



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires

T.P.	
Grupo	
Curso	
Año	

ROBOTICA

TRABAJO FINAL ROBOTICA 2009

Manipulador Robótico de 3 GDL tipo SCARA

DOCENTE: HERNAN GIANNETTA

MATERIA: ROBOTICA

CURSO: R6055

GRUPO:

AÑO: 2009

Integrantes del Grupo:

Legajo	Nombre y apellido	email
1102837	Mario Ernesto Espinoza	teo537@hotmail.com
1131400	Darío David de Lima	elpier24@yahoo.com.ar

Fecha de realización: 07/08/09

APROBADO EN FECHA: _____ **FIRMA:** _____

Introducción

Una clasificación elemental de los distintos tipos de robot es aquella que los distingue entre Manipuladores y Móviles. Este trabajo se basa en los primeros ya que son usados en la industria, por ello también son conocidos como robots industriales.

Un robot industrial se compone de una serie de partes rígidas (links) que están unidas mediante articulaciones (joins) formando una cadena, esta cadena tiene su origen en una base generalmente fija y termina en un extremo móvil y libre (efector) que es donde se acopla la herramienta de trabajo.

Existen varios tipos de articulaciones que permiten las correspondientes translaciones, pero las dos mas usadas en robótica son la articulación prismática P y la de rotación R.

La articulación prismática permite un desplazamiento lineal relativo a un eje mientras que la articulación rotacional permite un movimiento de giro alrededor de un eje.

Generalmente se utilizan tres translaciones según el respectivo eje X,Y,Z para posicionar el extremo del manipulador y luego se logra la orientación del efector con tres giros o rotaciones (Yaw,Pith y Roll) relacionados con los tres ejes mencionados.

En principio la estructura del robot esta determinada por el tipo de sus tres primeras articulaciones, así dichas articulaciones le confieren una determinada configuración y esta determina la conveniencia de adoptar un sistema de coordenadas específico.

Debido a esto, podemos clasificar a los manipuladores por sus distintas configuraciones.

Cuando se habla de la configuración de un robot, se habla de la forma física que tiene el brazo del robot. El brazo del manipulador puede presentar cuatro configuraciones clásicas:

Cartesiana:

Sus tres articulaciones principales son prismáticas y por ello tiene tres grados de libertad. Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son en base a interpolaciones lineales. Interpolación significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro.

A la trayectoria realizada en línea recta se la conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se la llama interpolación por articulación.

Cilíndrica:

La primer articulación es rotacional y las restantes son prismáticas. Puede ejecutar la Interpolación lineal y la articulación por trayectoria.

Esférico o Polar:

Los dos primeros movimientos son rotacionales y la tercer articulación es prismática.

Angular o Antropomórfico:

Sus tres articulaciones son rotacionales.

Además de las 4 configuraciones clásicas, existen otras como la configuración SCARA que es el objeto de este trabajo.

Robot SCARA

El Robot Scara (Selective Compliance Assembly Robot Arm) es originario de Japón y fue desarrollado en la Universidad Yamanashi por el Profesor Makino en 1982.

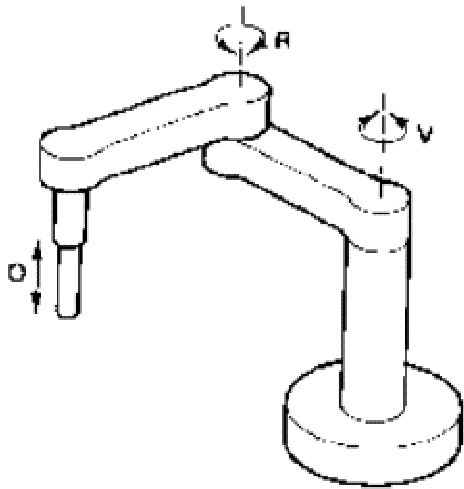
El objetivo era un robot con un número reducido en grados de libertad (3 o 4), un coste limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas.

Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración SCARA también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercer articulación).

En resumen, posee dos articulaciones rotacionales y una prismática. Con las dos primeras articulaciones se controla la posición respecto al plano X-Y y con la última articulación la coordenada Z.

Se emplea fundamentalmente en operaciones de ensamblado o inserción de componentes electrónicos y en trabajos similares.

Ejemplo de un robot SCARA:



Modelo Dinámico

Nos proponemos hallar el modelo dinámico que representa a esta configuración.

El modelo dinámico de un robot nos permite conocer la relación existente entre el movimiento y las fuerzas actuantes que provocan dicho movimiento.

A diferencia del modelo cinemático que solo representa el movimiento con respecto a un sistema de referencia, el modelo dinámico tiene en cuenta las fuerzas y pares aplicadas en las articulaciones y además los parámetros dimensionales del robot como la longitud, masa e inercia de sus elementos.

Desde un punto de vista matemático, se relaciona la locación del robot (que esta definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo), y sus derivadas: velocidad y aceleración.

El estudio dinámico del robot tiene como resultado un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen la conducta dinámica del manipulador.

Tales ecuaciones de movimiento son útiles para simulación por PC, diseño de ecuaciones de control apropiadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura cinemática del robot.

Un punto a tener en cuenta, es que la complejidad del modelo dinámico se acrecienta en gran medida con el aumento de grados de libertad (GDL) del manipulador. Como consecuencia del aumento de complejidad a medida que crece el número de GDL, no siempre es posible hallar una solución cerrada, es decir, un conjunto de ecuaciones diferenciales que al ser integradas nos den como resultado las fuerzas y torques a ser aplicadas para obtener un determinado desplazamiento con una cierta velocidad y aceleración, es decir, un único resultado.

Así, el modelo dinámico se debe resolver mediante cálculo numérico e iterativo (por Ej. uso de series convergentes).

Existen 2 formas básicas de encarar el problema del modelo dinámico:

Modelo Dinámico Directo: Expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.

Modelo Dinámico Inverso: Expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas.

Características del modelo dinámico

El modelo dinámico de un manipulador es complejo, a continuación se listan algunos aspectos que hacen que dicho modelo matemático no pueda ser exacto, sin importar cuan precisos sean los cálculos o mediciones:

-Modelo no lineal

-Alto grado de acoplamiento entre las articulaciones

-Sistema variante en el tiempo

Así mismo, se producen incertidumbres que pueden clasificarse en estructuradas y no estructuradas:

-Incertidumbres estructuradas: Imprecisión en las propiedades del enlace.

-Incertidumbres no estructuradas: Dinámica no modelada (por Ej. la fricción que puede ser estática, de Coulomb, viscosa, etc).

En síntesis, el objetivo del modelo dinámico es obtener una solución simbólica (modelo matemático) que represente los movimientos de los elementos del manipulador en función de los torques aplicados teniendo en cuenta sus parámetros geométricos (distancias, ángulos relativos, etc) e inerciales (masas, momentos de inercia, etc) que se pueden utilizar para simular, diseñar e implementar leyes de control.

Existen varios métodos básicos para obtener el modelo dinámico de un manipulador:

- Newton-Euler
- Lagrange-Euler
- Variables de estado
- Kane

Método de Newton Euler

Es un método iterativo y recursivo, se propagan aceleraciones y torques por los distintos elementos del manipulador. A continuación algunas características:

- Esta basado en la mecánica Newtoniana.
- Difícil obtención.
- Se obtienen ecuaciones recursivas. Cinemática hacia delante, dinámica hacia atrás.
- Menor tiempo de cálculo, útil en tiempo real.

Calculo hacia delante: se calculan las velocidades y aceleraciones lineales y angulares de cada elemento en función del elemento anterior.

Estos valores pueden calcularse recursivamente, comenzando desde al base y terminando en el efector final.

Calculo hacia atrás: medir, calcular o definir las fuerzas/torques actuantes sobre el efector final. Con dichas magnitudes hallar las fuerzas/torques en las uniones de cada elemento partiendo desde el efector final hasta y finalizando en la base.

Método de Lagrange Euler

Es un método cerrado, se basa en el balance de energías del sistema. Así, resulta de la diferencia de las energías cinéticas y potenciales de todos los elementos que componen el manipulador.

Este método produce las mismas ecuaciones de movimiento para el mismo manipulador.

Algunas características de este método:

- Obtención simple y sistemática
- Mucho tiempo de cálculo, no recomendable para tiempo real.
- Se obtienen ecuaciones diferenciales

Formulación de Lagrange-Euler

Se basa en la aplicación de la formulación Lagrangiana a la representación de Denavit-Hartenberg. Puede utilizarse para:

Analizar y diseñar estrategias de control avanzado

Resolver los problemas dinámico directo e inverso

ECUACION DE LAGRANGE-EULER

Se define el *lagrangiano* de un cuerpo como la diferencia entre sus energías cinética y potencial:

$$L=K-P$$

K: Energía cinética: depende de la velocidad del cuerpo

P: Energía potencial: depende de la posición del cuerpo

Donde $K \rightarrow K = \frac{1}{2}mv^2$ si es un link prismático y $K = \frac{1}{2}mr^2\dot{\theta}^2$ si es rotacional

y $P = mgh$

y se define la ecuación del movimiento de Lagrange como:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = T$$

por cada articulación habrá una q_i (q_i representa a la articulación i), de modo que habrá que resolver la ecuación para cada q_i . Con q_i desde 1 hasta n .

El método de Lagrange-Euler consiste en una serie de pasos para hallar los componentes de unas determinadas matrices que conforman la siguiente expresión matricial que puede representar a un manipulador de n grados de libertad:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q) = T$$

donde:

$M(q)$ es la matriz de inercia

$V(q, \dot{q})$ es la matriz de fuerzas centrífugas y coriolis

$G(q)$ es el vector de fuerzas gravitacionales

T es el vector de torques/fuerzas aplicados en las articulaciones

Al hacer el análisis, se debe tener en cuenta las siguientes fuerzas intervinientes:

Inercia, gravedad, coriolis, centrípeta y fricciones.

Modelo dinámico de un manipulador Scara mediante el Método de Lagrange-Euler

El método de lagrange_Euler utiliza la representación de Denavit-Hartenberg basada en las matrices de transformación homogénea para formular el modelo dinámico de un robot mediante la ecuación de Lagrange.

Desde el punto de vista computacional se trata de un método ineficiente ya que se realizan operaciones de suma y producto innecesarias ya que las matrices poseen información redundante.

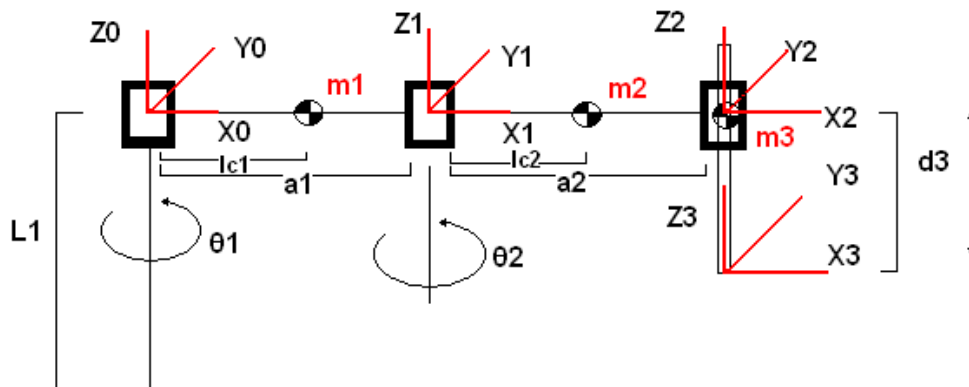
Se comprueba que la cantidad de operaciones a realizar crece con la potencia 4 en relación de la cantidad de grados de libertad del robot.

Su ventaja es que es un método sistemático que conduce a ecuaciones estructuradas y claras.

A continuación se detallan los 10 pasos que son necesarios llevar a cabo para hallar el modelo dinámico del robot Scara:

Para simplificar el modelo, cada eslabón de la cadena se trata como un cuerpo rígido y de masa concentrada en su centro de gravedad (que se elige a conveniencia). Tampoco se tendrán en cuenta las fricciones producidas, es decir, $F(q)=0$.

L-E1) Asignación de sistemas de referencia según D-H



Join	Θ	d	a	α
1	Θ_1	0	a1	0
2	Θ_2	0	a2	0
3	0	-d3	0	0

L-E2) Matrices de transformación

$$A_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2$$

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & a1C1 \\ S1 & C1 & 0 & a1S1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & a2C2 \\ S2 & C2 & 0 & a2S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^0 = \begin{bmatrix} C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(C1C2 - S1S2) + a1C1 \\ S1C2 + C1S2 & -S1S2 + C1C2 & 0 & a2(S1C2 + C1S2) + a1S1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^0 = \begin{bmatrix} C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(C1C2 - S1S2) + a1C1 \\ S1C2 + C1S2 & -S1S2 + C1C2 & 0 & a2(S1C2 + C1S2) + a1S1 \\ 0 & 0 & 1 & -d3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Px = a2(C1C2 - S1S2) + a1C1$$

$$Py = a2(S1C2 + C1S2) + a1S1$$

$$Pz = -d3$$

Estas expresiones obtenidas por la cinemática directa reflejan la posición final del efector referido al sistema {So}.

L-E3) Matrices Uij

$$U_{ij} = \frac{\partial A_i^0}{\partial q_i}$$

$$U_{11} = \frac{\partial A_1^0}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -S1 & -C1 & 0 & -a1S1 \\ C1 & -S1 & 0 & a1C1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{12} = \frac{\partial A_1^0}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{13} = \frac{\partial A_1^0}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{21} = \frac{\partial A_2^0}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a2(S1C2 + C1S2) - a1S1 \\ C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(C1C2 - S1S2) + a1C1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{22} = \frac{\partial A_2^0}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a2(C1S2 + S1C2) \\ C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(-S1S2 + C1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{23} = \frac{\partial A_2^0}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{31} = \frac{\partial A_3^0}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a2(S1C2 + C1S2) - a1S1 \\ C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(C1C2 - S1S2) + a1C1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{32} = \frac{\partial A_3^0}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a2(C1S2 + S1C2) \\ C1C2 - S1S2 & -C1S2 - S1C2 & 0 & a2(-S1S2 + C1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{33} = \frac{\partial A_3^0}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L-E4) Matrices Uijk

$$U_{ijk} = \frac{\partial U_{ij}}{\partial q_k}$$

$$U_{111} = \frac{\partial U_{11}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -C1 & S1 & 0 & -a1C1 \\ -S1 & -C1 & 0 & a1S1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{112} = \frac{\partial U_{11}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{113} = \frac{\partial U_{11}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{121} = \frac{\partial U_{12}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{122} = \frac{\partial U_{12}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{123} = \frac{\partial U_{12}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{131} = \frac{\partial U_{13}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{132} = \frac{\partial U_{13}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{133} = \frac{\partial U_{13}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{211} = \frac{\partial U_{21}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -C1C2 + S1S2 & C1S2 + S1C2 & 0 & a1(-C1C2 + S1S2) - a1C1 \\ -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a1(S1C2 + C1S2) - a1S1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{212} = \frac{\partial U_{21}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} S1S2 - C1C2 & S1C2 + C1S2 & 0 & a1(S1S2 - C1C2) \\ -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a1(C1S2 + S1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{213} = \frac{\partial U_{21}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{221} = \frac{\partial U_{22}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} S1S2 - C1C2 & S1C2 + C1S2 & 0 & a2(S1S2 - C1C2) \\ -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a2(C1S2 + S1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{222} = \frac{\partial U_{22}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} -C1C2 + S1S2 & C1S2 + S1C2 & 0 & a2(-C1C2 + S1S2) \\ -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a2(S1C2 + C1S2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{223} = \frac{\partial U_{22}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{231} = \frac{\partial U_{23}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{232} = \frac{\partial U_{23}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{233} = \frac{\partial U_{23}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{311} = \frac{\partial U_{31}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -C1C2 + S1S2 & C1S2 + S1C2 & 0 & a2(-C1C2 + S1S2) - a1C1 \\ -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a2(S1C2 + C1S2) - a1S1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{312} = \frac{\partial U_{31}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} S1S2 - C1C2 & S1C2 + C1S2 & 0 & a2(S1S2 - C1C2) \\ -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a2(C1S2 + S1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{313} = \frac{\partial U_{31}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{321} = \frac{\partial U_{32}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} S1S2 - C1C2 & S1C2 + C1S2 & 0 & a2(S1S2 - C1C2) \\ -C1S2 - S1C2 & -C1C2 + S1S2 & 0 & -a2(C1S2 + S1C2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{322} = \frac{\partial U_{32}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} -C1C2 + S1S2 & C1S2 + S1C2 & 0 & a2(-C1C2S1S2) \\ -S1C2 - C1S2 & S1S2 - C1C2 & 0 & -a2(S1C2 - C1S2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{323} = \frac{\partial U_{32}}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{331} = \frac{\partial U_{33}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{332} = \frac{\partial U_{33}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{333} = \frac{\partial U_{33}}{\partial \theta_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L-E5) Matrices de pseudoinercia J_i

$$J_i = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int y_i x_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int z_i x_i dm & \int z_i y_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} Lc_1^2 m1 & 0 & 0 & Lc_1 m1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ Lc_1 m1 & 0 & 0 & m1 \end{bmatrix} \quad J_2 = \begin{bmatrix} Lc_2^2 m2 & 0 & 0 & Lc_2 m2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ Lc_2 m2 & 0 & 0 & m2 \end{bmatrix} \quad J_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m3 \end{bmatrix}$$

L-E6) Matriz de Inercia $M = [d_{ij}]$

$$d_{ij} = \sum_{k=\max(i,j)}^n \text{traza}(U_{kj} J_k U_{ki}^T) \quad M = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = \sum_{k=\max(1,1)}^3 \text{traza}(U_{k1} J_k U_{k1}^T) = \text{tr}(U_{11} J_1 U_{11}^T) + \text{tr}(U_{21} J_2 U_{21}^T) + \text{tr}(U_{31} J_3 U_{31}^T)$$

$$d_{11} = 2a_2^2 m_3 + a_1^2 m_3 + 2Lc_1^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2 + 2a_2^2 m_2 + a_1^2 m_2 + Lc_1^2 m_1 + 2a_1 Lc_1 m_1 + a_1^2 m_1$$

$$d_{12} = \sum_{k=\max(1,2)}^3 \text{traza}(U_{k2} J_k U_{k1}^T) = \text{tr}(U_{22} J_2 U_{21}^T) + \text{tr}(U_{32} J_3 U_{31}^T)$$

$$d_{12} = 2Lc_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2 + 2a_2^2 m_2$$

$$d_{13} = \sum_{k=\max(1,3)}^3 \text{traza}(U_{k3} J_k U_{k1}^T) = \text{tr}(U_{33} J_3 U_{31}^T)$$

$$d_{13} = 0$$

$$d_{21} = \sum_{k=\max(2,1)}^3 \text{traza}(U_{k1} J_k U_{k2}^T) = \text{tr}(U_{21} J_2 U_{22}^T) + \text{tr}(U_{31} J_3 U_{32}^T)$$

$$d_{21} = 2Lc_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2 + 2a_2^2 m_2$$

$$d_{22} = \sum_{k=\max(2,2)}^3 \text{traza}(U_{k2} J_k U_{k2}^T) = \text{tr}(U_{22} J_2 U_{22}^T) + \text{tr}(U_{32} J_3 U_{32}^T)$$

$$d_{22} = 2Lc_2^2 m_2 + 2a_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2$$

$$d_{23} = \sum_{k=\max(2,3)}^3 \text{traza}(U_{k3} J_k U_{k2}^T) = \text{tr}(U_{33} J_3 U_{32}^T)$$

$$d_{23} = 0$$

$$d_{31} = \sum_{k=\max(3,1)}^3 \text{traza}(U_{k1} J_k U_{k3}^T) = \text{tr}(U_{31} J_3 U_{33}^T)$$

$$d_{31} = 0$$

$$d_{32} = \sum_{k=\max(3,2)}^3 \text{traza}(U_{k2}J_kU_{k3}^T) = \text{tr}(U_{32}J_3U_{33}^T)$$

$$d_{32} = 0$$

$$d_{33} = \sum_{k=\max(3,3)}^3 \text{traza}(U_{k2}J_kU_{k3}^T) = \text{tr}(U_{33}J_3U_{33}^T)$$

$$d_{33} = m_3$$

L-E7) Términos en h_{ijm}

$$h_{ijm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{traza}(U_{jkm}J_jU_{ji}^T)$$

$$h_{111} = \sum_{j=\max(1,1,1)}^3 \text{tr}(U_{111}J_1U_{11}^T) + \text{tr}(U_{211}J_2U_{21}^T) + \text{tr}(U_{311}J_3U_{31}^T) , \quad h_{111} = 0$$

$$h_{112} = \sum_{j=\max(1,1,2)}^3 \text{tr}(U_{212}J_2U_{21}^T) + \text{tr}(U_{312}J_2U_{21}^T)$$

$$h_{112} = S_2 L c_2 m_2 a_1 + a_2 S_2 m_2 a_1$$

$$h_{113} = \sum_{j=\max(1,1,3)}^3 \text{tr}(U_{313}J_3U_{31}^T) , \quad h_{113} = 0$$

$$h_{121} = \sum_{j=\max(1,2,1)}^3 \text{tr}(U_{221}J_2U_{21}^T) + \text{tr}(U_{321}J_3U_{31}^T)$$

$$h_{121} = -S_2 L c_2 m_2 a_1 - a_2 S_2 m_2 a_1$$

$$h_{122} = \sum_{j=\max(1,2,2)}^3 tr(U_{222}J_2U_{21}^T) + tr(U_{322}J_3U_{31}^T)$$

$$h_{122} = -S_2Lc_2m_2a_1 - a_2S_2m_2a_1$$

$$h_{123} = \sum_{j=\max(1,2,3)}^3 tr(U_{323}J_3U_{31}^T) \quad , h_{123} = 0$$

$$h_{131} = \sum_{j=\max(1,3,1)}^3 tr(U_{331}J_3U_{31}^T) \quad , h_{131} = 0$$

$$h_{132} = \sum_{j=\max(1,3,2)}^3 tr(U_{332}J_3U_{31}^T) \quad , h_{132} = 0$$

$$h_{133} = \sum_{j=\max(1,3,3)}^3 tr(U_{333}J_3U_{31}^T) \quad , h_{133} = 0$$

$$h_{211} = \sum_{j=\max(2,1,1)}^3 tr(U_{211}J_2U_{22}^T) + tr(U_{311}J_3U_{32}^T)$$

$$h_{211} = S_2Lc_2m_2a_1 + a_2S_2m_2a_1$$

$$h_{212} = \sum_{j=\max(2,1,2)}^3 tr(U_{212}J_2U_{22}^T) + tr(U_{312}J_3U_{32}^T) \quad , h_{212} = 0$$

$$h_{213} = \sum_{j=\max(2,1,3)}^3 tr(U_{313}J_3U_{32}^T) \quad , h_{213} = 0$$

$$h_{221} = \sum_{j=\max(2,2,1)}^3 tr(U_{221}J_2U_{22}^T) + tr(U_{321}J_3U_{32}^T) \quad , h_{221} = 0$$

$$h_{222} = \sum_{j=\max(2,2,2)}^3 tr(U_{222}J_2U_{22}^T) + tr(U_{322}J_3U_{32}^T) \quad , h_{222} = 0$$

$$h_{223} = \sum_{j=\max(2,2,3)}^3 tr(U_{323}J_3U_{32}^T) \quad , h_{223} = 0$$

$$h_{231} = \sum_{j=\max(2,3,1)}^3 tr(U_{331}J_3U_{32}^T) \quad , h_{231} = 0$$

$$h_{232} = \sum_{j=\max(2,3,2)}^3 tr(U_{332}J_3U_{32}^T) \quad , h_{232} = 0$$

$$h_{233} = \sum_{j=\max(2,3,3)}^3 tr(U_{333}J_3U_{32}^T) \quad , h_{233} = 0$$

$$h_{311} = \sum_{j=\max(3,1,1)}^3 tr(U_{311}J_3U_{33}^T) \quad , h_{311} = 0$$

$$h_{312} = \sum_{j=\max(3,1,2)}^3 tr(U_{312}J_3U_{33}^T) \quad , h_{312} = 0$$

$$h_{313} = \sum_{j=\max(3,1,3)}^3 tr(U_{313}J_3U_{33}^T) \quad , h_{313} = 0$$

$$h_{321} = \sum_{j=\max(3,2,1)}^3 \text{tr}(U_{321} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{321} = 0$$

$$h_{322} = \sum_{j=\max(3,2,2)}^3 \text{tr}(U_{322} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{322} = 0$$

$$h_{323} = \sum_{j=\max(3,2,3)}^3 \text{tr}(U_{323} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{323} = 0$$

$$h_{331} = \sum_{j=\max(3,3,1)}^3 \text{tr}(U_{331} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{331} = 0$$

$$h_{332} = \sum_{j=\max(3,3,2)}^3 \text{tr}(U_{332} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{332} = 0$$

$$h_{333} = \sum_{j=\max(3,3,3)}^3 \text{tr}(U_{333} J_3 U_{33}^T) \quad , h_{333} = 0$$

L-E8) Matriz columna de fuerza de coriolis y centrípeta $V[h_i]$:

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m \quad V = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}$$

$$h_1 = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 h_{1km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{111} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{113} \dot{\theta}_1 \dot{d}_3 + h_{121} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{122} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{123} \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 + h_{131} \dot{d}_3 \dot{\theta}_1 + h_{132} \dot{d}_3 \dot{\theta}_2 + h_{133} \dot{d}_3 \dot{d}_3$$

$$h_1 = m_2 a_1 (Lc_2 + a_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$h_2 = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 h_{2km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{211} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{213} \dot{\theta}_1 \dot{d}_3 + h_{221} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{222} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{223} \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 + h_{231} \dot{d}_3 \dot{\theta}_1 + h_{232} \dot{d}_3 \dot{\theta}_2 + h_{233} \dot{d}_3 \dot{d}_3$$

$$h_2 = m_2 a_1 (Lc_2 + a_2) \dot{\theta}_1^2$$

$$h_3 = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 h_{3km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{311} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{312} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{313} \dot{\theta}_1 \dot{d}_3 + h_{321} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{322} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{323} \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 + h_{331} \dot{d}_3 \dot{\theta}_1 + h_{332} \dot{d}_3 \dot{\theta}_2 + h_{333} \dot{d}_3 \dot{d}_3$$

$$h_3 = 0$$

L-E9) Matriz columna fuerza de gravedad

$$c_i = \sum_{j=1}^n (-m_j g U_{ji} r_j^j) \quad G = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$$

$$g = [0 \quad 0 \quad -g \quad 0]$$

$$r_1^1 = [Lc_1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$r_2^2 = [Lc_2 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$r_3^3 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$c_1 = \sum_{j=1}^3 (-m_j g U_{j1} r_j^j) = -m_1 g U_{11} r_1^1 - m_2 g U_{21} r_2^2 - m_3 g U_{31} r_3^3$$

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = \sum_{j=1}^3 (-m_j g U_{j2} r_j^j) = -m_1 g U_{12} r_1^1 - m_2 g U_{22} r_2^2 - m_3 g U_{32} r_3^3$$

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = \sum_{j=1}^3 (-m_j g U_{j3} r_j^j) = -m_1 g U_{13} r_1^1 - m_2 g U_{23} r_2^2 - m_3 g U_{33} r_3^3$$

$$c_3 = m_3 g$$

L-E10) Ecuaciones dinámicas del sistema

$$T_1 = (2a_2^2 m_3 + a_1^2 m_3 + 2Lc_2^2 m_2 + 4a_2^2 Lc_2 m_2 + a_1^2 m_2 + Lc_1^2 m_1 + 2a_1^2 Lc_1 m_1 + a_1^2 m_1) \theta_1'' + (2Lc_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2 + 2a_2^2 m_2) \theta_2'' + 2m_2 a_1 (Lc_2 + a_2) \theta_1' \theta_2'$$

$$T_2 = (2Lc_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2 + 2a_2^2 m_2) \theta_1'' + (2Lc_2^2 m_2 + 2a_2 a_2^2 m_2 + 4a_2 Lc_2 m_2) \theta_2'' + m_2 a_1 (Lc_2 + a_2) \theta_1'^2$$

$$F_3 = m_3 d_3'' + m_3 g$$

Control Dinámico

El control cinemático genera las trayectorias $q_d(t)$ que idealmente deberá seguir el robot, sin embargo diversos factores influyen (inercias, rozamientos, incertidumbre en los valores de los parámetros, etc) para que la trayectoria real $q(t)$ no coincida con la ideal.

El control dinámico es el encargado de minimizar la diferencia entre la trayectoria real y la ideal. Para lograrlo, se basa en el modelo dinámico del manipulador y la teoría de control.

La robótica moderna exige precisión y velocidad, el control dinámico debe diseñarse para satisfacer dichas exigencias atendiendo a un modelo no lineal, multivariable, con parámetros variables en el tiempo y con enlaces interdependientes.

En la práctica se asumen simplificaciones válidas que reducen el grado de complejidad y se obtienen resultados aceptables.

Si se desea obtener un resultado superior, el modelo aumenta su complejidad y también aumenta el costo computacional.

Control Monoarticular

Se basa en suponer que cada articulación está desacoplada de las demás, es decir, el movimiento de una de ellas no influye en las demás, como es de esperar, este planteamiento no es real pero si definimos el factor de reducción K , se comprueba que para valores elevados de K se puede suponer a cada eslabón como independiente a continuación se enumeran algunas características positivas del control monoarticular:

- Cada eje se controla individualmente
- Los modelos matemáticos son más sencillos
- Se deben diseñar n controladores lineales independientes

Sin embargo, hay que llegar a una solución de compromiso en el valor de K ya que con K aumentan las fricciones, disminuye la velocidad del eslabón y se introducen inexactitudes en la transmisión.

Una vez supuesto el sistema como desacoplado, se procede al diseño del regulador más adecuado para cada articulación. Lo más frecuente es usar controladores PD y PID y variaciones de estos de forma tal de cumplir con las especificaciones propuestas y garantizar el correcto funcionamiento ante perturbaciones e incertidumbre en el conocimiento de las inercias y fricciones.

A continuación se describen algunas características de los controladores comúnmente usados:

Control PID:

- El error en estado estacionario es nulo ante una perturbación de tipo escalón.
- Se garantiza coincidencia al final de la trayectoria.
- La trayectoria real es distinta de la ideal, existe error de seguimiento. Para solucionarlo se utiliza el control PID con Prealimentación.
- El uso de una acción integral elimina el error en régimen permanente pero empeora la respuesta dinámica.

Control PID con prealimentación:

- Permite obtener un error teórico de seguimiento nulo.
- Se necesita un conocimiento muy preciso de la articulación para cumplir con lo anterior.

Control PD con compensación de gravedad

- No se utiliza una acción integral para anular el error en régimen permanente.
- En régimen permanente las perturbaciones solo dependen de la gravedad ya que q' y q'' son nulas.
- Se utiliza la matriz G para compensar el valor de las perturbaciones en régimen permanente.
- La matriz G solo depende de la gravedad, su cálculo es relativamente sencillo.
- Al no tener acción integradora, no influye en la respuesta dinámica.

Control Multiarticular

La suposición de considerar a cada eslabón como desacoplado e independiente de los demás y que solo depende de sus propias características, no siempre es aceptable.

Las técnicas de control acopladas tienen en cuenta el modelo real del robot para a partir de este conocimiento, desacoplarlo para poder aplicar las técnicas antes comentadas.

Una técnica usual para lograr lo anterior se conoce como **Desacoplamiento por inversión del modelo** que se basa en hallar un diagrama en bloques equivalente para a partir de allí considerar a cada eslabón como independiente y desacoplado.

Un inconveniente es que la inversión del modelo exige una constante evaluación en tiempo real de la ley de control.

Control adaptativo

La técnica por desacople por inversión exige que se conozca perfectamente el modelo dinámico del robot, así en ausencia de perturbación la trayectoria real coincide con la deseada.

En las mayorías de los casos no es posible conocer con exactitud dicho modelo, además el cálculo continuo que necesita el desacople por inversión en tiempo real lo torna lento.

En resumen, los controladores descriptos anteriormente se diseñan para trabajar con sistemas de parámetros constantes los cuales deben ser conocidos y dichos controladores se ajustan para unas determinadas condiciones intermedias de trabajo degradando el funcionamiento global si nos alejamos de dichas condiciones

La técnica del control adaptativo es útil aun en aquellos casos en que conociendo el modelo dinámico, este cambia continuamente (punto de funcionamiento cambiante) al cambiar las condiciones de trabajo.

Así, un control adaptativo es aquel que puede cambiar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones.

La idea básica del control adaptativo es modificar en tiempo real los parámetros del controlador de acuerdo al comportamiento instantáneo del sistema.

A continuación se listan algunos controladores adaptativos:

Control adaptativo por planificación de ganancias GS:

Compara el comportamiento del sistema real del deseado, el error se utiliza para modificar los parámetros del regulador.

Una vez elegido el controlador, se ajustan los parámetros del mismo para un número determinado de condiciones de trabajo (carga y coordenadas), a mayor grado de libertad mayor cantidad de puntos de trabajo.

Control adaptativo con modelo de referencia MRAC:

Se selecciona una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo de segundo orden como modelo de referencia para cada grado de libertad del robot.

El manipulador se controla ajustando las ganancias de realimentación de posición y velocidad para seguir el modelo.

Control de par calculado adaptativo:

La técnica por inversión del modelo exige que se conozca con exactitud el modelo dinámico (y además estos varían con la ubicación) y también calcular continuamente en tiempo real una expresión del torque. Para solucionar estos inconvenientes, el control por par calculado adaptativo trata de identificar en línea en forma paramétrica las matrices del modelo dinámico.

El inconveniente es que la convergencia no está asegurada y puede tornar al sistema inestable.

Modelo Dinámico para Robot Scara de 3 gdl realizado con Matlab

El modelo dinámico de cualquier manipulador puede expresarse como

$$\tau = M(q)\ddot{q} + G(q) + V(\dot{q}) + F(\dot{q})$$

donde τ , G , V , F son vectores de n elementos, y $M(q)$ es una matriz de $n \times n$ (4×4) denominada matriz de masas. El término $G(q)$ representa los efectos gravitatorios y depende de las variables articulares. $V(\dot{q})$ representa los pares generados por las fuerzas centrífugas y de Coriolis y en el caso de que la velocidad sea pequeña es despreciable. Por último el término $F(\dot{q})$ se denomina vector de fricciones y en el análisis realizado posteriormente no se considera. La matriz de masas $M(q)$ es una matriz simétrica, definida positiva y está acotada superiormente e inferiormente ya que depende de las variables q a través de funciones trigonométricas. Un aspecto importante de dicha matriz es que es siempre invertible y su inversa es también definida positiva y acotada. El vector $G(q)$ contiene los términos que dependen de la gravedad g , y también depende de las variables articulares a través de senos y cosenos por lo que está acotado. El término de fricciones $F(\dot{q})$ es complejo y normalmente difícil de aproximar. A continuación comenzamos con unas simples simulaciones utilizando las funciones de la biblioteca Hemero del Simulink, las cuales nos permiten obtener los torques de los dos primeros eslabones y la fuerza del tercer eslabón. Luego de eso se obtienen las matrices de Inercia, Coriolis y Gravedad.

```
>> syms t1 t2 d3 real          %Variables Articulares t1 y t2 de Revolución; d3 Prismática
>> syms td1 td2 dd3 real      %Velocidades de las articulaciones
>> syms tdd1 tdd2 ddd3 real   %Aceleraciones de las articulaciones
>> syms l1 l2 l3 real         %Longitud de los eslabones ó enlaces
>> syms m1 m2 m3 real         %Masas de los eslabones ó enlaces
>> syms g real                %Representa la gravedad

>> %Se tomo a las masas concentradas en sus respectivos centros de gravedad
>> %de manera que los tensores de inercia se hagan 0

>> q=[t1 t2 -d3];            %Vector de variables articulares
>> qd=[td1 td2 dd3];         %Vector de velocidades articulares
>> qdd=[tdd1 tdd2 ddd3];     %Vector de aceleraciones articulares
>> gravedad=[0;0;g];         %Vector de gravedad, sólo influye en el eje z

>> %La matriz "dyn" debe contener los parámetros D-H
>> %junto con otros parámetros dinámicos

>> dyn=[0 0 t1 l1 0 m1 l1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
        0 l2 t2 0 0 m2 l2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
        0 l3 0 d3 1 m3 0 0 -l3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0];

>> %La función rne calcula el modelo dinámico por el método de Newton-Euler

>> tau=rne(dyn,q,qd,qdd,gravedad);
>> tau=simple(tau)

tau =[T1      T2      F3]

T1=2*l2^2*m2*tdd1+l2^2*m2*tdd2+2*l2^2*m2*cos(t2)*tdd1+l3^2*m3*tdd1+l3^2*m3*tdd2+2*l3*m3*cos(t2)*tdd1*l2+
l1^2*m1*tdd1-2*l2*sin(t2)*m3*l3*td1*td2-l2*sin(t2)*m3*l3*td2^2+m3*tdd1*l2^2-2*sin(t2)*m2*l2^2*td1*td2-
sin(t2)*m2*l2^2*td2^2+l2*cos(t2)*m3*l3*tdd2+cos(t2)*m2*l2^2*tdd2,

T2=l2^2*m2*tdd1+l2^2*m2*tdd2+l2^2*m2*sin(t2)*td1^2+l2^2*m2*cos(t2)*tdd1+l3^2*m3*tdd1+l3^2*m3*tdd2+l3*m3*
sin(t2)*td1^2+l3*m3*cos(t2)*tdd1*l2,

F3=m3*(-g+ddd3)

>> %Las dos primeras columnas representan los Torques 1 y 2 mientras que la
>> %tercera es una Fuerza
>> %A continuación vamos a obtener las matrices de Inercia, Coriolis y Gravedad
```



```
>> M=inertia(dyn,q)      %Matriz de Inercia
```

```
M =[m11    m12    m13
     m21    m22    m23
     m31    m32    m33]
```

```
m11=l2*m2*(l2+cos(t2)*l2)+l3*m3*(l3+cos(t2)*l2)+l1^2*m1+l2*(sin(t2)*(m3*sin(t2)*l2+m2*sin(t2)*l2)+cos(t2)*(m3*(l3+cos(t2)*l2)+m2*(l2+cos(t2)*l2))),
```

```
m12=l2*m2*(l2+cos(t2)*l2)+l3*m3*(l3+cos(t2)*l2),
```

```
m13=0
```

```
m21=l2^2*m2+l3^2*m3+l2*cos(t2)*(m3*l3+m2*l2),    m22=l2^2*m2+l3^2*m3,    m23=0
```

```
m31=0                                m32=0                                m33=m3
```

```
>> V=coriolis(dyn,q,qd)      %Matriz de fuerzas de Coriolis y Centrípetas V(q,qd)
```

```
V =[V1
     V2
     V3]
```

```
V1=l2^2*m2*sin(t2)*td1^2+l3*m3*sin(t2)*td1^2+l2*(sin(t2)*(m3*(-(td1+td2)^2*l3-cos(t2)*td1^2*l2)+m2*(-(td1+td2)^2*l2-cos(t2)*td1^2*l2))+cos(t2)*(m3*sin(t2)*td1^2*l2+m2*sin(t2)*td1^2*l2)),
```

```
V2=l2^2*m2*sin(t2)*td1^2+l3*m3*sin(t2)*td1^2*l2,
```

```
V3=0
```

```
>> G=gravity(dyn,q,gravedad)  %Matriz de Gravedad G(q)
```

```
G = [ 0, 0, -m3*g]
```

Con el modelo dinámico se relacionan los pares de control de las articulaciones con las variables articulares. Se puede utilizar dicho modelo para obtener las variables articulares ante la aplicación de unos determinados pares.

$$\ddot{q} = M^{-1}(q) [\tau - V(q, \dot{q}) - G(q)]$$

A partir de esta ecuación se pueden obtener las trayectorias articulares realizando la integración de la misma. Las condiciones iniciales serían:

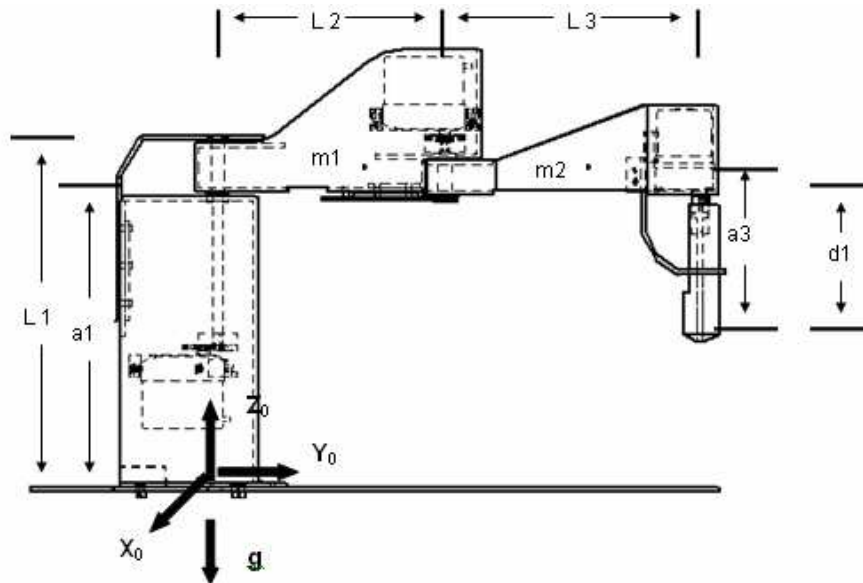
$$q(0) = q_0 \quad \dot{q}(0) = 0 \quad \ddot{q}(0) = 0$$

En los bloques de la matriz inversa de masas, términos gravitatorios y centrífugos se deben colocar los parámetros propios del Scara; nosotros por simple comparación con el SCORA-ER 14 de Eshed Robotec decidimos utilizar los siguientes datos:

```
l1=50cm    l2=27cm    l3=23cm
m1=10kg    m2=7kg     m3=3kg
```

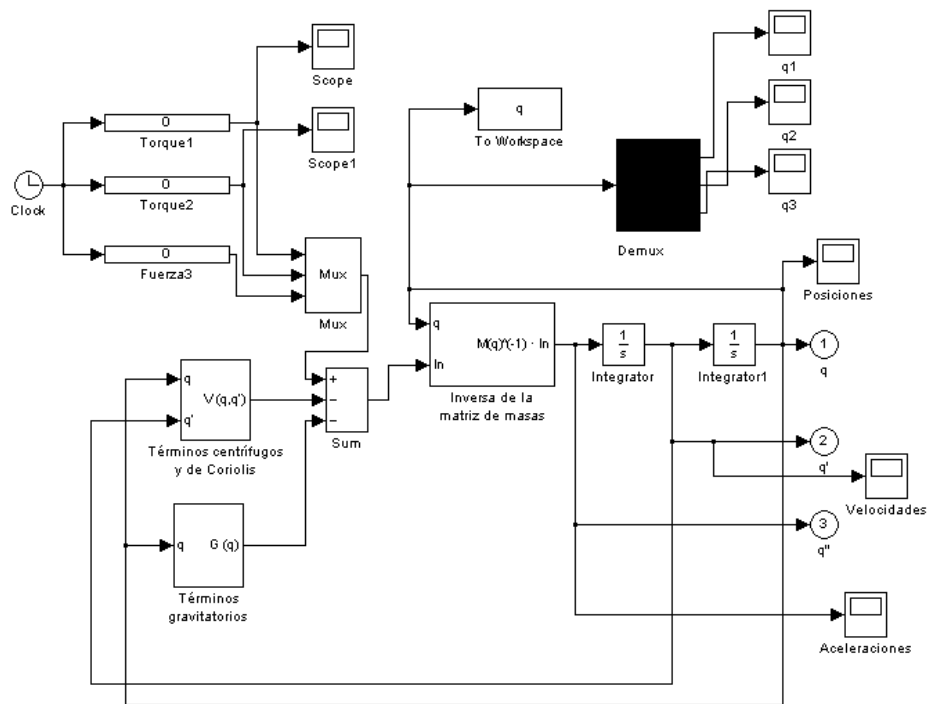
```
θ1= 288°=5.026rad    θ2=218°=3.8048rad    d1=d3=15cm
```

Variables Articulares



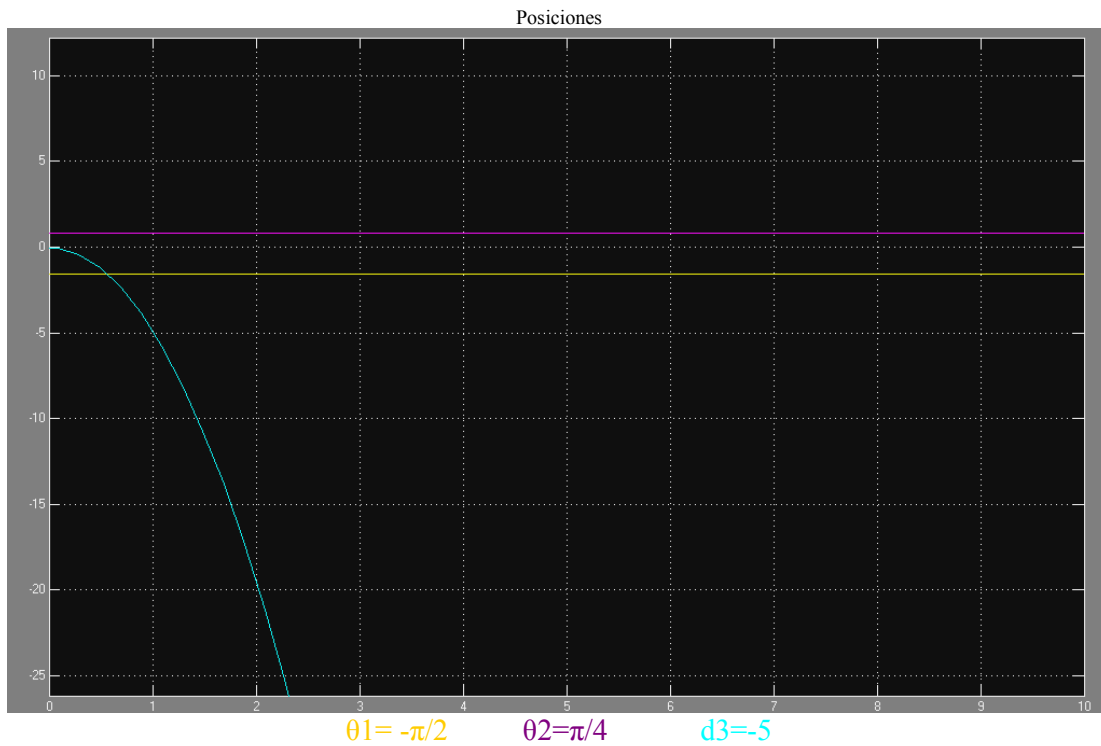
A continuación tenemos el diagrama en bloques que representa a la ecuación anterior que no es más que el comportamiento dinámico realizado con el Simulink de Matlab.

Diagrama en Bloques sin Fricciones Viscosas



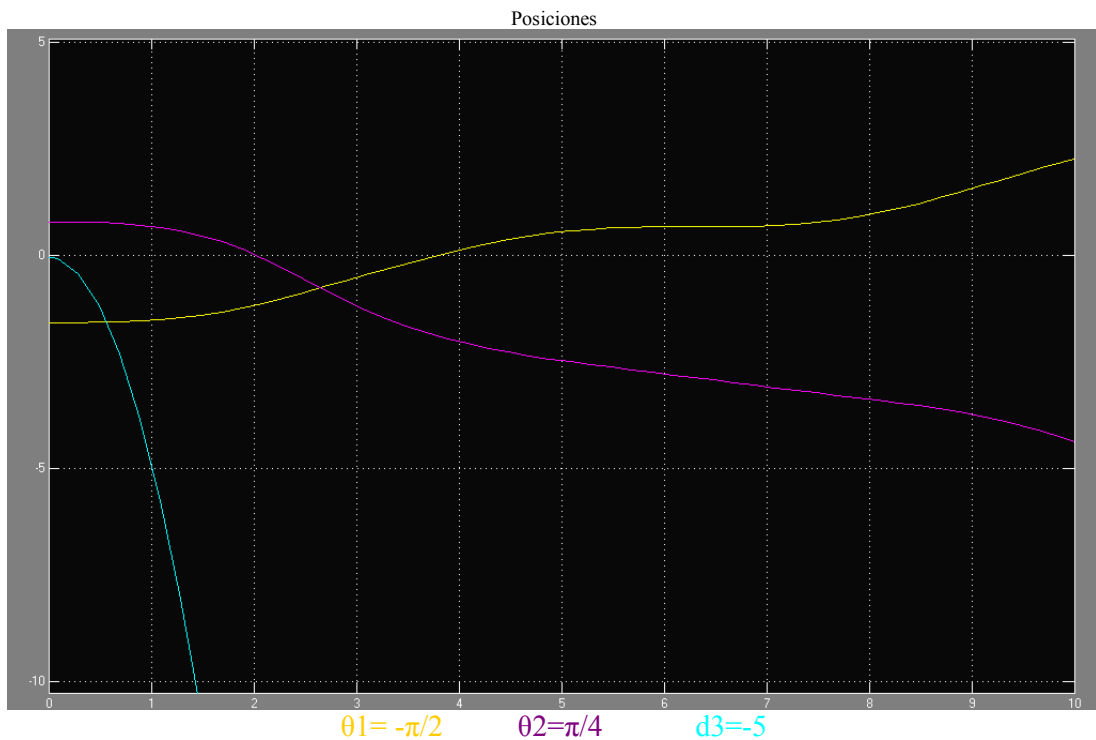
A continuación veremos distintas simulaciones para el diagrama en bloques antes mostrado, donde podremos notar como varían las articulaciones del Scara de acuerdo a distintas condiciones tanto iniciales como de torques y fuerzas aplicadas.

Caso 1: $\tau_1=0$, $\tau_2=0$, $F_3=0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3]=[-\pi/2, \pi/4, -5]$

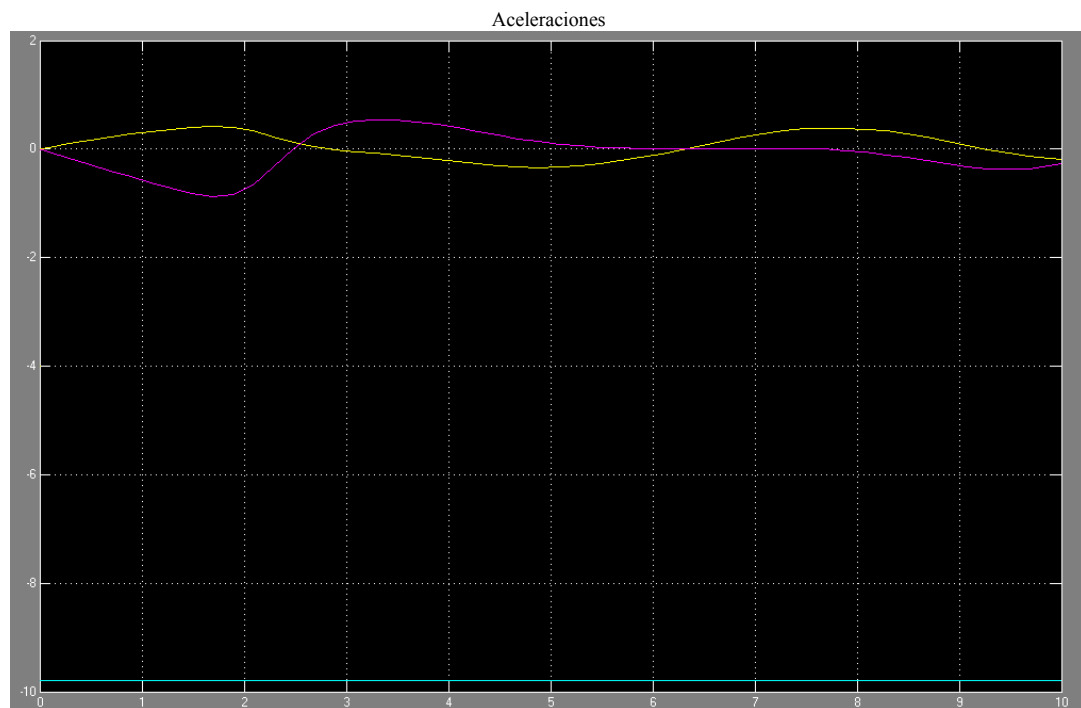
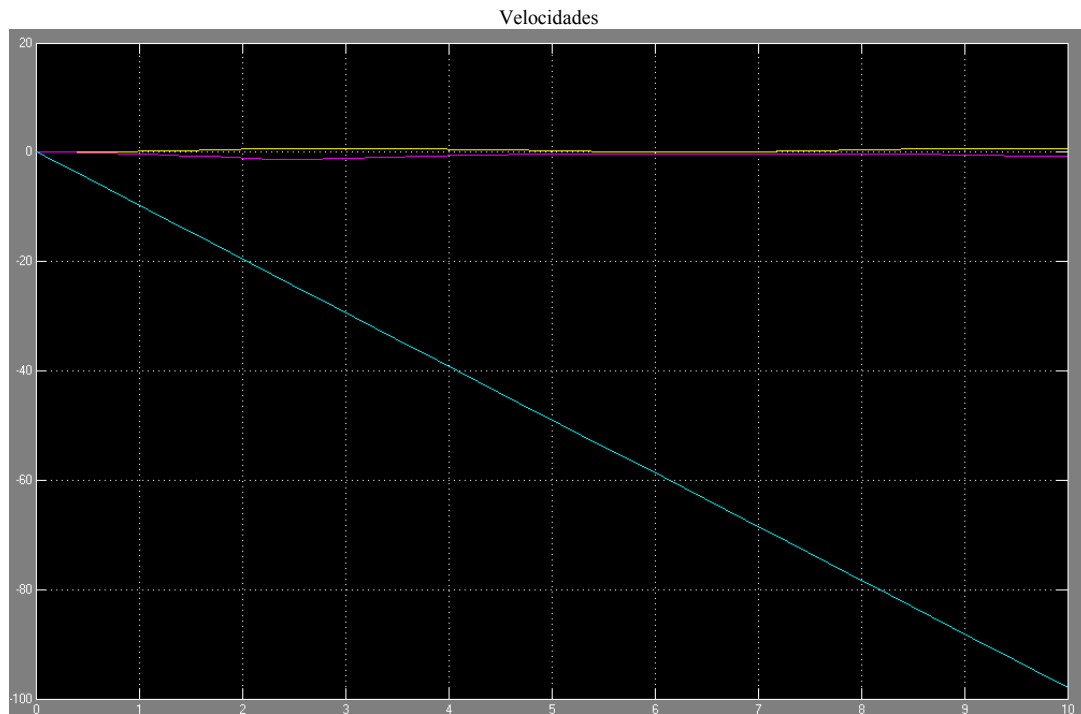


Notamos como las posiciones articulares de θ_1 y θ_2 se mantienen constantes mientras que d_3 cae por acción propia de la gravedad.

Caso 2: $\tau_1 = \sin(u)$, $\tau_2 = 0$, $F_3 = 0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3] = [-\pi/2, \pi/4, -5]$

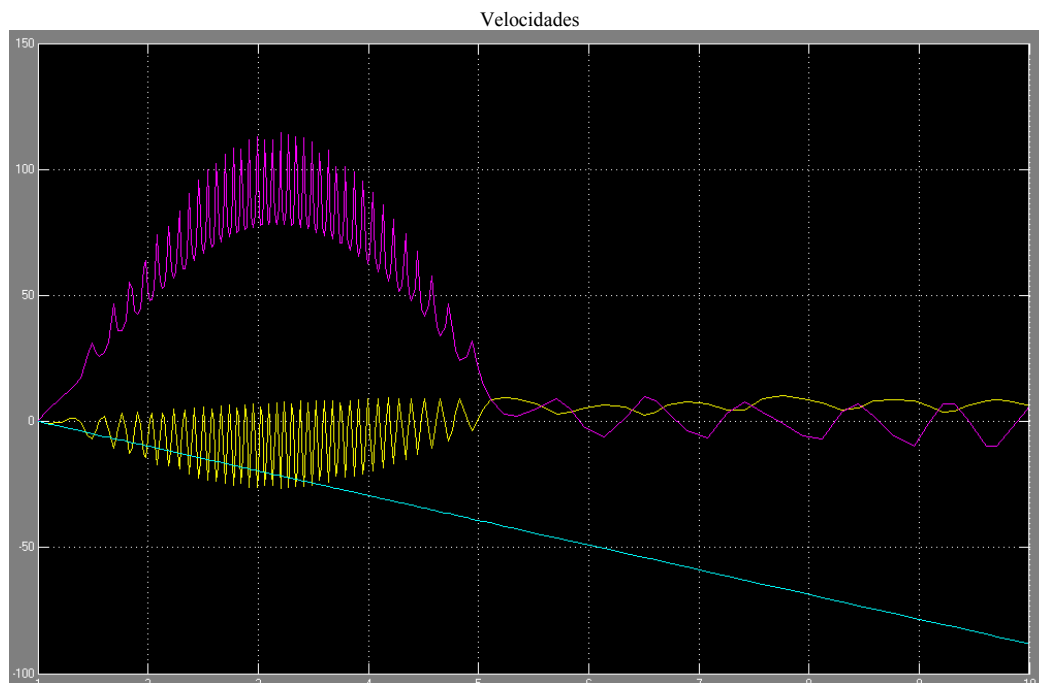
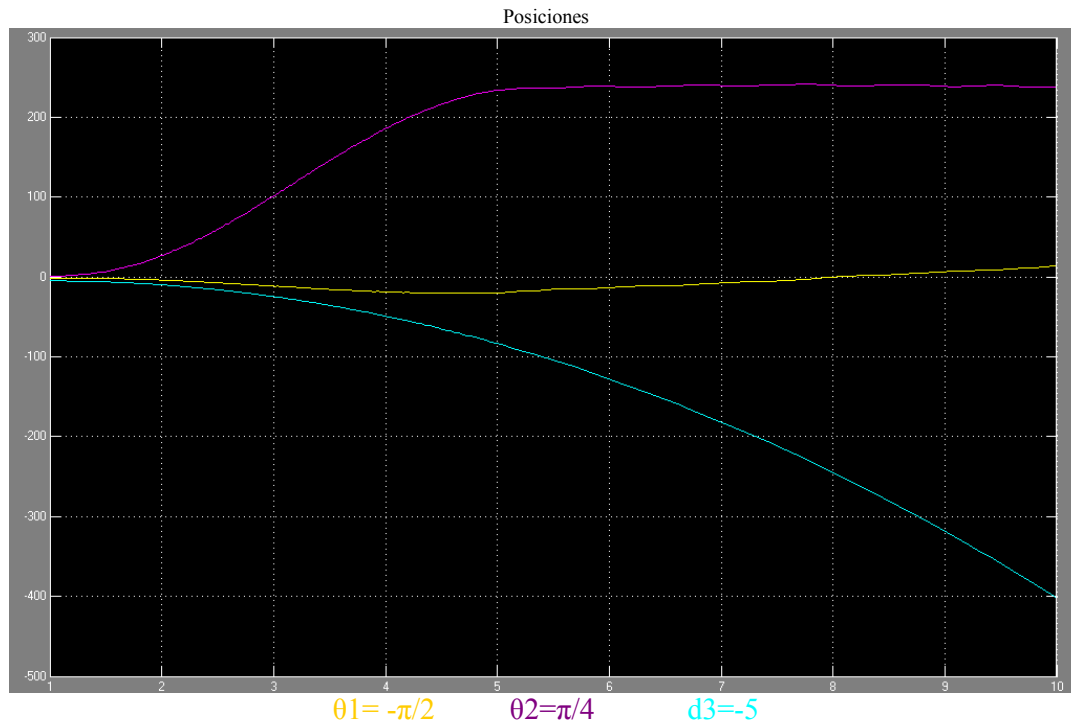


En este caso con el $\tau = \sin(u)$ vemos como comienza a cobrar interés las trayectorias θ_1 y θ_2 respecto de sus posiciones iniciales, mientras que d_3 no sufre alteraciones ya que se encuentra desacoplada de las demás.



En las dos últimas figuras representamos sólo de manera ilustrativa como se verían las velocidades y aceleraciones que son la derivada primera y segunda respectivamente de la posición. Para el caso de la aceleración sobre el último eslabón comprobamos como ésta se mantiene constante.

Caso 3: $\tau_1=15*(e^{-a})$, $\tau_2=30*\text{sen}(u)$, $F_3=0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \theta_2 d_3]=[-\pi/2, \pi/4, -5]$



Aceleraciones

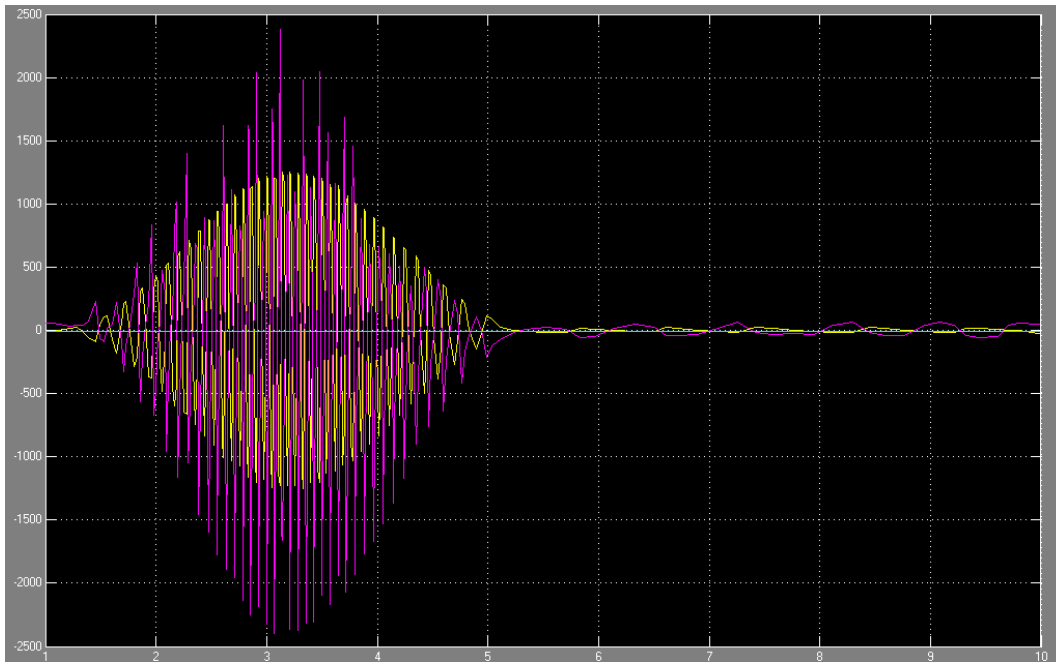
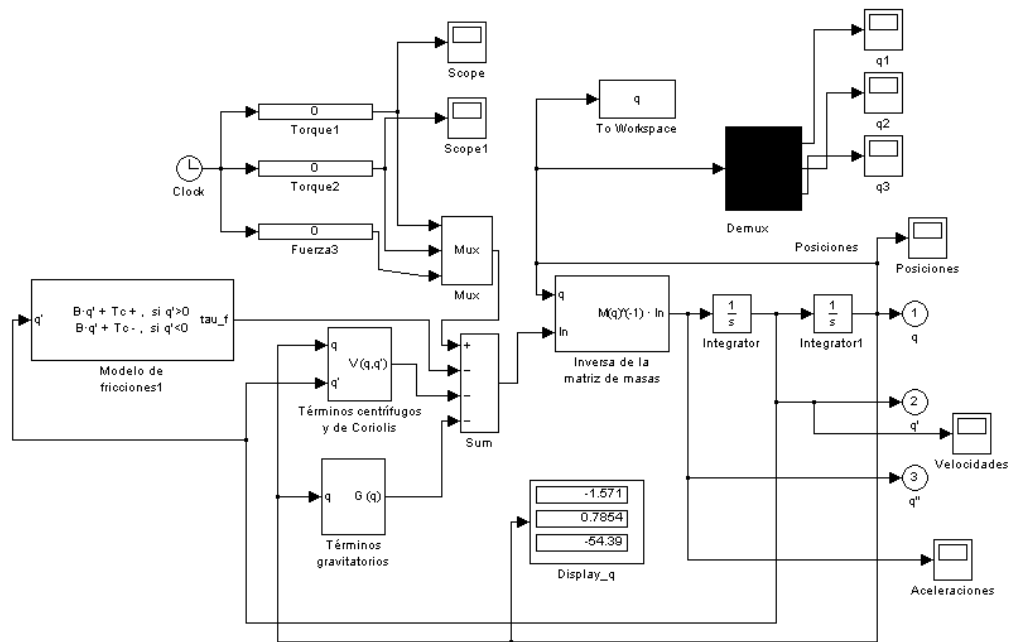
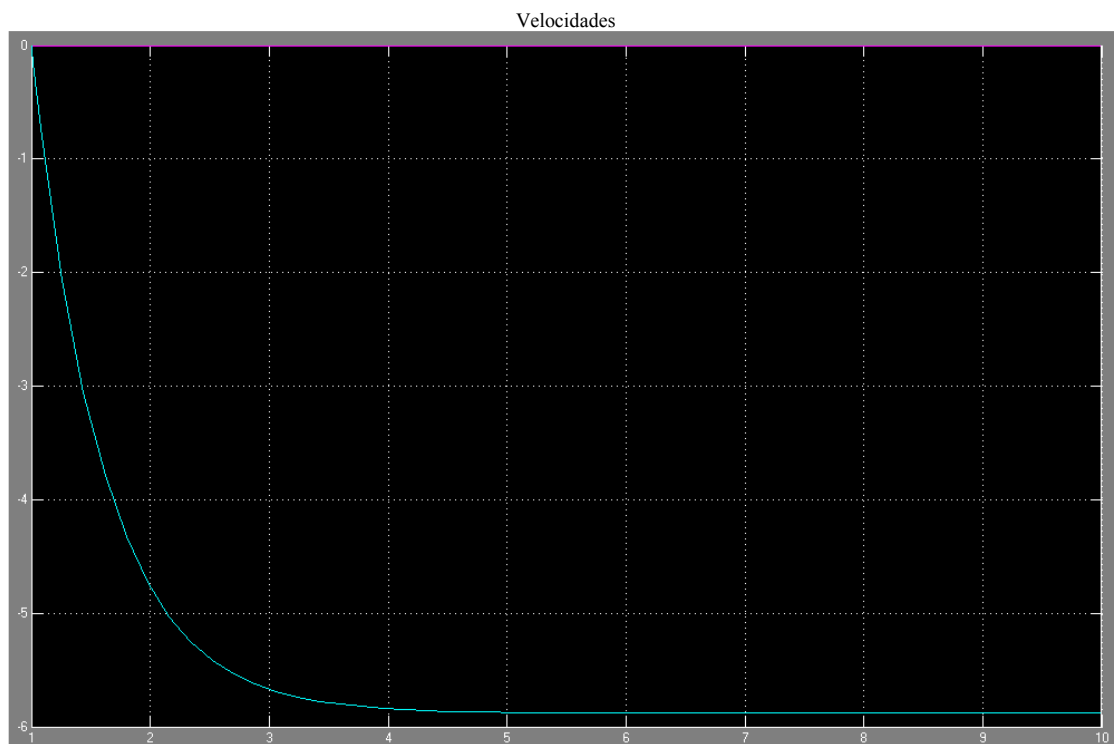
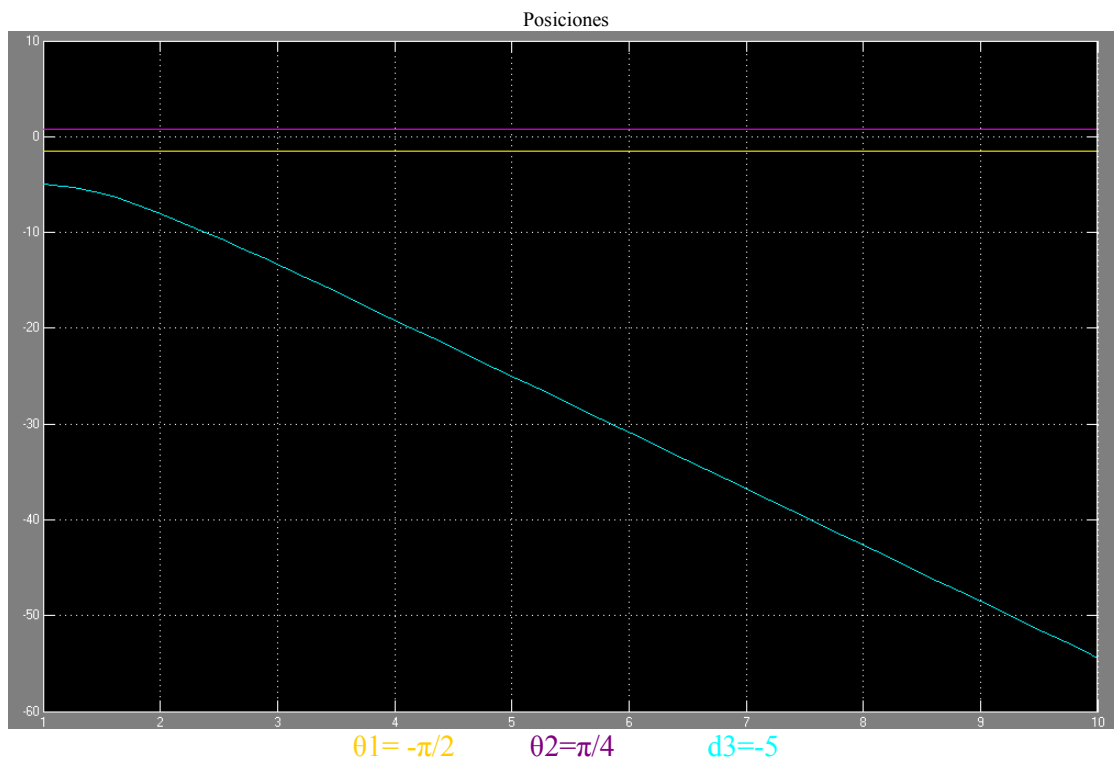


Diagrama en Bloques con Fricciones Viscosas

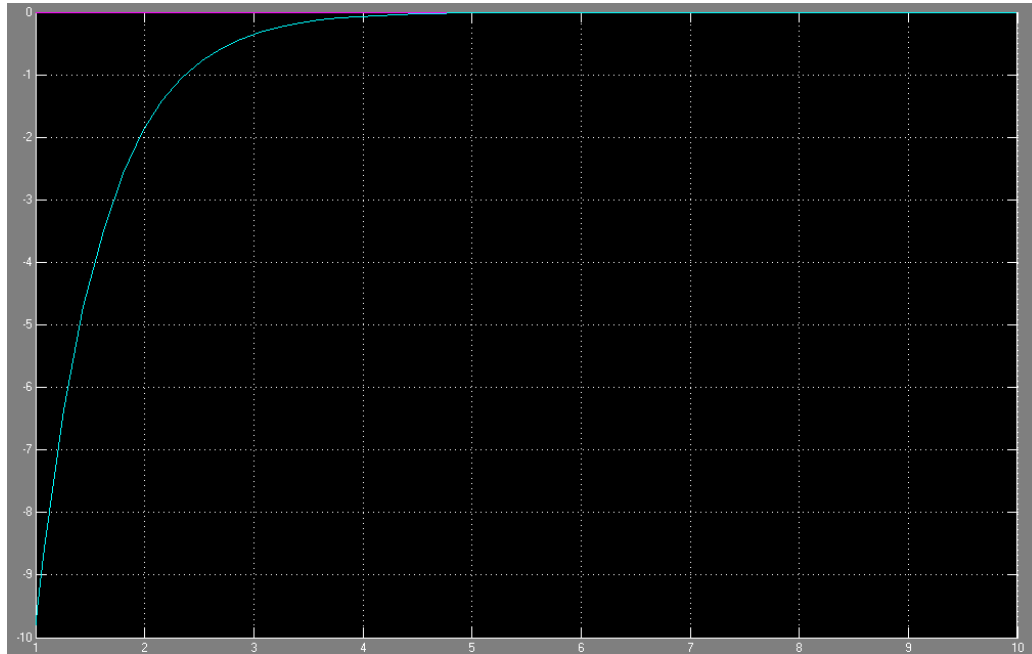


Aquí se han agregado dos bloques más a diferencia de las simulaciones anteriores; uno de ellos es un simple display donde podemos ver la evolución de las posiciones iniciales, en nuestro caso $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3] = [-\pi/2, \pi/4, -5]$. El otro bloque que es de mayor importancia para analizar en este caso, representa a las fricciones viscosas y de coulomb referidas a los motores que se colocarán en el scara. Este bloque forma parte de la ecuación dinámica de cualquier manipulador, generalmente y para el análisis cualitativo se suele despreciarlo.

Caso 1: $\tau_1=0, \tau_2=0, F_3=0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3] = [-\pi/2, \pi/4, -5]$



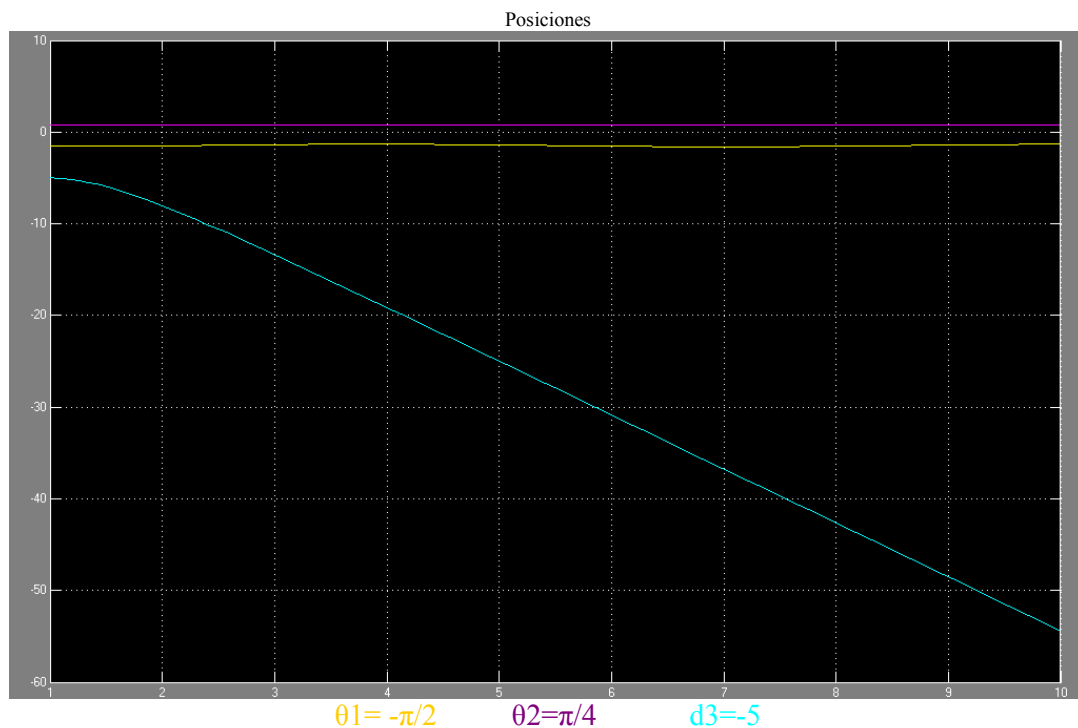
Aceleraciones

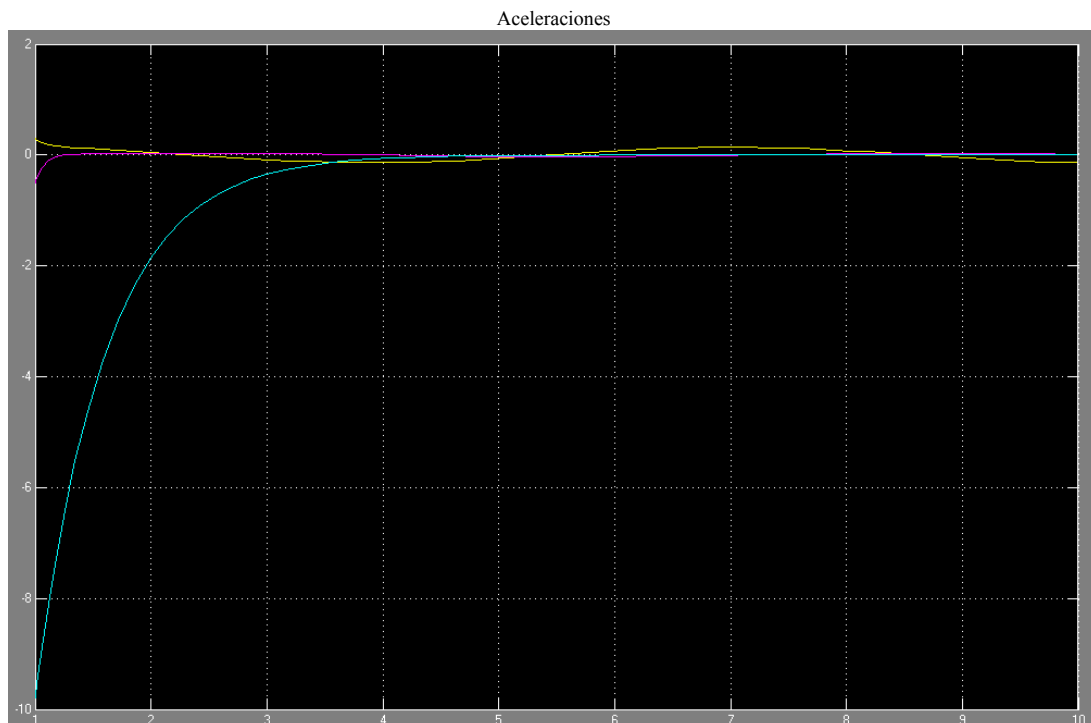
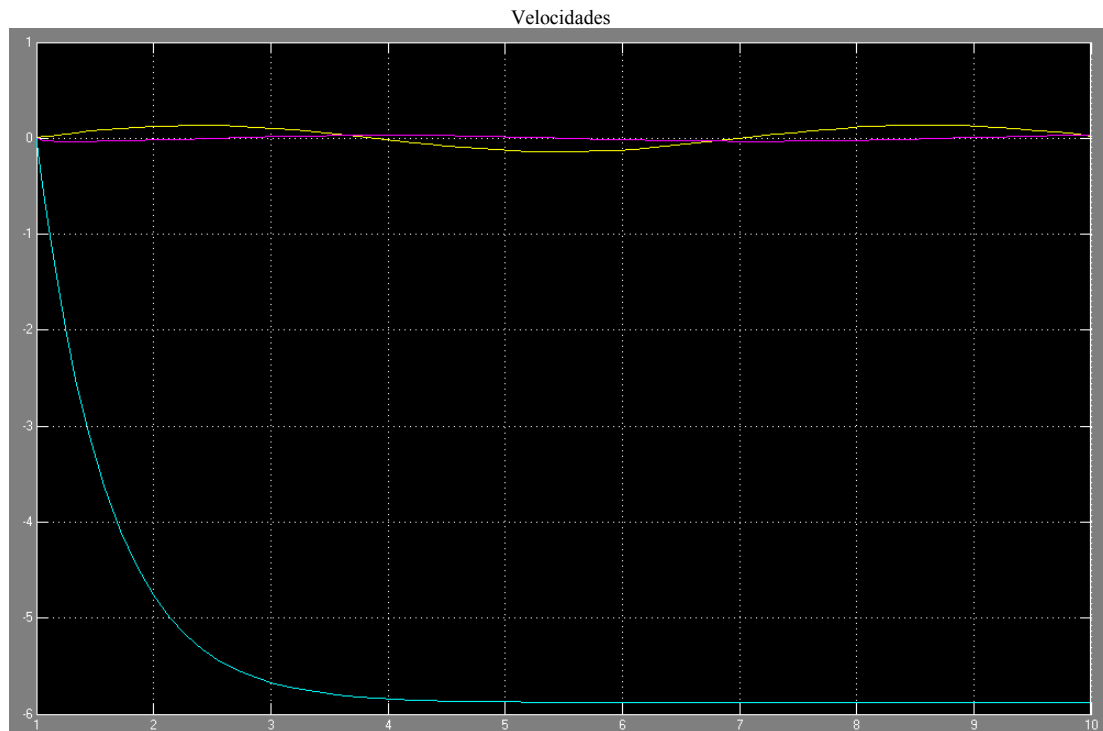


Podemos comprobar como debido al efecto del agregado de las fricciones viscosas, el último eslabón del robot se deslizará inicialmente por efecto de la gravedad para luego comenzar a detenerse; similar es el efecto producido en un péndulo.

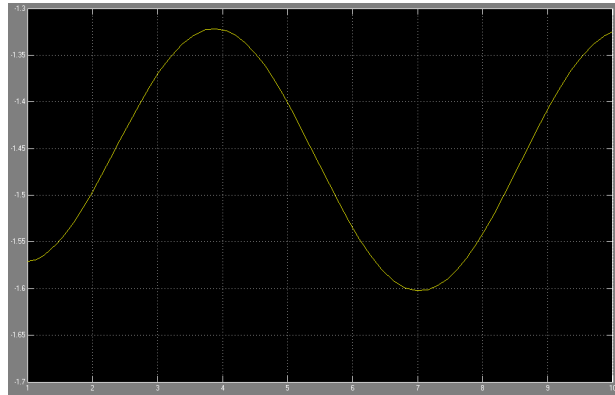
Lo dicho anteriormente lo verificamos con ambas gráficas, en la de velocidad vemos como esta se va reduciendo exponencialmente, mientras que la aceleración muestra su efecto de forma inversa, comienza en -9.8m/seg^2 hasta llegar a anularse.

Caso 2: $\tau_1 = \sin(u)$, $\tau_2 = 0$, $F_3 = 0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3] = [-\pi/2, \pi/4, -5]$

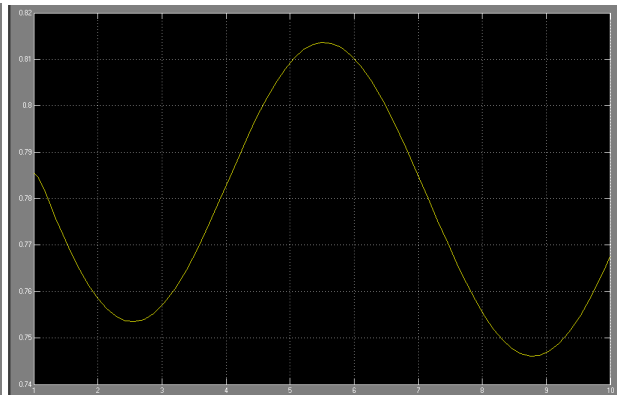




En los gráficos de las posiciones no se llega a notar, pero con la aplicación del $\tau_1 = \sin(u)$ tanto θ_1 como θ_2 se comportan como una función senoidal, comenzando cada una en su valor inicial. A continuación lo veremos en más detalle.

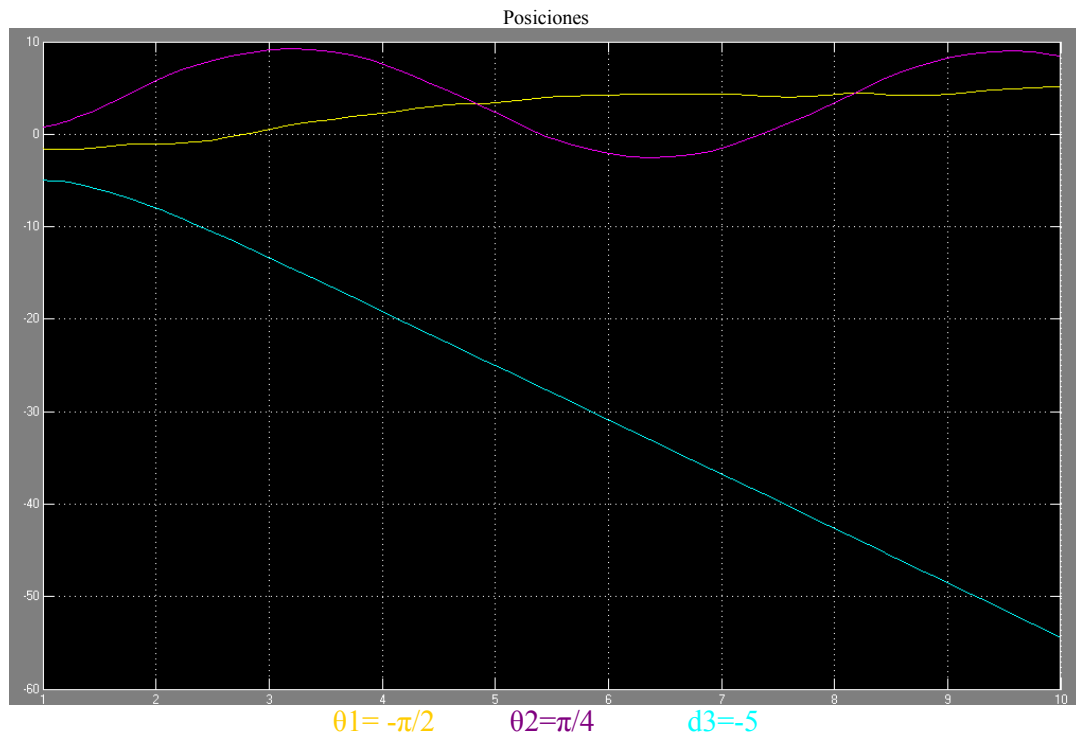


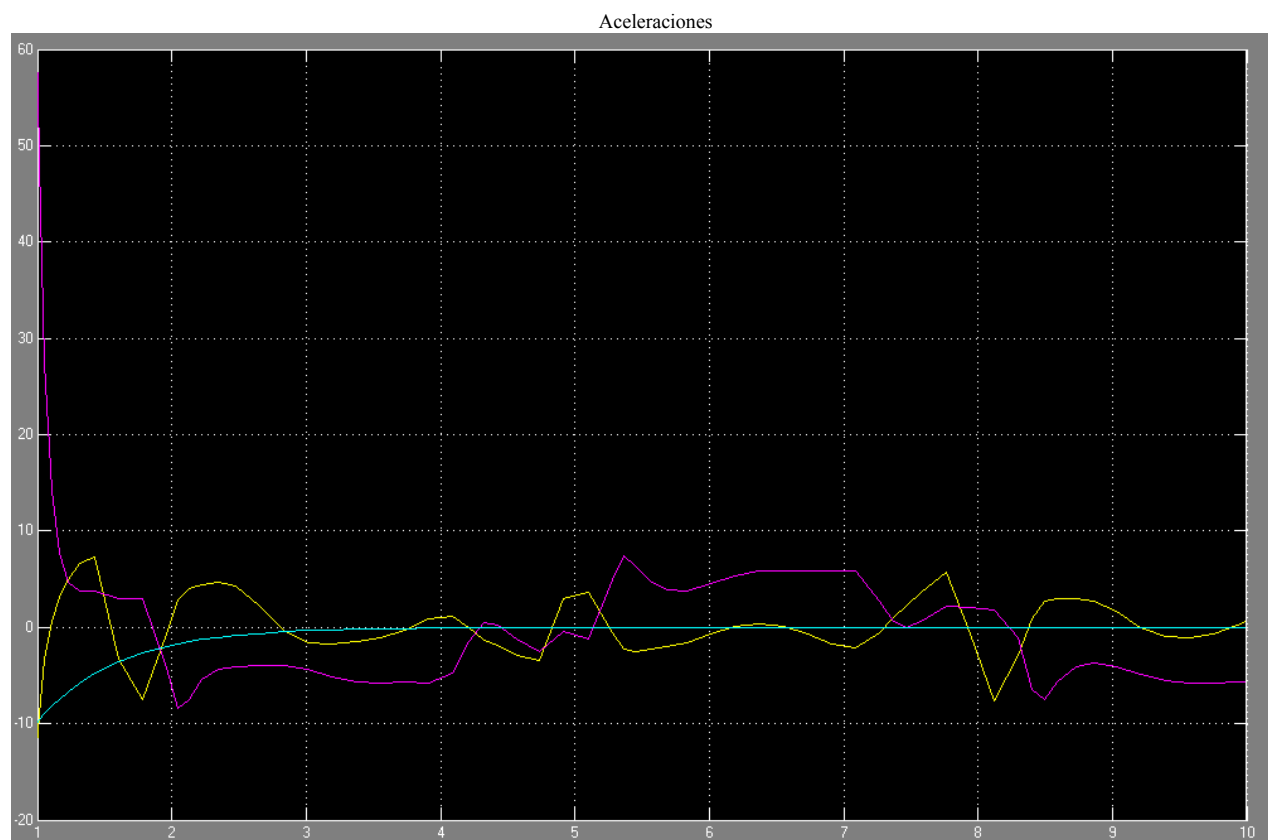
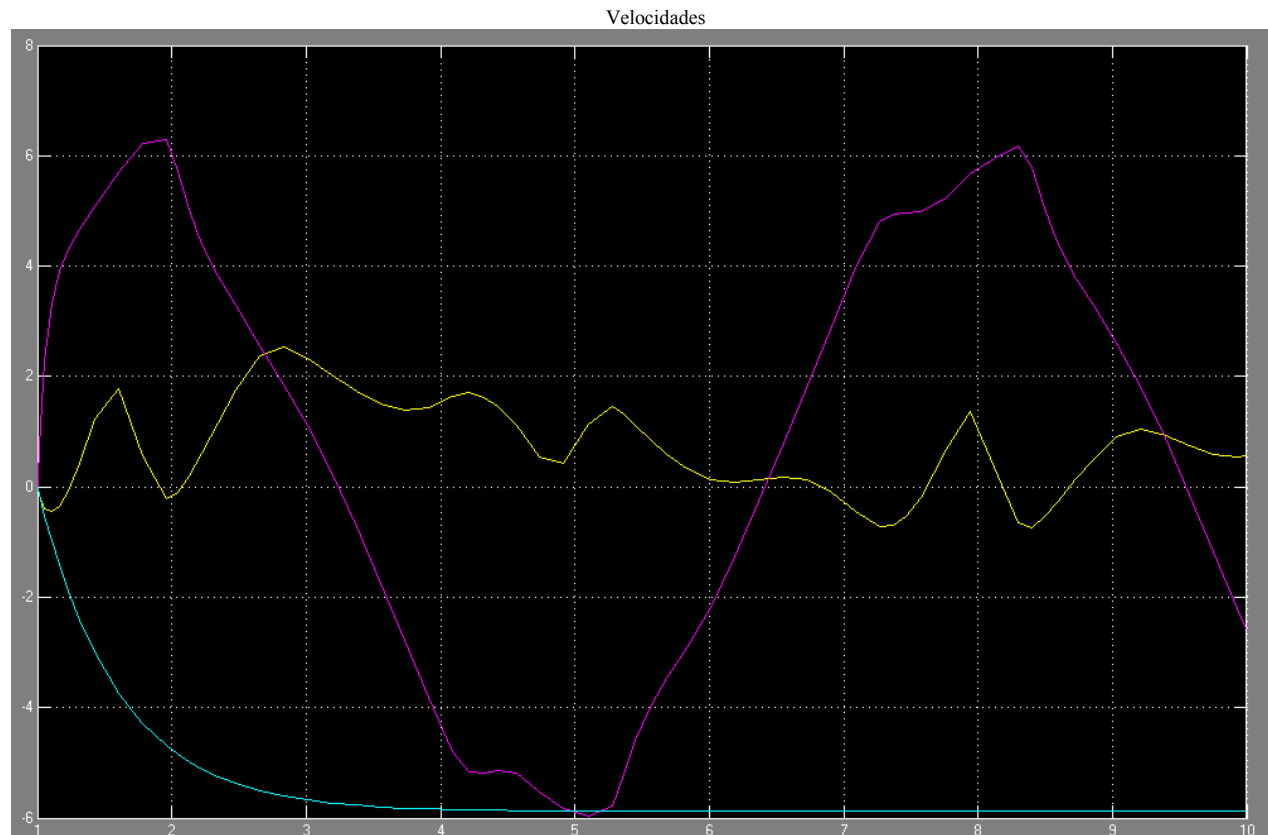
Siendo su posición inicial $\theta_1 = -\pi/2 = -1.57\text{rad}$, varía entre $-1.32\text{rad} < \theta_1 < -1.6\text{rad}$



Siendo su posición inicial $\theta_2 = \pi/4 = 0.785\text{rad}$, varía entre $0.753\text{rad} < \theta_2 < 0.814\text{rad}$

Caso 3: $\tau_1 = 15 * (e^{-a})$, $\tau_2 = 30 * \text{sen}(u)$, $F_3 = 0$ y condiciones iniciales $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3] = [-\pi/2, \pi/4, -5]$





ESTRATEGIAS DE CONTROL

Introducción

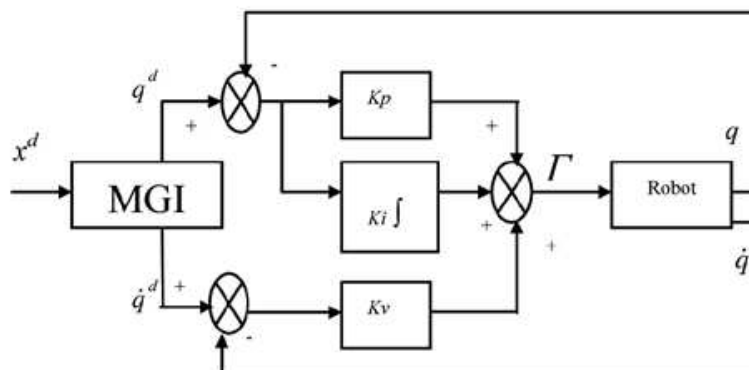
Muchas estrategias han sido utilizadas para el control de robots en los últimos años. Los robots industriales utilizan normalmente el control clásico tipo **PID**. Pero los brazos manipuladores, los cuales se componen de varias articulaciones unidas entre sí, poseen una dinámica altamente no lineal con un fuerte acoplamiento entre sus respectivas articulaciones. Esto complica la tarea de un simple controlador PID así como su sintonización, sobre todo, con consignas a altas velocidades o aceleraciones. Mejores soluciones han sido entonces propuestas con controladores basados en el modelo del robot, los cuales utilizan un modelo matemático del mecanismo con el fin de compensar los términos dinámicos presentes.

En los brazos robotizados industriales la estrategia de control más común que tiene en cuenta el modelo es el **control por par computado**. Este control es relativamente fácil de implementar y provee resultados satisfactorios en cuanto a errores de seguimiento y robustez. Pero las incertidumbres presentes en el modelo, debido a parámetros mal estimados o no modelados, dificultan el diseño de un eficaz algoritmo basado en un modelo matemático exacto. Por esto, otros tipos de soluciones han sido diseñados con el fin de darle al sistema la robustez deseada.

En la pasada década, el **control predictivo** (*MPC-Model Predictive Control*) se posicionó como una estrategia efectiva para un gran número de procesos. Muchos trabajos han mostrado que el control predictivo es una opción interesante para el manejo de diversos procesos, al realizarse una optimización del pronóstico del comportamiento del sistema. Este control provee buenas respuestas en términos de rapidez, rechazo de perturbaciones y respuesta frente a errores en los parámetros de la planta. Sin embargo, aunque un significativo número de aplicaciones industriales pueden ser encontradas en procesos químicos o de fabricación de alimentos, donde las dinámicas a tratar son relativamente lentas, pocos resultados pueden encontrarse en el control de procesos no lineales y con alta dinámica, como es el caso de los robots manipuladores, donde, además, se manejan órdenes de pocos milisegundos.

Control PID

El controlador PID aplicado al robot SCARA se muestra en la siguiente figura. Dicho controlador ha sido definido en el espacio operacional, donde las posiciones articulares deseadas son obtenidas a partir del modelo geométrico inverso (MGI). Siguiendo un procedimiento básico de sintonizado, se fijan las ganancias de los parámetros para cada articulación.



Cuya ley de control está definida por:

$$\Gamma = -kp(qd - q) - kv(qd - q) - ki \int (qd - q) dt$$

Donde Γ es el par de control, q^d y \dot{q}^d son la posición y velocidad deseadas respectivamente, q y \dot{q} son la posición y velocidad medidas, kp , kd , ki son matrices diagonales de $(n \times n)$ cuyos elementos genéricos son las ganancias k_{pj} proporcional, k_{dj} derivativa y k_{ij} integral.

Linealización y desacoplado del modelo dinámico de un robot

El comportamiento de un brazo robot rígido de n grados de libertad es regido por la siguiente ecuación:

$$\Gamma = A(q)q'' + C(q, q')q' + g(q)$$

Donde Γ es el par aplicado; $A(q)$ es la matriz de inercia, simétrica y definida positiva; $C(q, q')$ es la matriz que incluye las fuerzas de Coriolis y centrífugas; y $g(q)$ es el vector de fuerzas gravitacionales. La posición articular está dada por q , la velocidad por q' y la aceleración por q'' . Esta ecuación dinámica puede también escribirse de manera compacta como:

$$\Gamma = A(q)q'' + H(q, q')$$

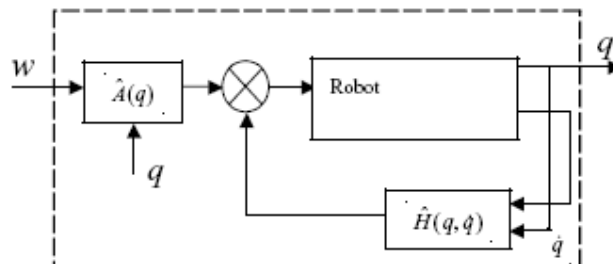
donde H incluye las fuerzas de Coriolis, centrífugas y gravitacionales. Los términos dinámicos de la ecuación son altamente no lineales y, además, acoplados. El primer paso será entonces linealizar y desacoplar el modelo dinámico del robot. La posibilidad de encontrar dicho linealizador está facilitada por la forma particular del sistema dinámico. En efecto, este es lineal en el control Γ y la matriz de rango pleno $A(q)$ puede ser invertida para cualquier configuración de robot. Se propone entonces la siguiente linealización:

$$\Gamma = \hat{A}(q)u + \hat{H}(q, q')$$

donde u representa un nuevo vector de control \hat{A} y \hat{H} son las estimaciones de los respectivos términos del robot real. En ausencia de perturbaciones y cuando el modelo dinámico es perfectamente conocido, $\hat{A} = A$ y $\hat{H} = H$. En este caso u tiene la forma de la aceleración articular:

$$u = q''$$

Esto es equivalente a un sistema desacoplado que se representa por un sistema lineal de segundo orden. En otras palabras, el componente u_i influye, con una relación de segundo orden, sólo la variable articular q_i , independientemente del movimiento de las respectivas articulaciones.



Esta técnica de desacoplamiento y compensación no lineal es muy atractiva desde el punto de vista del control, ya que la dinámica no lineal y con acoplamiento se reemplaza por un sistema lineal de segundo orden y sin acoplamiento. Pero la compensación puede no ser perfecta en presencia de incertidumbres en el modelo o debido a las aproximaciones realizadas en el cálculo en línea del modelo inverso.

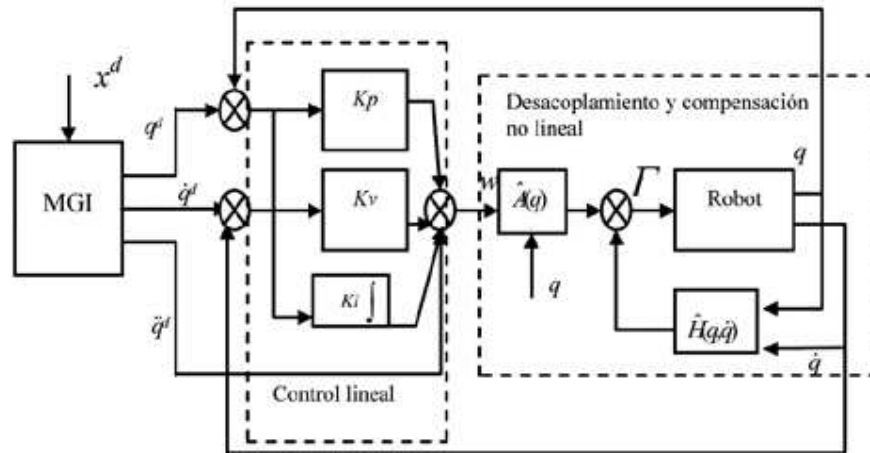
Control por par calculado

Teniendo en cuenta que el movimiento deseado se especifica con la posición q_d , el control por par calculado, una vez linealizado y desacoplado el sistema como se mostró anteriormente, calcula el vector de control de la siguiente manera:

$$w = K_p(q_d - q) + K_v q'$$

donde K_p y K_v representan las ganancias de los controladores. Al igual que en el PID bajo un procedimiento de sintonización se fijan K_p y K_v . El esquema de control usado se muestra a continuación,

donde la consigna deseada se define en el espacio operacional y se transforma en consigna articular gracias al modelo geométrico inverso (MGI).



A continuación mostraremos las diversas simulaciones hechas con Simulink, para ver como nuestro manipulador Scara sigue una determinada trayectoria de referencia de acuerdo al tipo de controlador que se coloque.

Para todos los casos se optó por utilizar la técnica de control por par calculado.

Control por par calculado utilizando un PD (Proporcional+derivativo)

-Trayectorias de referencia a seguir: $\theta_{1d} = 0.5 \cdot \sin((\pi/2) \cdot u)$ $\theta_{2d} = 0.75 \cdot \cos((\pi/2) \cdot u)$ $d_{3d} = \sin((\pi/2) \cdot u)$

-Suponiendo que conocemos el modelo dinámico perfecto: $m_1 = m_1^* = 10 \text{ kg}$ $m_2 = m_2^* = 7 \text{ kg}$
 $m_3 = m_3^* = 3 \text{ kg}$

$l_1 = l_1^* = 50 \text{ cm}$ $l_2 = l_2^* = 27 \text{ cm}$
 $l_3 = l_3^* = 23 \text{ cm}$

-Variables dinámicas: $\theta_1 = 288^\circ = 5.02 \text{ rad}$ $\theta_2 = 218^\circ = 3.8 \text{ rad}$ $d_3 = 15 \text{ cm}$

-Condiciones iniciales: $\theta_1 = 0$ $\theta_2 = 0$ $d_3 = 0$

-Cálculo ó sintonización de las constantes K_p y K_v :

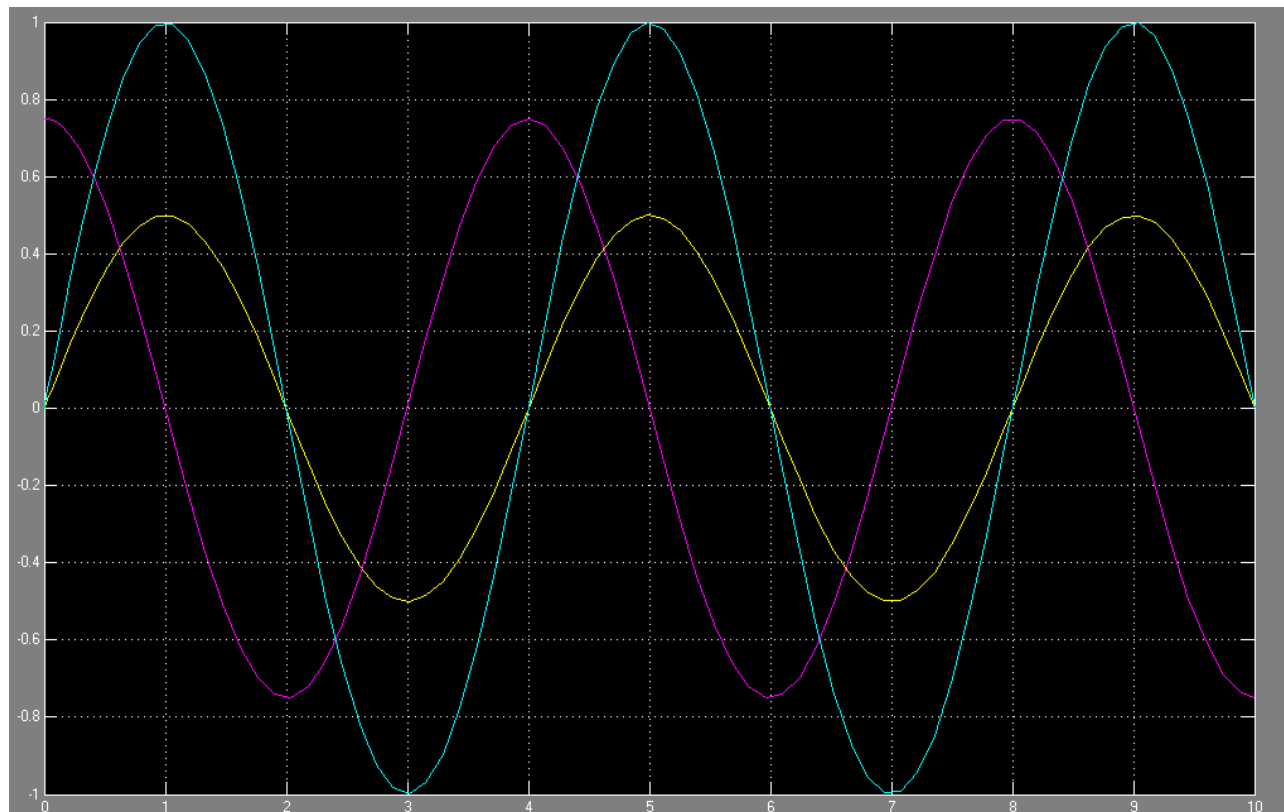
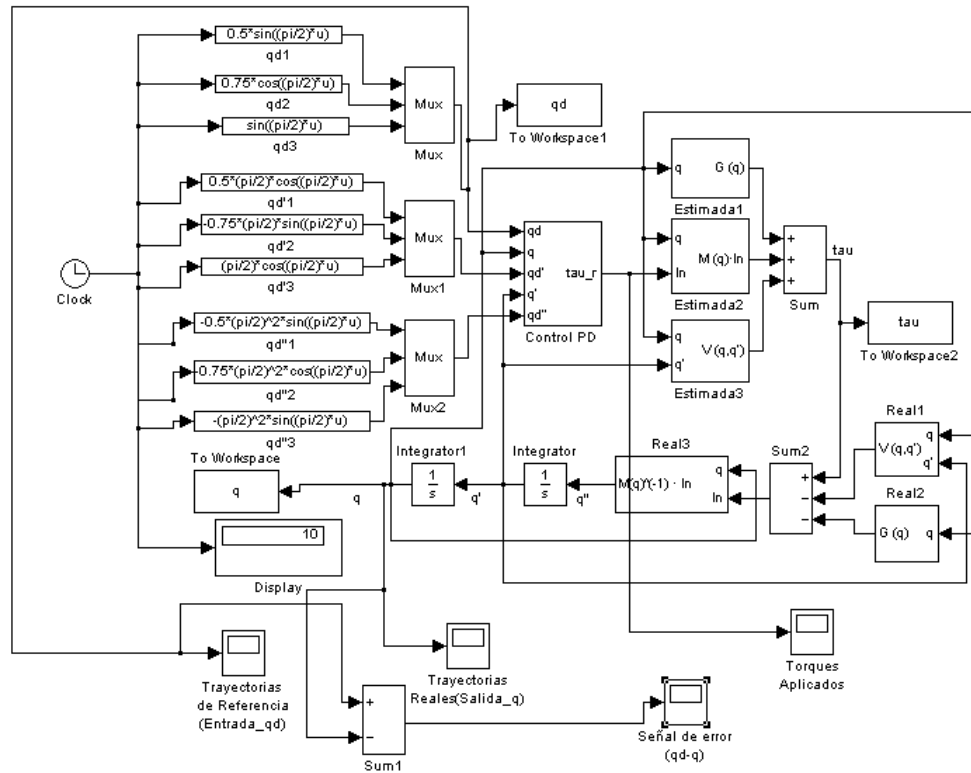
Sabemos que el tiempo de establecimiento es: $\longrightarrow \quad t_s = \pi / \delta W_n$

Como necesitamos amortiguamiento crítico: $\longrightarrow \quad \delta = 1$

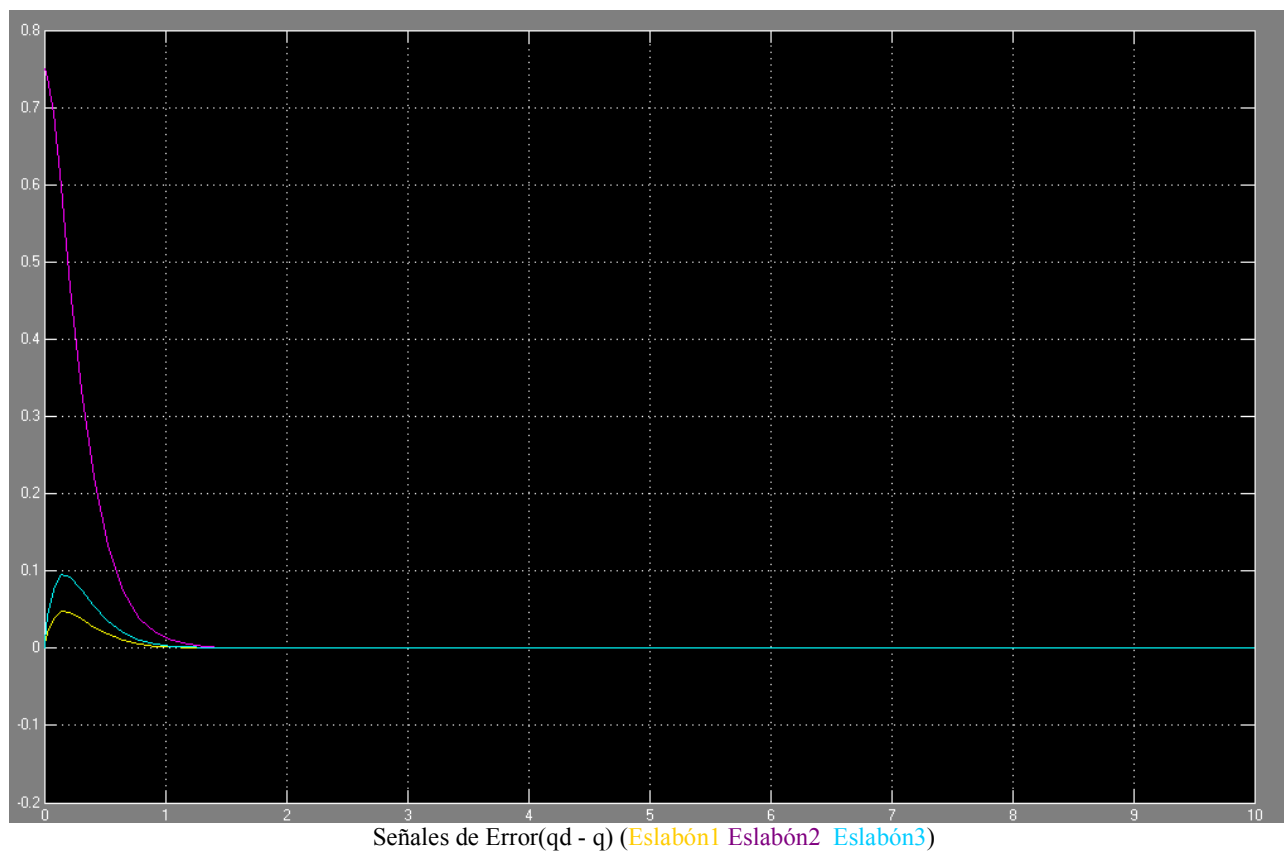
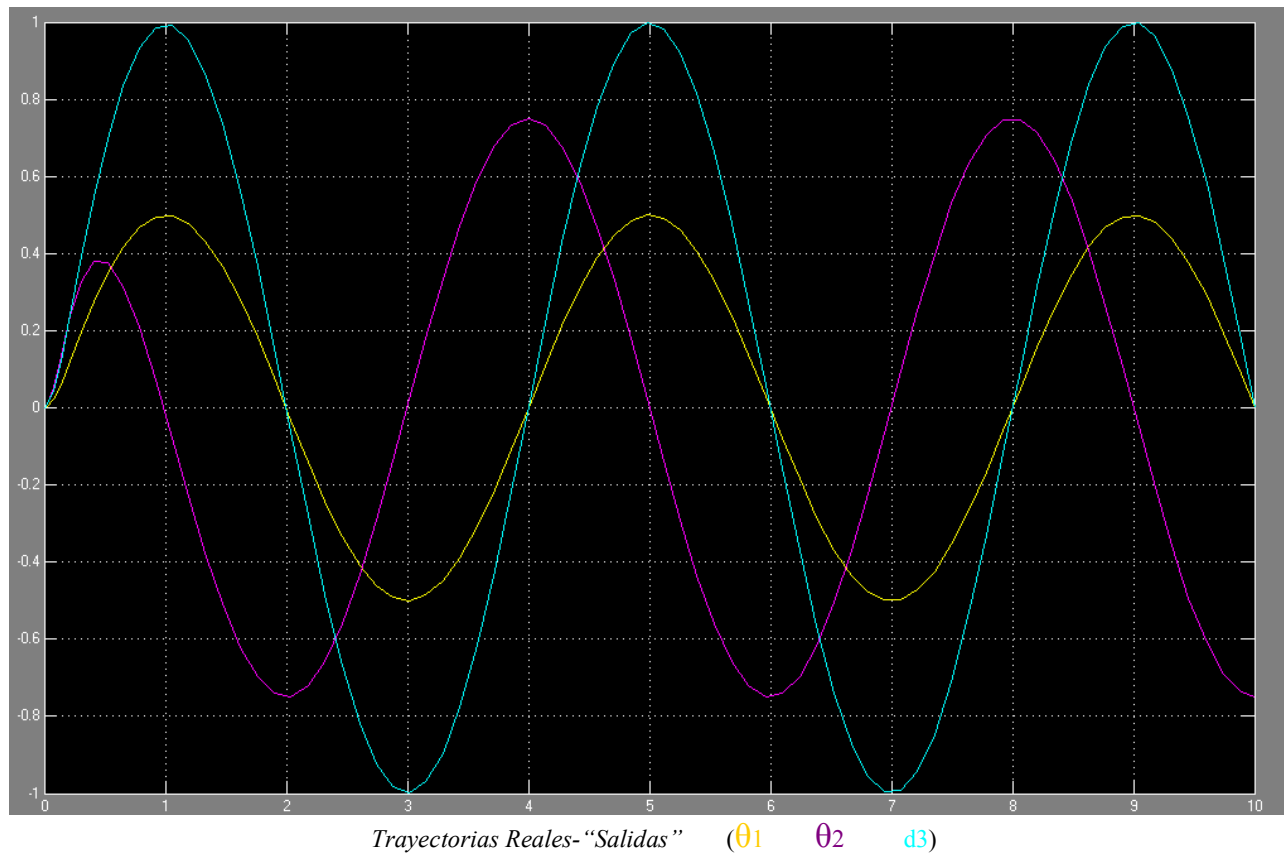
Fijamos un tiempo de establecimiento en: $\longrightarrow \quad t_s = \pi / 6 = 0.52 \text{ seg}$

Sabemos también que: $\longrightarrow \quad K_p = W_n^2$ y $K_v = 2W_n$

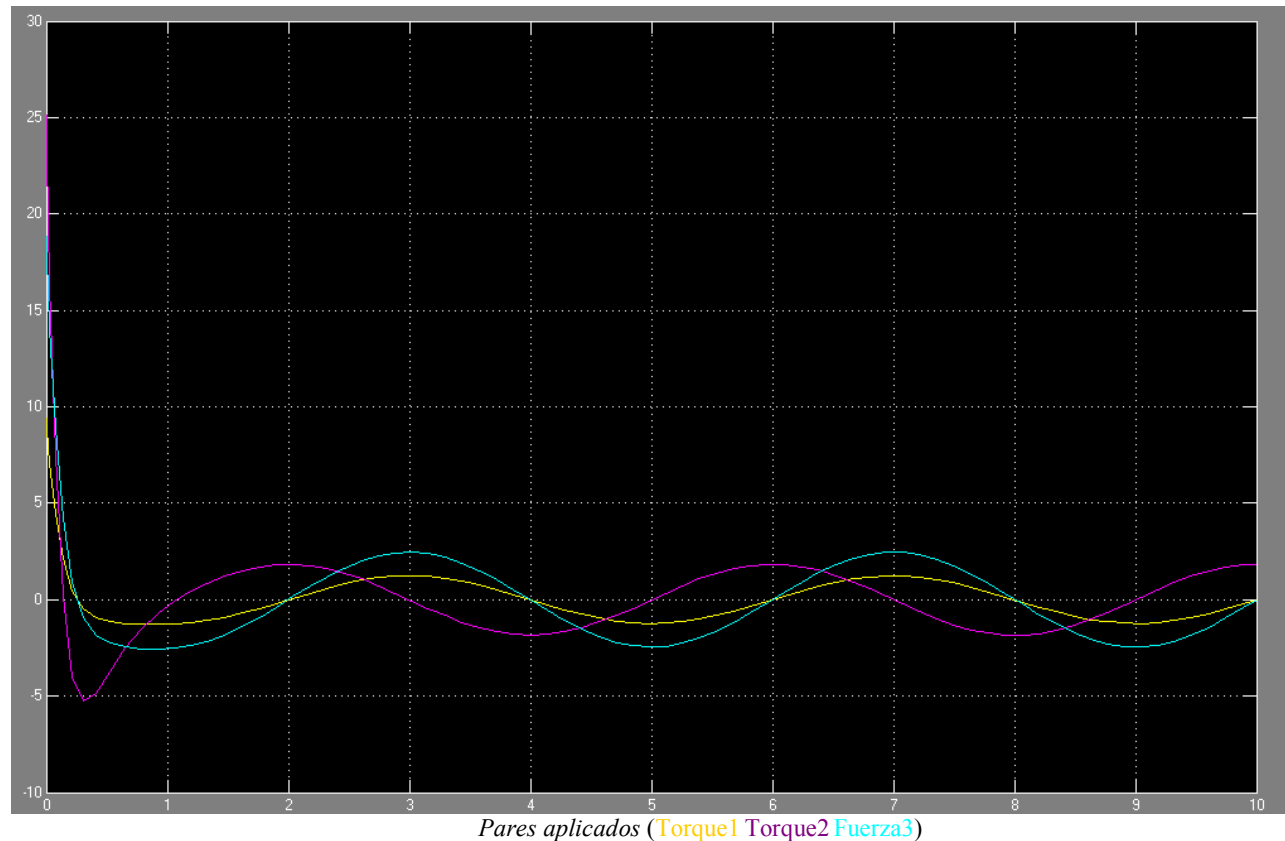
$W_n = 6$ $K_p = 36$ $K_v = 12$

Diagrama en bloques del modelo utilizado en Simulink.

Trayectorias de referencia ($\theta_{1d}=0.5*\sin((\pi/2)*u)$ $\theta_{2d}=0.75*\cos((\pi/2)*u)$ $d_{3d}=\sin((\pi/2)*u)$)
“ Entradas ”



La señal de error es la esperada no existe amortiguación en la misma, es decir se comporta en forma crítica. A su vez podemos distinguir que se produce mayor error en la segunda articulación, eso es propio de las variables dinámicas del sistema. Los errores de los dos primeros eslabones se expresan en radianes mientras que el del tercer eslabón en metros.



En esta última gráfica es importante resaltar que no podemos comparar los torques [Nm] aplicados a los eslabones 1 y 2 con la fuerza aplicada [N] sobre el eslabón 3. Al ver los torques 1 y 2 notamos como el torque 1 es mayor al 2; esto verifica que se necesitará un mayor par sobre el primer eslabón que además de poseer mayor masa tiene conectado el resto del manipulador.

Con respecto a las trayectorias de salida podemos decir que luego de un corto tiempo se alcanza a las trayectorias de referencia, es decir que el Scara con un controlador PD se comporta muy bien y eso quedó reflejado en las señales de error que rápidamente en los tres eslabones llegan a valer 0.

Pero se debe tener en cuenta que en las simulaciones realizadas se tomó a las variables estimadas del modelo dinámico igual a las reales, esto significa que se supuso conocer el modelo dinámico de forma perfecta cosa que en la realidad generalmente no ocurre.

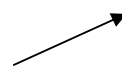
Por lo anteriormente dicho se procederá a continuación a simular el mismo modelo, pero considerando a las variables estimadas de valor distinto a las reales para ver que es lo que ocurre.

$m1=10\text{kg}$ $m2=7\text{kg}$ $m3=3\text{kg}$

$m1^{\wedge}=10.5\text{kg}$ $m2^{\wedge}=6.5\text{kg}$ $m3^{\wedge}=3.3\text{kg}$

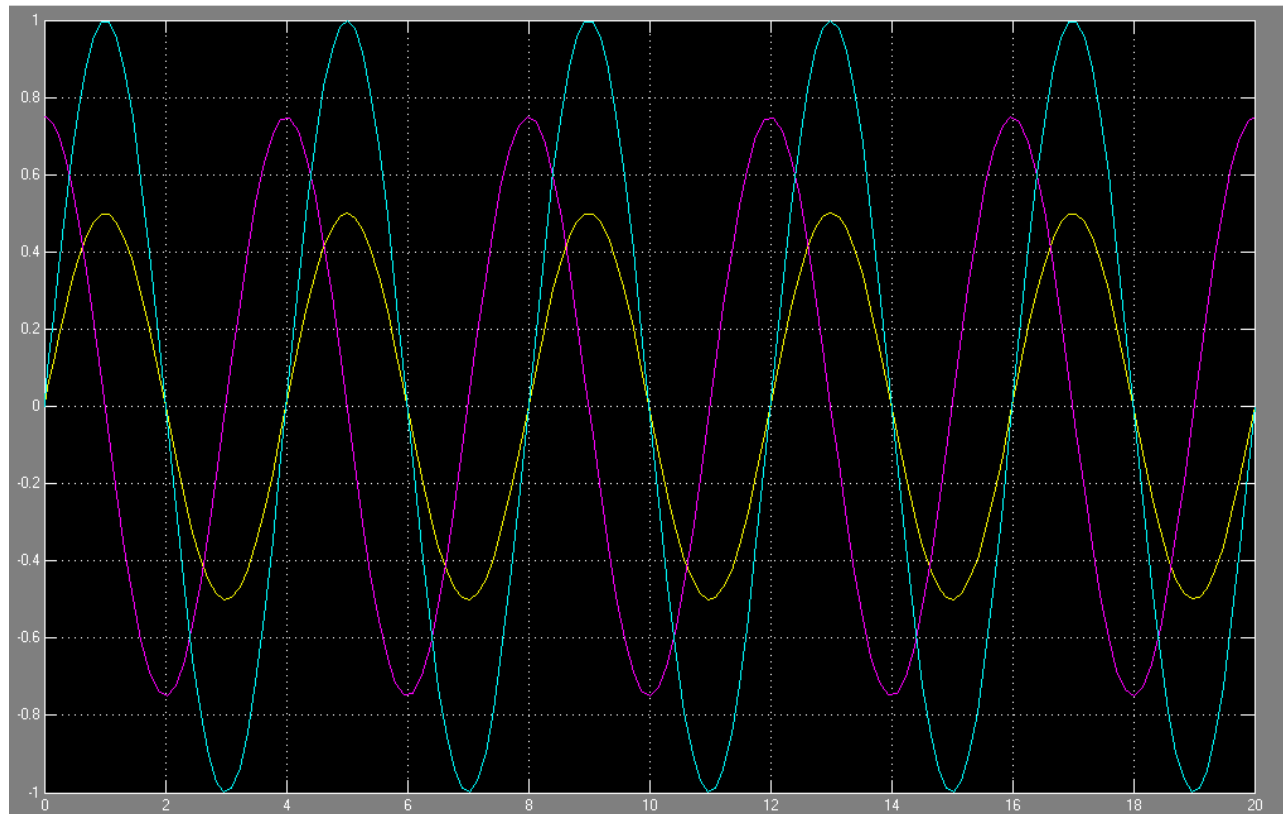


Valores Reales

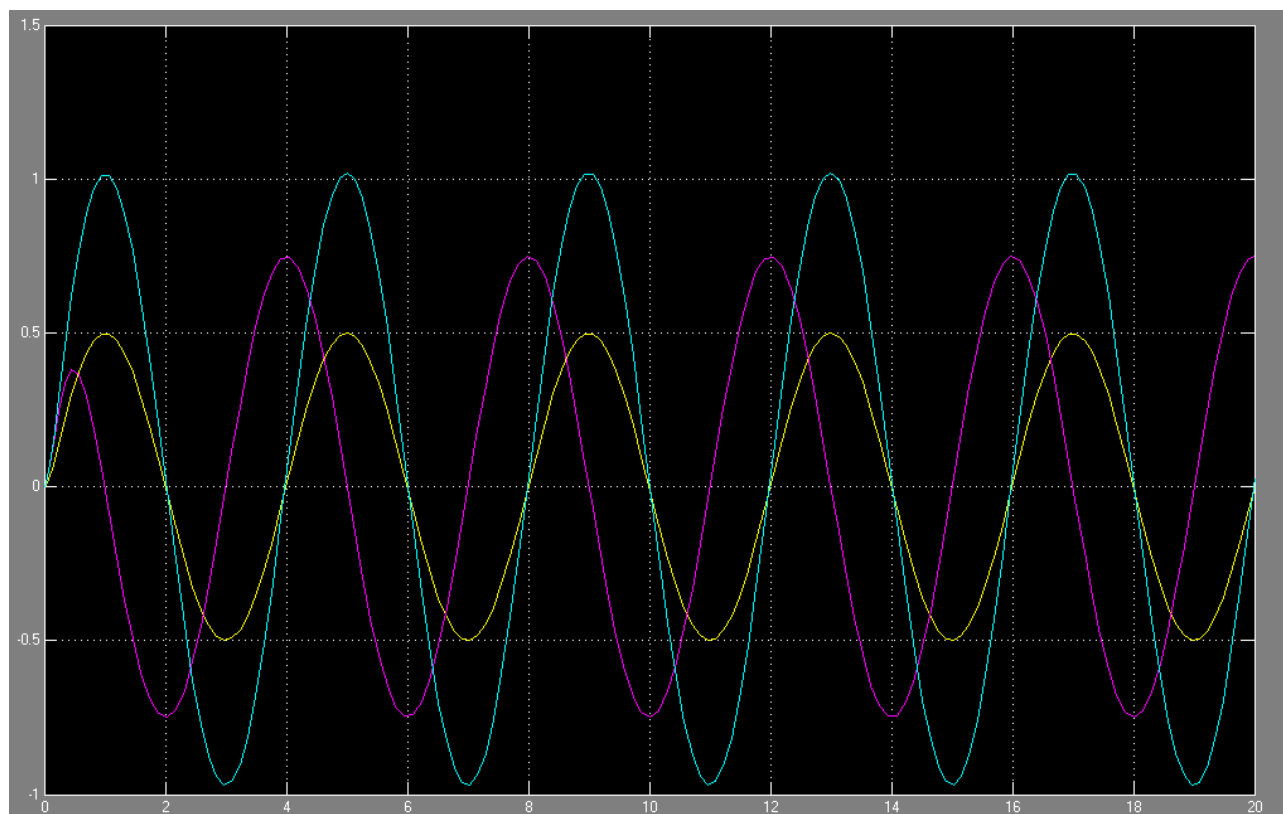


Valores Estimados

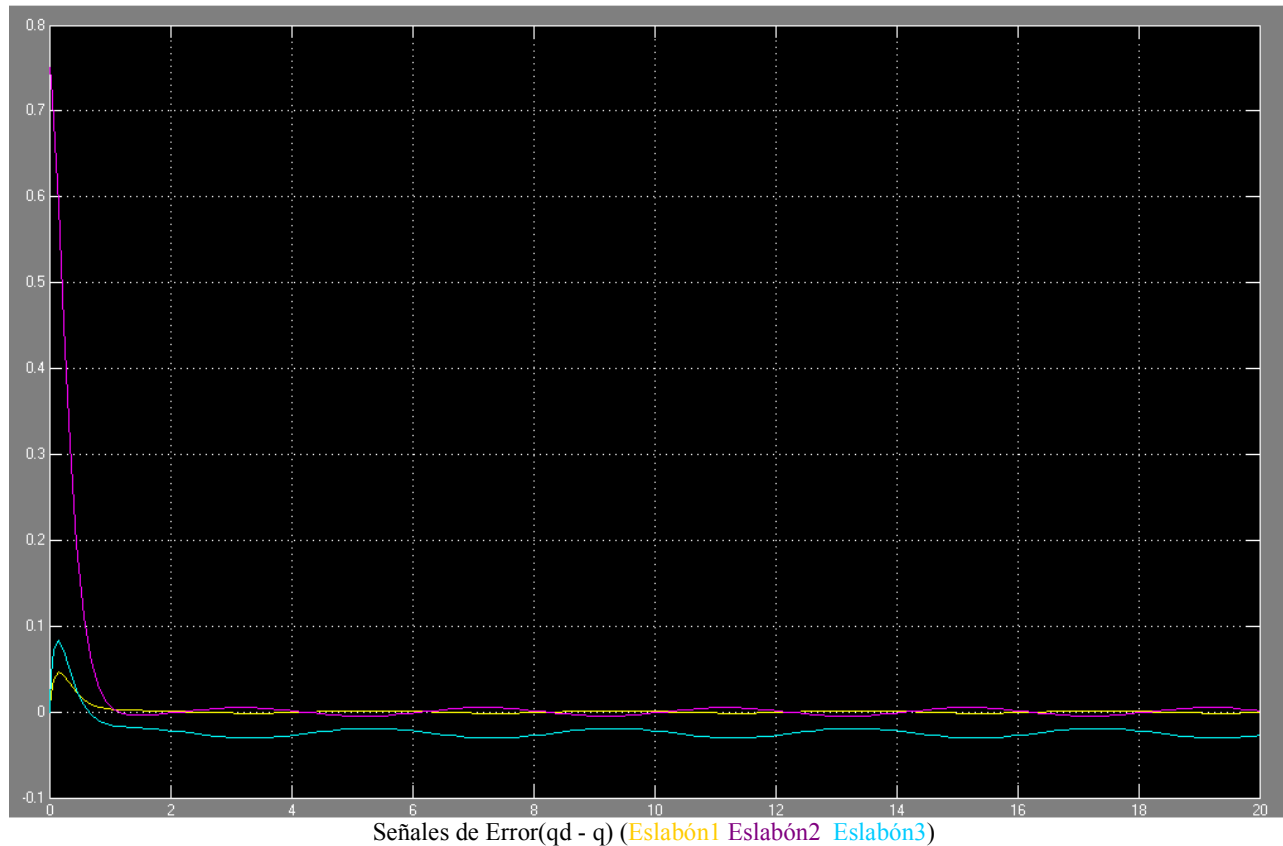
Para estos casos extendimos el tiempo de muestreo hasta 20seg de manera de observar mejor el comportamiento de las señales.



Trayectorias de referencia ($\theta_1d=0.5*\sin((\pi/2)*u)$ $\theta_2d=0.75*\cos((\pi/2)*u)$ $d3d=\sin((\pi/2)*u)$)
“Entradas”



Trayectorias Reales-“Salidas” (θ_1 θ_2 d_3)



Podemos notar como el comportamiento en los tres eslabones ha empeorado de manera muy notoria, reflejándose en el error en régimen permanente el cual no llega a anularse en el tiempo de muestreo que le dimos, el cual es realmente excesivo. De esta manera demostramos que no podemos seguir de una forma correcta a nuestra trayectoria deseada y confirmamos la importancia que tiene el tener un modelo dinámico perfecto lo que es muy difícil.

Como conclusión final con respecto al controlador PD, este es aplicable para mejorar el régimen transitorio, ya que sintonizando de manera adecuada las constantes K_p y K_v logramos reducir error de manera considerada. Ahora bien si no tenemos un modelo dinámico exacto, comenzamos a ver que aparecen errores de seguimiento en régimen permanente; recordando un poco, sabemos que el PD representa un proporcional más un derivativo, es decir que por más que sigamos buscando un valor adecuado a nuestras constantes K_p y K_v nunca vamos a lograr mejorar el estacionario. Para obtener una mejora se necesitará otro tipo de controlador que permita colocar un polo en el origen, es por eso que a continuación se desarrollará un controlador PID para ver como se comporta nuestro Scara.

Control por par calculado utilizando un PID (Proporcional+integral+derivativo)

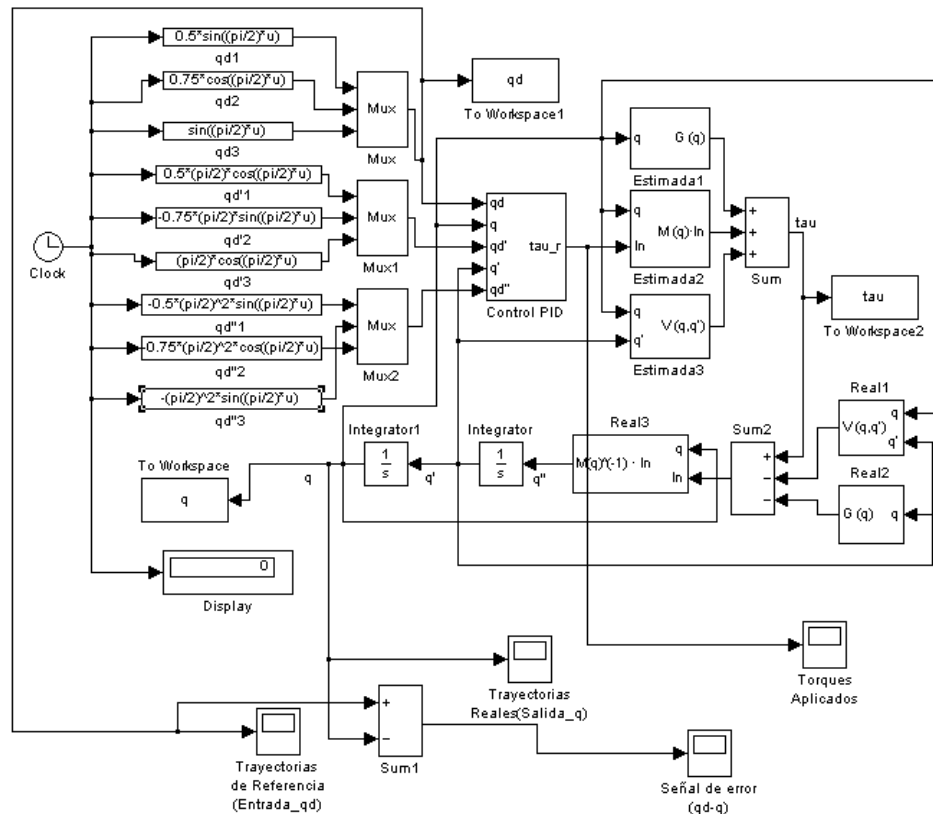
-*Trayectorias de referencia a seguir:* $\theta_{1d} = 0.5 \cdot \sin((\pi/2) \cdot u)$ $\theta_{2d} = 0.75 \cdot \cos((\pi/2) \cdot u)$ $\theta_{3d} = \sin((\pi/2) \cdot u)$

$$l_1 = l_1^* = 50 \text{ cm}$$

$$l_2 = l_2^* = 27 \text{ cm}$$

$$l_3 = l_3^* = 23 \text{ cm}$$

-*Variables dinámicas:* $\theta_1 = 288^\circ = 5.02 \text{ rad}$ $\theta_2 = 218^\circ = 3.8 \text{ rad}$ $d_3 = 15 \text{ cm}$

Diagrama en bloques del modelo utilizado en Simulink.

$$m_1 = 10 \text{ kg} \quad m_2 = 7 \text{ kg} \quad m_3 = 3 \text{ kg}$$

$$m_1^* = 10.5 \text{ kg} \quad m_2^* = 6.5 \text{ kg} \quad m_3^* = 3.3 \text{ kg}$$

Valores Reales

Valores Estimados

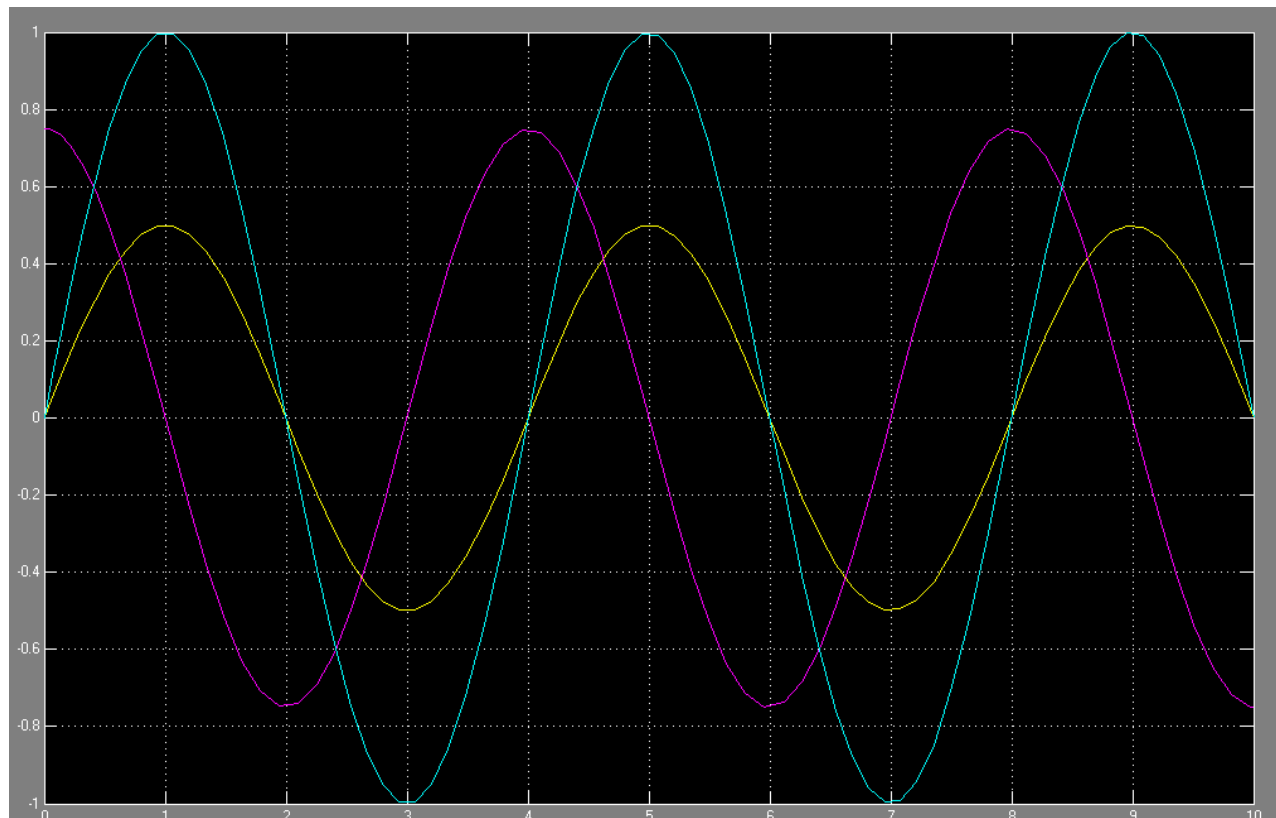
$$K_p = 36$$

$$K_v = 12$$

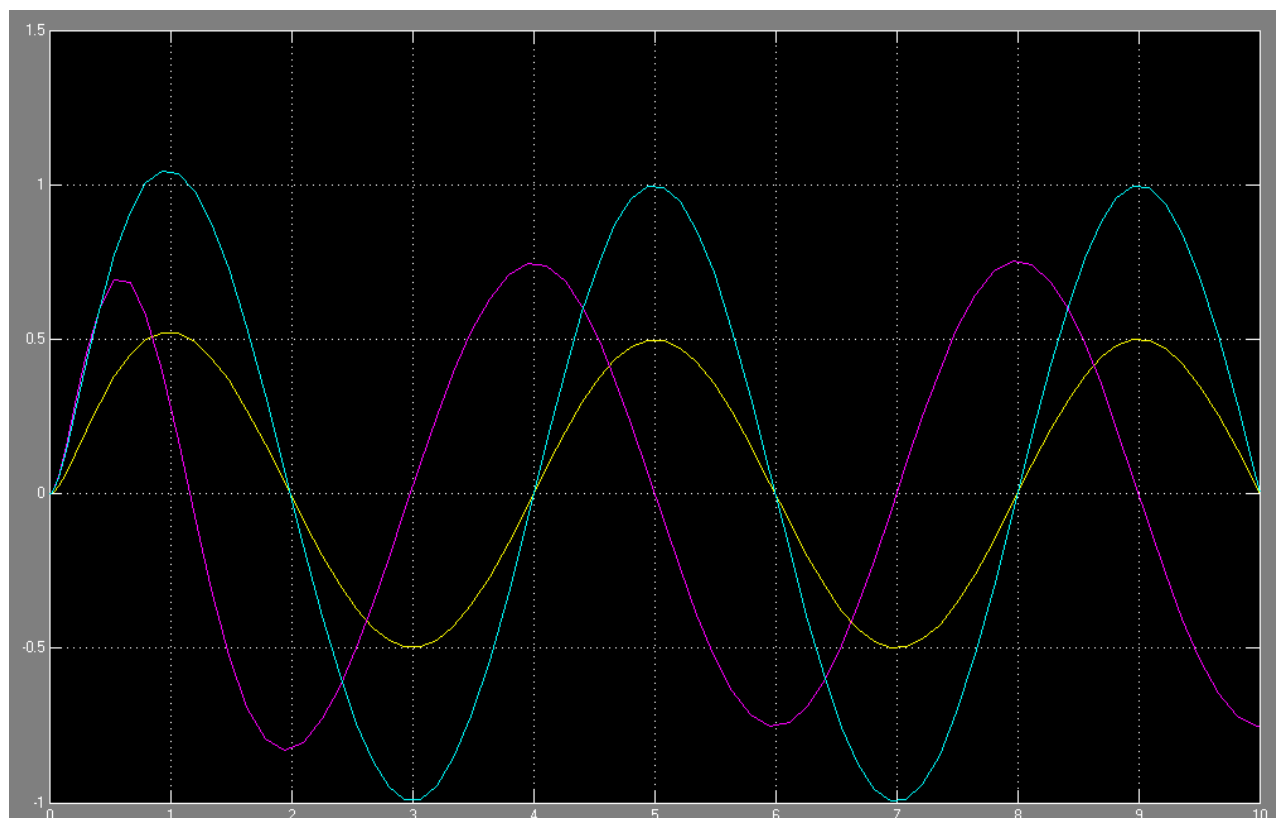
$$K_i = 100$$

Con un valor de $K_i \geq 75$, podemos decir que el error en régimen permanente se encuentra prácticamente anulado. Por simplicidad hemos adoptado $K_i = 100$, de manera de ver como en realidad actúa la constante integrativa sobre el controlador PID.

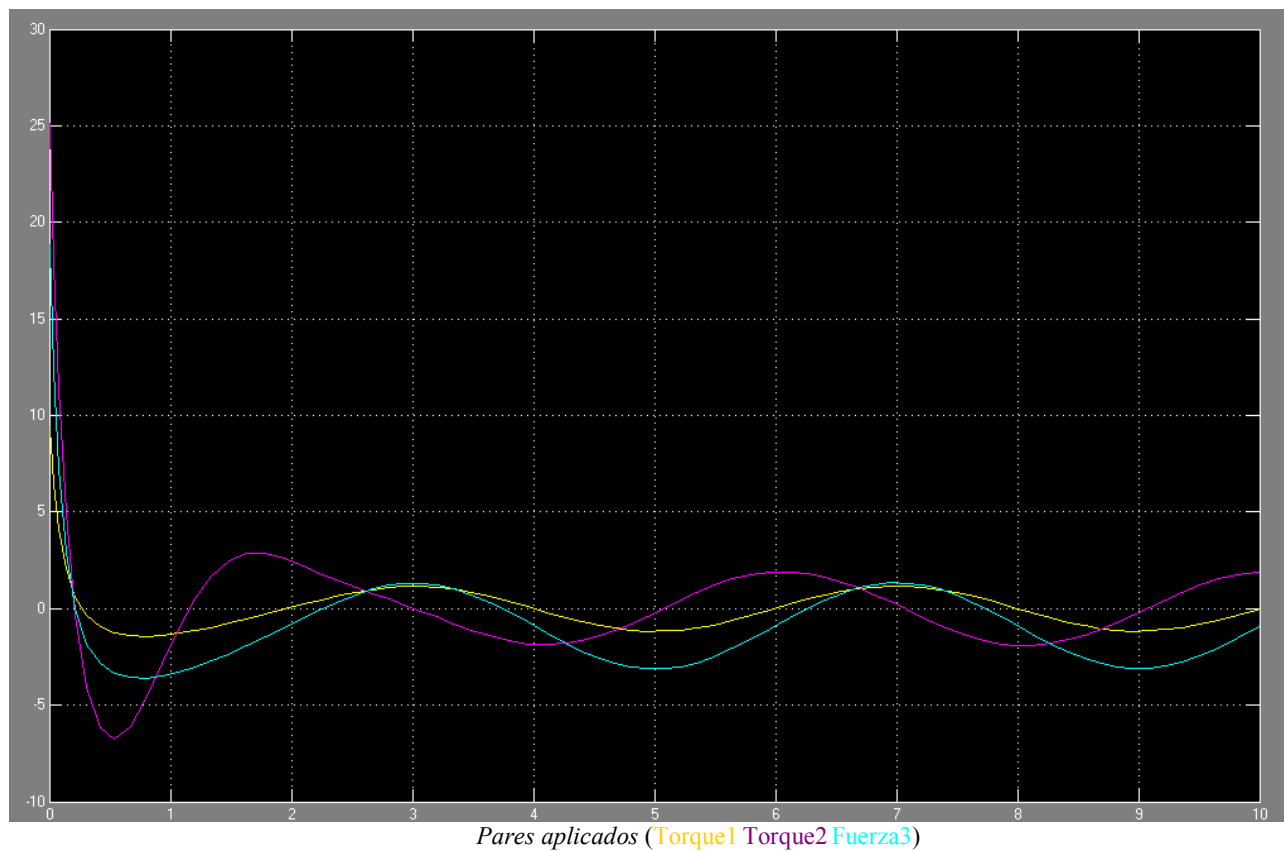
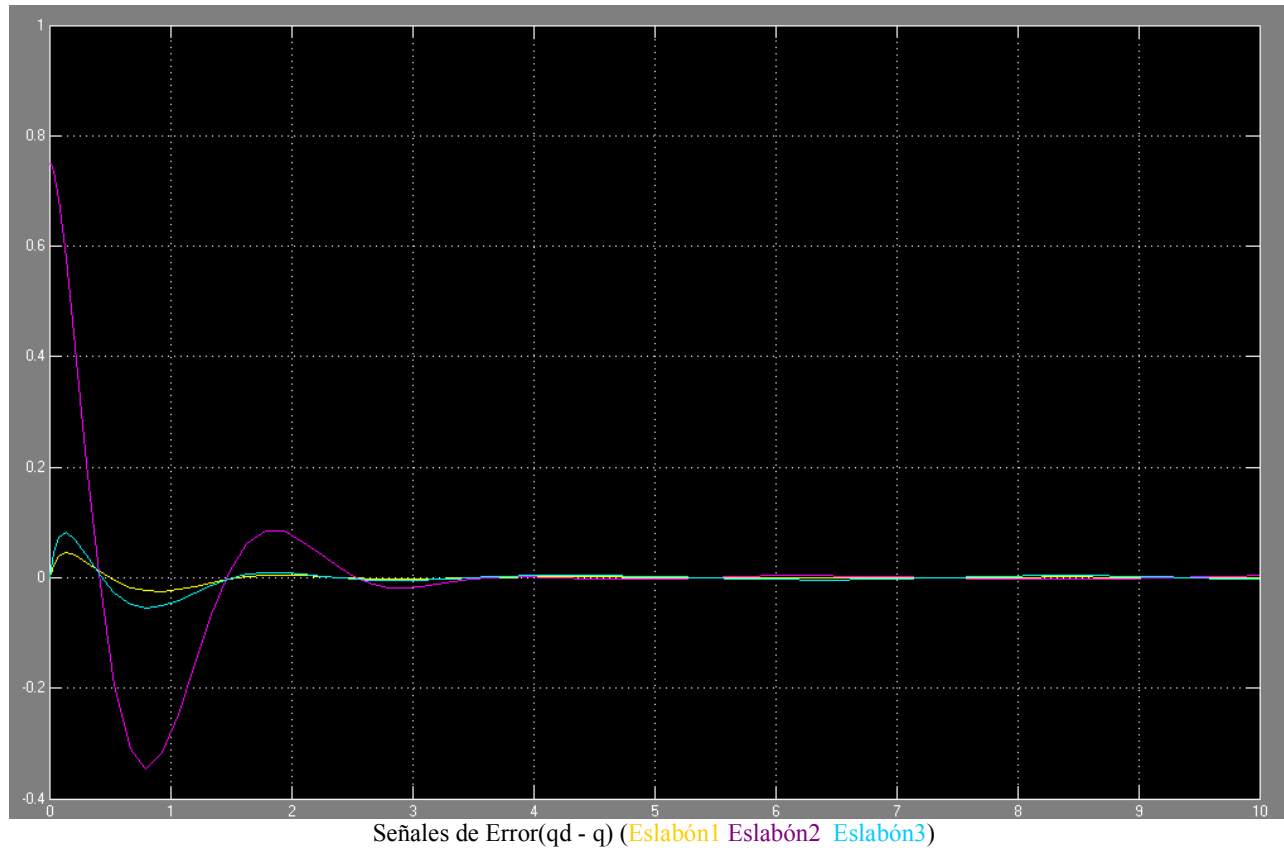
A continuación presentamos las distintas gráficas.



Trayectorias de referencia ($\theta_1d=0.5*\sin((\pi/2)*u)$ $\theta_2d=0.75*\cos((\pi/2)*u)$ $d3d=\sin((\pi/2)*u)$)
“Entradas”



Trayectorias Reales-“Salidas” (θ_1 θ_2 $d3$)

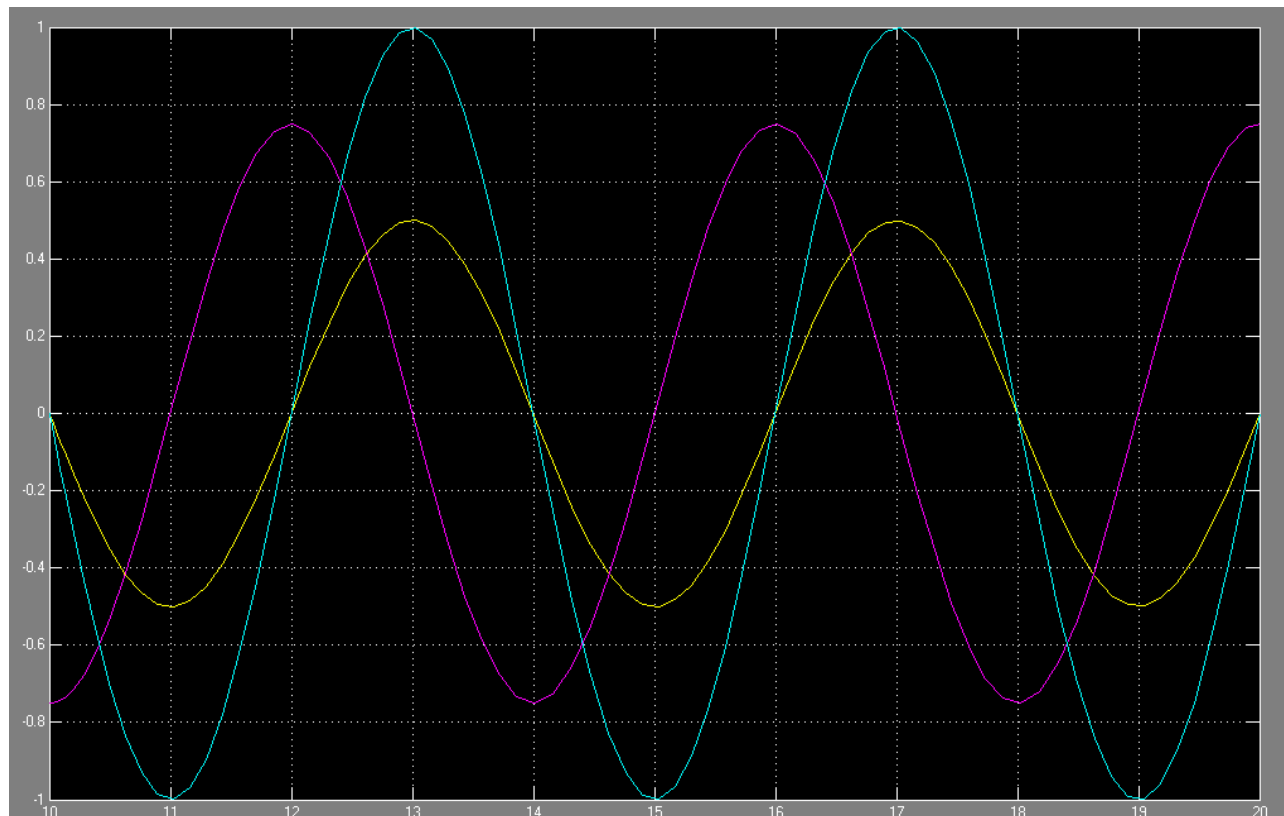


Vemos como manteniendo los mismos valores de K_i y K_v , y con un valor mayor a 75 para K_i nos acercamos más rápidamente a la trayectoria deseada, y por lo tanto logramos anular el error en régimen estacionario. También notamos que con el PID se tarda un poco más en llegar al permanente, lo que significa que con el PD se obtienen transitorios más rápidos que con el PID.

Control PID, con agregado de una masa sobre el eslabón3

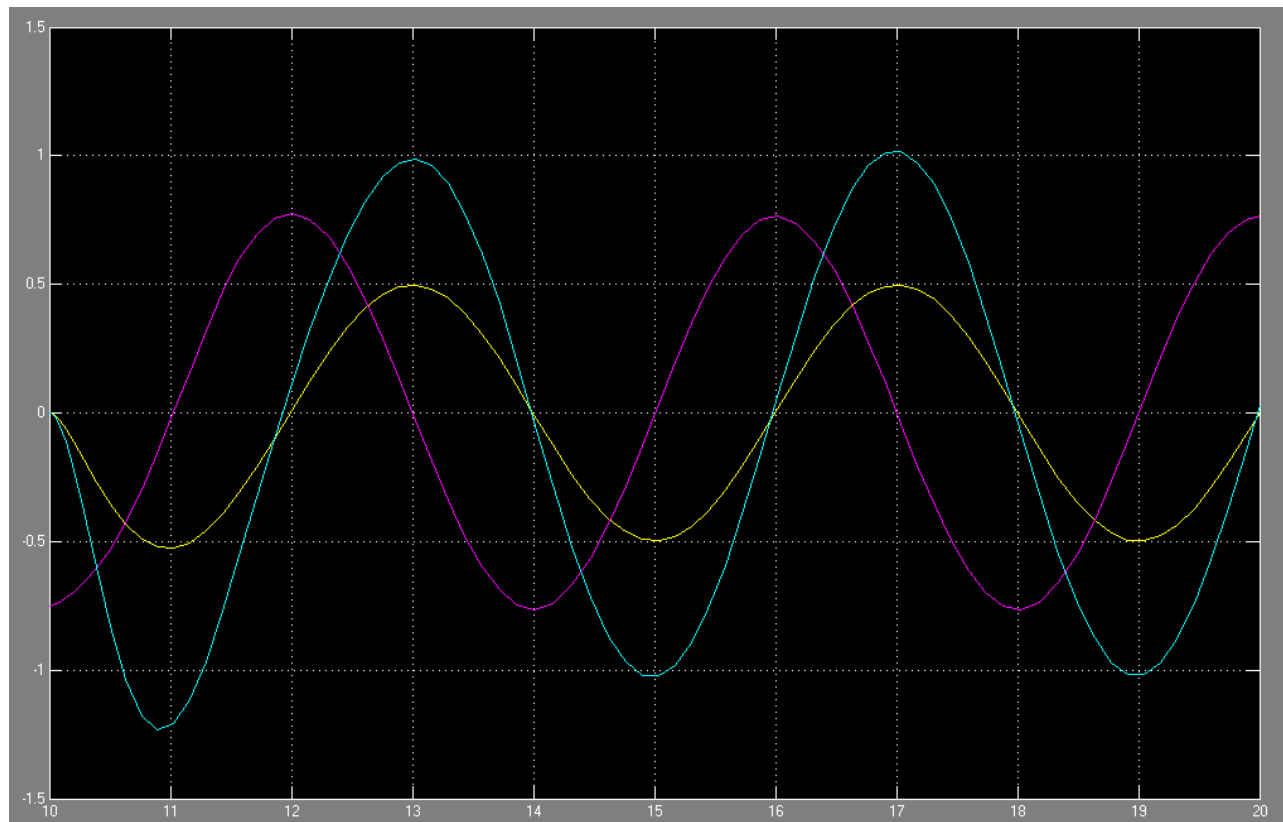
Vamos a suponer que en el instante de los 10seg nuestro Scara recoge una masa de 3kg. Esto significa que sobre el extremo del último eslabón existirá una $m_3=6\text{kg}$.

A continuación veremos la simulación del ejemplo antes nombrado donde se tuvo que corregir las matrices dinámicas reales junto con la última posición que el robot tenía $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3]=[0 \ -0.75 \ 0]$.

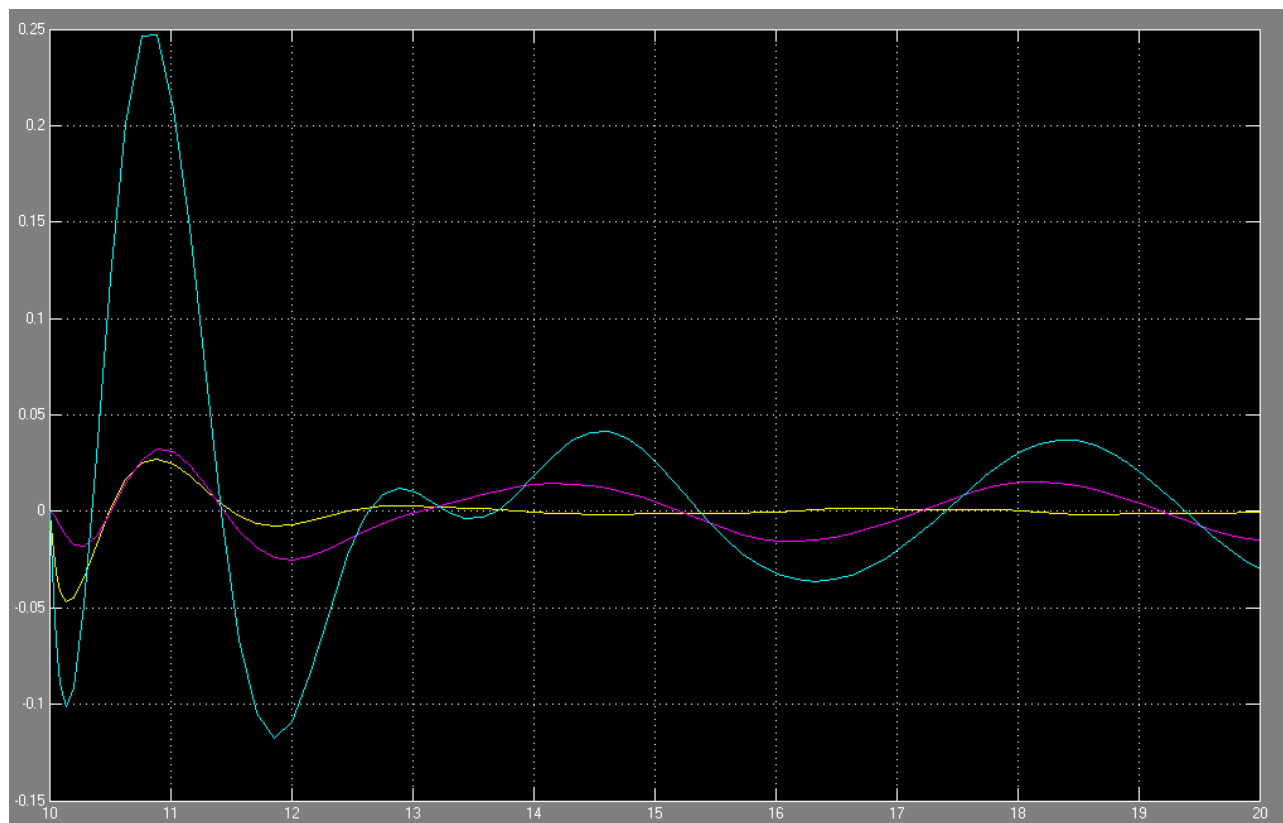


Trayectorias de referencia ($\theta_{1d}=0.5*\sin((\pi/2)*u)$ $\theta_{2d}=0.75*\cos((\pi/2)*u)$ $d_{3d}=\sin((\pi/2)*u)$)
“ Entradas ”

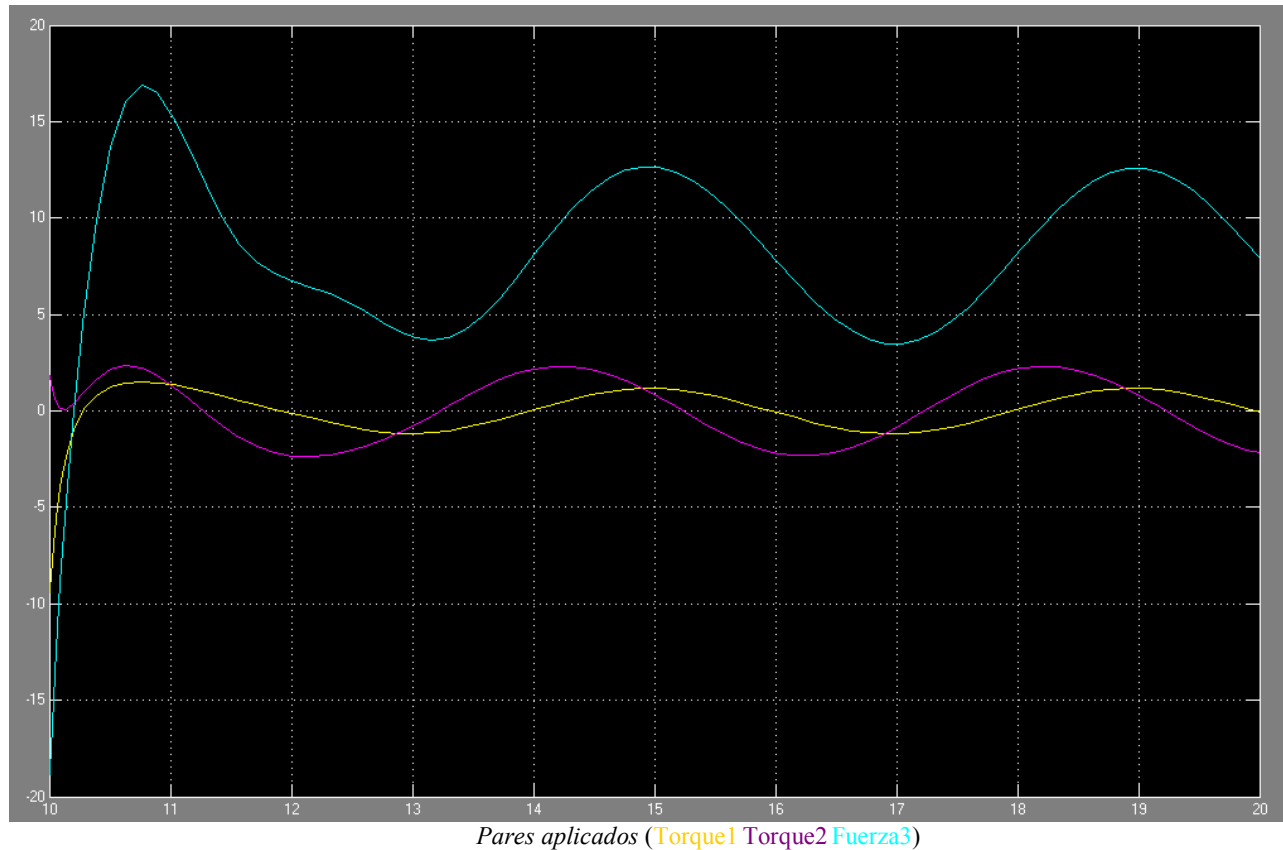
No lo aclaramos, pero con $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3]=[0 \ -0.75 \ 0]$ nos estamos refiriendo a la última posición en que había quedado el Scara. Es decir que esos datos los ingresamos en el integrador, de manera que la referencia de este último no sea $[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3]=[0 \ 0 \ 0]$ como en los casos anteriores sino que comience a describir la posición final que tendrá a partir de la última posición en que se detuvo.
Se dejaron inalterables las constantes $K_p=36$, $K_v=12$ y $K_i=100$



Trayectorias Reales-“Salidas” (θ_1 θ_2 $d3$)



Señales de Error($q_d - q$) (Eslabón1 Eslabón2 Eslabón3)



Con el peso colocado en el extremo el control PID dejó de ser lo que realmente esperábamos. Decimos esto porque realmente las cosas empeoraron; a partir del instante de $T=10\text{seg}$ es casi imposible seguir la trayectoria del eslabón 3, ocurriendo lo mismo pero en menor medida en las otras dos articulaciones. La consecuencia a esto se ve claramente en la gráfica del error, donde en el comienzo es extremadamente grande para luego convertirse en una oscilación continua sin llegar a hacerse cero.

Con respecto a los pares, la fuerza ejercida sobre el tercer eslabón aumenta notablemente al agarrar el supuesto objeto, en las dos primeras articulaciones parece no ocurrir lo mismo, sólo se nota un aumento en ambos torques pero no es comparable con la fuerza que realiza el último.

Siguiendo con el análisis decidimos variar el K_i para ver que es lo que sucedía: para K_i más pequeño disminuye sólo un poco el error sobre el eslabón 3 pero aumenta en las otras dos articulaciones; aumentando K_i las oscilaciones sobre el eslabón 3 aumentan demasiado su amplitud haciendo que el error no que nunca estabilizado en 0.

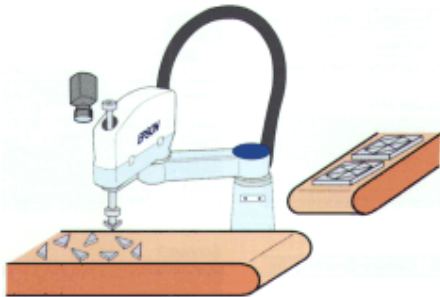
Todo esto nos hace pensar en buscar la solución haciendo que el control se pueda adaptar a las condiciones de trabajo del manipulador, es decir una buena solución sería el control adaptativo.

Aplicaciones del Robot Scara

El robot SCARA es muy utilizado en todo tipo de aplicaciones industriales, especialmente en aquellas que se realizan básicamente en un plano. A continuación se enumeran aplicaciones más habituales en las que se utiliza esta configuración:

- Distribuir objetos.
- Soldadura.
- Agarrar y colocar.
- Guiado.
- Montaje de componentes (principalmente electrónicos).
- Atornillar.

En algunas de estas aplicaciones es necesario el guiado por visión. Para ello algunos de los robots incluyen un software para el procesamiento de imágenes, que se ejecutará en un PC. Este tipo de herramientas mejoran mucho la eficiencia de las aplicaciones en comparación con los métodos tradicionales. Como ejemplo de este tipo de aplicaciones se van mostrar cuatro escenarios en los que se utiliza una cámara junto con el robot para el desarrollo del trabajo.

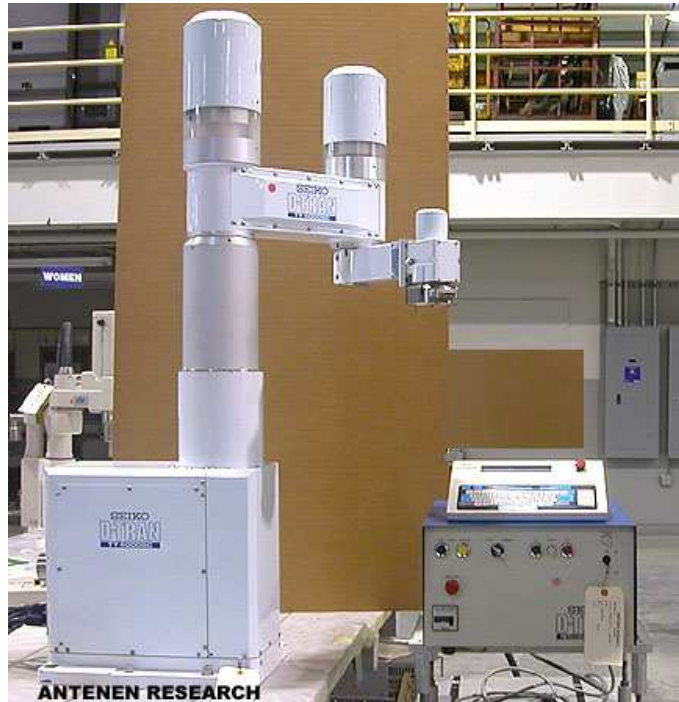


En la figura se observa a la cámara en la parte superior apuntando hacia abajo, de manera que se observe la correcta posición de donde se van colocando las piezas sobre la cinta transportadora.



Para este caso la cámara se ha colocado desde debajo de manera de observar la correcta ubicación y orientación de la pieza antes de posicionarla.

Ejemplos Reales de robots Scara utilizados en la Industria



Marca: Seiko

Modelo: TT400 Darl 4

Tipo: Scara

Ejes: 4

Alcance: 660mm

Capacidad: 5Kg

Aplicaciones:- Ensamblado/Montaje
- Manipulador de Piezas
- Distribución



Marca: Seiko

Modelo: TT8550 SRC

Tipo: Scara

Ejes: 4

Alcance: 550mm

Capacidad: 11kg

Aplicaciones:- Ensamblado/Montaje
- Manipulador de Piezas
- Distribución



Marca: Fanuc

Modelo: A-510 RJ (WD)

Tipo: Scara

Ejes: 4

Alcance: 740mm

Capacidad: 20kg

Aplicaciones: -Manipulador de Piezas
-Ensamblado/Montaje
-Distribución



Marca: FAPUC

Modelo: A520i RJ2

Tipo: Scara

Ejes: 4

Alcance: 900mm

Capacidad: 20kg

Aplicaciones: Manipulador de Piezas



Marca: IBM

Modelo: 7535

Ejes: 4

Alcance: 464 mm

Capacidad: 6kg

Aplicaciones:- Ensamblado
- Manipulador de Piezas



Marca: IBM

Modelo: 7576

Tipo: Scara

Ejes: 4

Alcance: 800mm

Capacidad: 10kg

Aplicaciones: -Ensamblado
-Manipulador de Piezas

Referencias

- Fundamentos de robótica, Barrientos-Peñín-Balanguer-Aracil (editorial McGraw-Hill)
- Robótica Manipuladores y robots móviles, Aníbal Ollero Baturone (editorial Marcombo)
- Robots Manipulators and control system.
- Robot Modeling and Control, Hutchinson, Vidyasagar
- Roboworks Manual, Ana María Franco, Carlos Rodríguez (Universidad EAFIT)
- Simulación Mecánica de un Robot Humanoide(Partes 1 y 2)
- Control predictivo de un Robot tipo Scara-Nota de aplicación (Oscar Andrés Vivas Albán)
- Simulación de un Servo Control de 2 GDL-Nota de aplicación- (Universidad Miguel Hernández)
- Simulador de un Robot SCARA de 4 Grados de Libertad Basado en Realidad Virtual-Nota de Aplicación (Universidad del Cauca)
- Design and Construction of a Manipulator type Scara, Implementing a Control System-Nota de Aplicación (John Faber Archila Diaz, Max Suell Dutra, Claudia Johana Diaz)
- Uso del Matlab para análisis cinemáticos-Manual (Barrientos)
- <http://www.loslocosproyectos.blogspot.com/>
- <http://perso.wanadoo.es/e/alimapp/scara/aplicaciones.htm>
- <http://www.seikorobots.com/>
- <http://www.scara-robot.com/>
- <http://www.sti-sl.es/scoraer14.htm>
- <http://www.newtonium.com/>
- <http://www.robohoo.com/>
- <http://www-robotics.cs.umass.edu/robotics.html>