

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES - ITBA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO PRÁCTICO FINAL

AUTORES:	Lambertucci, Guido Enrique	(Leg. N° 58009)
	Londero Bonaparte, Tomás Guillermo	(Leg. N° 58150)
	Mechoulam, Alan	(Leg. N° 58438)
	Maselli, Carlos Javier	(Leg. N° XXXXX)

DOCENTES:	Arias, Rodolfo Enrique
	Sofio Avogadro, Federico
	Spinelli, Mariano Tomás

22.90 - Automación Industrial

BUENOS AIRES

Índice

1. Deducción de modelo	2
2. Control de posición no lineal	3
2.1. Caracterización del problema	3
2.2. Esquema de control	3
2.3. Resultados	3
3. Control de fuerza no lineal	5
3.1. Caracterización del problema	5
3.2. Esquema de control propuesto	6
3.3. Resultados	6
4. Control híbrido no lineal	9
4.1. Caracterización del problema	9
4.2. Esquema de control propuesto	9
4.3. Resultados	9
5. Conclusiones	12

1. Deducción de modelo

La consigna propone un manipulador RR de las siguientes cualidades.

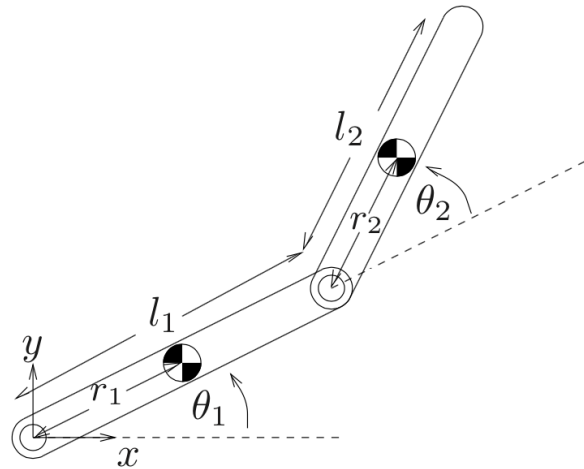


Figura 1: Manipulador RR.

Donde para los parametros DH se opto por la posicion $\theta_1 = 0$ y $\theta_2 = 0$. A partir de ello se obtuvieron los siguientes parámetros DH (Donde todas las ternas son paralelas. Los Z paralelos, los ejes X colineales y en sentido del siguiente link).

	α	\mathbf{a}	θ	\mathbf{d}
1	0	0	θ_1	0
2	0	L_1	θ_2	0
EE	0	L_2	0	0

Luego realizando la propagación de velocidades se obtiene que:

$${}^1v_1 = 0 \quad (1)$$

$${}^1\omega_1 = \dot{\theta}_1 \cdot \hat{k} \quad (2)$$

$${}^2v_2 = \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2)L \cdot \hat{i} + \dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2)L \cdot \hat{j} \quad (3)$$

$${}^2\omega_2 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \cdot \hat{k} \quad (4)$$

Luego obteniendo los correspondientes a los centros de masa (Ubicados al final de cada link).

$${}^1v_{c1} = \dot{\theta}_1 L \cdot \hat{j} \quad (5)$$

$${}^2v_{c2} = \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2)L \cdot \hat{i} + \left(\dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2)L + L(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right) \cdot \hat{j} \quad (6)$$

Las matrices de inercia serán diagonales con valores $I_{zz} = mL^2$, $I_{yy} = mL^2$ e $I_{xx} = 0$

Luego se procede a calcular el vector de torques.

$$\mathcal{L}(\Theta, \dot{\Theta}) = k(\Theta, \dot{\Theta}) - u(\Theta) \quad (7)$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial k}{\partial \dot{\Theta}} \right) - \frac{\partial k}{\partial \Theta} + \frac{\partial u}{\partial \Theta} \quad (8)$$

Debido a que todo el movimiento del brazo se encuentra al mismo potencial gravitatorio los terminos de u son nulos.

Operando se obtiene un modelo de la siguiente forma:

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) + F(\Theta, \dot{\Theta}) \quad (9)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} 2m_2L^2 + 2I_{zz} + m_1L^2 & m_2L^2 + I_{zz} \\ m_2L^2 + I_{zz} & m_2L^2 + I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\dot{\theta}_1 b_1 - L \sin(\theta_2) m_2 \dot{\theta}_2 \\ -\dot{\theta}_2 b_2 + L \sin(\theta_2) m_2 \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Adicionalmente se obtuvo el Jacobiano, si bien este es una matriz de 3x2, dado a que nunca hay un movimiento en el versor k, se lo toma de 2x2.

$${}^{EE}J = \begin{pmatrix} L \sin(\theta_2) & 0 \\ L(\cos(\theta_1 + \theta_2) + 1) & L \end{pmatrix} \quad (11)$$

2. Control de posición no lineal

2.1. Caracterización del problema

Se pide un control cartesiano no lineal para el manipulador RR. Agregando una zona prohibida que es todo valor por encima de una pared, descrita en el plano XY por la siguiente ecuación:

$$y = 2 - x \quad (12)$$

Al manipulador se le pide que vaya del punto (1;-1;0) a (1;1;0). Para generar la trayectoria se utiliza la función **jitraj** del toolbox de matlab de Peter Corke.

2.2. Esquema de control

El modelo de control propuesto es el conocido como linealización por realimentación. Es fundamental para este tipo de control tener un gran conocimiento de la planta, ya que básicamente se lo controla como si fuese lineal, con un esquema tipo PD. Con la diferencia que se le agrega a la acción de control la respuesta no lineal de la planta, gracias al conocimiento del modelo no lineal de la planta y sus variables de estado.

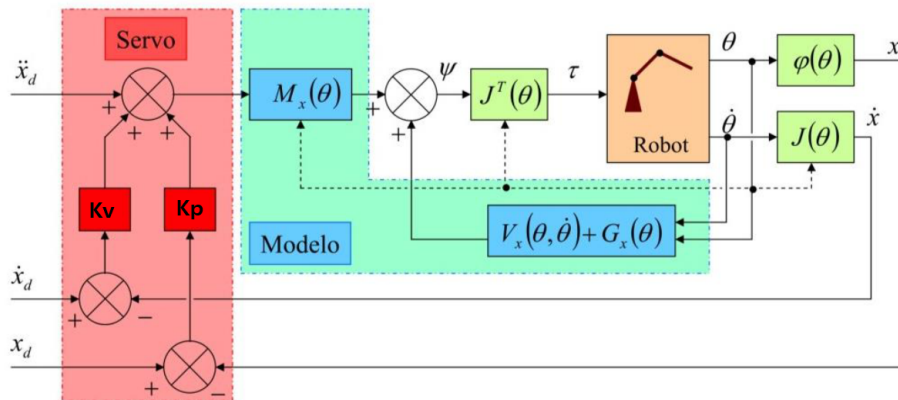


Figura 2: Topología del control de posición cartesiano no lineal.

Cabe mencionar que las matrices M_x , V_x , y G_x se encuentran en espacio cartesiano, y la manera de pasar de las mismas en espacio joint es la siguiente:

$$M_x(\Theta) = J^{-T}(\Theta)M(\Theta)J^{-1}(\Theta) \quad (13)$$

$$V_x(\Theta, \dot{\Theta}) = J^{-T}(\Theta) \left(V(\Theta, \dot{\Theta}) - M(\Theta)J^{-1}(\Theta)\dot{J}(\Theta)\dot{\Theta} \right) \quad (14)$$

$$G_x(\Theta) = J^{-T}(\Theta)G(\Theta) \quad (15)$$

HABLAR DE VALROES DE GANANCIAS

2.3. Resultados

Se realizó el simulink del sistema. Obteniendo los siguientes gráficos. Aquí se pueden observar los ángulos de los manipuladores en espacio de joint. Como el primer rotacional hace una trayectoria de $-\frac{\pi}{2}$ hacia 0, y el segundo si bien el punto inicial y final son el mismo, se desvía con el propósito de seguir la trayectoria cartesiana indicada.

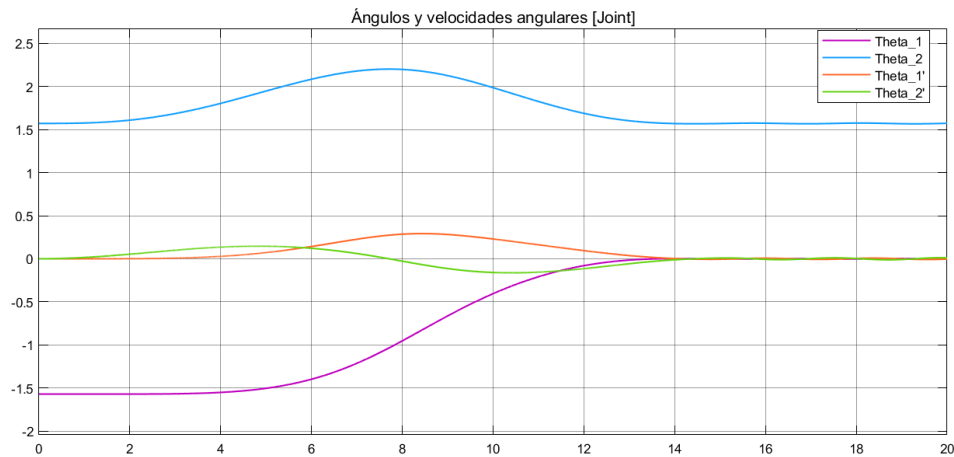


Figura 3: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

Aquí se ven tanto las referencias como las coordenadas reales que tomo el EE, con un error porcentual menor al XX %

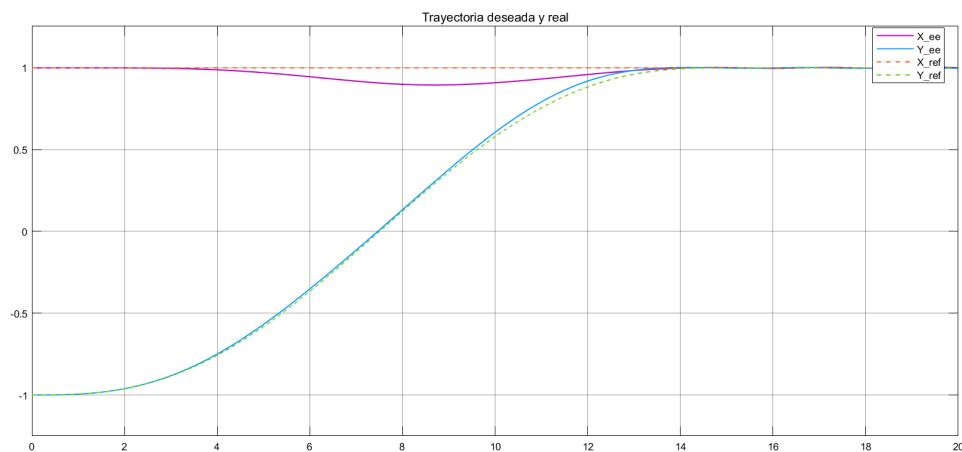


Figura 4: Posición deseada y real del EE.

La trayectoria descrita por el EE se observa claramente en la siguiente imagen.

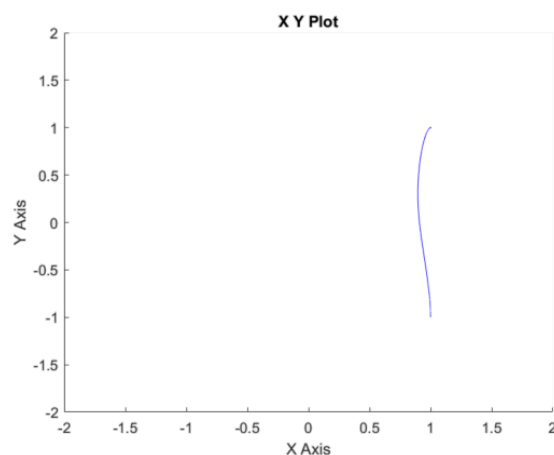


Figura 5: Gráfico XY.

Ademas se le incluyó un disturbio a la planta tanto en posición como en velocidad. Este disturbio sucede en el segundo 14. Y se observa en los siguientes gráficos como el manipulador se ve afectado por el mismo y luego vuelve rápidamente a la referencia.

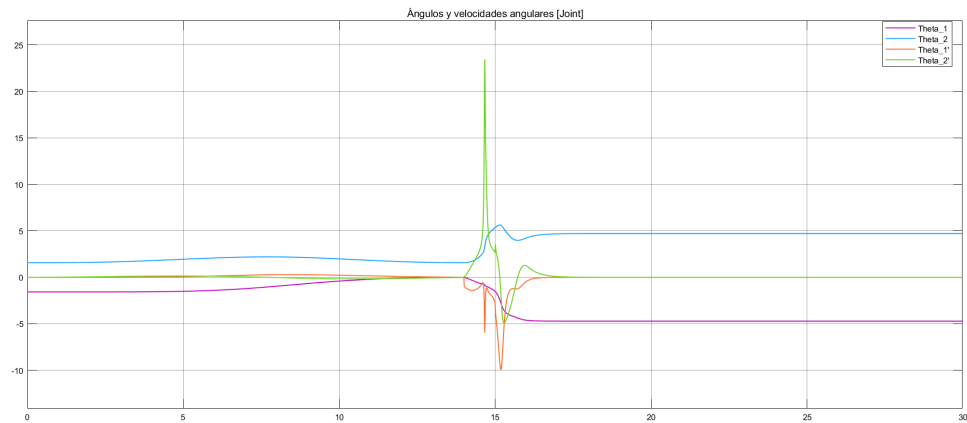


Figura 6: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

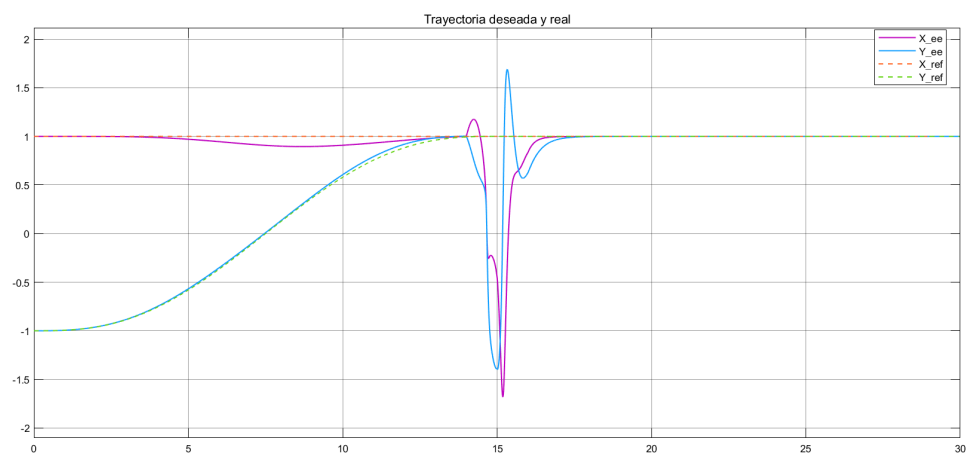


Figura 7: Posición deseada y real del EE.

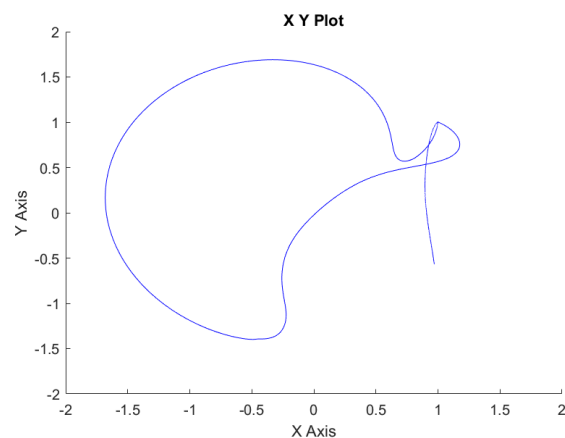


Figura 8: Gráfico XY.

3. Control de fuerza no lineal

3.1. Caracterización del problema

Para este caso se pidió un control de fuerzas no lineal. Para ello un aspecto fundamental es modelar las fuerzas del sistema que interaccionan con el actuador. En este caso es la pared que trabaja como obstáculo. La fuerza de

reacción entre el EE y la pared será aquella definida por:

$$f_r = k_e \cdot d \cdot \hat{n} \quad (16)$$

La cual es una fuerza proporcional a la distancia y normal a la superficie de la pared. Esta fuerza será nula mientras el EE no se encuentre en contacto con la pared y no nula en caso de estarlo.

3.2. Esquema de control propuesto

El esquema de control propuesto será nuevamente una linealización por realimentación de la siguiente manera.

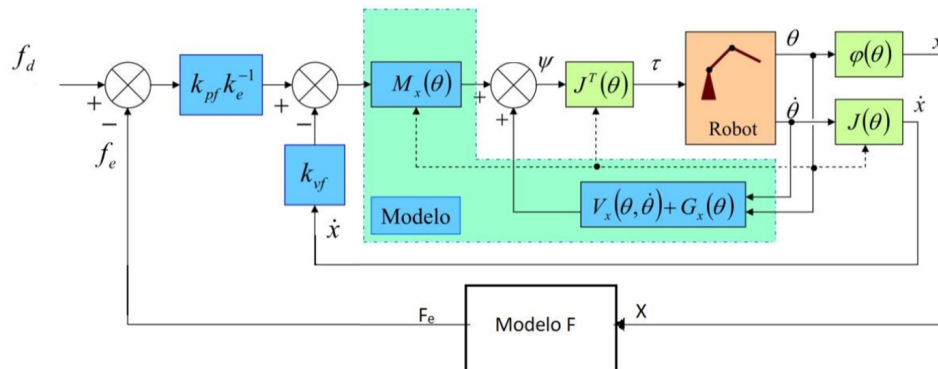


Figura 9: Topología del control de fuerza no lineal.

HABLAR DE VALORES DE GANANCIAS

3.3. Resultados

Se realizó el simulink del sistema. Obteniendo los siguientes gráficos. Algo característico que tiene este control de fuerzas es que debido a que no hay información provista como referencia de posición, el manipulador se moverá hasta estar cerca de la pared, y luego realizará una breve oscilación sobre la pared hasta llegar a un estado permanente en el cual el manipulador estará aplicando la fuerza comandada por la referencia.

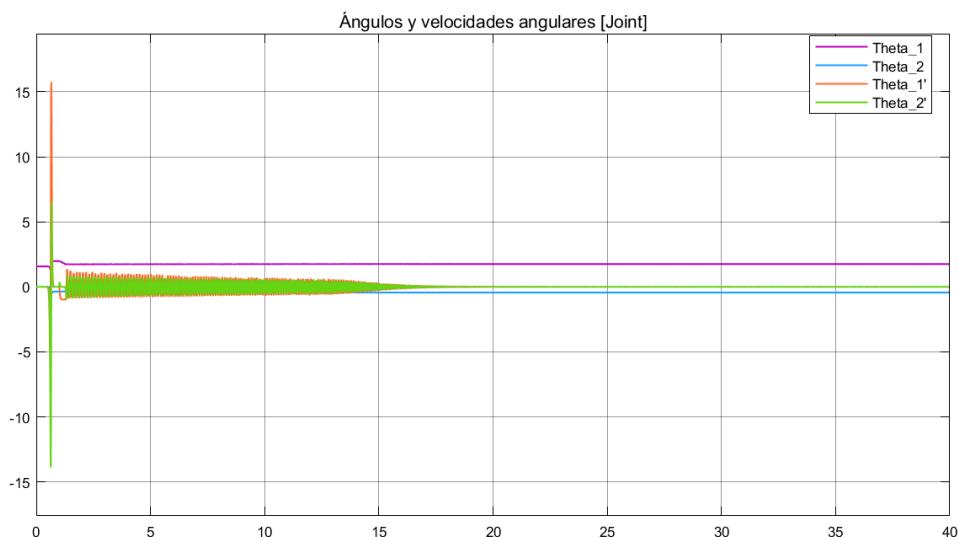


Figura 10: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

Se observa claramente en la siguiente imagen, como oscila levemente el EE al llegar a la pared.

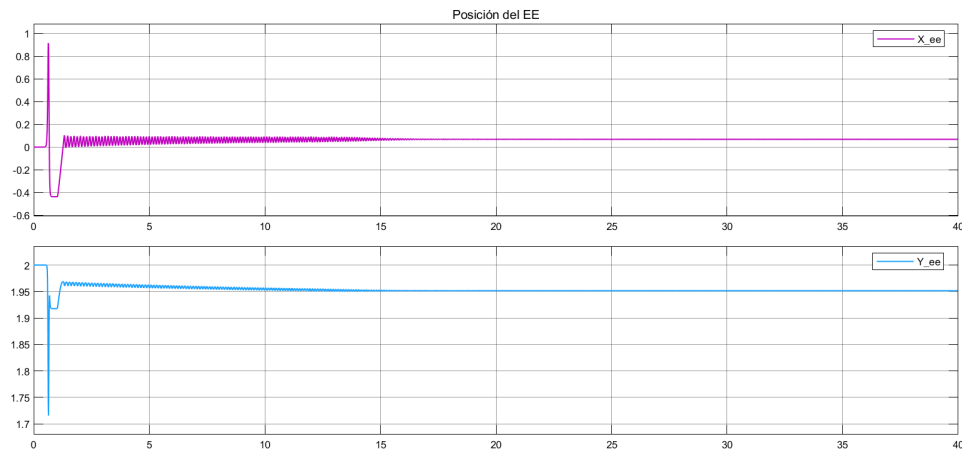


Figura 11: Posición del EE.

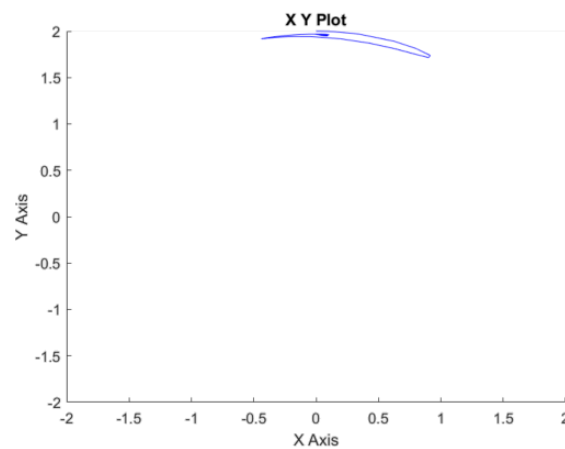


Figura 12: Gráfico XY.

Cabe mencionar en este gráfico que en todos los puntos en los cuales la función es cero, se debe a que el manipulador no está en contacto con la pared por lo que la misma no aplica una fuerza. Además se ve como una vez alcanzada la pared y dada una referencia, el EE oscila levemente en torno a la referencia hasta establecerse.

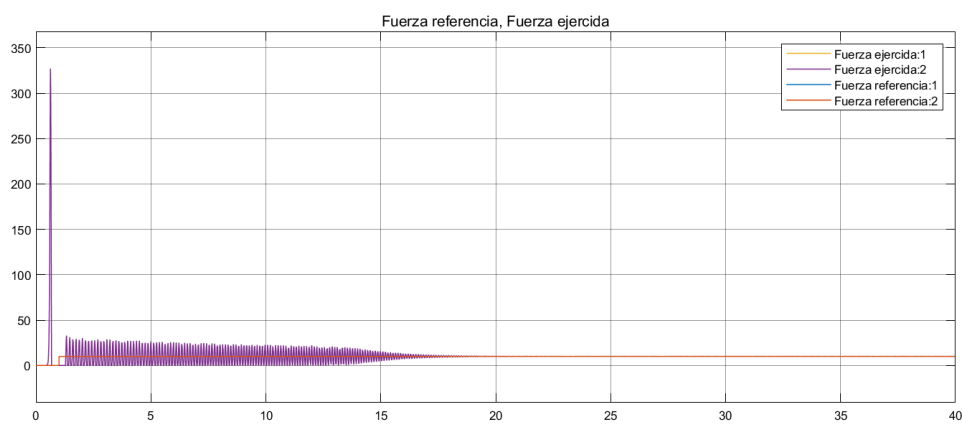


Figura 13: Gráfico XY.

Además se le incluyó un disturbio a la planta tanto en posición como en velocidad. Se puede ver claramente en este gráfico el momento en el que se le aplica el disturbio a la planta, y como las variables de estado se estabilizan nuevamente.

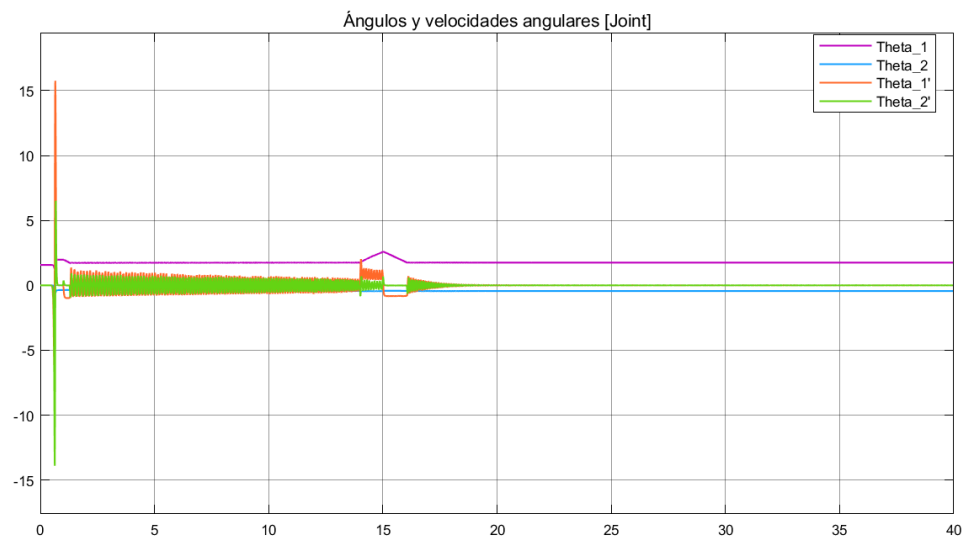


Figura 14: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

Aquí se ve el movimiento del EE.

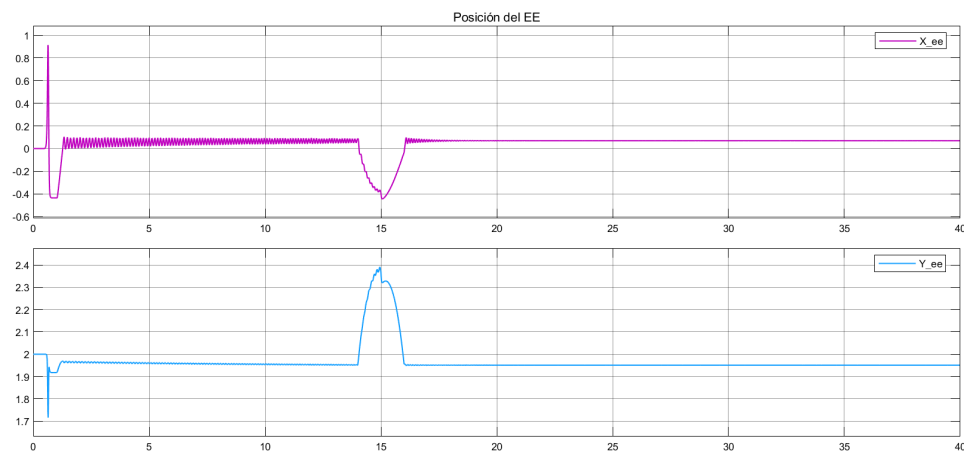


Figura 15: Posición del EE.

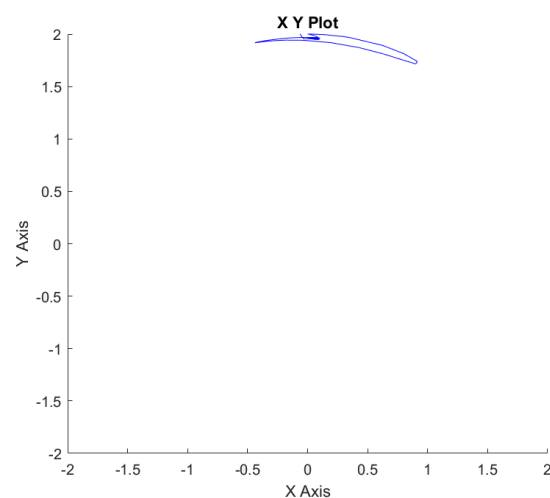


Figura 16: Gráfico XY.

Y finalmente se observa un gráfico similar al de fuerzas anterior, con la diferencia de que se hace nulo el valor

de la fuerza aplicada en el segundo 15 al EE despegarse completamente de la pared. luego vuelve a la misma y se establece en el régimen permanente nuevamente.

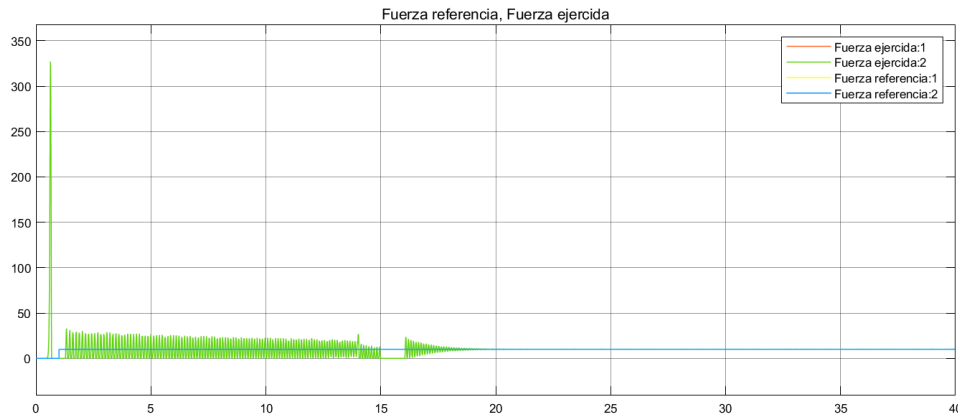


Figura 17: Fuerza deseada y real.

4. Control híbrido no lineal

4.1. Caracterización del problema

Finalmente se realizó un control híbrido, en el cual toman parte tanto posición como fuerza.

4.2. Esquema de control propuesto

El esquema de control propuesto será nuevamente una linealización por realimentación de la siguiente manera.

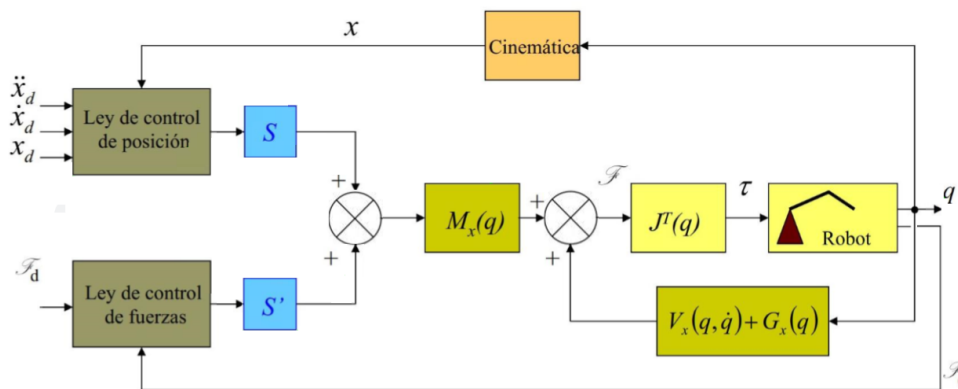


Figura 18: Topología del control de fuerza no lineal.

HABLAR DE VALORES DE GANANCIAS

4.3. Resultados

Se realizó el simulink del sistema. Obteniendo los siguientes gráficos. En este control sucede algo muy peculiar. Debido a las ganancias elegidas existe un control mas fuerte asociado al control de fuerzas que al de trayectoria, por lo que aproximadamente en el segundo 1 el EE se acerca a la pared y sigue pegado a esta, si bien se mueve la dirección provista por el control de posición, lo hace pegado a la pared.

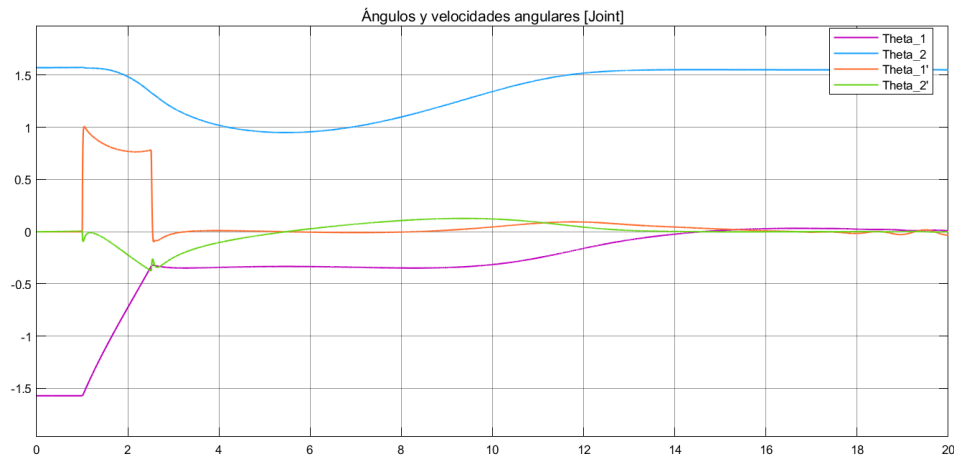


Figura 19: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

Se puede ver como convergen las posiciones del EE con las de la referencia.

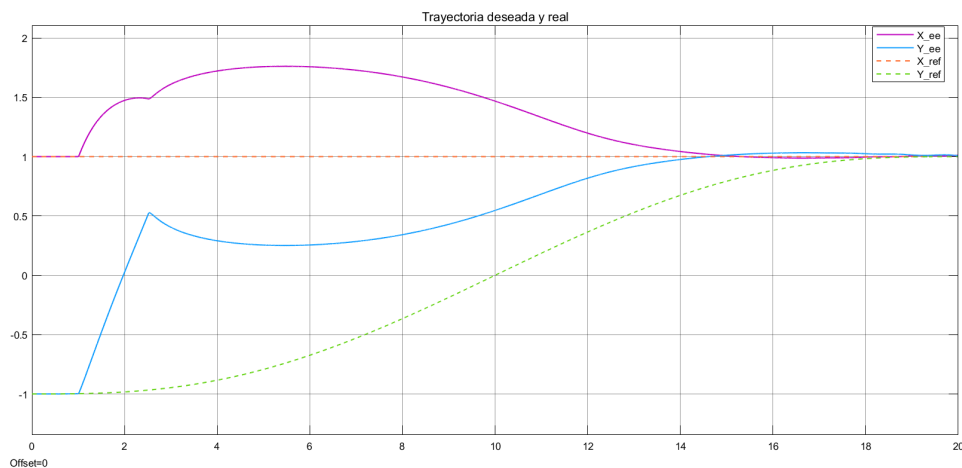


Figura 20: Posición del EE.

En el siguiente gráfico se puede apreciar claramente lo discutido previamente, como el EE al llegar a la pared este se pega a ella, y avanza sobre la pared en dirección al punto descrito por el control de posición.

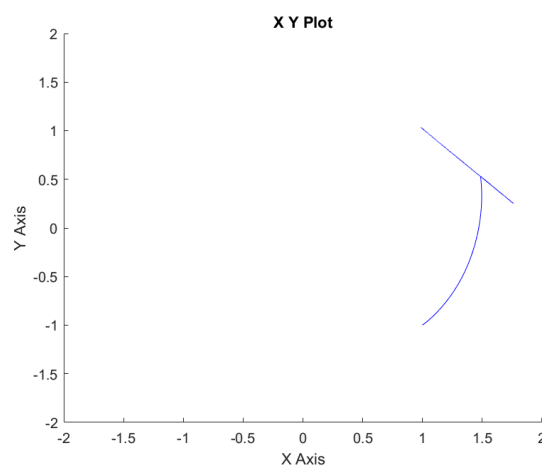


Figura 21: Gráfico XY.

Aquí también se ve como aproximadamente en el segundo 2.5 el EE llega a la pared y comienza a hacer fuerza contra la misma, y esta fuerza se mantiene por todo el recorrido hasta el fin.

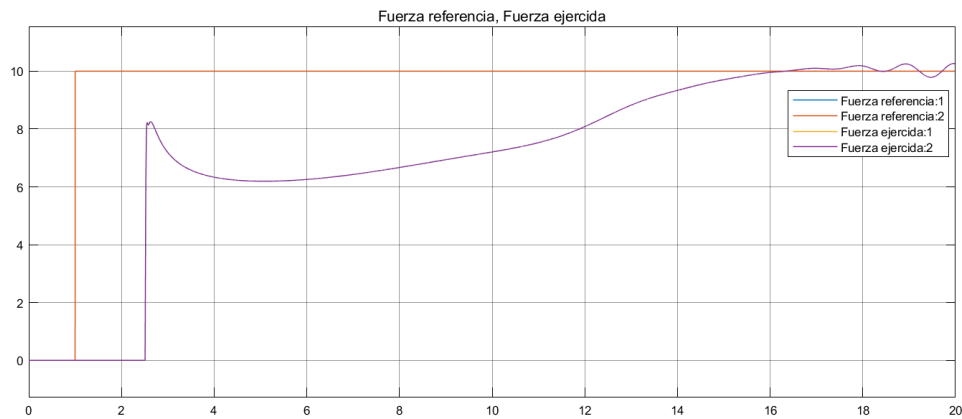


Figura 22: Gráfico XY.

Además se le incluyó un disturbio a la planta tanto en posición como en velocidad. En este caso el disturbio se optó por hacerlo en el segundo 5, así se observa como reacciona el manipulador en pleno movimiento en vez de en régimen permanente. Se puede ver como si bien hay mucho mayor desvío de la posición, las variables convergen.

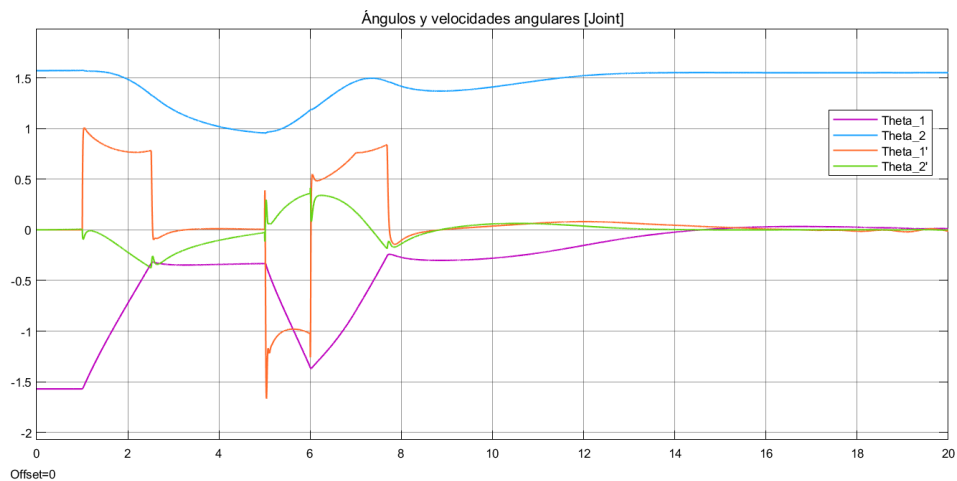


Figura 23: Ángulos en función del tiempo en espacio joint.

En este caso es el control en el que mayor error respecto de la referencia hay.

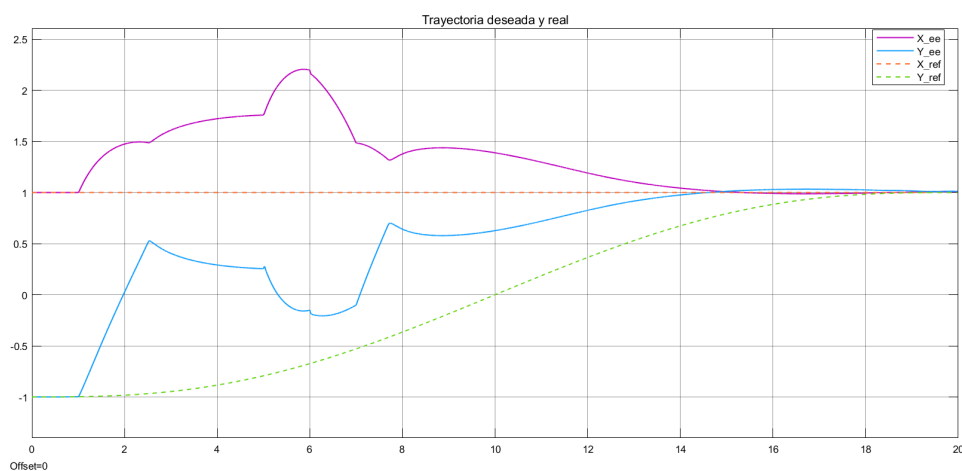


Figura 24: Posición del EE.

Aquí se puede ver como se desplaza el EE por el plano, pegado a la pared hasta el disturbio.

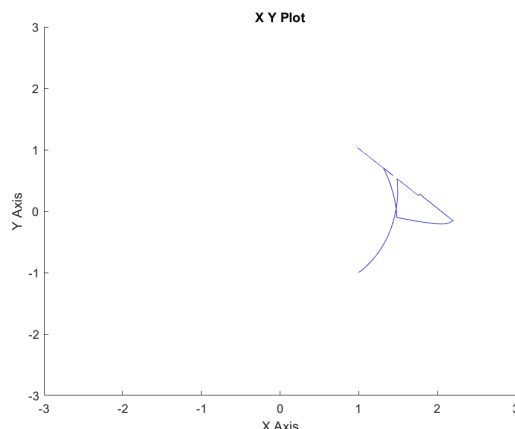


Figura 25: Gráfico XY.

En este gráfico es donde mas claramente se puede ver el disturbio introducido, y como rápidamente el control de fuerzas vuelve a su referencia.

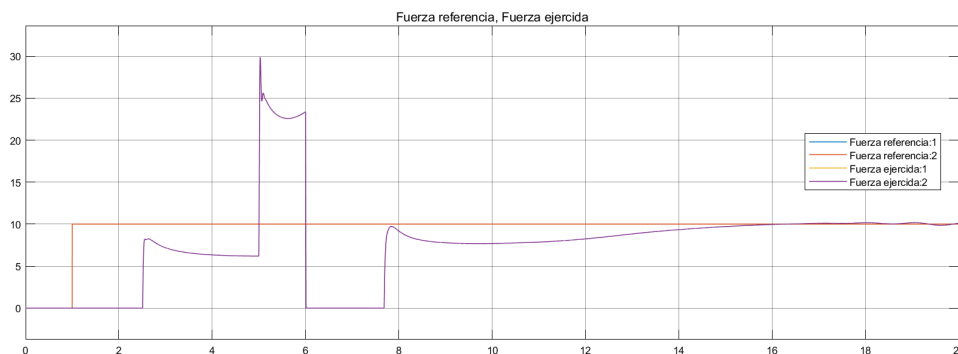


Figura 26: Fuerza deseada y real.

5. Conclusiones

Hubo la oportunidad de desarrollar analíticamente la mecánica del manipulador propuesto por la cátedra, obteniendo a través del método de Lagrange el vector de torques, al igual que por propagación de velocidades la matriz jacobiana. Parámetros sumamente importantes para la siguiente actividad, la cual fue llevar a cabo diversos tipos de control, tanto de posición y fuerza e incluso uno híbrido el cual incluía tanto posición como fuerza.

Se exploraron varias topologías de control no lineal, como puede ser la linealización por punto de equilibrio variable, y la linealización por realimentación. La utilizada fue la linealización por realimentación debido al amplio conocimiento que se tiene sobre la planta.

Se profundizó en el uso de simulink al igual que un aprendizaje en el uso del toolbox de robotics de Peter Corke, una gran herramienta para la simulación de manipuladores.

Finalmente se observó como era la reacción de los distintos tipos de control ante disturbios en la planta. Y como estos volvían a sus señales respectivas de referencia.