

# **SIMULACIÓN DEL CONTROL DE UN ROBOT MANIPULADOR CON LAZO DE SEGURIDAD PARA LA INTERACCIÓN CON EL HUMANO USANDO UN SENSOR DE FUERZA VIRTUAL**

*SIMULATION OF THE CONTROL OF A MANIPULATOR ROBOT  
WITH A SAFETY LOOP FOR INTERACTION WITH HUMANS  
USING A VIRTUAL FORCE SENSOR*

**Jesús Aldo Paredes Ballesteros**

Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, México  
*jparedesb1900@alumno.ipn.mx*

**Miguel Gabriel Villarreal Cervantes**

Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, México  
*mvillarrealc@ipn.mx*

**Saul Enrique Benitez Garcia**

Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, México  
*sbenitezg1100@alumno.ipn.mx*

**Alejandro Rodríguez Molina**

Tecnológico Nacional de México / IT de Tlalnepantla, México  
*alejandro.rm@tlalnepantla.tecnm.mx*

**Recepción:** 24/noviembre/2023

**Aceptación:** 26/diciembre/2023

## **Resumen**

La seguridad en la robótica se ha convertido en un factor de importancia dada la creciente interacción entre los humanos y robots. En el presente documento, se aborda la problemática de la seguridad robótica mediante la implementación de un campo potencial repulsivo dentro del lazo de control, relativo a la fuerza de interacción con los obstáculos, permitiendo que un robot pueda eludir obstáculos y continuar con una tarea de seguimiento definida. Este sistema de control basado en fuerza repulsiva se activa en el momento que el efector final esté en la presencia de un obstáculo. Esta estrategia, proporciona una solución de seguridad directa dentro del espacio de la tarea del manipulador, con el propósito de mejorar la confiabilidad del sistema de seguridad robótico. Escenarios de prueba con obstáculo fijo y en movimiento, validan el enfoque propuesto.

**Palabras Clave:** Campo repulsivo, Robot manipulador, Seguridad, Sensor de fuerza.

## **Abstract**

*Given the increasing interaction between humans and robots, robotic security has become essential. In this document, we address the issue of robotic safety by implementing a repulsive potential field within the control loop related to the interaction force with obstacles, allowing a robot to evade obstacles and continue with a defined tracking task. This system of force-based control is activated when the end effector is in the presence of an obstacle. This strategy provides a direct safety solution within the manipulator's task space, aiming to enhance the reliability of the robotic security system. Test scenarios with both stationary and moving obstacles validate the proposed approach.*

**Keywords:** Force sensor, Manipulator robot, Repulsive field, Security.

## **1. Introducción**

La colaboración entre humanos y robots es cada vez más común en hogares e industria, destacando la importancia de la seguridad en el camino hacia la automatización. En [Zacharaki, 2020], clasifica los robots en tres categorías: robots en la naturaleza, robots de servicio profesional y robots de servicio personal. En este documento, es de interés los robots de servicio profesional, como los manipuladores. Los manipuladores son sistemas mecánicos programables que se usan para realizar tareas repetitivas, a veces peligrosas o inaccesibles para ser humano. Los manipuladores pueden manejar objetos con precisión, velocidad y fuerza o realizar diversas trayectorias con diferentes herramientas. Estos robots en actividades industriales comparten el mismo espacio de trabajo que los seres humanos, sin embargo, para que la interacción sea segura, es necesario adoptar un conjunto de técnicas de seguridad.

Existen diversos mecanismos de seguridad descritos en la literatura, en [Rosenstrauch, 2018], se crea una delimitación en la zona de trabajo del robot y se facilita la implementación de medidas de seguridad adecuadas para la interacción,

en [Baek, 2012] se propone diferentes algoritmos y configuraciones en respuesta a situaciones de riesgo, como la creación de espacios en los que el efector final no puede ocupar ciertos espacios. Otra medida de seguridad son los sensores o sistemas de detección. En estos sistemas el robot debe ser capaz de detenerse o bajar su velocidad en cuanto se aproxima hacia un obstáculo [Garcia, 2009]. En la literatura encontramos diversas aplicaciones de seguridad en cuanto a la previsión de colisiones y la detección de estas, en [Wenzhong, 2017], se detecta la colisión de un robot sin un sensor, utilizando la desviación de la velocidad optimizada. También en [Lee, 2014], se propuso un método de detección de colisiones en un manipulador redundante equipado con sensores de par en las articulaciones, esto cuando el efector final está en contacto o cooperando con humanos. En [Magrini, 2014], con el objetivo de lograr una colaboración efectiva entre humanos y robots, se detectan interacciones de fuerza dinámica que ocurren a lo largo de la estructura del robot con una cámara de profundidad, al mismo tiempo que se determinan los pares de torsión generados por la interacción física utilizando el método residual. En [Kuli, 2007] se presenta una metodología basada en el nivel de peligro de la interacción, donde se realizan tres movimientos brindando seguridad al humano por medio de la modificación de las trayectorias y su planeación, estos incluyen: la planificación de ruta a largo plazo, la planificación de trayectoria a mediano plazo y el control reactivo a corto plazo.

En el presente documento se propone un sistema de control simulado de seguridad que utiliza un lazo de fuerza de repulsión. Este lazo se activa en respuesta a la detección de fuerza por parte de un sensor simulado, enviando una señal que permite al manipulador alejarse del objeto y mantener su trayectoria.

El control de seguridad se basa en la utilización de un campo potencial repulsivo que se construye en función de la fuerza externa que resulta de la colisión entre el manipulador y el obstáculo.

La colisión genera un vector de fuerza que se extiende desde el obstáculo y que aumenta a medida que el robot se acerca al objeto. El campo repulsivo empuja al robot lejos del obstáculo permitiendo que el sistema robótico se aleje de cualquier objeto que obstruya su trayectoria deseada.

Para evaluar la efectividad del control con lazo de seguridad de fuerza propuesto, se lleva a cabo una simulación con un robot RRR. El robot se coloca en un entorno virtual y se utiliza un sensor de fuerza simulado numéricamente para detectar la presencia de objetos cercanos al primero. A partir de la información del sensor, se genera un campo potencial repulsivo que evita que el robot colisione con los objetos en su entorno. La efectividad del control se evaluará en términos de la capacidad del robot para evitar colisiones y cumplir con la trayectoria deseada. Los resultados del estudio pueden tener aplicaciones y contribuciones importantes para el desarrollo de robots seguros y eficientes en entornos de producción y de investigación.

El documento se divide en cinco secciones. La segunda sección abarca el modelo dinámico y cinemático del robot RRR. En la tercera sección se explica el control con lazo de seguridad de fuerza que se propone en este documento. En la cuarta sección está dedicada a presentar los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas. Finalmente, en la quinta y última sección se presentan las conclusiones extraídas y resumiendo las implicaciones relevantes que se derivan del mismo.

## 2. Métodos

### Modelo cinemático y dinámico del robot RRR

El desarrollo de los modelos dinámico y cinemático fue obtenido de [Benitez-Garcia, 2020]. En la figura 1 se muestra el robot RRR y sus parámetros que incluyen la longitud de los ejes rotatorios, los ángulos entre ellos, así como los marcos de referencia asignados a cada eje.

La cinemática directa, permite conocer la posición y la orientación del efector final a partir de su configuración dada por  $\theta_1, \theta_2$  y  $\theta_3$ , donde la posición del efector final  $P =$

$[P_x, P_y, P_z]^T$  se establece en la ecuación 1 y su orientación en la ecuación 2.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2)$$

La dinámica del robot RRR en su forma cerrada está expresada en la ecuación 3.

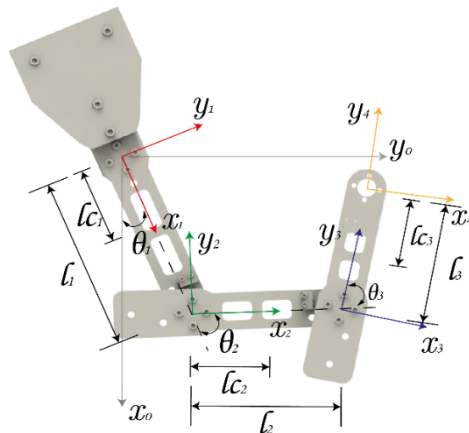
$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \quad (3)$$

Donde:

$M(\theta)$  : Matriz de inercia  $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,

$C(\theta, \dot{\theta})$  : Matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis  $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,

$G(\theta)$  : Vector de gravedad  $\in \mathbb{R}^3$ .



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Diagrama general del robot RRR.

### Control con lazo de seguridad de fuerza

Los campos potenciales  $U$  se han usado frecuentemente en la planeación de rutas para robots. La idea básica de los enfoques de campos potenciales es la de construir campos potenciales en el espacio  $\Omega$  donde se desarrolla la tarea del robot, de tal forma que el punto de interés en donde se va a desarrollar dicha tarea sea atraído por la meta  $\varphi_{final}$  y sea repelida de la región de obstáculos  $\bar{\Omega}$ .

En lo general, el campo potencial  $U$  se conforma de la suma de potenciales atractivos y repulsivos, cuyo gradiente  $-\nabla U$  indica la dirección local más prometedora del movimiento en la planeación de la ruta, considerando  $\varphi \in \Omega$  como el espacio en donde se desarrolla la tarea,  $U(\varphi)$ , el campo potencial, ecuación 4.

$$U(\varphi) = U_{atr}(\varphi) + U_{rep}(\varphi) \quad (4)$$

El campo potencial repulsivo debe alejar al punto de interés en el robot manipulador de los obstáculos, sin permitir que el robot se impacte con ellos, cuando el robot

este alejado de éstos, el campo potencial no debe ejercer ninguna influencia en el movimiento del robot. En la literatura se han propuesto varias funciones de campos potenciales repulsivos que logran satisfacer lo mencionado arriba. Una de éstas, es la que se desarrolla en [Spong, 2006], presentada en la ecuación 5.

$$U_{rep}(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 & \text{si } \rho(\varphi) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{si } \rho(\varphi) > \rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde  $\rho_0$  es la distancia de influencia de un obstáculo,  $\bar{\rho}(\varphi) = \|\varphi - b\|$  es la distancia euclidiana del espacio de configuración del robot,  $\varphi$  es donde se desarrolla la tarea (para el caso particular del espacio Cartesiano  $x_0 - y_0$  al espacio de configuración del obstáculo) y  $\eta$  es un coeficiente de ganancia escalar que determina la influencia del campo repulsivo.

Por lo tanto, la fuerza repulsiva  $F_{rep}$  está dada por el gradiente negativo del campo potencial repulsivo cuando  $\bar{\Omega}$  consiste en una región convexa, expresado en la ecuación 6.

$$F_{rep} = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\left(\frac{1}{\rho^2(\varphi)}\right)\nabla\rho(\varphi) & \text{si } \rho(\varphi) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{si } \rho(\varphi) > \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

Asumiendo que  $\bar{\Omega}$  es un espacio convexo, el gradiente de la distancia más corta al obstáculo está dada en la ecuación 7, donde  $b$  es el punto en el límite de  $\bar{\Omega}$  que está más cerca a  $\varphi$ , esto se evidencia en la figura 2. Para este caso particular a diferencia de lo anteriormente presentado, se propone un campo potencial repulsivo dado por las ecuaciones 8 y 9. En este caso, el campo potencial está en función de la fuerza externa ejercida por el ambiente y no por la posición.

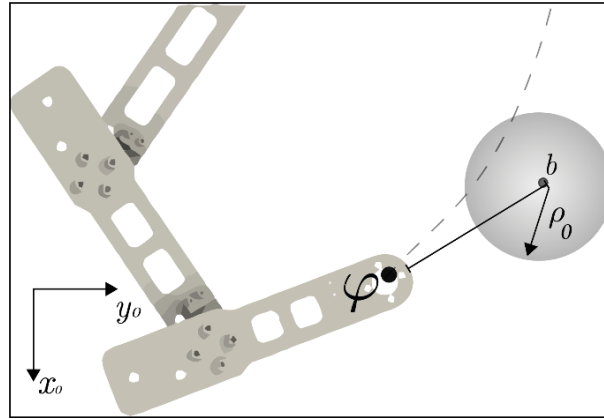
$$\nabla\rho(\varphi) = \frac{\varphi - b}{\|\varphi - b\|} \quad (7)$$

$$U_{rep}(F_{ext}) = \begin{cases} \frac{1}{2}\bar{\eta}(\bar{\rho}(F_{ext}))^2 & \text{si } \rho(\varphi) > 0 \\ 0 & \text{si } \rho(\varphi) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{rep}(F_{ext}) = \begin{cases} \bar{\eta}(\bar{\rho}(F_{ext}))\nabla\bar{\rho}(F_{ext}) & \text{si } \bar{\rho}(\varphi) > 0 \\ 0 & \text{si } \bar{\rho}(\varphi) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Donde  $F_{ext} \in \mathbb{R}^N$ ,  $\bar{\rho}(F_{ext}) = \|F_{ext}\| \in \mathbb{R}$  y  $\nabla \bar{\rho} = \frac{F_{ext}}{\|F_{ext}\|} \in \mathbb{R}^N$  es el vector de fuerzas y pares externos generado al chocar con un obstáculo y  $\bar{\eta} = \text{diag}\{\bar{\eta}_1, \dots, \bar{\eta}_N\} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  es una matriz diagonal con los coeficientes de ganancia escalar. Simplificando ecuación 9 resulta en ecuación 10.

$$F_{rep}(F_{ext}) = \begin{cases} \eta F_{ext} & \text{si } \bar{\rho}(\varphi) > 0 \\ 0 & \text{si } \bar{\rho}(\varphi) = 0 \end{cases} \quad (10)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Representación esquemática del robot RRR y el obstáculo.

### Estrategia de control

Considere la dinámica del robot escrita en la ecuación 11 y el sistema de control dado por la ecuación 12 en donde se incorpora la fuerza repulsiva  $F_{rep}$ .

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = u \quad (11)$$

$$u = J^T(K_p e_\varphi + K_d \dot{e}_\varphi + F_{rep}) + G \quad (12)$$

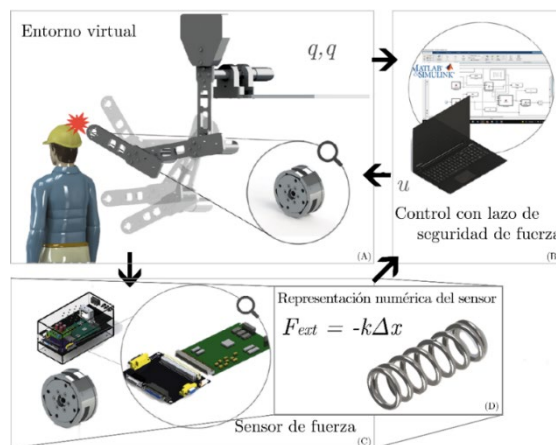
Las matrices y vectores asociados al sistema de control están dados por:

- $M(\theta) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  matriz de inercia definida positiva y simétrica.
- $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} \in \mathbb{R}^N$  vector de fuerza centrífuga y de Coriolis.
- $G(\theta) \in \mathbb{R}^N$  vector de fuerzas debido a la gravedad.
- $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta} \in \mathbb{R}^N$  vector de posición, velocidad y aceleración en el espacio articular del robot.
- $u \in \mathbb{R}^N$  vector de par de entrada.

- $J \in \mathbb{R}^{N \times N}$  matriz Jacobiana.
- $K_p \in \mathbb{R}^{N \times N}$  matriz diagonal con ganancias proporcionales.
- $K_d \in \mathbb{R}^{N \times N}$  matriz diagonal con ganancias derivativas.
- $e_\varphi = \varphi_d - \varphi \in \mathbb{R}^N$  vector de error de posición Cartesiana.
- $\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi}_d - \dot{\varphi} \in \mathbb{R}^N$  vector de error de velocidad Cartesiana, para el caso de regulación  $\dot{e}_\varphi = -\varphi$ .
- $\varphi \in \mathbb{R}^N$  vector de posición en el espacio Cartesiano del robot.
- $\varphi_d \in \mathbb{R}^N$  vector de posición deseada en el espacio Cartesiano del robot.
- $F_{rep} \in \mathbb{R}^N$  vector de fuerza repulsiva.

### 3. Resultados

En el siguiente apartado, se explica con detalle las partes que conforman la plataforma experimental. Acorde a lo que se exhibe en la figura 3 está dividida en tres partes principales: el entorno virtual, el sensor de fuerza y el controlador con lazo de seguridad de fuerza.



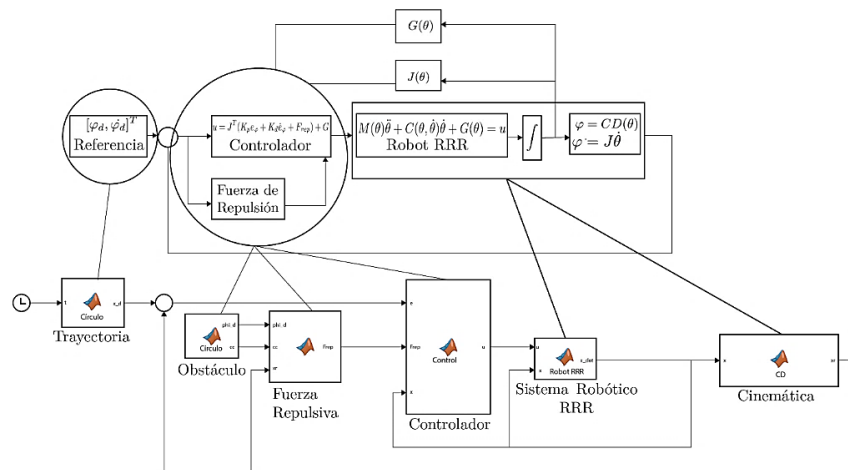
Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Diagrama general del control con lazo de seguridad.

Tal como se ilustra en el recuadro (A), está el entorno virtual donde se encuentra al manipulador realizando una trayectoria o una tarea programada que, a su vez, colisiona contra un obstáculo. Al colisionar el manipulador con el objeto habrá una fuerza externa que producirá un cambio en los valores que se obtienen del sensor,



en caso contrario, el sensor no registrará ningún valor, indicando que no existe obstáculo alguno que obstruya la operación del manipulador. En los recuadros (C) y (D) se muestra el sensor de fuerza. Este sensor se encuentra ubicado en el efector final y será representado numéricamente por la ley de elasticidad de Hooke, es decir, se considera el comportamiento de la fuerza externa producida por el sensor como el de un resorte. Por último, está el controlador con lazo de seguridad de fuerza en el recuadro (B) realizado en MATLAB R2021b - Simulink con base en el diagrama mostrado en la figura 4, donde, al presentarse una fuerza externa por parte del sensor, el primero responderá con una fuerza repulsiva para repeler el efector final del objeto y terminar la trayectoria



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Diagrama esquemático del control con lazo de seguridad.

En la figura 4, se identifica una trayectoria  $\varphi_d$ , que realiza con base en el controlador dado por ecuación 12, mismo que al sentir una fuerza externa se activa la fuerza de repulsión. El controlador envía una señal  $u$  al sistema dinámico del manipulador RRR para obtener su posición y velocidad mediante el integrador, por último, pasa del espacio articular al espacio Cartesiano usando la cinemática directa.

### Condiciones del experimento

Se realizaron dos casos de estudio para comprobar la efectividad de la propuesta bajo las siguientes condiciones La simulación numérica se propuso con un tiempo

final de  $t_{out} = 15$  segundos utilizando la integración de Euler (ode1) con un tamaño de paso de  $dt = 0.001 s$  bajo la condición inicial  $x(0) = [0,0,0,0,0,0]^T$ . Las ganancias de (12) considera los valores en  $K_p = diag\{200,200,100\}$  y  $K_v = diag\{20,20,2\}$  y la constante de rigidez del resorte  $K = diag\{350,2588,0\}$ .

En el primer caso, nombrado caso A, se plantea la introducción de un obstáculo fijo en la trayectoria deseada para el robot RRR, con el propósito de generar una colisión controlada entre ambos. En contraste, con el segundo escenario, llamado caso B, el obstáculo se encuentra en movimiento, adentrándose en la zona de tarea del manipulador. Este planteamiento busca evaluar y analizar la capacidad del robot para detectar y responder a la presencia de obstáculos durante su operación.

### **Resultados del caso A**

Para el primer caso propuesto se empleó el sistema de control visto en el diagrama de la figura 4, en el que se tiene un obstáculo fijo en el plano dado por la circunferencia descrita a continuación:

- Posición del centro del círculo en el eje  $x$  en  $0.15(m)$ .
- Posición del centro del círculo en el eje  $y$  en  $0.11(m)$ .
- Radio del círculo de  $r = 0.5 (m)$ .

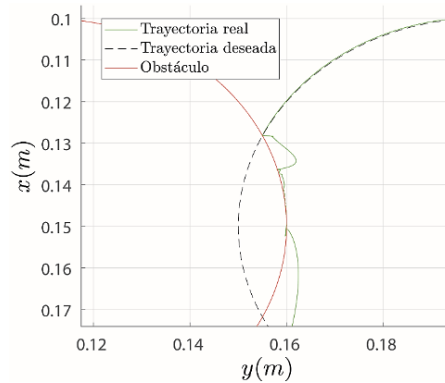
La trayectoria deseada que se le incluye para que el manipulador la realice en el plano, está descrita por una circunferencia con los siguientes valores:

- Posición del centro del círculo en el eje  $x$  en  $0.15(m)$ .
- Posición del centro del círculo en el eje  $y$  en  $0.20(m)$ .
- Radio del círculo de  $r = 0.5 (m)$ .

Con base en las condiciones ya expuestas se presentan los siguientes resultados de la simulación numérica:

- En la figura 5 se visualiza las dos trayectorias, tanto la deseada como la real.
- Se puede examinar como es que el robot manipulador, que es descrito en la gráfica por la trayectoria verde, colisiona frente al obstáculo y lo repele procurando seguir la trayectoria que se le asignó.

- También se evidencia la trayectoria deseada que es descrita por la línea discontinua, para ser contrastada con la trayectoria real para percibir con mayor detalle la colisión.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Comportamiento del efector final colisionando con un obstáculo.

## Resultados del caso B

Para el segundo caso propuesto se tiene un obstáculo en movimiento, que posee las mismas características que el obstáculo del caso A.

- Posición del centro del círculo en el eje  $x$  en  $0.15 (m)$ .
- Posición del centro del círculo en el eje  $y$  en  $0.11 (m)$ .
- Radio del círculo de  $r = 0.5 (m)$ .

El obstáculo, después de que pasan 7 segundos, el obstáculo avanza  $0.01 m$  cada segundo en el plano sobre las abscisas, que en este caso particular coinciden con  $y$ .

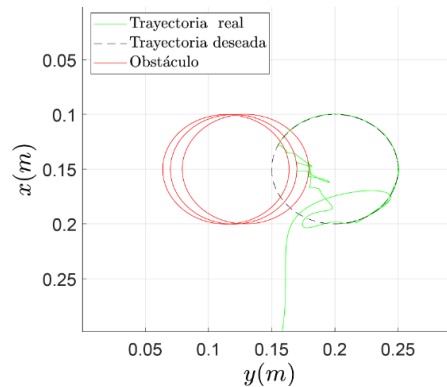
La posición final con respecto al tiempo queda de la siguiente forma:

- Posición final a los 15 segundos en el eje  $x$  en  $0.15 (m)$ .
- Posición final a los 15 segundos en el eje  $y$  en  $0.19 (m)$ .

La trayectoria deseada, con los siguientes valores:

- Posición del centro del círculo en el eje  $x$  en  $0.15 (m)$ .
- Posición del centro del círculo en el eje  $y$  en  $0.2 (m)$ .
- Radio del círculo de  $0.5 (m)$ .

En la figura 6 se aprecia la trayectoria real contra la trayectoria deseada. Como se infiere, en esta figura, a medida que el obstáculo va ingresando al espacio de trabajo. La figura 6 resalta que el obstáculo se encuentra en tres posiciones distintas mientras se introduce en el área de trabajo del manipulador, el cual sigue avanzando en su trayectoria.



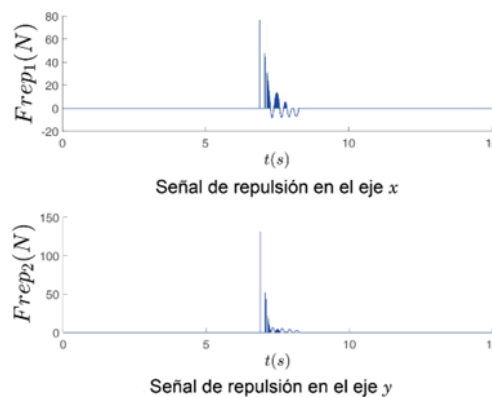
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Obstáculo en tres posiciones accediendo al espacio de trabajo.

## 4. Discusión

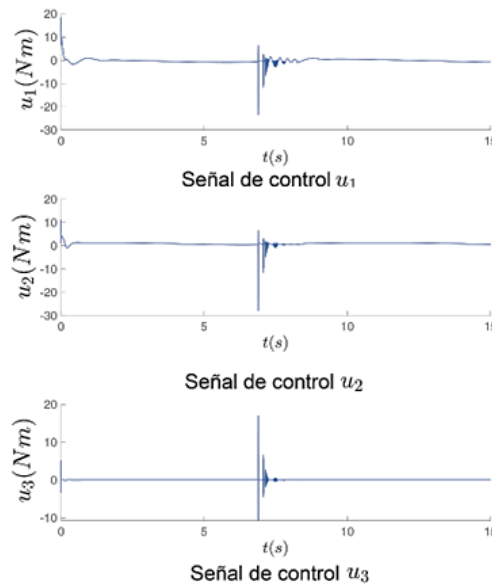
### Discusiones del caso A

La figura 5 muestra el sistema sigue una trayectoria constante. Sin embargo, cuando esta trayectoria se ve alterada por una fuerza repulsiva, mostrado en el segundo 6.8 en la figura 7, la fuerza de repulsión en el controlador interviene para alejar al sistema robótico del obstáculo, figura 8.



Fuente: elaboración propia.

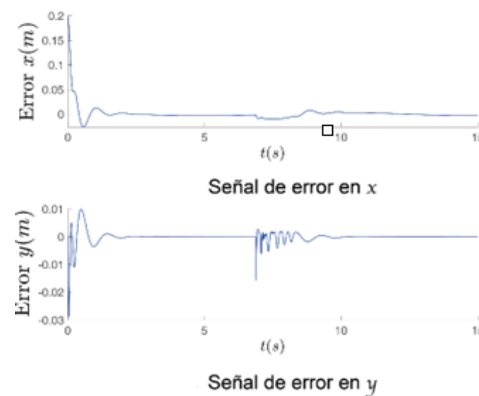
Figura 7 Representación gráfica de la fuerza de repulsión al colisionar.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Desempeño de las señales de control al realizar al colisionar.

La señal de control oscila temporalmente, pero luego se estabiliza una vez que el obstáculo ya no interfiere con el sistema robótico. También se visualiza el error de posición Cartesiana del manipulador en la figura 9. Donde se aprecia que el sistema robótico en el espacio Cartesiano es estable hasta la interferencia del obstáculo.

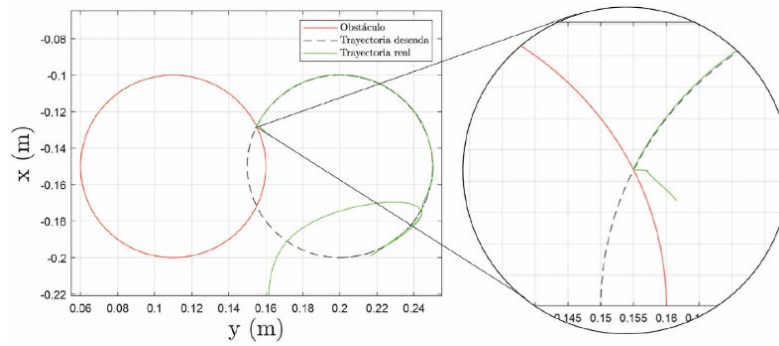


Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Evolución del error en el tiempo.

## Discusiones del caso B

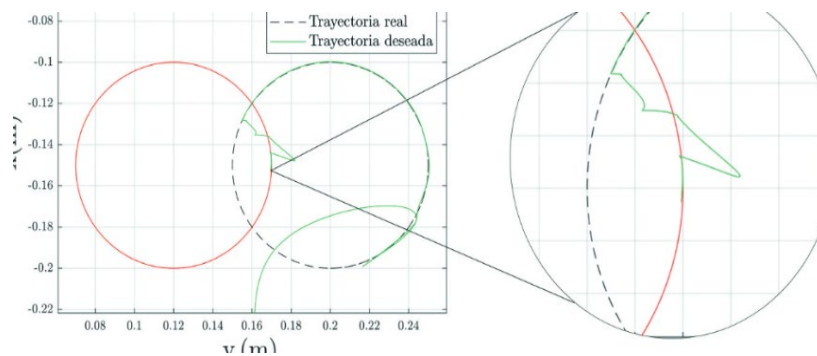
En la figura 10, a los 7 segundos, se ve cómo el obstáculo choca con el efector final, pero es repelido para seguir su trayectoria.



Fuente: elaboración propia.

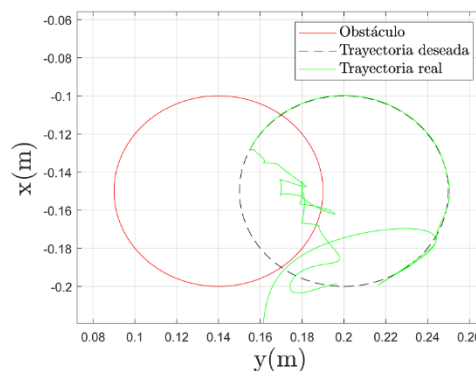
Figura 10 Comportamiento del efector final en el momento de la colisión.

En la figura 11, en el segundo 8, el obstáculo avanza  $0.01\text{ m}$  y el robot evita el obstáculo y en la figura 12 retoma su ruta sin colisiones. En las figuras, el robot se aparta del obstáculo gracias a la fuerza repulsiva, intentando completar su trayectoria. Aunque el objeto interfiere de nuevo, el robot se aparta de él.



Fuente: elaboración propia.

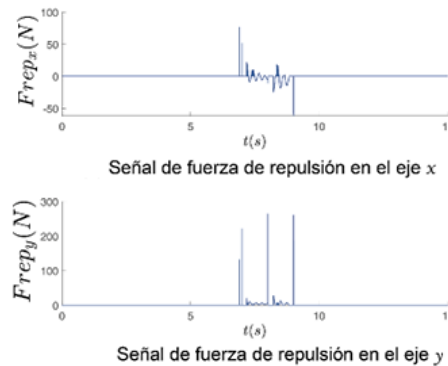
Figura 11 Comportamiento del efector final en el momento de la colisión.



Fuente: elaboración propia.

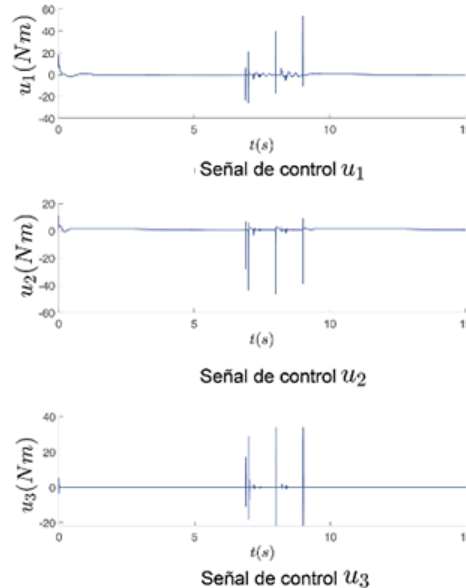
Figura 12 Diagrama del comportamiento del efector final.

La colisión del obstáculo en movimiento se realiza a los 6.8 segundos, como se puede observar en las gráficas de la fuerza repulsiva (Figura 13), y deja de colisionar con el objeto a los 8.9 segundos. En la figura 14 se observar la señal de control, que empieza a oscilar cuando se activa la fuerza repulsiva. En otras palabras, el robot entra en contacto con el obstáculo en el segundo 6.8 y finaliza a los 9.01 segundos.



Fuente: elaboración propia.

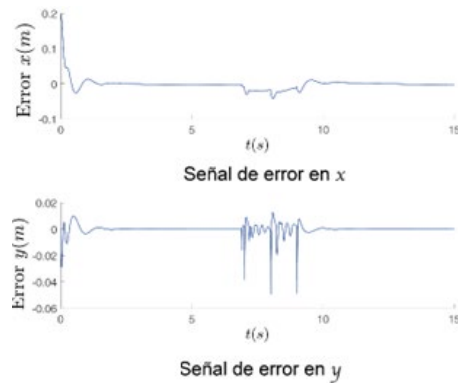
Figura 13 Representación gráfica de la fuerza de repulsión.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14 Desempeño de las señales de control.

Por último, se tiene la evolución del error en el espacio Cartesiano, en la figura 14 se observa que alcanza la referencia hasta que cesan las colisiones esto permitiéndole volver a su punto de equilibrio.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14 Evolución del error en el tiempo.

## 5. Conclusiones

En el presente documento, se ha diseñado un mecanismo de seguridad para evitar colisiones entre un robot y un ser humano. Este mecanismo incorpora un lazo de fuerza repulsiva en el controlador, simulando numéricamente la fuerza externa en función de la elongación de un resorte. Se han realizado dos casos de estudio para probar el funcionamiento, uno con obstáculo fijo y el otro con un obstáculo en movimiento. Los resultados indican que el mecanismo de seguridad propuesto es viable para su implementación práctica, ya que evadió el obstáculo cuando el robot colisionó con el obstáculo. La propuesta no sólo se puede aplicar en el efector final, sino en varios puntos de interés del robot llevando el Jacobiano transpuesto al punto de interés. La propuesta del sistema de seguridad es complementaria a las medidas ya instaladas en una célula robótica, en lugar de reemplazar una medida, se añade una capa adicional de protección confiable y no invasiva. Así mismo, se detecta la colisión de manera directa y no de manera indirecta mediante cámaras, sensores o mallas en donde podría no visualizarse o detectar el obstáculo.

Para trabajo futuro se realizará la sintonización óptima del controlador mediante metaheurísticas para garantizar un error pequeño y una trayectoria más suave.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Baek, Seung-Min, Chung, Tae-Hyok, Kim, Dong-Hyeok and Kim, Sung-Rak. Systems and algorithms for development of the robot safety function. En 2012



- 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 471-475, 2012.
- [2] Benitez-Garcia, Saul Enrique, M. G. Villarreal-Cervantes, J. F. Guerrero-Castellanos and J. P. Sánchez-Santana. Periodic event-triggered control for the stabilization of robotic manipulators. *IEEE Access*, vol. 8, 111553-111565, 2020.
- [3] Garcia, G. J., Corrales, J. A., Pomares, J., Candelas, F. A. & Torres, F. Visual servoing path tracking for safe human-robot interaction. *IEEE International Conference on Mechatronics*, 2009.
- [4] Kulić, D., & Croft, E. Pre-collision safety strategies for human-robot interaction. *Autonomous Robots*, 22(2), 149–164, 2006.
- [5] Lee, Sang-Duck, Song, Jae-Bok. Collision detection for safe human-robot cooperation of a redundant manipulator. En 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014). IEEE, 591-593, 2014.
- [6] Magrini, Emanuele, Flacco, Fabrizio, De Luca, Alessandro. Estimation of contact forces using a virtual force sensor. En 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2126-2133, 2014.
- [7] Rosenstrauch, Martin J., and Jörg Krüge. Safe human robot collaboration—Operation area segmentation for dynamic adjustable distance monitoring. En 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). IEEE, 17-21, 2018.
- [8] Spong, Mark W., Seth Hutchinson, and Mathukumalli Vidyasagar. *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, p. 154, 2006.
- [9] Wenzhong, Xu, XI, Xiao, Xinjian, Jiang. Sensorless robot collision detection based on optimized velocity deviation. En 2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 6200-6204, 2017.
- [10] Zacharaki, A., Kostavelis, I., Gasteratos, A., & Dokas, I. Safety bounds in human robot interaction: A survey, *Safety Science*, 127, 104667, 2020.