

ROBOT KUKA KR 10 R1100 SIXX

Proyecto integrador - Cátedra Robótica 1

Bustillo, Carlos¹✉; Pérez, Rodrigo²✉;

^{1,2} Facultad de Ingeniería, UNCUYO, Mendoza, Argentina

✉ cabustillo13@hotmail.com y rodrigoperez2110@gmail.com

Fecha de envío: 24 de octubre de 2021

RESUMEN: Simulación de un brazo robótico inspector tipo serie, de 7 eslabones, 6 articulaciones y 6 grados de libertad, con una cámara como efector final. Con la finalidad de: inspeccionar el estado de las piezas de máquinas y estructuras; determinar cuándo es necesario realizarle un mantenimiento preventivo; o si ya no pueden seguir en operatividad y deba ser reemplazada. Como tarea específica para la realización del proyecto, se propuso realizar el control del estado de la soldadura de un tubo en operatividad. Como resultado se parametrizó la estructura con Denavit – Hartenberg; Cinemática Directa e Inversa; Relación de velocidades; Planificación y generación de trayectoria.

Palabras clave: Robot Kuka, Robot tipo serie, Inspección de Soldadura.

1. INTRODUCCIÓN

La propuesta del trabajo integrador se basa en la automatización del mantenimiento predictivo destinado a la inspección visual, mediante visión artificial de soldaduras en diversas piezas relevantes, de máquinas y estructuras en operatividad.

Bajo esta premisa, se propuso, realizar un brazo robótico inspector tipo serie, de 7 eslabones, 6 articulaciones y 6 grados de libertad, con una cámara como efector final. Específicamente se propone la utilización del robot Kuka KR 10 R1100 sixx (<https://www.kuka.com/>).

Así, el robot podría inspeccionar el estado de las piezas de máquinas y estructuras; determinar cuándo es necesario realizarle un mantenimiento preventivo; o si ya no pueden seguir en operatividad y deba ser reemplazada. Como tarea específica para la realización del proyecto, se propone realizar el control del estado de la soldadura de un tubo en operatividad.

La trayectoria a seguir por el extremo del robot está definida por el cordón de soldadura de la pieza a inspeccionar.

2. PRESENTACIÓN TÉCNICA DEL ROBOT

A partir del datasheet del robot KR 10 R1100 sixx se extrajo la información siguiente:

1. Alcance máximo: 1101 mm
2. Carga útil máxima: 10 kg

3. Repetibilidad de pose: (ISO 9283) $\pm 0,03$ mm
4. Número de ejes: 6
5. Posición de montaje: Piso
6. Huella: 320 mm x 320 mm
7. Peso aproximado: 55 kilogramos

2.1. ESQUEMAS ROBOT

KR 10 R1100 sixx



Figura 1: Imagen del robot físico real.

2.2. WORKSPACE

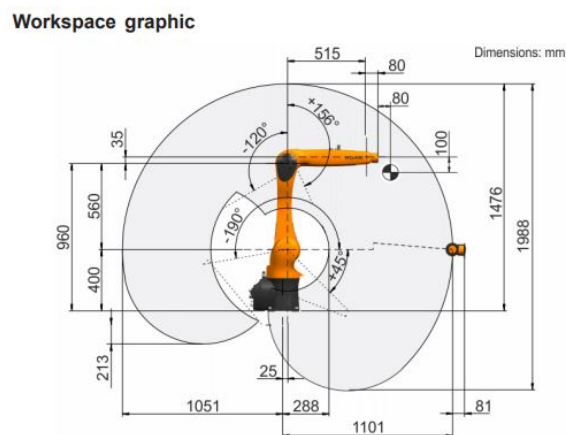


Figura 2: Imagen del área de trabajo del robot físico real.

2.3. LÍMITES

Axis data	
Motion range	
A1	$\pm 170^\circ$
A2	$-190^\circ / 45^\circ$
A3	$-120^\circ / 156^\circ$
A4	$\pm 185^\circ$
A5	$\pm 120^\circ$
A6	$\pm 350^\circ$

Figura 3: Imagen de los límites articulares del robot físico real.

2.4. OTRAS ESPECIFICACIONES

- **Diagrama de Carga:** El KR 10 R1100 sixx está diseñado para una carga útil nominal de 5 kg con el fin de optimizar el rendimiento dinámico del robot. Con distancias de centro de carga reducidas, se pueden utilizar cargas más altas hasta la carga útil máxima.

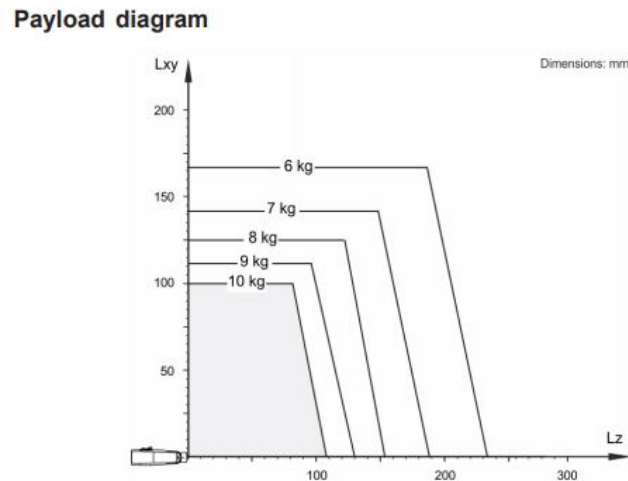


Figura 4: Diagrama de carga.

- **Condiciones de Operación:** Durante las operaciones a Temperatura ambiente se recomienda trabajar en el rango de 5°C a 45°C (278 K a 318 K).

3. ROBOT

3.1. DENAVIT – HARTENBERG

Sistema	θ	d	a	α	σ
1	q1	0,4	0,03	$-\pi/2$	0
2	q2	0	0,56	0	0
3	q3	0	0,035	$-\pi/2$	0
4	q4	0,52	0	$\pi/2$	0
5	q5	0	0,08	$-\pi/2$	0
6	q6	0	0.	0	0

Tabla 1: Matriz de DH para el robot simulado.

Cabe resaltar la dificultad para encontrar los parámetros mencionados en la página comercial de KUKA, se tomó como referencia los parámetros en el robot-forum.com para este robot.

3.2. CINEMÁTICA DIRECTA

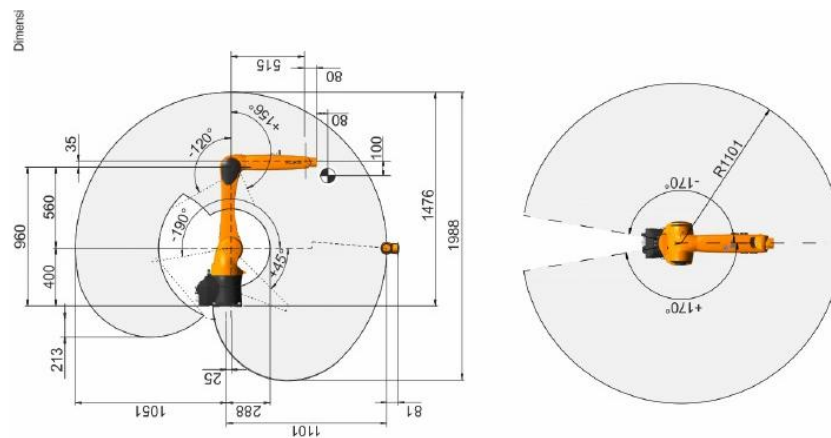


Figura 5: Imagen del área de trabajo del robot físico real.

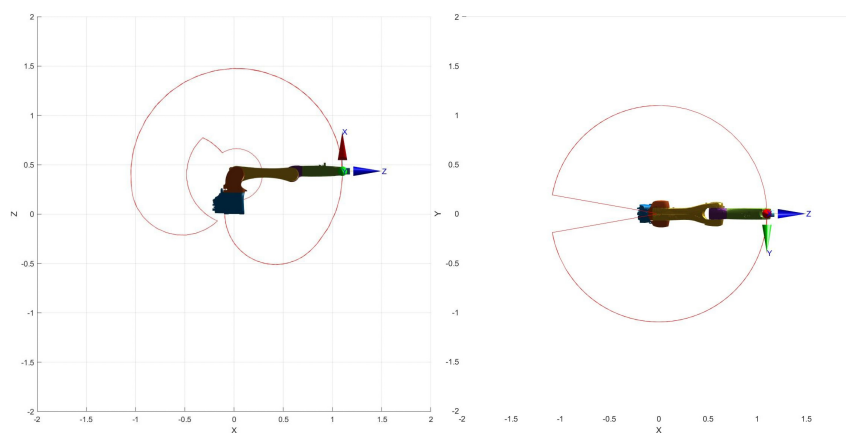


Figura 6: ET Diestro lateral y ET Diestro superior.

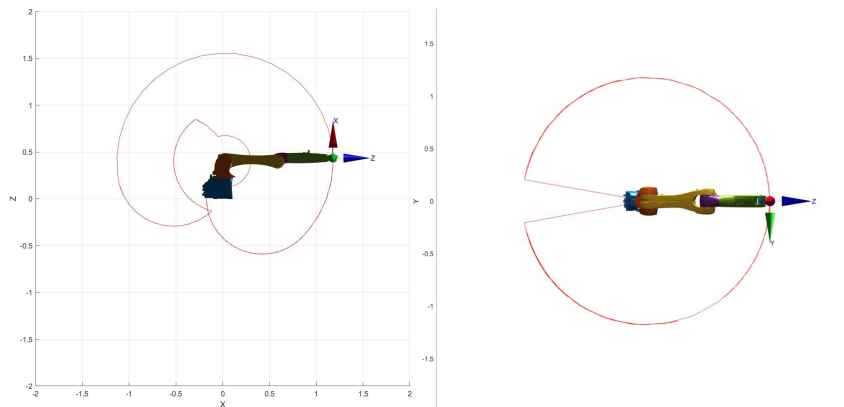


Figura 7: ET Alcanzable lateral y ET Alcanzable superior.

- **Espacio de Trabajo considerado:** Se concluye que es suficiente para la aplicación: inspección visual de soldaduras. En la presente aplicación es crítico que en el espacio de trabajo efectivo (menor a los 1.98 m de diámetro máximos posibles) se pueda orientar la cámara (efector final) con gran exigibilidad. El diseño del robot en sí mismo (con ese tipo de muñeca) permite una gran manipulabilidad incluso acercándose a los extremos del espacio de trabajo (con los dos eslabones largos casi extendidos).
- **Matrices de Base y Tool:** Ambas fueron consideradas en la presente aplicación. Para la herramienta, fue interesante tener la posición del lente de la cámara (elemento para inspeccionar) respecto del sistema de coordenadas "mundo", por lo que era necesario tener una transformación Tool traslacional dependiendo de la cámara elegida. Con respecto a la Base, se concluye que el montaje del robot depende mucho del tipo de pieza que se va a inspeccionar. Para algunas escenas será útil que el robot esté montado en el techo, pero para este proyecto se considera montarlo sobre una base (de aproximadamente el diámetro de la base del robot a una altura arbitraria) con la finalidad de ganar distintos ángulos de enfoque.
- **Futura Implementación:** Se contempla la idea de poder agregar un grado de libertad traslacional a la base del robot para la inspección de piezas extensas que requieran movimiento (trasladar todo el robot de un punto a otro).

3.3. CINEMÁTICA INVERSA

Dada una posición (y orientación) del extremo del robot, en el espacio cartesiano, se requiere conocer cuál es misma posición (y orientación) en el espacio articular. Esta se obtiene mediante la aplicación de fórmulas matemáticas al calcular la cinemática inversa del robot.

$$\vec{q} = \text{funcion}({}^0T_6) \quad (1)$$

El problema es que no hay una única solución, sino que suelen existir varias soluciones, o incluso no existir ninguna solución real. Esto es debido a que diversas combinaciones de posiciones angulares pueden llevar al extremo a la misma posición cartesiana.

En el caso del robot Kuka del presente proyecto, el cual posee 6 gdl, se simplifica el problema de la cinemática inversa al considerar que los límites articulares de q_6 son solo de $[-180^\circ, 180^\circ]$,

y no los verdaderos de $[-350^\circ, 350^\circ]$, ya que no es relevante para la aplicación que esta articulación exceda los $\pm 180^\circ$. Así, se obtiene un máximo de ocho posibles soluciones reales (es decir, exactas).

Estas se dan debido a:

- Las posiciones de codo arriba y codo abajo del robot
- Al giro de 180° de la articulación q4, la cual hace girar al eslabón 4 sobre su propio eje
- Al giro de 180° de la articulación q1, ya que el brazo puede pasar por encima del mismo robot y trabajar "hacia atrás".

Método de solución

El robot KR 10 R1100 sixx es un tipo de robot con muñeca esférica, ya que posee tres ejes consecutivos que se intersecan. Para realizar el cálculo de la cinemática inversa de este tipo de robots, conviene utilizar el método de Pieper (también conocido como "desacoplo cinemático"), por lo que se opta por aplicar este método. Además, como se puede observar, también se hace uso del método geométrico.

■ Cálculo de $q_1(\theta_1)$:

$$q_1 = \arctan\left(\frac{{}^0P_{4Y}}{{}^0P_{4X}}\right) \quad (2)$$

Aquí se puede obtener un segundo valor de q_1 sumando o restando 180° , dependiendo si el ángulo q_1 obtenido es respectivamente menor o mayor a 0° . Ya que esta duplicación en la cantidad de soluciones es debida justamente a la rotación de 180° de q_1 , dado que el brazo puede trabajar "hacia atrás".

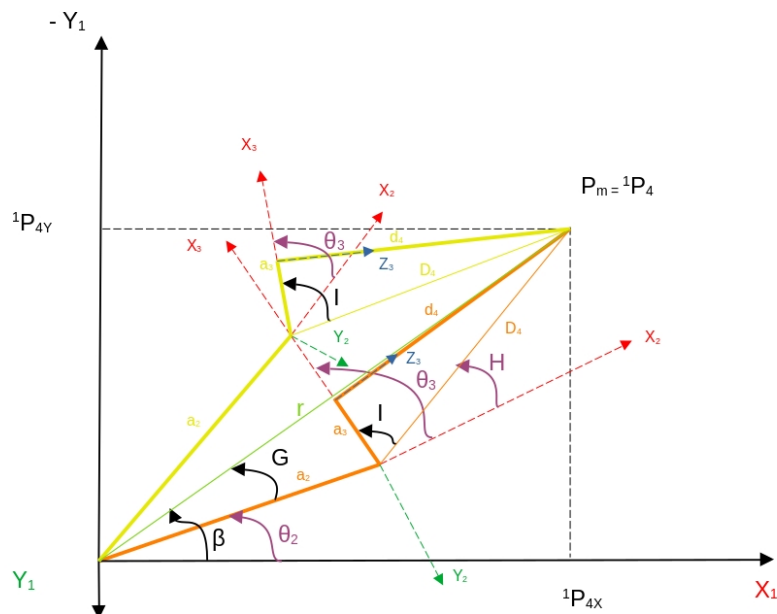


Figura 8: Cálculo de q_2 y q_3 .

Nota: Los ángulos en color violeta en la gráfica, para la posición cartesiana mostrada, son ángulos que se ingresan a las ecuaciones (u obtienen de ellas) con signo negativo.

■ **Cálculo de $q_2(\theta_2)$:**

$$\theta_2 = \beta \pm G \quad (3)$$

$$\beta = \arctan({}^1P_{4y}/{}^1P_{4x}) \quad (4)$$

$$G = \arccos\left(\frac{(a_2)^2 + (r)^2 - (D_4)^2}{2 \cdot r \cdot a_2}\right) \quad (5)$$

$$D_4 = \sqrt{(a_3)^2 + (d_4)^2} \quad (6)$$

Aquí se obtienen dos valores de q_2 , para cada uno de los dos valores de q_1 obtenidos, los cuales corresponden a las posiciones de codo abajo y codo arriba.

Así, también se obtienen dos valores del ángulo G , para cada valor de q_1 . Si uno de estos valores de G es imaginario entonces de las 8 soluciones, solo 4 se encuentran dentro del ET debido a la extensión máxima del brazo. Y si ambos valores de G son imaginarios, significa que la posición objetivo se encuentra fuera del ET. Esto es, sin considerar los límites articulares del robot.

Si un valor de G resulta ser imaginario, entonces se sigue el cálculo solo con su parte real, para obtener el punto más cercano al objetivo.

■ **Cálculo de $q_3(\theta_3)$:**

$$\theta_3 = H - I \quad (7)$$

$$H = \arctan({}^2P_{4y}/{}^2P_{4x}) \quad (8)$$

$$I = \arctan(d_4/a_3) \quad (9)$$

Aquí, se obtiene siempre solo un valor de q_3 para cada par de valores (q_1, q_2).

■ **Cálculo de q_4, q_5 y q_6 ($\theta_4, \theta_5, \theta_6$):**

Se procede a calcular la orientación del extremo del robot. Aquí, para cada terna (q_1, q_2, q_3) tendremos 2 soluciones de (q_4, q_5, q_6), dadas por la rotación de 180° de q_4 .

El método de Pieper reduce el problema significativamente, ya que una vez obtenidos los valores de q_1, q_2 y q_3 , se calcula P_6 respecto de la trama 3; y luego a partir de esta matriz homogénea P_6 respecto de 3, se plantea un sistema más simple para el cálculo de q_4, q_5 y q_6 .

Solución normal

$$q_4 = \arctan(-{}^3P_{6y}/-{}^3P_{6x});$$

Aquí, al igual que en el cálculo de q_1 , se puede obtener un segundo valor de q_4 sumando o restando 180° , dependiendo si el ángulo q_4 obtenido es respectivamente

menor o mayor a 0° . Para cada valor de q_4 , se recalcula la posición de la trama 6 respecto a la trama 4 y a la 5, y se calculan los valores de q_5 y q_6 :

$$q_5 = \arctan(-{}^4P_{6y} / -{}^4P_{6x});$$

$$q_6 = \arctan(-{}^5P_{6y} / -{}^5P_{6x});$$

Solución degenerada

Cuando $q_5=0$ los eslabones 4 y 6 se alinean, y tanto q_4 como q_6 producen exactamente el mismo movimiento, es decir tienen infinitos valores combinados. Esto es una singularidad que aparece con mucha frecuencia, por lo que se debe tratar de alguna forma. Por cuestión de utilidad práctica, se recurre a dejar q_4 con el valor que tenga previamente el robot, y se gira q_6 lo necesario para cumplir con la posición objetivo.

■ Validación

Se realiza una verificación gráfica mediante la visualización de las 8 soluciones (aunque no sean exactas), y la visualización del sistema de referencia objetivo, graficado en color magenta.

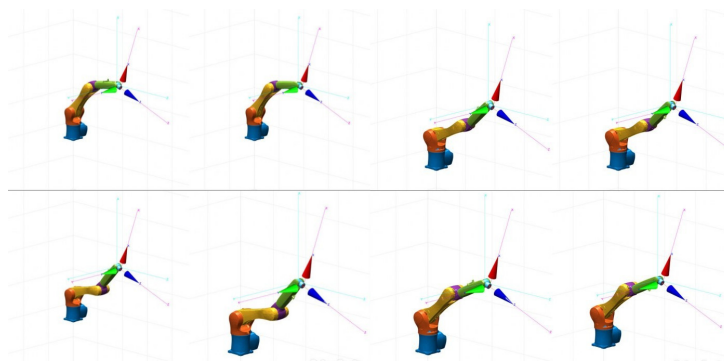


Figura 9: Visualización de las 8 soluciones.

Para validar, se pasaron distintas matrices, y también posiciones angulares más el uso de cinemática directa, para probar inteligentemente los diversos casos diferentes que existen. Se testeó el programa tanto dentro, fuera, como en el límite del ET diestro, y se corroboró que las soluciones exactas fueran correctas, así como también que concordara la cantidad lógica de soluciones exacta, y para las soluciones no reales, se verificó que estas fueran aquellas soluciones que se encuentren lo más cerca posible al objetivo.

3.4. RELACIÓN DE VELOCIDADES

Jacobiano y el determinante simbólico

Dada la complejidad para el cálculo de los determinantes de manera simbólica del Jacobiano de un robot de 6 GDL, (tanto en consumo de memoria y tiempo para la resolución del problema, como dificultad para manipular). Por ello, en lugar de implementar simbólicamente el determinante, se realiza su cálculo de manera numérica.

A continuación, se procede a realizar dicho cálculo numérico de dos formas distintas:

■ Utilizando posiciones aleatorias

Se implementa un bucle de N iteraciones en donde se realiza la evaluación numérica del determinante jacobiano de N posiciones articulares aleatorias. Se grafican los valores de los determinantes obtenidos vs la iteración (posición aleatoria), para tener una idea y analizar el porcentaje de posiciones del espacio de trabajo que se encuentran en o cerca de una singularidad, y el porcentaje que se encuentra lejos de las singularidades. Para el presente trabajo se consideró a $N=1000$, y se obtuvo la siguiente gráfica.

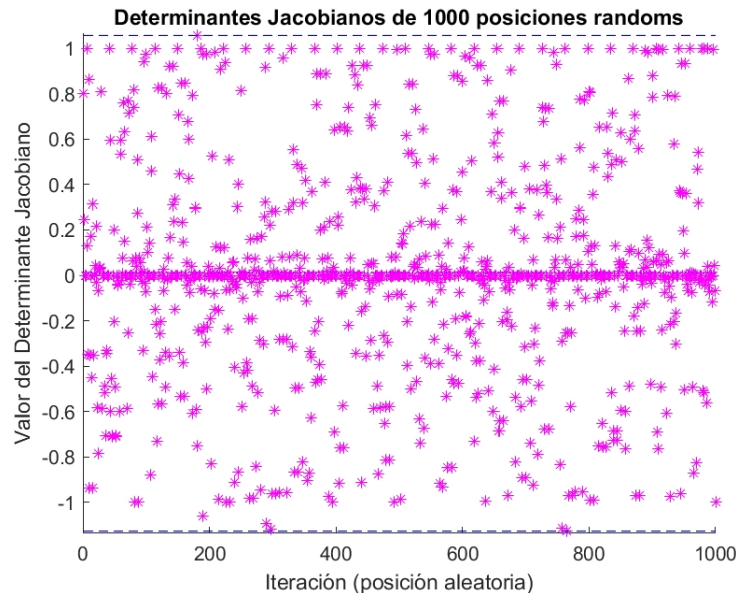


Figura 10: Para el presente trabajo se consideró a $N=1000$, y se obtuvo la siguiente gráfica.

En la cual, a simple vista se puede apreciar en el gráfico la formación de una línea horizontal en el valor cero para el determinante, lo que nos dice que una gran cantidad de puntos caen en o muy cerca de una singularidad.

Luego se obtiene el valor máximo, mínimo y mínimo absoluto de dichos determinantes calculados. En donde, como se puede ver a continuación, el mínimo valor absoluto del determinante, siempre que se ejecutó el programa, resultó ser exactamente cero; lo que nos indica que siempre, por lo menos una posición aleatoria, ha caído en una singularidad.

Máximo: 1.05635

Mínimo: -1.12588

Mínimo en valor absoluto: 0.000000000

■ Realizando un barrido del espacio de trabajo

Se realiza un barrido del espacio de trabajo ET del robot, barriendo cada variable articular desde su límite inferior hasta el superior. Dicho barrido se realiza en una exploración en árbol, tal que se abarquen todas las formas posibles de posicionarlo en cada punto del ET. Para ello, se utilizan tantos bucles de iteración anidados como gdl posea el robot, y una discretización en radianes para las articulaciones angulares. Dentro del bucle anidado más interno se lleva a cabo el cálculo del jacobiano y su determinante para cada posición articular del barrido, mediante el simple uso del toolbox de Peter Corke.

Es necesario discretizar, por 2 motivos:

- 1) No se podría buscar combinaciones continuas (son infinitas)
- 2) Hay que reducir el tiempo de cálculo, ya que dicho barrido en árbol puede ser muy costoso computacionalmente.

Analizando la simulación presente del KUKA KR 1100, se determinó que no es necesario analizar todo el ET, ya que las singularidades no dependen de qué valores tome q_6 ni q_1 ; q_6 porque, al ser última articulación, no puede llevar al a una singularidad; y q_1 porque el conjunto de valores que tomen las demás articulaciones, para cada singularidad encontrada, es el mismo para cualquier valor que tome q_1 . Así, se logró simplificar en gran medida el problema de costo computacional, al pasar de tener que computar 6 bucles anidados a solo 4, con lo que se reduce el tiempo necesario para realizar el barrido.

Existencia de puntos singulares a partir del determinante simbólico

Para localizar las singularidades, se decidió proseguir utilizando el método del barrido del ET, en lugar del método de entradas aleatorias. Esto debido, a que se consideró más ventajoso el hecho de poder obtener las singularidades de una forma ordenada, para así facilitar el análisis para poder llegar a encontrar de forma segura todas las singularidades que posea el robot; por sobre la desventaja del posible riesgo de requerir un gran tiempo de cómputo.

Teniendo en consideración que los límites articulares (en grados) para las 6 articulaciones del robot son múltiplo de 5, y luego de realizar sucesivas pruebas para ver la cantidad de singularidades que se obtenían para cada posición discreta de q_2 , se decidió utilizar un paso de 5° , y un valor umbral de 0,001 del determinante jacobiano para considerar a una posición articular como singular o no.

Aunque el tiempo de cómputo fue mucho mayor al esperado, se obtuvo un archivo de texto en donde se fueron guardando todas las posiciones singulares encontradas.

En particular, por ya conocerse de antemano, por simplificación no se guarda el conjunto de singularidades correspondientes a $q_5=0$, ya que se obtenían muchas singularidades de este tipo, las cuales estorbaban en la detección de aquellas singularidades que no se conocían. Pero, aun así, se obtuvieron 123450 posiciones articulares, varias de las cuales corresponden a un mismo punto singular, ya que se encuentran muy cerca de él. Luego de analizarlas y se las agrupó, obteniendo los siguientes resultados:

■ Singularidad debida a la extensión máxima del manipulador

Este tipo de singularidad depende únicamente del valor de q_3 , y se da cuando esta variable articular es tal que se alcanza el límite del espacio de trabajo diestro, ya que en dichos puntos se pierde el grado de libertad radial de la muñeca del robot.

A continuación, se muestran los valores de q_3 obtenidos para cuatro valores distintos de q_1 :

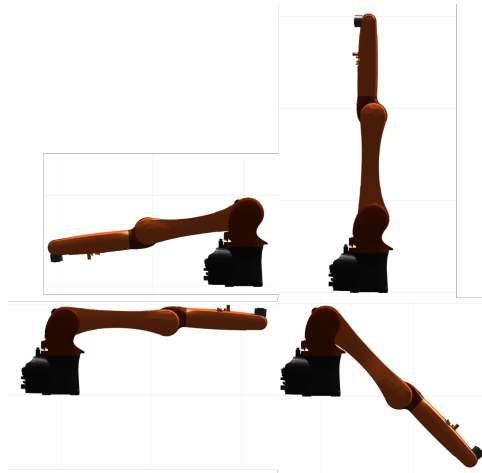


Figura 11: (1) $q_2 = -190^\circ \rightarrow q_3 = -86,11^\circ$
 (2) $q_2 = -90^\circ \rightarrow q_3 = -88,96^\circ$
 (3) $q_2 = 0^\circ \rightarrow q_3 = -86,11^\circ$
 (4) $q_2 = 45^\circ \rightarrow q_3 = -88,96^\circ$.

Nota: En todos los casos se tomó a $q_5 = -90$, para estar lejos y así no confundir las imágenes con la singularidad siguiente.

■ Singularidad para cuando $q_5 = 0$

Cuando se hace $q_5 = 0$, se alinean los ejes z de rotación de las articulaciones q_4 y q_6 . Por lo que ambas variables articulares (q_4 y q_6), contribuyen a un mismo movimiento en el espacio articular, por lo que el robot pierde un gdl. Y si pierde un gdl en el espacio articular también lo pierde en el espacio cartesiano.

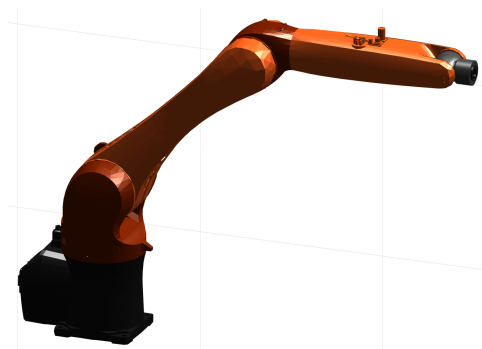


Figura 12: $q_5 = 0^\circ$

Dicha singularidad, podría darse para cualquier posición de la muñeca en el ET diestro. Y, en particular, si se da justo en el límite de dicho ET, entonces se encontraría también con la singularidad debida a la extensión máxima del manipulador, y el robot perdería dos gdl. Por lo que, si se dibujase la elipse de manipulabilidad para esta posición articular comentada, se obtendría solo una línea recta en el espacio 3D.

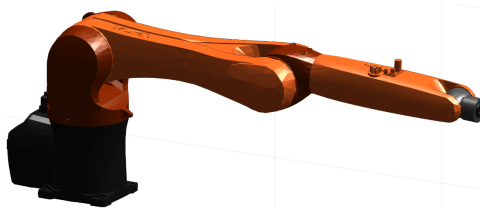


Figura 13: $q_2=0^\circ$, $q_3=-86,11^\circ$; $q_5=0^\circ$

■ Singularidad nueva, no conocida de antemano

Este tipo de singularidad, a diferencia de las anteriores, no se conocía ni esperaba, y no hubiera sido fácil encontrarla sin realizar un análisis lo suficientemente exhaustivo como el análisis realizado con el determinante del jacobiano.

Para que se de esta singularidad se deben dar dos condiciones:

- 1) Que sea $q_4=0$ (para que q_5 mueva al último eslabón en el mismo plano en que se encuentran los demás eslabones).
- 2) Que se cumpla la siguiente relación: $q_2+q_3+90^\circ+q_5 = \pm 90^\circ$

En esta singularidad en particular se pierden dos gdl, debido a que:

- 1) El robot no puede moverse de forma perpendicular al plano en el que se encuentra, sin tener alguna velocidad articular infinita.
- 2) Se alinea q_1 con q_6 . Este es un caso similar al correspondiente a la alineación de q_4 con q_6 .

A continuación, se muestran distintas posiciones (cercanas) para las cuales se dan ambas singularidades simultáneamente:

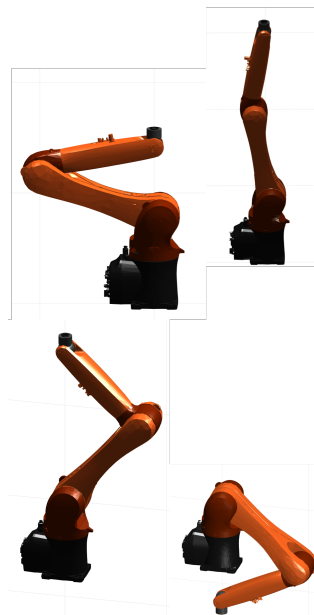


Figura 14: (1) $q_2=-160^\circ$, $q_3=60^\circ$; $q_5=-80^\circ$
 (2) $q_2=-100^\circ$, $q_3=-70^\circ$; $q_5=-10^\circ$
 (3) $q_2=-50^\circ$, $q_3=-175^\circ$; $q_5=45^\circ$
 (4) $q_2=40^\circ$, $q_3=25^\circ$; $q_5=-65^\circ$

Para los 4 casos mostrados anteriormente tenemos que $q_4=0$, y que se cumple la ecuación:

$q_2+q_3+90^\circ+q_5 = -90^\circ$, excepto para la última imagen correspondiente que da se cumple $q_2+q_3+90^\circ+q_5 = +90^\circ$.

¿La aplicación elegida se trabajará en las proximidades de un punto singular?

Inicialmente la aplicación era sobre inspección visual de un cordón de soldadura en un tubo; para una primera implementación el robot estaría montado sobre una plataforma móvil, tal que se pudiera mover su base por el espacio tridimensional.



Figura 15: Inspección de un caño circular.

Dicho movimiento de la base escapa de los alcances de la materia; y al visualizar al robot fijo en la aplicación, se observa que este no puede cumplir con la trayectoria deseada de lograr una vuelta completa al tubo. Esto considerando que el tubo fijo debería estar dentro del ET (no realista), o considerar un tubo que se pueda trasladar (en este caso sería trivial la movilidad del robot, ya que lo más fácil sería hacer girar al tubo). Para la aplicación general de inspección visual sería más coherente la utilización de un robot híper-redundante, el cual sí se podría lograr la circunferencia completa del tubo con una orientación radial al mismo. Por todo lo mencionado, se optó por cambiar la aplicación, por una inspección visual general de la cara completa de un prisma.

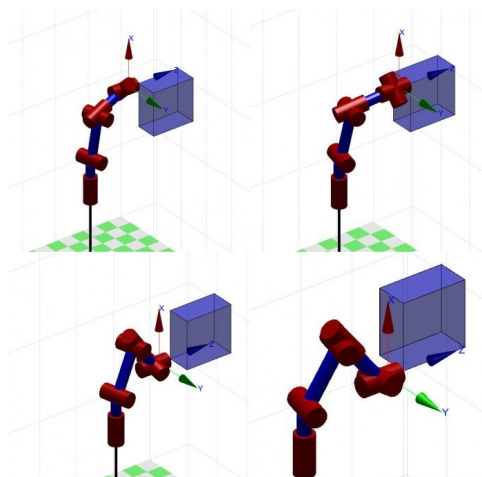


Figura 16: Mediante la utilización de la cinemática inversa del robot, se obtuvieron 4 posiciones articulares características de la aplicación.

Observando detalladamente el barrido de la cara del cubo, se encontrará con una singularidad correspondiente a la alineación de q_4 con q_6 , es decir que se cree que puede pasar por la

singularidad dada por $q_5=0$, pero para la aplicación de inspección visual no es necesario la utilización de la articulación q_6 , por lo que dicha singularidad no sería relevante, y además dicha singularidad se resuelve sola en la cinemática inversa al tomar $q_4=q_4$ anterior.

Análisis de manipulabilidad

Para un posición articular característica arbitraria de la aplicación, se realizó el análisis de la elipse de manipulabilidad traslacional en el extremo, y la verificación de los movimientos en torno a dicha posición si son consistentes desde el punto de vista del análisis de manipulabilidad.

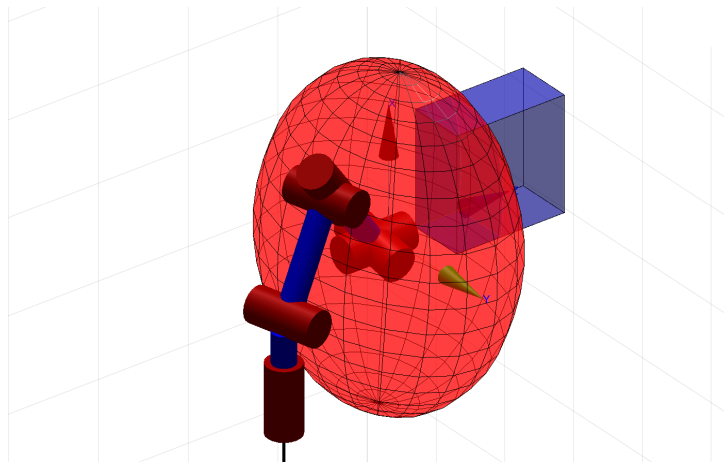


Figura 17: Para la posición articular:

$$q = [13.6005, -60.7863, 23.5389, -163.0945, 53.9645, 169.8628] * (\pi/180);$$

Al graficar el elipsoide de manipulabilidad, se puede observar que este posee una gran amplitud en el plano paralelo a la cara del prisma que pasa por la punta del manipulador, por lo que asegura una gran capacidad de los movimientos necesarios en la aplicación.

3.5. PLANIFICACIÓN Y GENERACIÓN DE TRAYECTORIA

Para la generación de trayectorias mediante la cinemática directa e inversa se procedió a calcular la trayectoria necesaria para inspeccionar la cara frontal del cubo (la que está frente al brazo), la mitad de la cara superior y de sus caras laterales.

Dicha operación requiere una trayectoria suave a velocidad constante y en todo momento mantenga la misma distancia respecto a la pieza a inspeccionar. Se plantearon 2 soluciones posibles: una realizando una interpolación en el espacio articular con $jtraj$ (tiene ajuste polinomial de 5to orden) y otra en el espacio cartesiano con $ctrj$ (ajuste del perfil de velocidad trapezoidal).

El brazo parte del home, realiza una maniobra de aproximación y luego se ubica en un vértice de la cara frontal del cubo y comienza a recorrerla. Cada vez que termina una cara realiza una maniobra de seguridad para no colisionar con la pieza ni con el brazo mismo y finaliza la inspección volviendo al home.

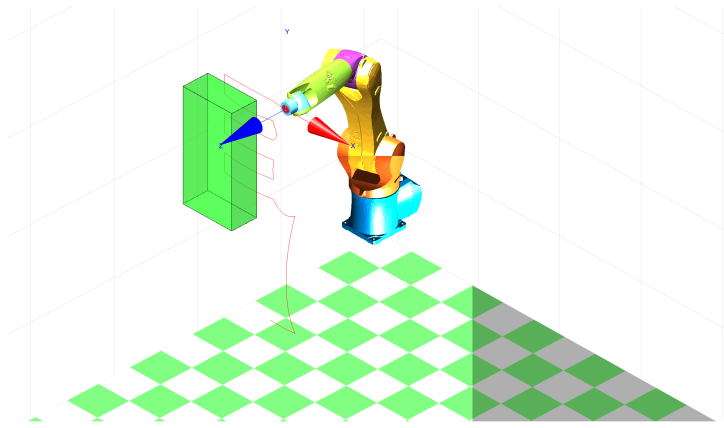


Figura 18: Imagen de la trayectoria con jtraj.

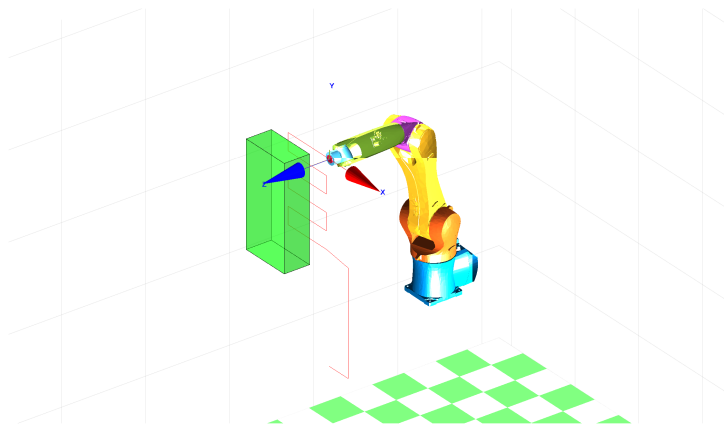


Figura 19: Imagen de la trayectoria con ctraj.

Haciendo un análisis solo en trayectoria, la mejor implementación para nuestra tarea es ctraj dado que sigue líneas rectas lo cual es requerido al momento de realizar una inspección precisa y que se requiere para mantener la cámara a una distancia constante. Con el uso de jtraj, las trayectorias realizan pequeñas curvas acercando la distancia del efector y no inspeccionando en línea recta.

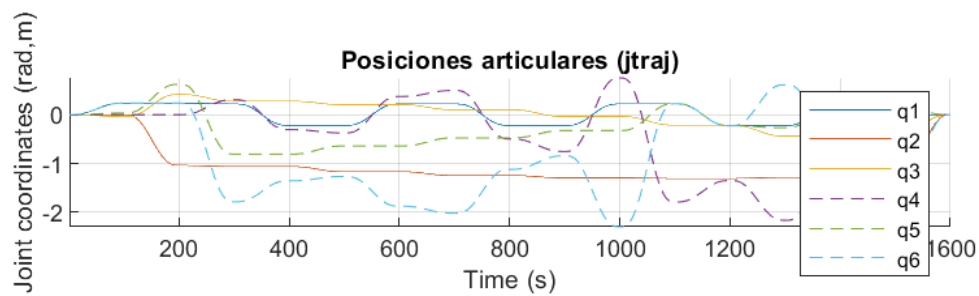


Figura 20: Resultados con jtraj.

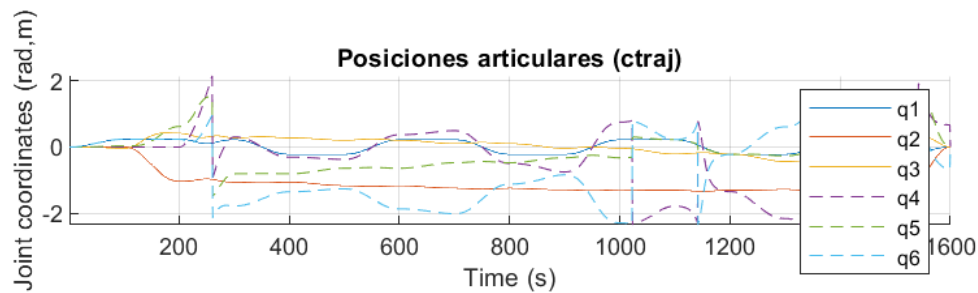


Figura 21: Resultados con ctrj.

Al analizar la gráfica de ctrj se aprecian picos en ciertos instantes de tiempo lo cual se soluciona de la siguiente manera:

1) **Problemática:** Desde el último punto definido en la trama del homming, hasta el punto inicial de la tarea, hay una gran variación en la orientación, que produce saltos abruptos en las gráficas de posición, velocidad y aceleración, de las variables articulares q4, q5 y q6. Lo mismo ocurre cuando realiza la última tarea y va nuevamente de regreso al homming.

La solución: Llevar el extremo del robot mediante jtraj (ya que simplemente interesa que se posicione en el extremo del objeto a analizar) y posteriormente aplicar ctrj para inspeccionar.

2) **Problemática:** Los picos producidos en medio se deben a la presencia de un caso degenerado ($q_5 = 0$). Acá tanto q4 como q6 producen el mismo giro, y por lo tanto podrían tener infinitos valores combinados.

La solución: Por practicidad, se recurre a dejar q4 con el valor que tenía anteriormente el robot, y se gira q6 lo necesario para cumplir con la rotación del vector X.

4. SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES

El robot seleccionado para el estudio es un robot comercial, por lo tanto la libertad de selección de actuadores, por ejemplo, es nula. También cabe aclarar que los distintos sensores y actuadores que podría llegar a usar este robot, ya sea porque están ya están incorporados dentro de él (debido que es un robot comercial) o externos debido a la necesidad de la tarea a realizar, fueron considerados para la tarea de inspección.

4.1. ACTUADORES

- **Como actuador eléctrico:** Se plantea el servomotor DSH1 45–100 High Precision síncrono monofásico porque es un motor de precisión y tiene buenas prestaciones de potencia para un tamaño reducido. Estos motores se pueden conectar a 220 V. Los motores deben llevar reductores de velocidad.
Para el caso de la elección de un motor DSH1-100 por ejemplo, se necesitaría un reductor de 1:80 de relación para obtener resultados similares a los de las velocidades máximas de cada articulación ($3000 \times 6 = 18000^\circ/\text{s}$ y se necesita 225° en promedio para una de las articulaciones).
Adicionalmente se podría usar un sensor de corriente como sensor interno.



Figura 22: Servomotor DSH1 45-100 High Precision síncrono monofásico.

- **Como Driver:** Se propone el modelo MDDH MGME de Panasonic, puede administrar una potencia de hasta 0,9 kW a 4,5 kW, lo que es más que suficiente para el motor propuesto anteriormente.



Figura 23: Driver MDDH MGME de Panasonic.

4.2. SENSORES

En términos generales los robot de la gama KUKA KR poseen sensores de torque en todas sus articulaciones, como también los correspondientes encoders que permiten conocer su posición en todo momento, finales de carrera, etc.

- **Cámara para inspección:** (Para el efector final) El robot soporta hasta 10 kg en su extremo, por eso se eligió una cámara Cognex 3DSMax (un sistema de visión rápido y de alta definición para adquirir imágenes e inspeccionar productos en 3D). Esta tiene un peso de 0.843 kg



Figura 24: Cámara Cognex 3DSMax.

- **Sensor de fuerza y par:** Es bastante importante en la presente aplicación debido a que el objetivo es realizar tomas de vídeo / imágenes bajo cualquier circunstancia con cualquier trayectoria por cercana que sea la superficie, objetos o personas. Por ende es necesario contar con un sensor de fuerza y par en el extremo del robot, ya que si ocurre alguna

colisión no esperada, funcione como sistema de parada de emergencia, por ello a modo de ejemplo se aprovecharía la sensibilidad con KUKA.ForceTorqueControl como dispositivo de bus de campo (por ejemplo, ProfiNET, EtherCAT, EthernetIP) o como otro tipo de sensor de apoyo.



Figura 25: Módulo KUKA.ForceTorqueControl.

- **Sensor de posición para cada articulación:** Para obtener una posición exacta y velocidad (con la aplicación de un sistema de control adecuado se podría estimar la velocidad en función del sensor de posición). Para el posicionamiento se pueden elegir sensores tanto ópticos como inductivos (“encoders”). Hay una pequeña diferencia en cuanto al precio pero se compensa con una mejor precisión al usar encoders inductivos. Como ejemplo de uso se propone Zettler Incoder Midi Ultra Range 75-300mm (CELERA). Dicho sensor puede elegirse para recibir alimentación de 5, 12 o 24 V y se elige para este caso el que soporta tensiones nominales de 24 V.



Figura 26: Zettler Incoder Midi Ultra Range.

- **Sensor de proximidad para el efector y para el brazo:** Se plantearon diferentes tipos de sensores, como sensores infrarrojos o inductivos, pero finalmente se optó por sensores de ultrasonido. Como caso particular se podría implementar el Sick UM12 / UM12 UM12-1172271. El sensor especificado puede tener límites de hasta 15 V o 30 V, se elige el sensor que soporta hasta 30 V. Con el sensor se buscaría que el efector nunca se acerque a más de 15 cm de la pieza a inspeccionar.



Figura 27: Sensor Sick UM12 / UM12 UM12-1172271.

4.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La alimentación para este robot está diseñada para 400 - 480 VAC. Cabe recalcar que el robot ya cuenta con un sistema de suministro de energía integrado, impresionando con contornos disruptivos reducidos y un suministro fiable de energía a las herramientas.

Para el sensor de proximidad se necesita una alimentación con valor nominal de 15 a 30 V: se propone una de 24 V. Para los encoders de posición se propone el de 24 V. Y junto a la cámara destinada para la inspección, el sistema va a constar con una fuente tipo switching con entrada de 220 VAC y salida de 24VDC y 3 ADC.

5. CONCLUSIÓN

Con el trabajo realizado en este informe se pudo llevar a cabo satisfactoriamente la implementación de la cinemática directa, inversa y estudio de singularidades con la finalidad de simular una trayectoria para el robot elegido y la tarea de inspección propuesta a partir del modelado y análisis de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

6. ANEXO

Todo el código de este proyecto se adjunta en la carpeta TF_Bustillo_Perez.

7. BIBLIOGRAFÍA Y CITAS

- Libro: Craig, 2006
- Libro: Corke, 2013
- Datasheet: KUKA, s.f.-a
- Datasheet: Panasonic, s.f.
- Web: KUKA, s.f.-c
- Web: Robot-Forum, s.f.
- Web: Baumueller, s.f.
- Web: Cognex, s.f.
- Web: KUKA, s.f.-b
- Web: Celera-Motion, s.f.
- Web: Sick, s.f.

REFERENCIAS

- Baumuell. (s.f.). *Servomotor DSH1-045-100*. <https://www.baumueller.com/es/download/baumuell-downloads/dsh1-045-100-de-de>
- Celera-Motion. (s.f.). *Midi Ultra IncOder™ Inductive Angle Encoder*. <https://www.celeramotion.com/zettlex/product/incoder-inductive-angle-encoders-midi-ultra-range/>
- Cognex. (s.f.). *DSMax 3D Laser Displacement Sensor*. <https://www.cognex.com/products/machine-vision/3d-machine-vision-systems/dsmax-3d-laser-displacement-sensor>
- Corke, P. (2013). *Robotics Toolbox for MATLAB Rel. 10*. P. Corke.
- Craig, J. (2006). *Robótica*. Pearson.
- KUKA. (s.f.-a). *Datasheet for Robot KUKA KR*. https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000210360_en.pdf
- KUKA. (s.f.-b). *KUKA.ForceTorqueControl*. <https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/software/application-software/kuka-forcetorquecontrol>
- KUKA. (s.f.-c). *Página web principal de KUKA*. <https://www.kuka.com/>
- Panasonic. (s.f.). *Driver MINAS A5*. https://www.panasonic-electric-works.com/cps/rde/xbcr/pew_eu_en/mn_63789_0700_en_minas_a5_basic400V.pdf
- Robot-Forum. (s.f.). *DH for Robot KUKA KR*. <https://www.robot-forum.com/robotforum/thread/20360-denavit-hartenberg-parameter-kuka-agilus-kr-10-r1100-sixx/>
- Sick. (s.f.). *Sensores de ultrasonido UM12*. <https://www.sick.com/es/es/sensores-de-distancia/sensores-de-ultrasonido/um12/c/g305961>