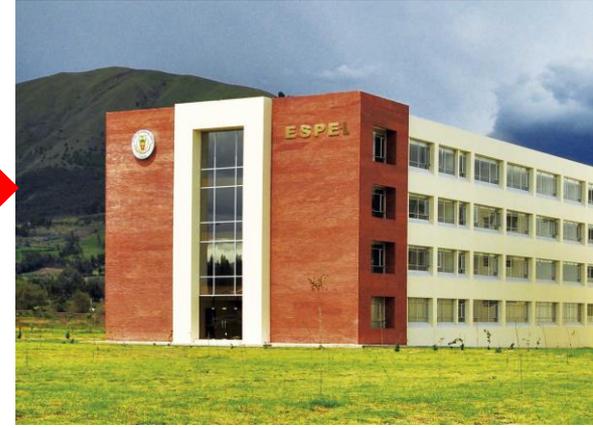








**NO**   
**ENTRAR**



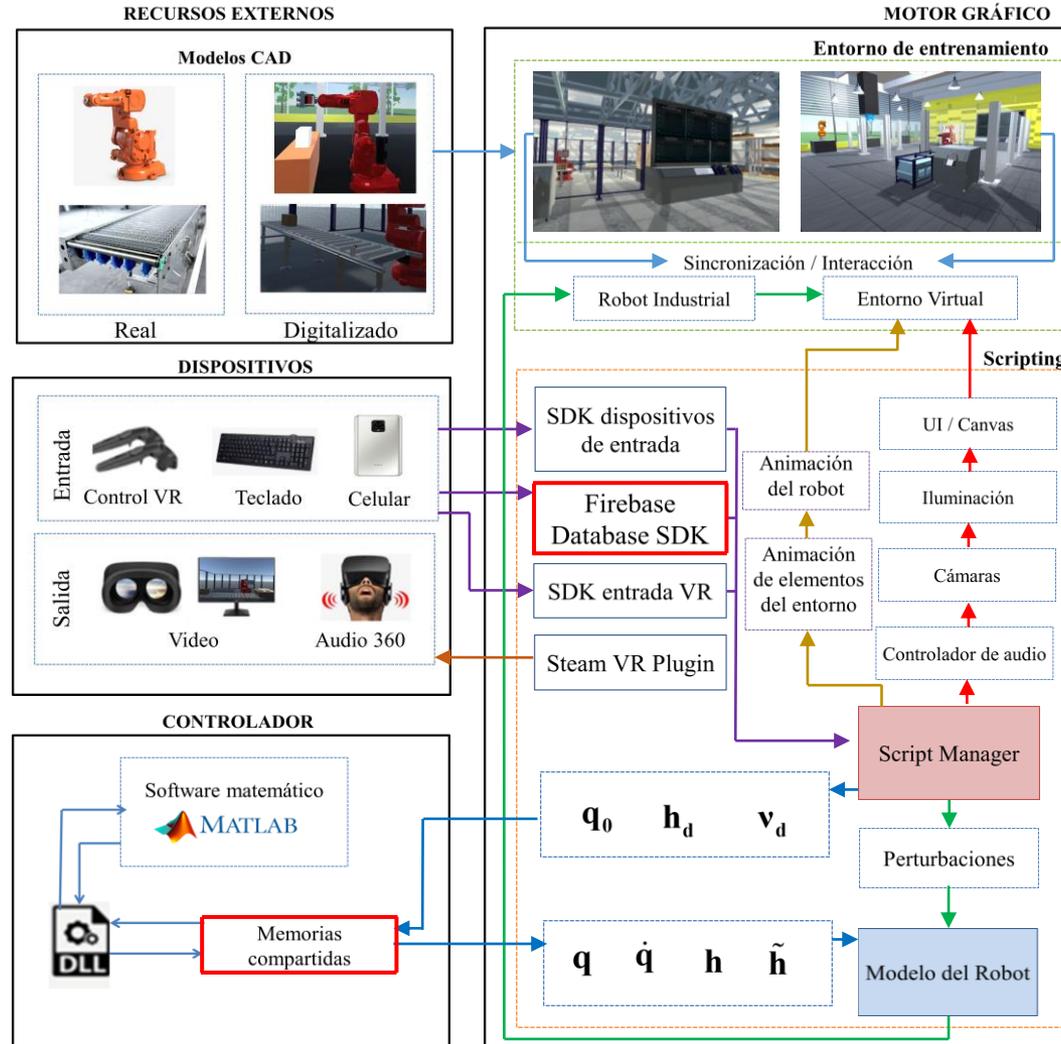
Desarrollar un **sistema didáctico** basado en **realidad virtual** que permita la **interacción del usuario**, a fin de facilitar el **proceso de enseñanza-aprendizaje** de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica en el área de Robótica Industrial

- **Investiga** en las diferentes **bases de datos científicas** acerca de la **modelación y control de robots industriales**, a fin de ejecutar tareas de **manipulación autónoma**.
- **Definir las características y restricciones de movimiento** de un robot manipulador industrial tipo antropomórfico de 6GDL, con el propósito de **implementar algoritmos de control avanzados** para la manipulación autónoma de objetos.
- Proponer un **esquema de control en lazo cerrado basado en el modelo cinemático y en técnicas de control acoplado** para la ejecución de **tareas de posicionamiento y seguimiento de trayectoria**, a fin de ejecutar tareas autónomas de manipulación de objetos.
- Analizar la **estabilidad y robustez del esquema de control** propuesto con la finalidad de evaluar el **comportamiento de los errores de control**.

- Desarrollar una **aplicación de realidad virtual** para la interacción del usuario en **dos entornos digitales recreados**. El primer entorno comprenderá de un **laboratorio de Robótica Industrial**; y el segundo considera un **entorno industrial de trabajo**, en el cual el robot manipulador ejecutará **tareas de manipulación autónoma**.
- Desarrollar una **aplicación móvil** que considere únicamente las siguientes funcionalidades del panel de control del robot manipulador: **configuración de velocidades, sistema de coordenadas articulares y botón de hombre muerto físico**; a fin de permitir al usuario el manejo del robot manipulador industrial en el entorno virtual recreado de laboratorio de Robótica Industrial.
- Realizar **evaluaciones del esquema de control propuesto y de la aplicación de realidad virtual** desarrollada, a fin de **comprobar la usabilidad** de la aplicación en el proceso de enseñanza-aprendizaje en la ingeniería Mecatrónica

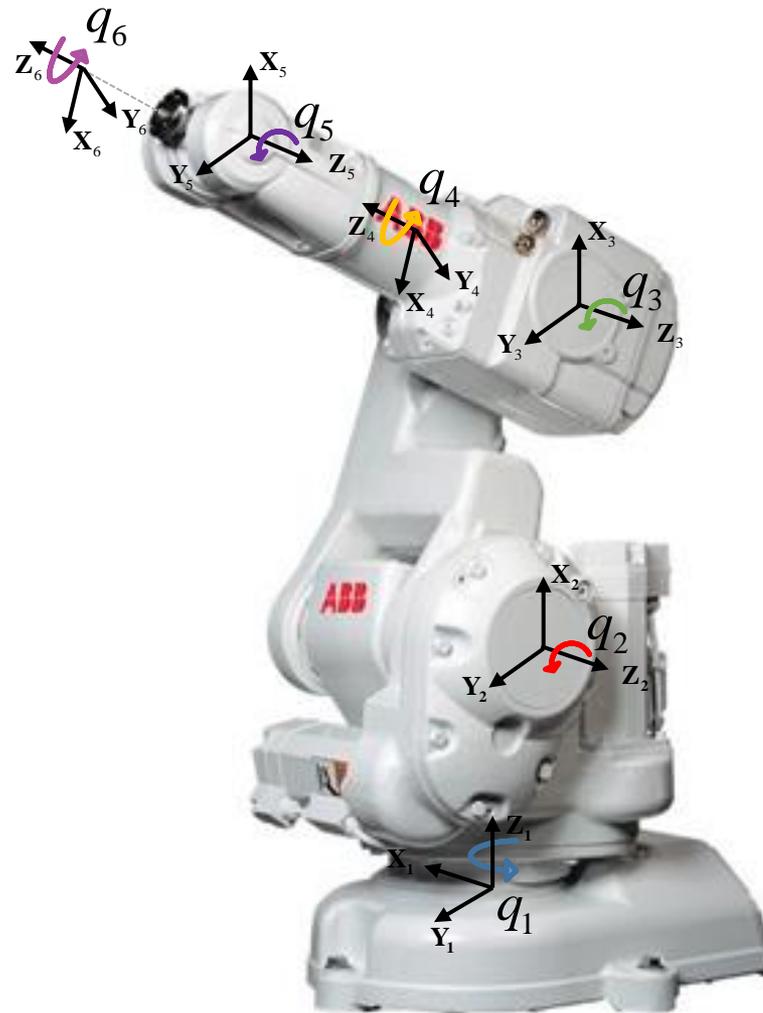


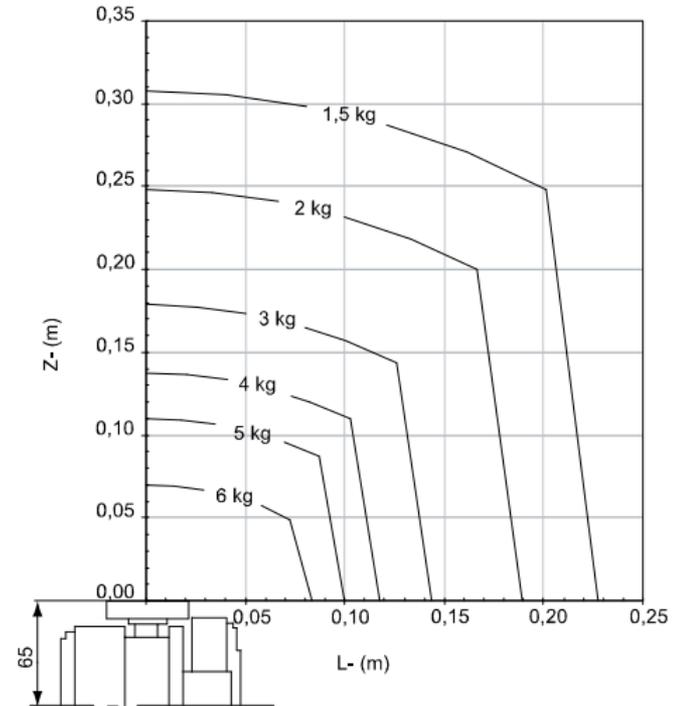
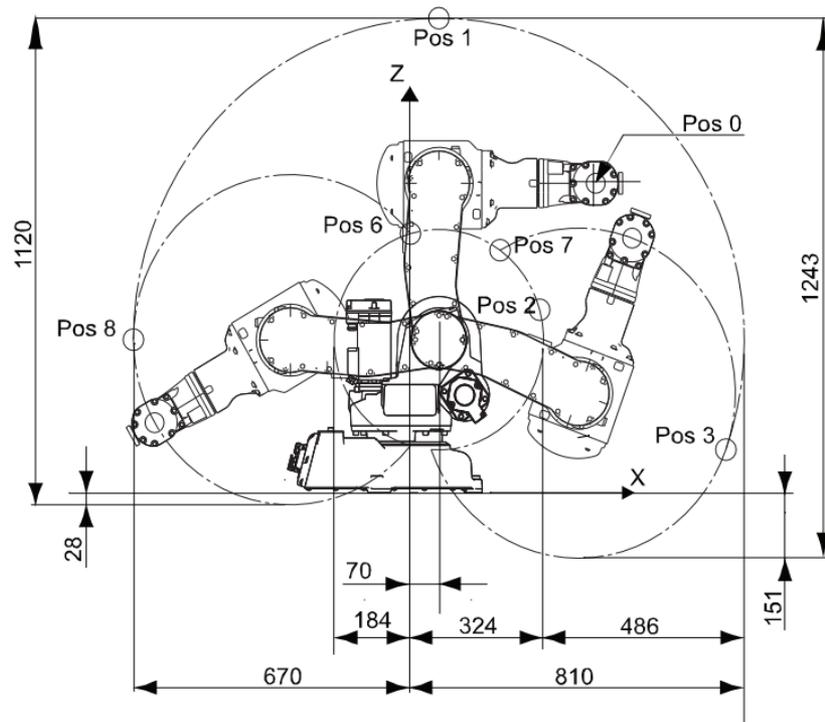
# Estructura del sistema



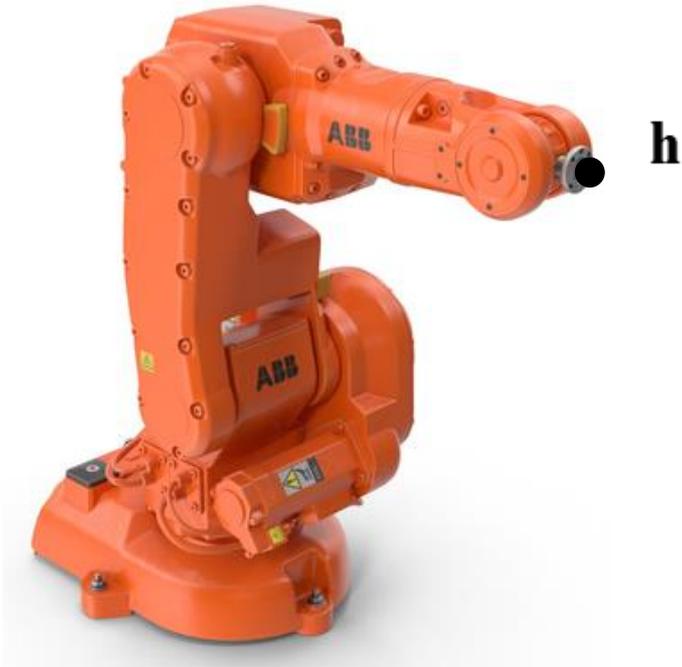


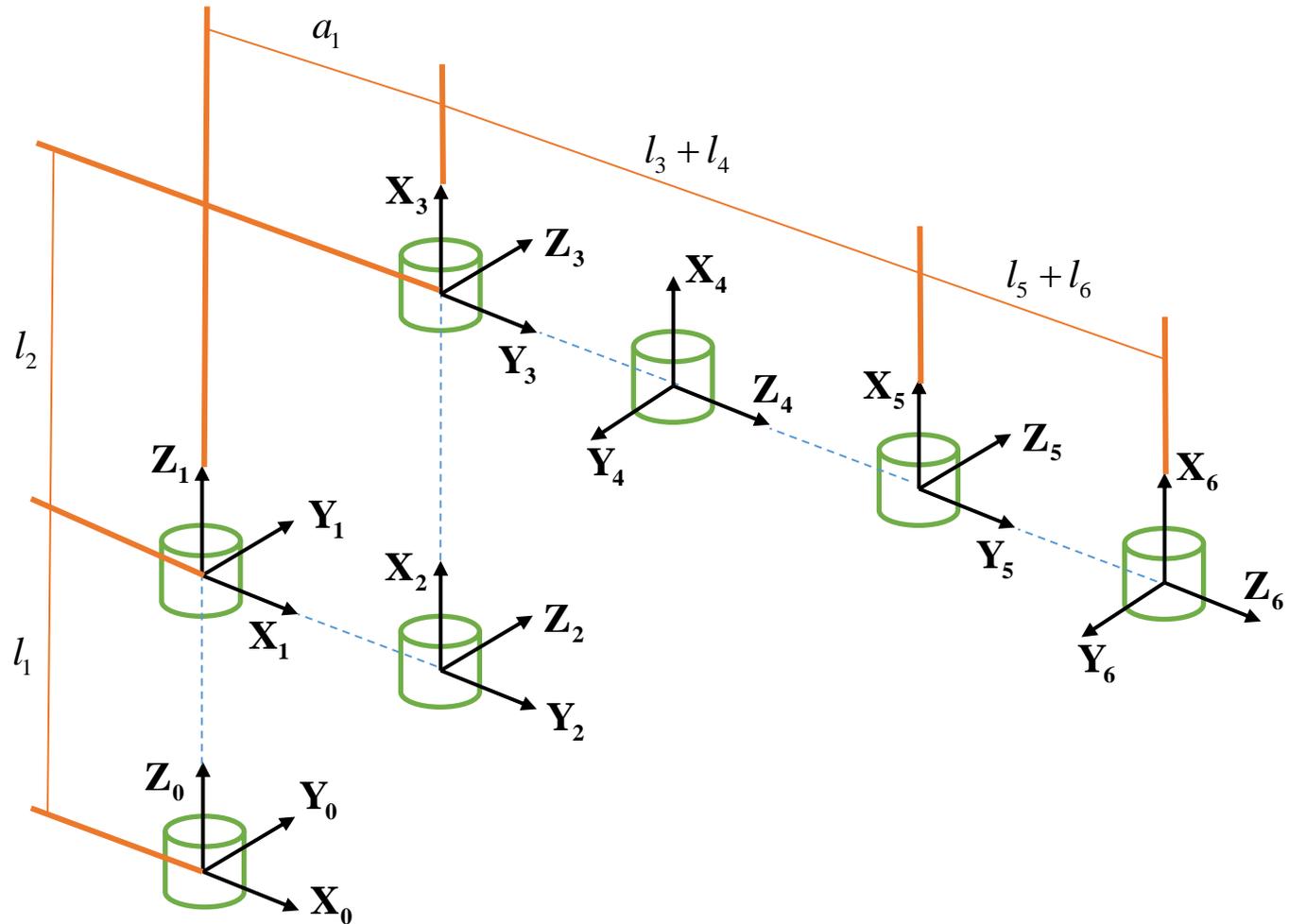






$$\mathbf{q} \mapsto \mathbf{h} = f(\mathbf{q})$$





$\theta$	$a$	$d$	$\alpha$
$q_1$	$a_1$	$l_1$	$-\frac{\pi}{2}$
$q_2 - \frac{\pi}{2}$	$l_2$	0	0
$q_3$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
$q_4$	0	$l_3$	$\frac{\pi}{2}$
$q_5$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
$q_6 + \pi$	0	$l_6$	0

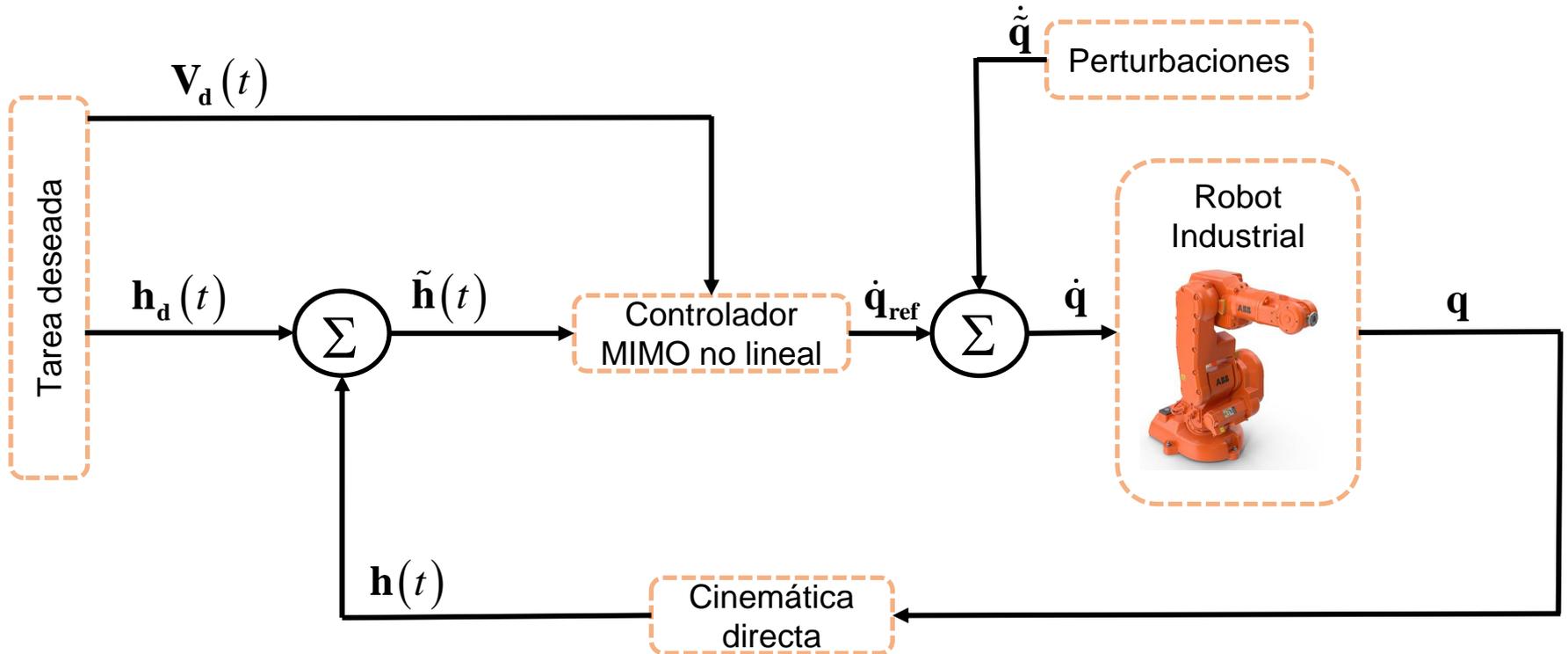
$${}^0\mathbf{T}_n = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 \dots {}^{n-1}\mathbf{A}_n$$

$$\mathbf{h} = [h_x, h_y, h_z, h_\alpha, h_\beta, h_\gamma]^T$$

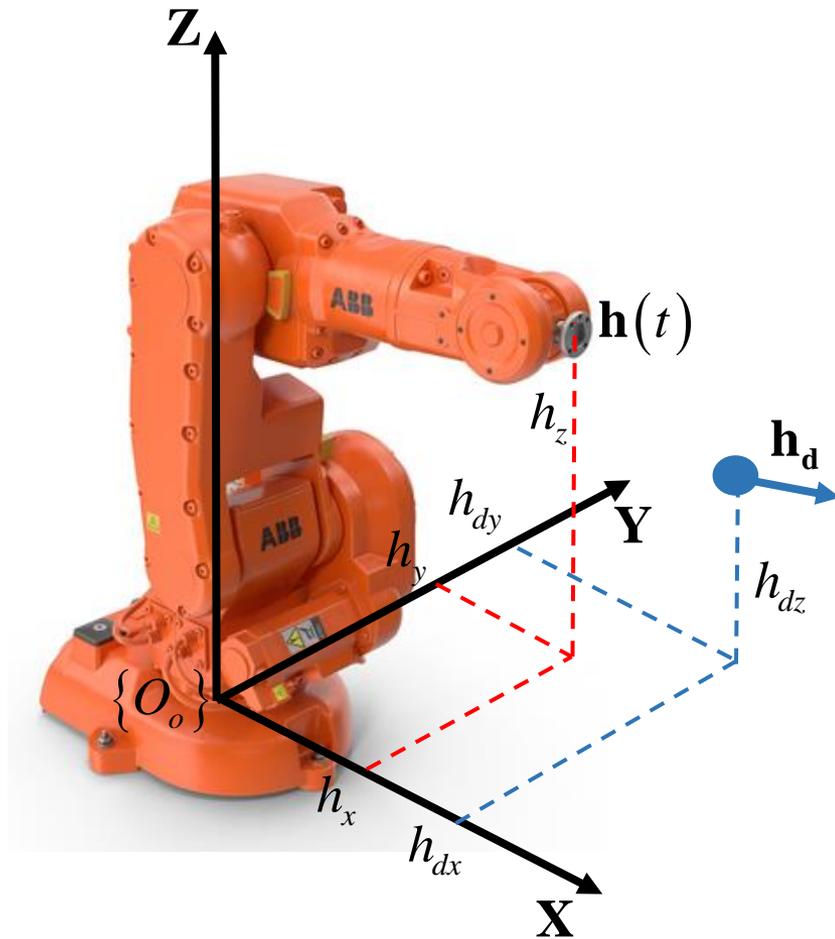
$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}(t)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad \mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$$





## Estabilización en un punto



Tarea deseada

$$\mathbf{h}_d = [h_{dx}, h_{dy}, h_{dz}, h_{d\alpha}, h_{d\beta}, h_{d\gamma}]^T$$

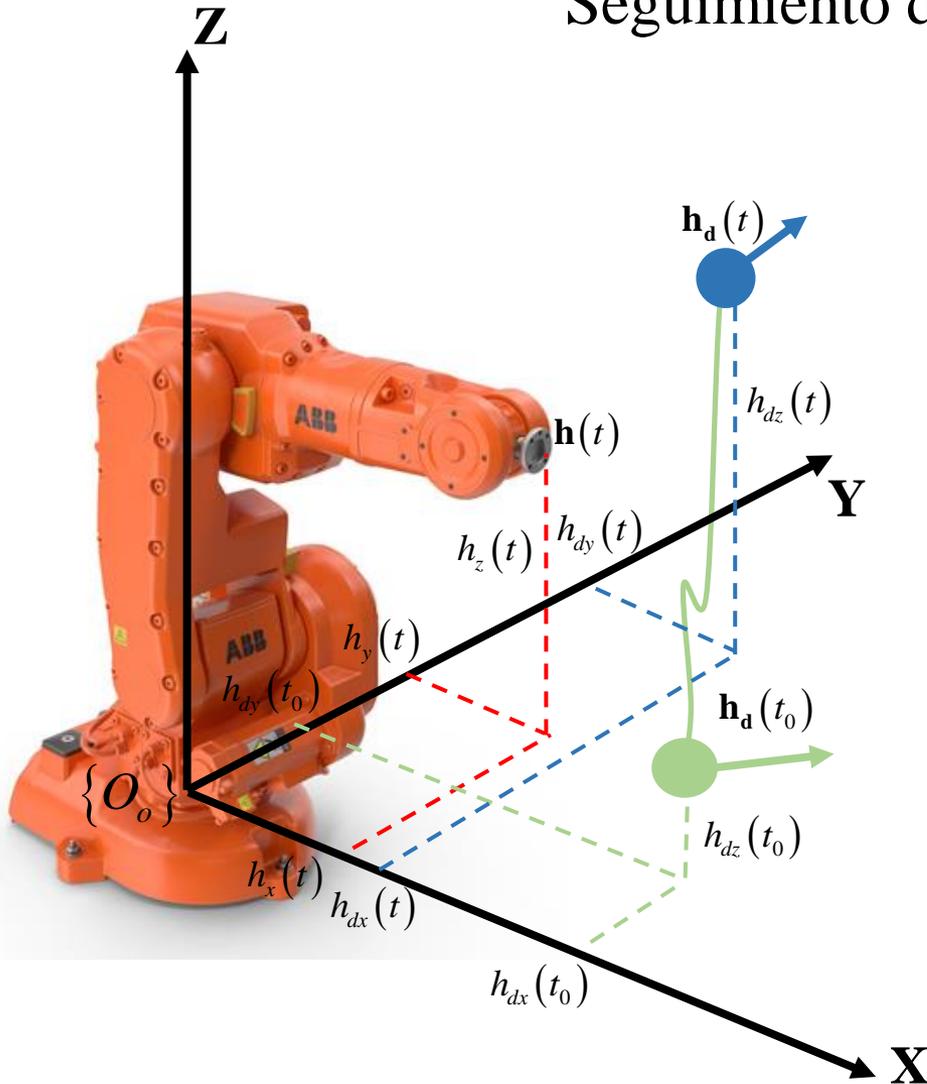
$$\mathbf{v}_d(t) = \dot{\mathbf{h}}_d(t) = 0$$

Objetivos de control

$$\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}(t)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{h}_d - \mathbf{h}(t)) = 0$$

## Seguimiento de trayectoria



### Tarea deseada

$$\mathbf{h}_d(t) = [h_{dx}(t), h_{dy}(t), h_{dz}(t), h_{d\alpha}(t), h_{d\beta}(t), h_{d\gamma}(t)]^T$$

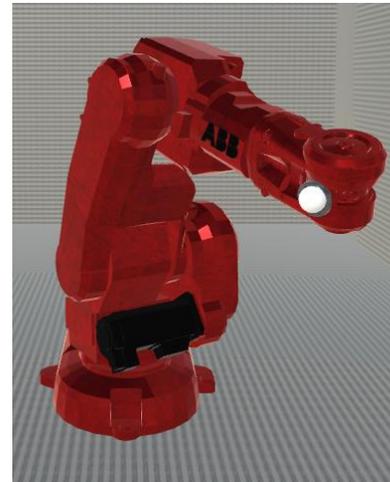
$$\mathbf{v}_d(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{h}_d(t)$$

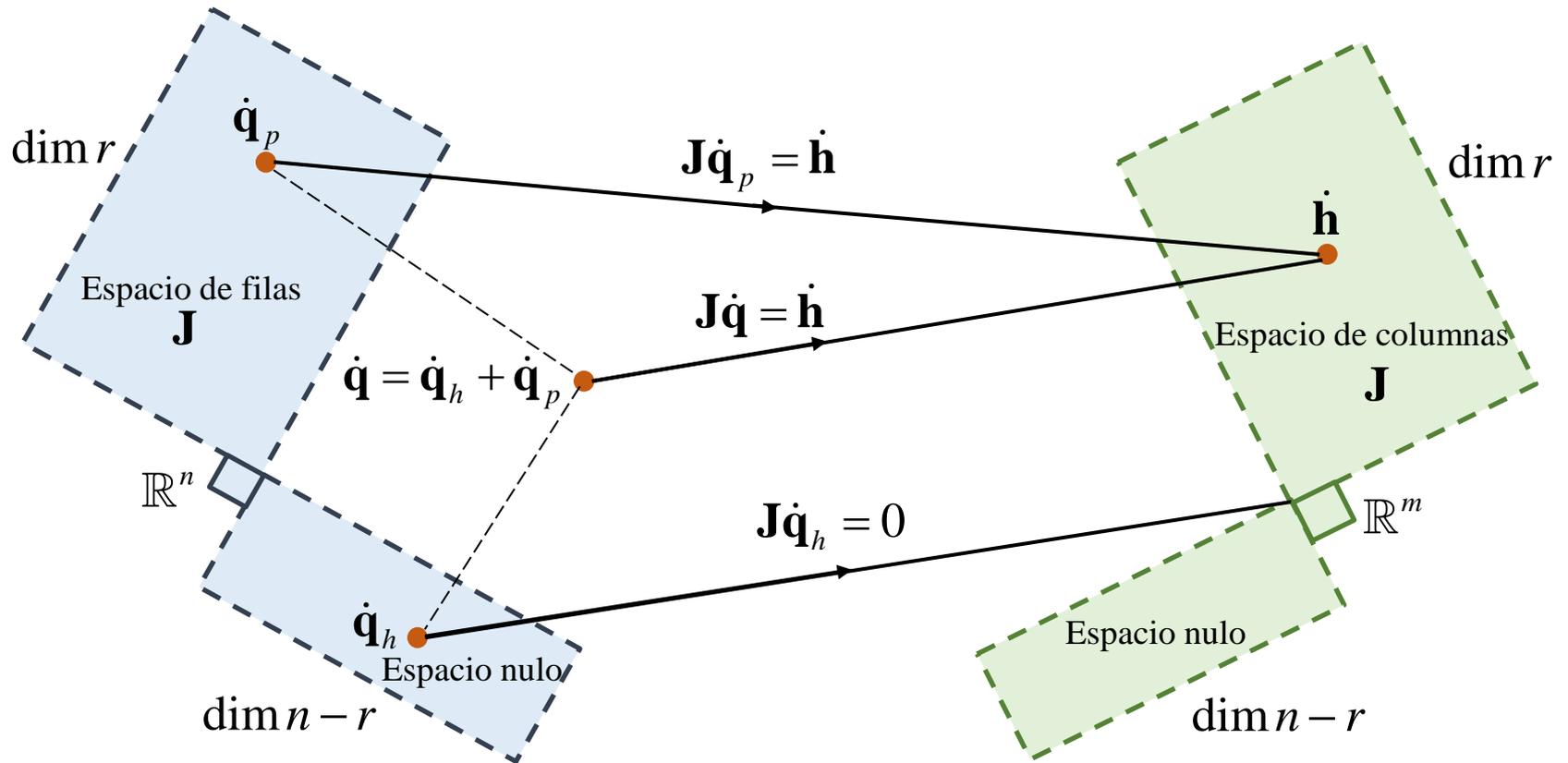
### Objetivos de control

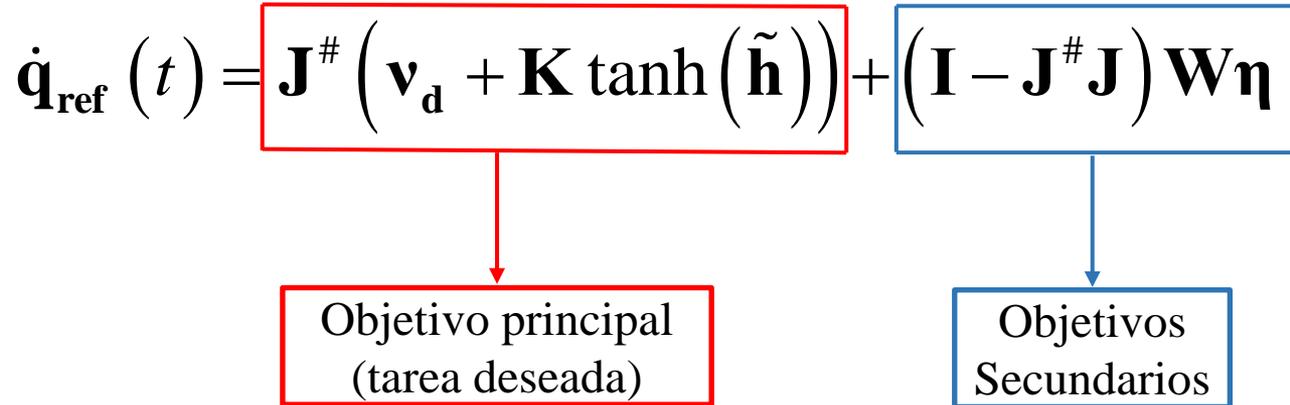
$$\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)) = 0$$

# Sistema Redundante





$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}}(t) = \mathbf{J}^{\#} \left( \mathbf{v}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^{\#} \mathbf{J}) \mathbf{W} \boldsymbol{\eta}$$


Objetivo principal  
(tarea deseada)

Objetivos  
Secundarios

Donde:

$\mathbf{J}$  = Matriz Jacobiana

$\mathbf{K}$  = Matriz de ganancia

$\mathbf{I}$  = Matriz identidad

$\mathbf{W}$  = Matriz de pesos de los errores

$\boldsymbol{\eta}$  = Vector del espacio nulo

Robot - Modelo cinemático:

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}(t) \quad (1)$$

Ley de control:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} = \mathbf{J}^{\#} \left( \mathbf{v}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^{\#} \mathbf{J}) \mathbf{W} \boldsymbol{\eta} \quad (2)$$

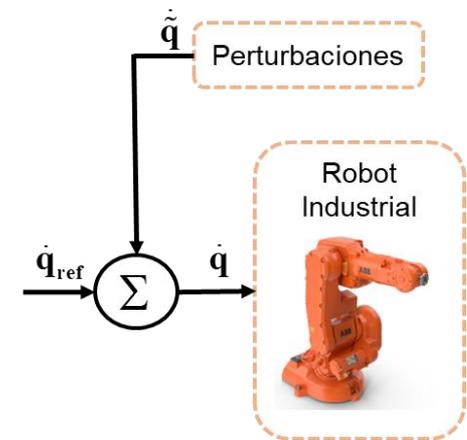
Considerando:  $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}$  y su derivada:  $\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}$

Como:

$$\mathbf{v}_d = \dot{\mathbf{h}}_d$$

Errores por perturbación:

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = \dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} - \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$



Ecuación de Lazo Cerrado:

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = -\mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) + \mathbf{J}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (4)$$

Función candidata de Lyapunov:

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}}$$

Derivada:

$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}} \quad (5)$$

Reemplazando 4) en 5) :

$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = -\tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) + \tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{J}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} < 0$$

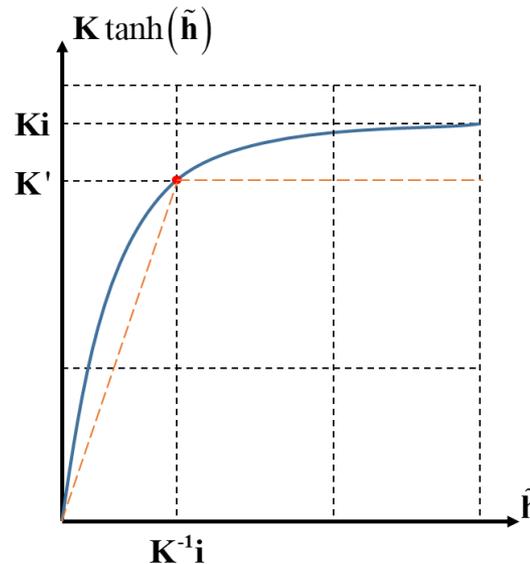
Entonces:

$$\left| \tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right| > \left| \tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{J} \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \right|$$

Para valores grandes de  $\tilde{\mathbf{h}}(t)$ :  $\mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \approx \mathbf{K}'$

Entonces:

$$\|\mathbf{K}'\| > \|\mathbf{J} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}\|$$



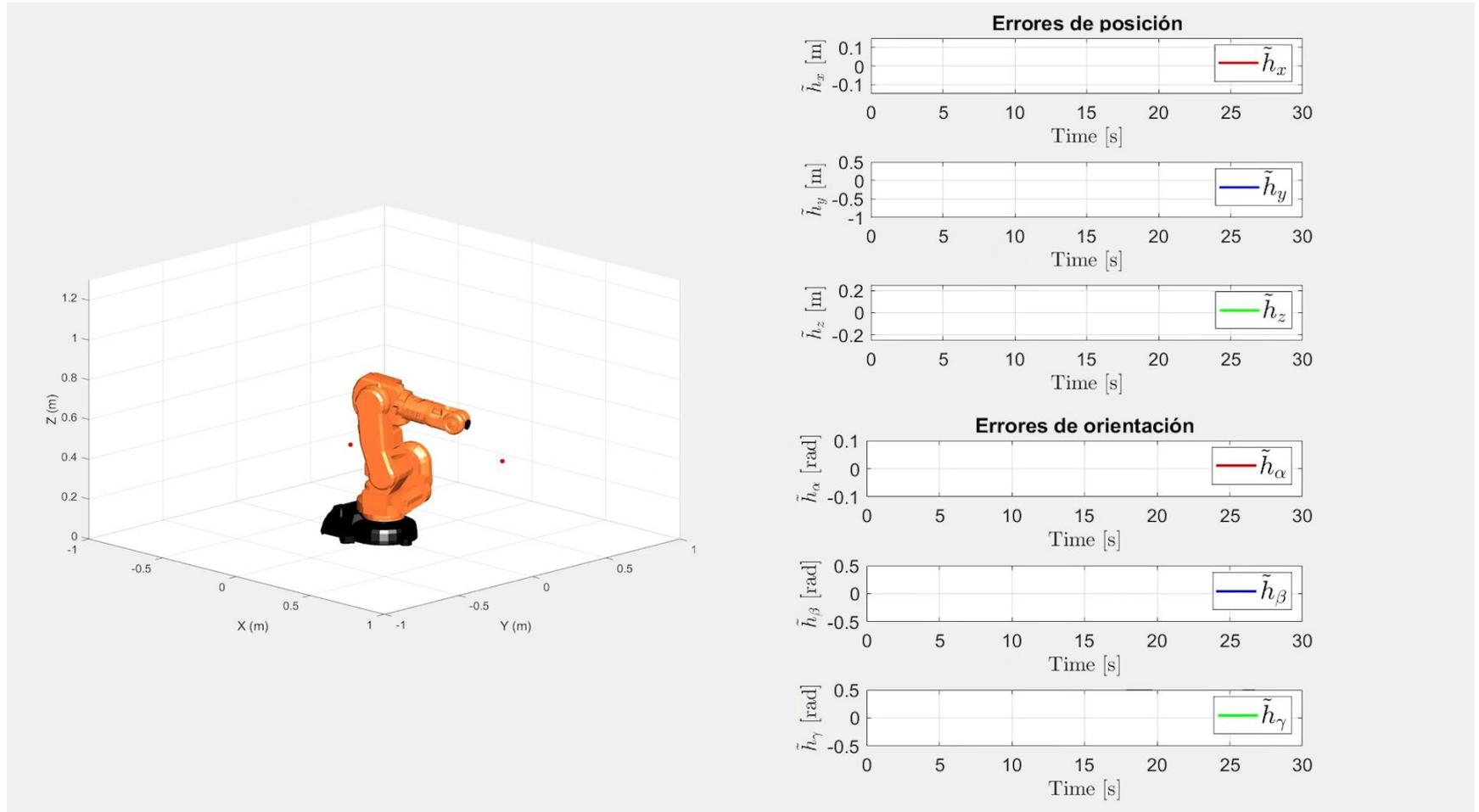
Para valores pequeños de  $\tilde{\mathbf{h}}(t)$  se considera que:  $\mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \approx \tilde{\mathbf{h}}$

Entonces:

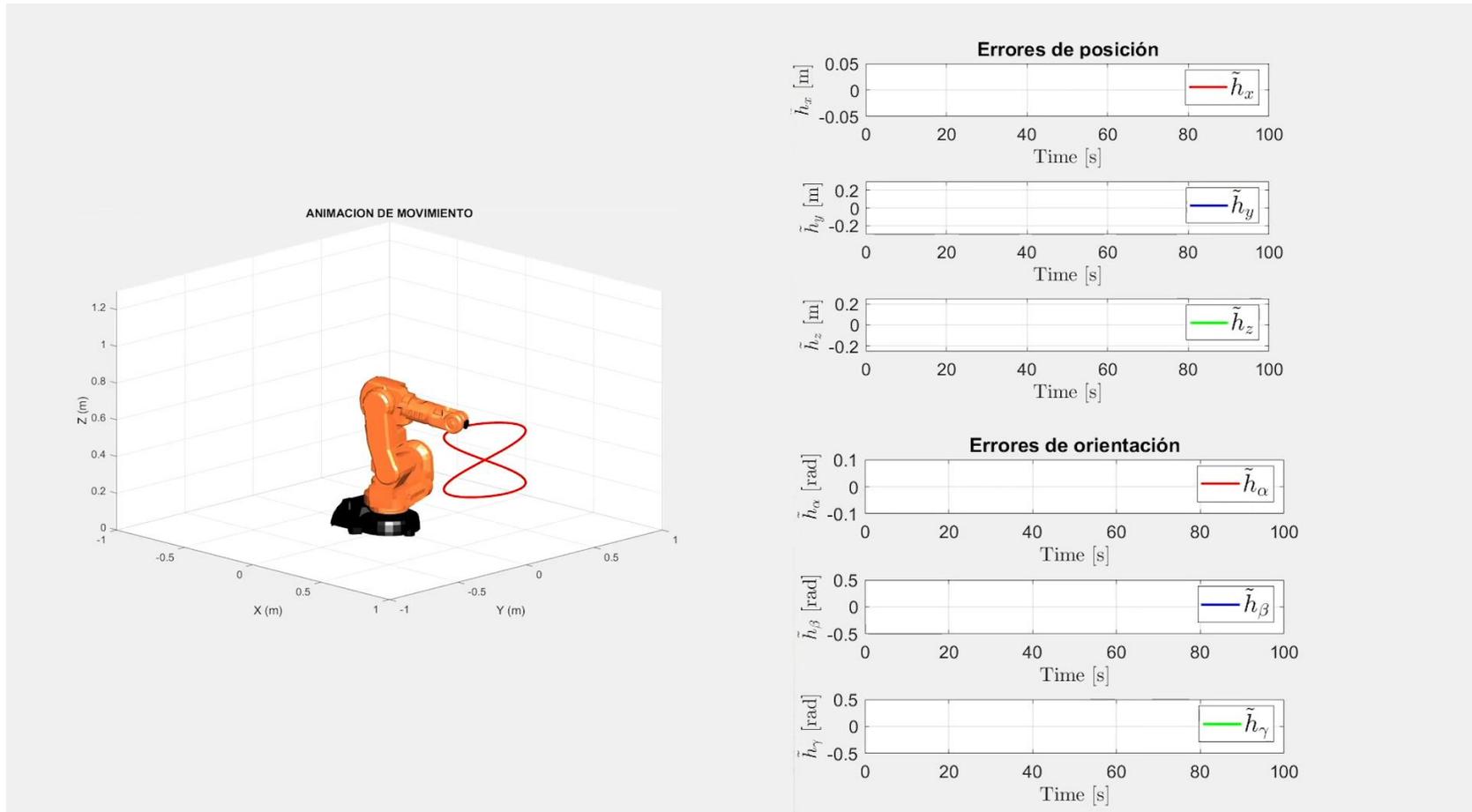
$$\|\tilde{\mathbf{h}}\| \leq \frac{\|\mathbf{J}\dot{\tilde{\mathbf{q}}}\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{K})}$$

$\tilde{\mathbf{h}} \rightarrow 0$  Cuando  $t \rightarrow \infty$

## Estabilización en un punto



## Seguimiento de trayectoria







**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**  
**SEDE LATACUNGA**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL DE 6 GDL**



**ABB IRB 140**



Estaciones Industriales

Generalidades

Paletizado Soldadura

Ingresar Ingresar

Laboratorio de Robótica Industrial

Instrucciones

Ingresar

Salir

## Escala de usabilidad de un sistema (SUS)

- Realizado con 20 personas
- Rango de calificación:
  - 5 muy de acuerdo
  - 1 muy en desacuerdo



Nº	Pregunta	Calificación	Cálculo
Q1	Me gustaría usar este sistema frecuentemente	5	5-1=4
Q2	El sistema me parece innecesariamente complejo	1	5-1=4
Q3	Pienso que el sistema es fácil de usar	4	4-1=3
Q4	Necesito el soporte de un técnico para poder usar el sistema	2	5-2=3
Q5	Pienso que las funciones del sistema están bien integradas	4	4-1=3
Q6	Pienso que hay muchas inconsistencias en el sistema	1	5-1=4
Q7	Considero que las personas aprenderán a usar el sistema rápidamente	4	5-1=4
Q8	Encuentro al sistema muy incómodo de usar	1	5-1=4
Q9	Me sentí cómodo al usar el sistema	4	4-1=3
Q10	Necesité aprender muchas cosas para utilizar el sistema	3	5-3=2
		<b>Total</b>	34*2.5=85



- El **modelo cinemático** del robot manipulador industrial **define las características y restricciones de movimiento de robot**, sin considerar su **dinámica**.
- El **algoritmo de control** propuesto permite ejecutar **tareas autónomas de posicionamiento y seguimiento de trayectoria** considerando la **redundancia del robot**, a través del cumplimiento de objetivos secundarios.
- El análisis de **estabilidad y robustez** permite garantizar que cuando **no existe perturbaciones los errores de control converjen a cero asintóticamente** cuando el tiempo tiende a infinito; **mientras que cuando se considera perturbaciones en la entrada los errores de control son acotados**.
- Las **pruebas experimentales y el análisis de usabilidad** determinó que el **sistema de entrenamiento virtual** desarrollado permite a los usuarios entender las **características y funcionamiento de un robot manipulador industrial**.



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniería Mecatrónica**

**CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO ANTROPOMÓRFICO  
DE 6GDL A TRAVÉS DE ENTORNOS EN REALIDAD VIRTUAL.**

**Autor:**

Cobo Freire Erick Bryan

Ph.D. Víctor H. Andaluz, *Tutor*

