

**RECONFIGURACIÓN DEL MANIPULADOR DE LA PLANTA DE
CLASIFICACIÓN DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS**



Anexos

Liza María Candamil Erazo

**Universidad del Cauca
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2015**

**RECONFIGURACIÓN DEL MANIPULADOR DE LA PLANTA DE
CLASIFICACIÓN DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniera en Automática Industrial**

Anexos

Liza María Candamil Erazo

Director:

Francisco Franco Obando

Magister en Electrónica y Telecomunicaciones

**Universidad del Cauca
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2015**

Contenido

Índice de figuras	3
Índice de Tablas	5
ANEXO A.PLANOs de la estructura del Robot.....	1
A.1 Primer eslabón.....	1
A.2 Partes Segundo eslabón	1
A.3 Partes Soporte del contrapeso	2
A.4 Partes tercer eslabón.....	3
A.5 Partes Pinza.....	4
ANEXO B.TABLA DE PARAMETROS BASEY RESULTADOS DE ITERACIONES	6
ANEXO C. PARAMETROS DEL ROBOT PARA ENCONTRAR EL MODELO DINÁMICO.....	10
ANEXO D.GRÁFICAS TRAYECTORIAS: COMPARACIÓN ENTRE EL POLINOMIO QUE SE OBTUVO MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL Y RESPUESTA DEL MG	11
ANEXO E. TUTORIAL GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS	18
ANEXO F. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA MÁQUINA DE ESTADOS IMPLEMENTADA IMPLEMENTACION DEL MODELO GEOMÉTRICO en arduino.....	34
ANEXO G. CALIBRACIÓN Y ADECUANCION DE LA SEÑAL ADQUIRIDA MEDIANTE ACELERÓMETRO	43
G.1 Cálculo de integración.....	43
G.2 Medición de la inclinación:	46
ANEXO H. GRÁFICAS TRAYECTORIAS: COMPARACIÓN ENTRE EL POLINOMIO QUE SE OBTUVO MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL, RESPUESTA DEL MODELO Y LA MEDIDA POR EL ACELERÓMETRO.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A. 1Primer eslabón. a Vista lateral. bVista frontal.Fuente elaboración propia	1
Figura A. 2Segundo eslabón plano parte lateral derecha e izquierda.Fuente elaboración propia	1
Figura A. 3 Segundo eslabónplano tapa superior e inferior.Fuente elaboración propia	2
Figura A. 4 Soporte contrapeso. a. Plano parte superior e inferior. b.Plano partes laterales. Fuente elaboración propia.....	2
Figura A. 5 Soporte contrapeso plano parte trasera. Fuente elaboración propia.....	2
Figura A. 6Tercer eslabón planoparte lateral derecha. Fuente elaboración propia.....	3
Figura A. 7 Tercer eslabón planoparte lateral izquierdo. Fuente elaboración propia	3
Figura A. 8 Tercer eslabón plano tapa superior e inferior	3
Figura A. 9 Tercer eslabón plano tapa posterior	4
Figura A. 10 Pinza plano Base.....	4
Figura A. 11 Pinza plano brazo.....	4
Figura A. 12 Pinza plano brazo engranaje.....	5

Figura A. 13 Pinza plano brazo eslabón	5
Figura A. 14 Pinza vista superior	5
Figura B. 1 Convención utilizada para determinar la tabla de parámetros. Fuente elaboración propia	6
Figura E. 1 Arduino Mega ubicada en el panel de la planta de presión. Fuente elaboración propia	18
Figura E. 2 Fuente ubicada en el panel de control. Fuente elaboración propia	18
Figura E. 3 Fuente de poder. Fuente elaboración propia.....	19
Figura E. 4 Interface hombre máquina. Fuente elaboración propia.....	19
Figura E. 5 Monitor serial del IDE de Arduino. Fuente elaboración propia.....	19
Figura E. 6 Monitor serial. Fuente elaboración propia.....	20
Figura E. 7 Definición de puntos en el espacio de trabajo limitado por la planta de clasificación. Fuente elaboración propia	21
Figura E. 8 MG en Simulink. Fuente elaboración propia.....	21
Figura E. 9 Parámetros para definir los vectores. Fuente elaboración propia.....	22
Figura E. 10Condición para una correcta concatenación. Fuente elaboración propia.	23
Figura E. 11 Vectores concatenados. Fuente elaboración propia	23
Figura E. 12 Trayectoria base. Fuente elaboración propia	23
Figura E. 13 Implementacion del modelo geometrico para prueba de trayectorias. Fuente elaboración propia.....	24
Figura E. 14 Parámetros para cargar entradas a simulink. Fuente elaboración propia	24
Figura E. 15 Parámetros de configuración del solver. Fuente elaboración propia	25
Figura E. 16 Coordenadas cartesianas deseadas. Fuente elaboración propia.....	25
Figura E. 17 Coordenadas articulares. Fuente elaboración propia.....	26
Figura E. 18 Coordenadas cartesianas obtenidas. Fuente elaboración propia	26
Figura E. 19 Error cartesiano aplicando offset al modelo simulado para coincidir con el real. Fuente elaboración propia	26
Figura E. 20 Coordenadas articulares. Fuente elaboración propia.....	27
Figura E. 21 Herramienta Basic Fitting en Matlab. Fuente elaboración propia	27
Figura E. 22 Obtención de polinomio. Fuente elaboración propia	28
Figura E. 23 Script 'Regresión articular PosA_Pos1'. Fuente elaboración propia.....	28
Figura E. 24 Primera coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia	29
Figura E. 25 Segunda coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia ..	29
Figura E. 26 Tercera coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia	29
Figura E. 27 Coeficientes en Arduino. Fuente elaboración propia.....	30
Figura E. 28 Polinomios en Arduino. Fuente elaboración propia.....	31
Figura E. 29 coeficientes de polinomio. Fuente elaboración propia	32
Figura E. 30 Configuración estados de parada. Fuente elaboración propia.....	33
Figura F. 1 Diagrama máquina de estados parte 1. Fuente elaboración propia	34
Figura F. 2 Diagrama máquina de estados parte 2. Fuente elaboración propia	34
Figura F. 3 Diagrama máquina de estados parte 3. Fuente elaboración propia	35
Figura F. 4 Diagrama máquina de estados parte 4. Fuente elaboración propia	35
Figura F. 5 Diagrama máquina de estados parte 5. Fuente elaboración propia	36
Figura F. 6 Diagrama máquina de estados parte 6. Fuente elaboración propia	36
Figura F. 7 Diagrama máquina de estados parte 7. Fuente elaboración propia	37

Figura F. 8 Diagrama máquina de estados parte 8. Fuente elaboración propia	37
Figura F. 9 Diagrama máquina de estados parte 9. Fuente elaboración propia	38
Figura F. 10 Diagrama máquina de estados parte 10. Fuente elaboración propia	38
Figura F. 11 Diagrama máquina de estados parte 11. Fuente elaboración propia	39
Figura F. 12 Diagrama máquina de estados parte 12. Fuente elaboración propia	39
Figura F. 13 Diagrama máquina de estados parte 13. Fuente elaboración propia	39
Figura F. 14 Diagrama máquina de estados parte 14. Fuente elaboración propia	40
Figura F. 15 Diagrama máquina de estados parte 15. Fuente elaboración propia	40
Figura F. 16 Diagrama máquina de estados parte 16. Fuente elaboración propia	41
Figura F. 17 Diagrama máquina de estados parte 17. Fuente elaboración propia	41
Figura F. 18 Diagrama máquina de estados parte 18. Fuente elaboración propia	42
Figura G. 1 Área resultante como combinación de dos áreas. Fuente [26].....	43
Figura G. 2 Valor de referencia para muestreo de señales [26].	44
Figura G. 3 Graficas de aceleración, velocidad y posición. Fuente [26]......	44
Figura G. 4 Aplicación de un filtro ventana. Fuente [26].	45
Figura G. 5 Diagrama de flujo para el cálculo de posición y velocidad a partir de la aceleración. Fuente elaboración propia	46
Figura G. 6 Ubicación de ejes en un smartphone. Fuente [26]......	46
Figura G. 7 Diagrama de flujo para el cálculo de ángulos de giro. Fuente elaboración propia.	50
Figura H. 1 Trayectoria #1 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	51
Figura H. 2 Trayectoria #2 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	51
Figura H. 3 Trayectoria #3 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	51
Figura H. 4 Trayectoria #4 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	52
Figura H. 5 Trayectoria #5 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	52
Figura H. 6 Trayectoria #6 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia ..	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla B. 1 Tabla de parámetros base para un robot de cuatro grados de libertad. Fuente elaboración propia.....	6
Tabla C. 1 Parámetros para encontrar el modelo dinámico	10
Tabla D. 1 Trayectorias Propuestas. Fuente elaboración propia	17
Tabla E. 1 Caracteres para variar la posición de cada servomotor. Fuente elaboración propia.	20

ANEXO A.PLANOS DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT

En este anexo se exponen los planos en del brazo robótico de todas la piezas que se fabricaron y algunas que no pero que hacen parte de él como es la pinza que conforma el efector final del brazo.

A.1 Primer eslabón

A pesar de que el primer eslabón se tomó de la primera versión del robot se incluyen los planos debido a la modificación del mismo mencionada en el capítulo tres aparte 3.2.1 sobre el aumento de la distancia entre las placas soldadas sobre la base.

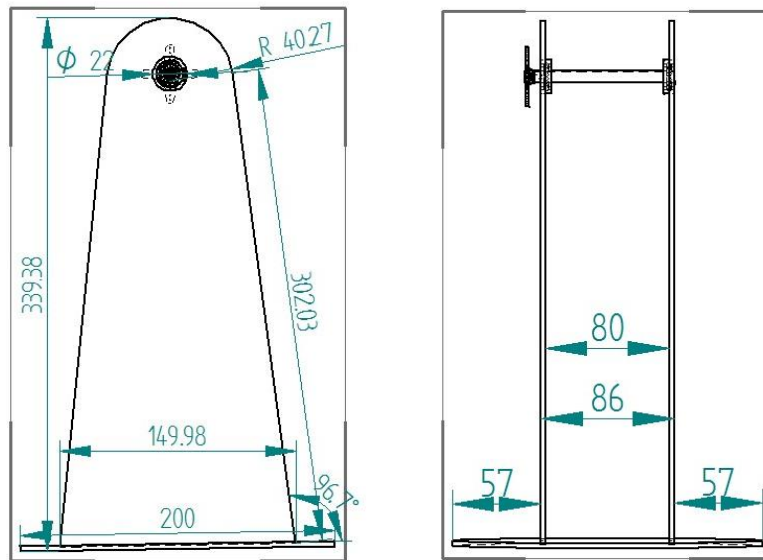


Figura A. 1 Primer eslabón. a Vista lateral. B Vista frontal. Fuente elaboración propia

Para información del funcionamiento de la primera articulación revisa anexos de [1]

A.2 Partes Segundo eslabón

En la figura A.2 se tiene el plano para los dos largueros o partes laterales del segundo eslabón, ya que ambos son iguales. Y en la figura A.3 el plano para las tapas de arriba y abajo de este eslabón.

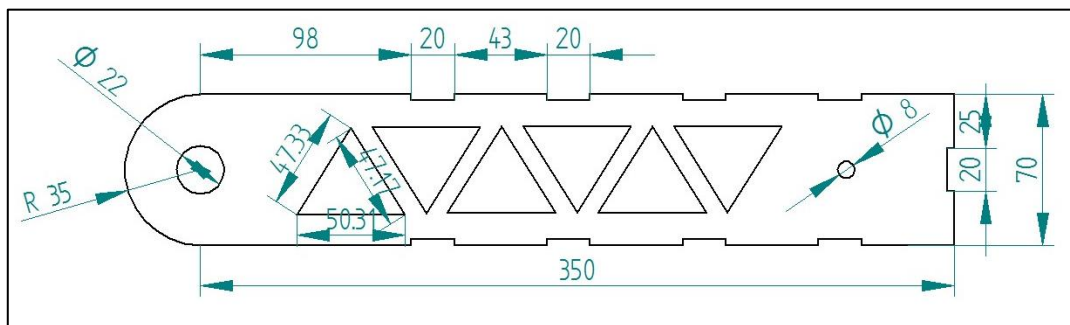


Figura A. 2 Segundo eslabón plano parte lateral derecha e izquierda. Fuente elaboración propia

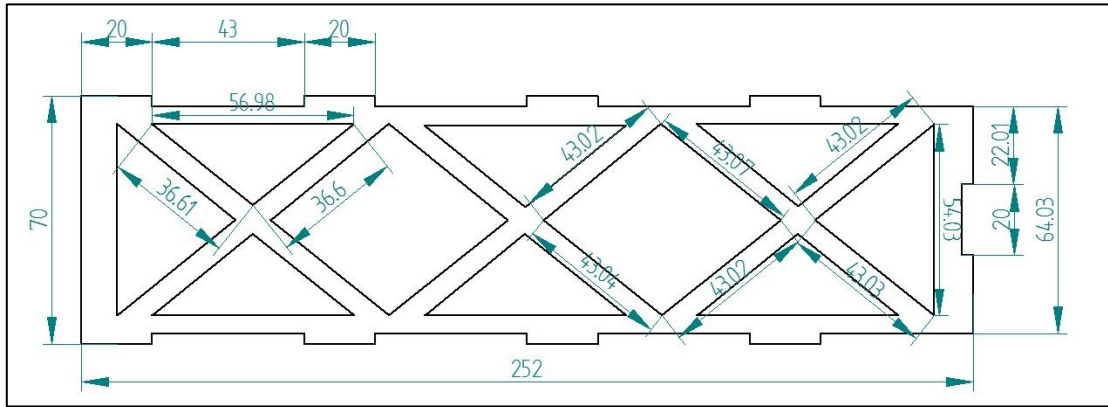


Figura A. 3 Segundo eslabón plano tapa superior e inferior. Fuente elaboración propia

A.3 Partes Soporte del contrapeso

A continuación los planos de las partes que conforman el soporte del contrapeso, el cual es una extensión del segundo eslabón.

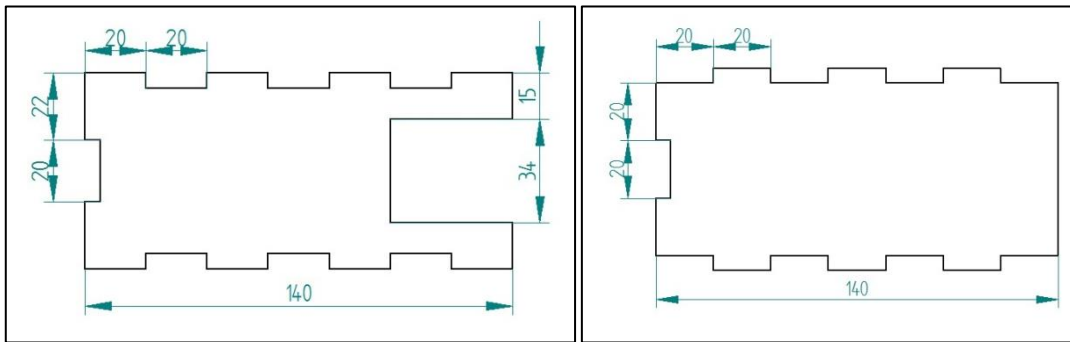


Figura A. 4 Soporte contrapeso. a. Plano parte superior e inferior. b. Plano partes laterales. Fuente elaboración propia

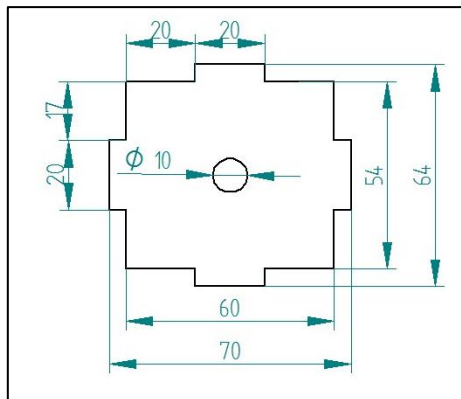


Figura A. 5 Soporte contrapeso plano parte trasera. Fuente elaboración propia

A.4 Partes tercer eslabón

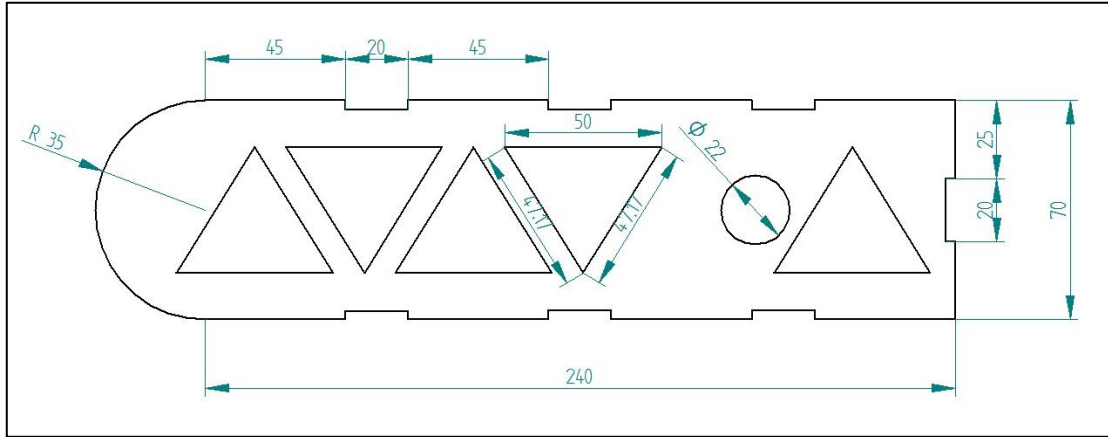


Figura A. 6 Tercer eslabón plano parte lateral derecha. Fuente elaboración propia

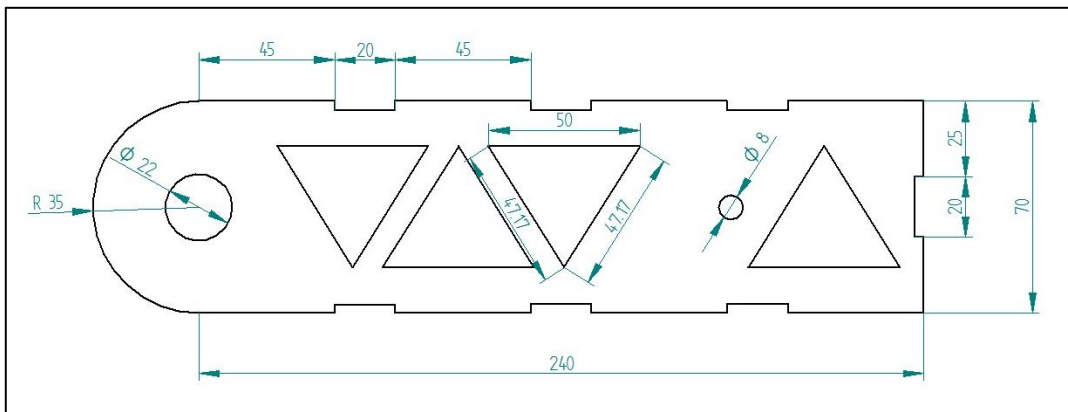


Figura A. 7 Tercer eslabón plano parte lateral izquierdo. Fuente elaboración propia

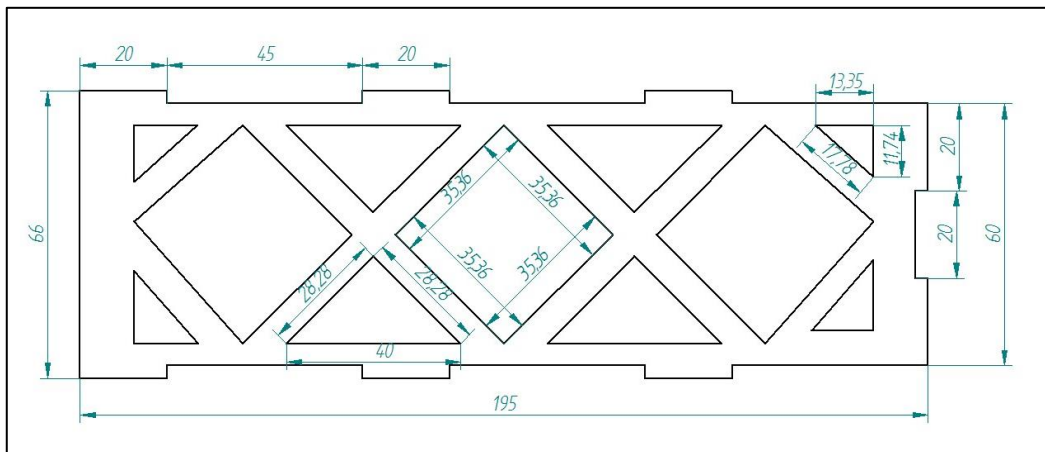


Figura A. 8 Tercer eslabón plano tapa superior e inferior

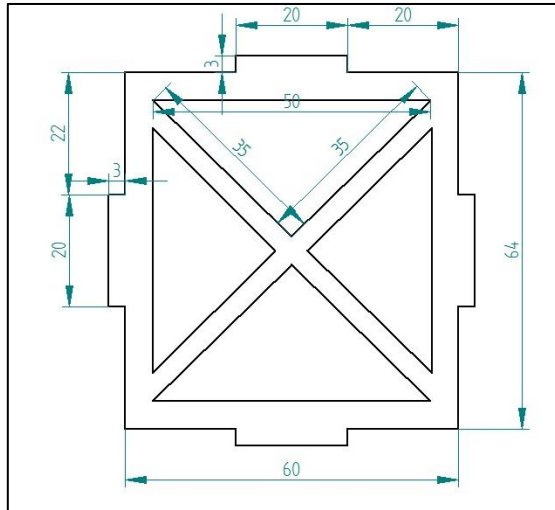


Figura A. 9 Tercer eslabón plano tapa posterior

A.5 Partes Pinza

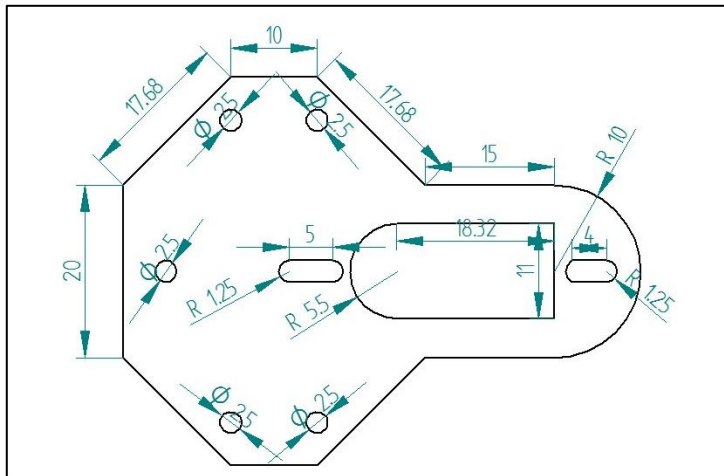


Figura A. 10 Pinza plano Base

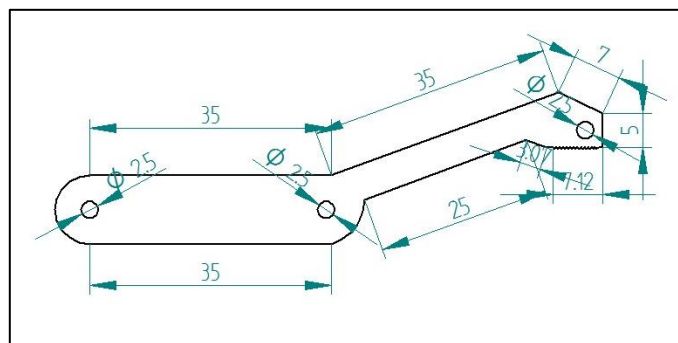


Figura A. 11 Pinza plano brazo

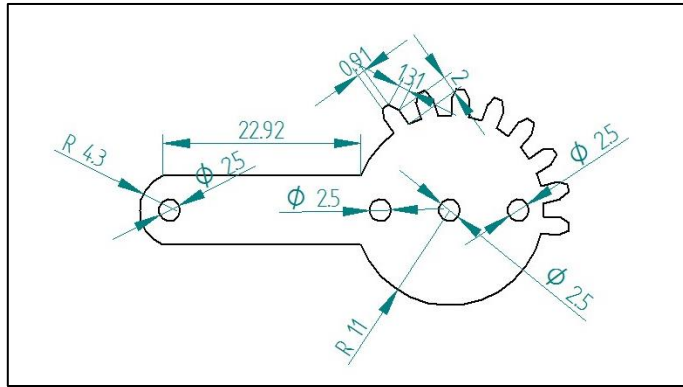


Figura A. 12 Pinza plano brazo engranaje

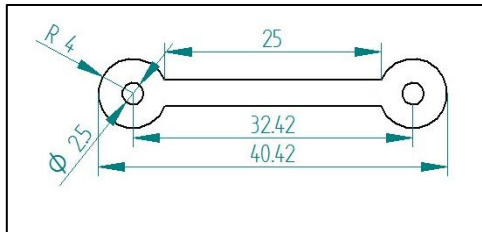


Figura A. 13 Pinza plano brazo eslabón

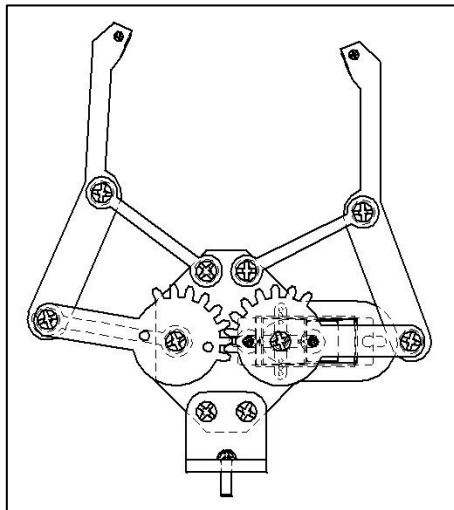


Figura A. 14 Pinza vista superior

ANEXO B.TABLA DE PARAMETROS BASEY RESULTADOS DE ITERACIONES

Siguiendo el método de Khalil Kleinfinger y se realiza la estructura del robot en forma simplificada, como se muestra en la figura B.1

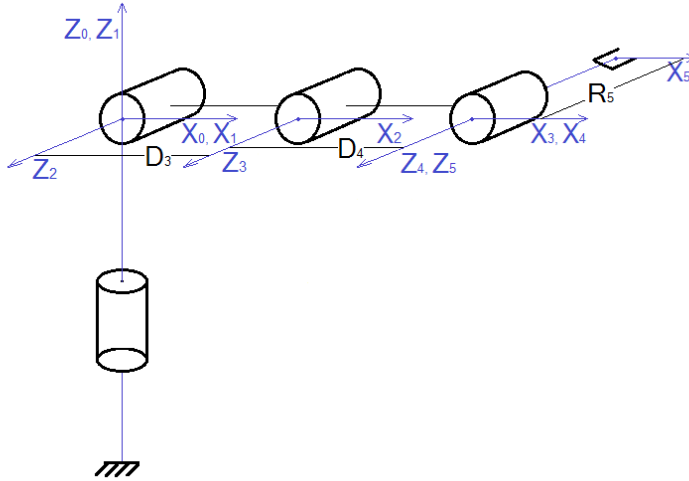


Figura B. 1 Convención utilizada para determinar la tabla de parámetros. Fuente elaboración propia

Mediante el método mencionado se obtiene la tabla de parámetros para el robot antropomórfico de cuatro grados de libertad mostrada a continuación.

J	σ_i	α_i	d_i	θ_i	r_i
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	90	0	θ_2	0
3	0	0	D_3	θ_3	0
4	0	0	D_4	θ_4	0
5	2	0	0	0	R_5

Tabla B. 1Tabla de parámetros base para un robot de cuatro grados de libertad. Fuente elaboración propia

De la tabla 2.1 se parte para encontrar los modelos matemáticos geométrico directo y geométrico inverso siguiendo los métodos que se aplican según la literatura.

A continuación se muestran los resultados de las matrices por cada iteración.

Nota: Tener en cuenta la convención

$$C1 = \cos \theta_1$$

$$C23 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

I iteración: $T_1 = U_1$

$$T_1 = \begin{bmatrix} c234 & -s234 & 0 & D_3 c2 + D_4 c23 \\ 0 & 0 & -1 & -R_5 \\ s234 & c234 & 0 & D_3 s2 + D_4 s23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} s_x c1 + s_y s1 & n_x c1 + n_y s1 & a_x c1 + a_y s1 & P_x c1 + P_y s1 \\ s_y c1 - s_x s1 & n_y c1 - n_x s1 & a_y c1 - a_x s1 & P_y c1 - P_x s1 \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

II iteración: $T_2 = U_2$

$$T_2 = \begin{bmatrix} c34 & -s34 & 0 & D_3 + D_4 c3 \\ s34 & c34 & 0 & D_4 s3 \\ 0 & 0 & 1 & R_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} c2(s_x c1 + s_y s1) + s_z s2 & c2(n_x c1 + n_y s1) + n_z s2 & c2(a_x c1 + a_y s1) + a_z s2 & c2(P_x c1 + P_y s1) + P_z s2 \\ -s2(s_x c1 + s_y s1) + s_z c2 & -s2(n_x c1 + n_y s1) + n_z c2 & -s2(a_x c1 + a_y s1) + a_z c2 & -s2(P_x c1 + P_y s1) + P_z c2 \\ -s_y c1 + s_x s1 & -n_y c1 + n_x s1 & -a_y c1 + a_x s1 & -P_y c1 + P_x s1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta iteración se despeja θ_2 usando la ecuación $T_2(1,4)$ y $T_2(2,4)$ como se muestra a continuación

Si $A = P_x c1 + P_y s1$ se tiene que

$$Ac2 + P_z s2 = D_3 + D_4 c3$$

$$-As2 + P_z c2 = D_4 s3$$

Se eleva al cuadrado cada ecuación y se suman con lo cual se cancela θ_3 , la ecuación resultante es:

$$Yc2 + Xs2 = Z$$

Donde

$$Y = -2AD_3$$

$$X = 2P_z D_3$$

$$Z = D_4^2 - A^2 - P_z^2 - D_3^2$$

Haciendo uso de la ecuación aplicada en [15] se tiene

$$c2 = \frac{YZ + \varepsilon X \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

$$s2 = \frac{XZ - \varepsilon Y \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(s2/c2)$$

De esta iteración también se despeja θ_3 usando las ecuaciones $T_2(1,4)$ y $T_2(2,4)$ como se muestra a continuación

$$c2(P_x c1 + P_y s1) + P_z s2 = D_3 + D_4 c3$$

$$-s2(P_x c1 + P_y s1) + P_z c2 = D_4 s3$$

De cada ecuación se despeja C3 y S3 respectivamente

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{(P_z \cos \theta_2 - \sin \theta_2 (P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1))}{(P_z \sin \theta_2 + \cos \theta_2 (P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1) - D_3)}\right)$$

III iteración $T_3 = U_3$

$$T_3 = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & D_4 \\ s4 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_3 = \begin{bmatrix} c23(s_x c1 + s_y s1) + s_z s23 & c23(n_x c1 + n_y s1) + n_z s23 & c23(a_x c1 + a_y s1) + a_z s23 & c23(P_x c1 + P_y s1) + P_z s23 - D_3 c3 \\ -s23(s_x c1 + s_y s1) + s_z c23 & -s23(n_x c1 + n_y s1) + n_z c23 & -s23(a_x c1 + a_y s1) + a_z c23 & -s23(P_x c1 + P_y s1) + P_z c23 + D_3 s3 \\ -s_y c1 + s_x s1 & -n_y c1 + n_x s1 & -a_y c1 + a_x s1 & -P_y c1 + P_x s1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta iteración se despeja θ_1 usando la ecuación $T_3(3,4)$ como se muestra a continuación

$$-P_y C1 + P_x S1 = R_5$$

$$Y = -P_y$$

$$X = P_x$$

$$Z = R_5$$

Por medio de Maple se deduce que

$$C1 = \frac{YZ + \varepsilon X \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

$$S1 = \frac{XZ - \varepsilon Y \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(S1/C1)$$

De esta iteración también se despeja θ_4 usando las ecuaciones $T_3(1,1)$ y $T_3(2,1)$ como se muestra a continuación

$$C4 = c23(s_x c1 + s_y s1) + s_z s23$$

$$S4 = -s23(s_x c1 + s_y s1) + s_z c23$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{(S_z \cos(\theta_2 + \theta_3) - \sin(\theta_2 + \theta_3) (S_x \cos \theta_1 + S_y \sin \theta_1))}{(S_z \sin(\theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_2 + \theta_3) (S_x \cos \theta_1 + S_y \sin \theta_1))} \right)$$

IV iteración: $T_4 = U_4$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_4 = \begin{bmatrix} c234(s_y s1 + s_x c1) + s_z s234 & c234(n_x c1 + n_y s1) + n_z s234 & c234(a_x c1 + a_y s1) + a_z s234 & c234(P_x c1 + P_y s1) + P_z s234 - D_3 c34 - D_4 c4 \\ -s234(s_x c1 + s_y s1) + s_z c234 & -s234(n_x c1 + n_y s1) + n_z c234 & -s234(a_x c1 + a_y s1) + a_z c234 & -s234(P_x c1 + P_y s1) + P_z c234 + D_3 s34 + D_4 s4 \\ -s_y c1 + s_x s1 & -n_y c1 + n_x s1 & a_y c1 + a_x s1 & -P_y c1 + P_x s1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ANEXO C. PARAMETROS DEL ROBOT PARA ENCONTRAR EL MODELO DINÁMICO

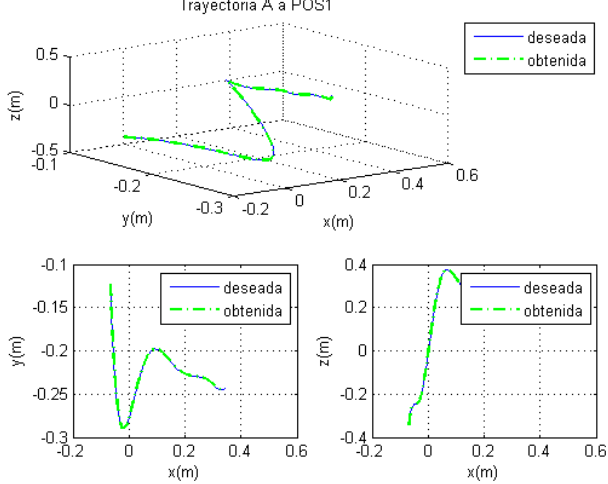
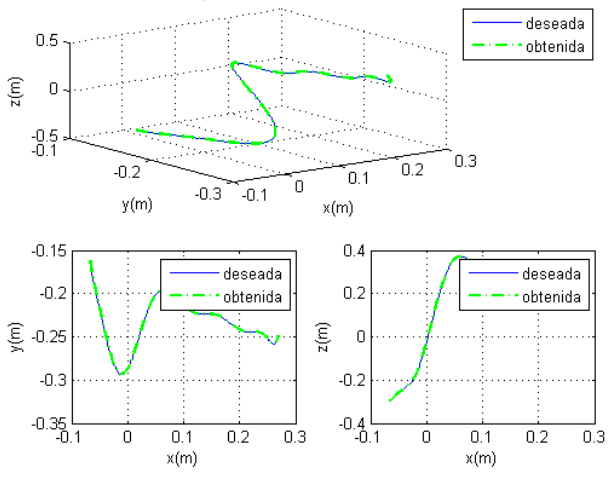
A partir de los datos hallados mediante Solid Edge, mostrados en la tabla C.1 se halla el modelo dinámico mediante Symoro.

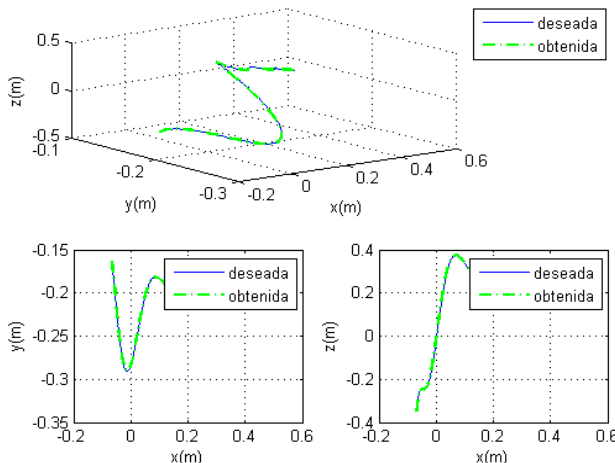
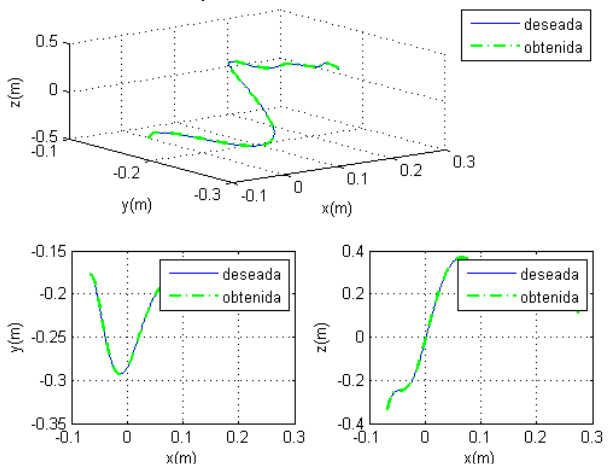
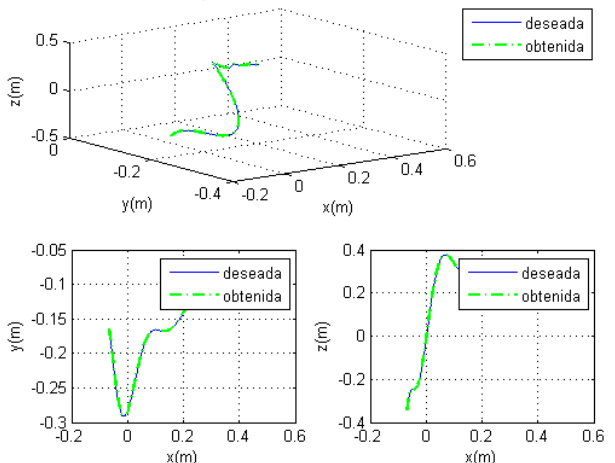
Eslabón	Propiedades físicas V(mm ³) M(Kg)	Con respecto al sistema de coordenadas de cada articulación		
		Centro de masa(mm)	Primer momento de inercia(g-cm ²)	Segundo momento de inercia (g-cm ²)
1ro	V= 461436,89 M= 2,615	X= -1,88 Y= 5,09 Z= 111,49	lxx= 690679,97 lyy= 669039,25 lzz= 100451,85 lxy= -656,64 lxz= -9949,93 lyz= 38031,28	I1= 364956,05 I2= 346007,95 I3= 97423,82
2do	V=173390,14 M= 0,207	X=-103,75 Y= -38,02 Z= 58,55	lxx= 20322,38 lyy= 59230,73 lzz= 49491,67 lxy= 8175,75 lxz=-24252,30 lyz= -4614,05	I1= 30823,87 I2= 29841,28 I3= 3613,37
3ro	V= 261700,54 M= 0,292	X= -44,44 Y=-29,98 Z= -0,16	lxx= 5281,13 lyy= 17531,99 lzz= 20650,94 lxy= 3809,33 lxz= 45,98 lyz= 19,41	I1= 12262,18 I2= 11766,65 I3= 2657,32
4to	V=114877,13 M= 0,137	X= 105,65 Y= 28,98 Z= -0,36	lxx= 2909,52 lyy= 23476,45 lzz= 24565,34 lxy= 4186,26 lxz= -41,33 lyz= -14,28	I1= 8216,74 I2= 8157,38 I3= 1760,88

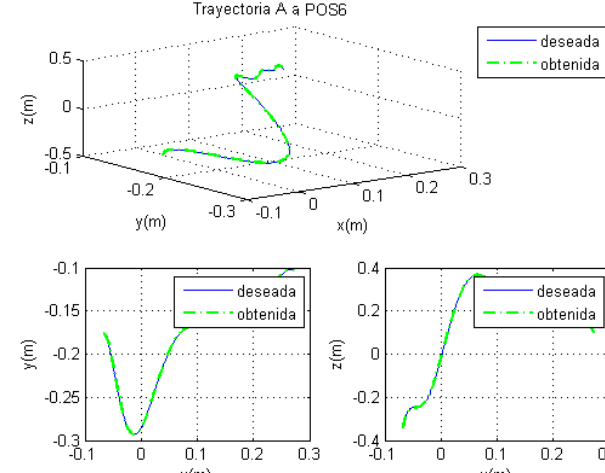
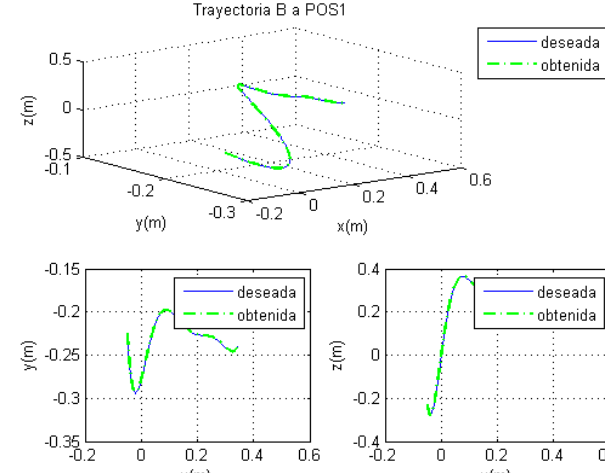
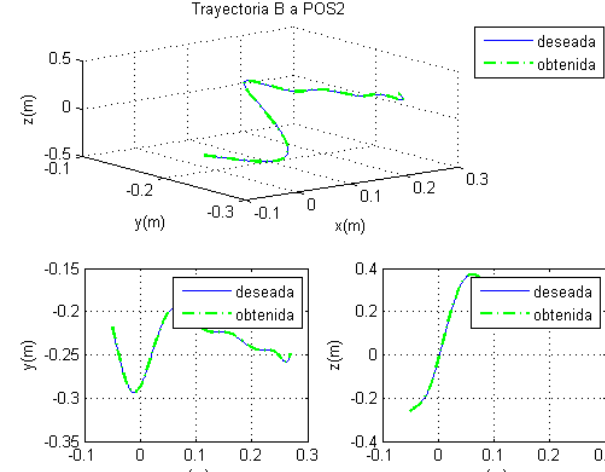
Tabla C. 1 Parámetros para encontrar el modelo dinámico

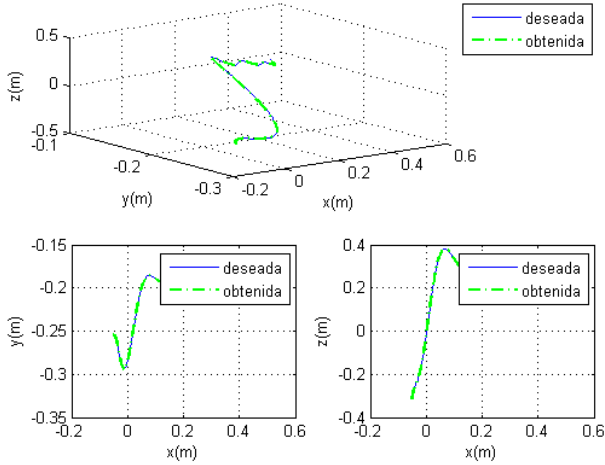
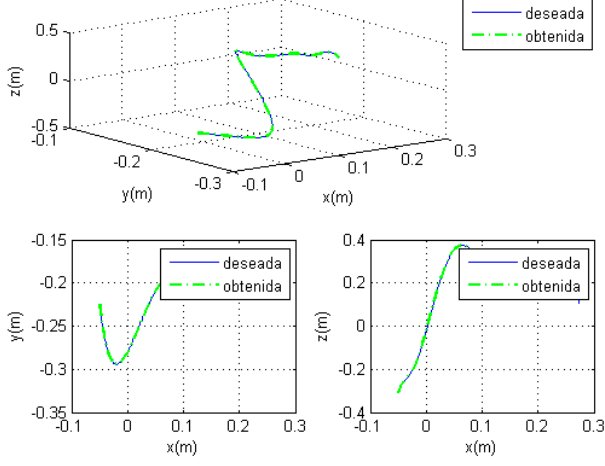
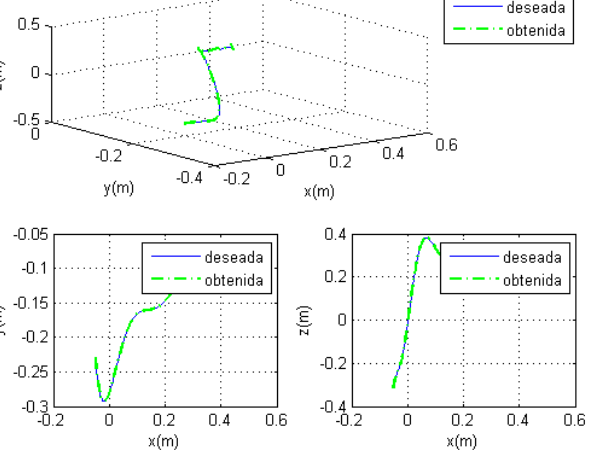
Donde V es volumen y M la masa

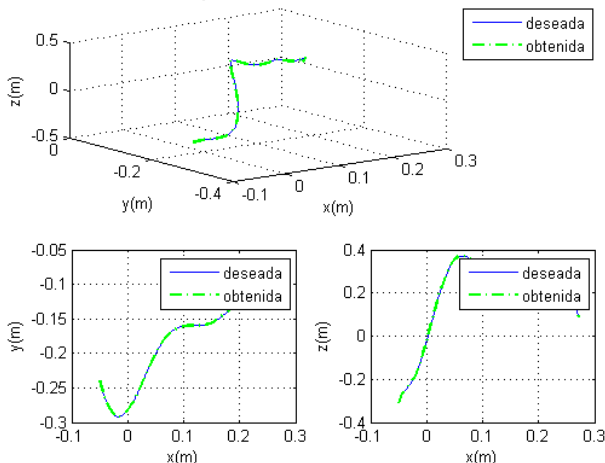
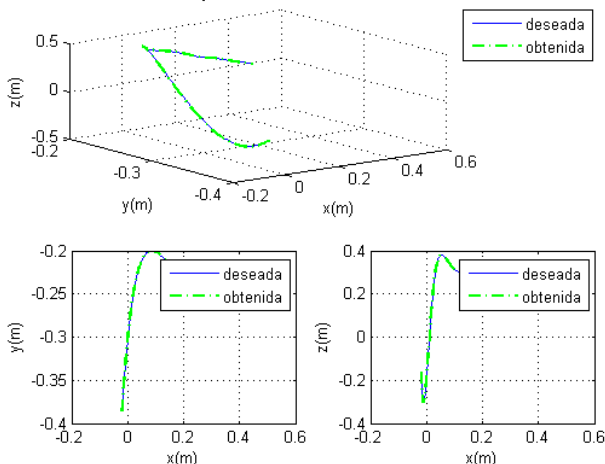
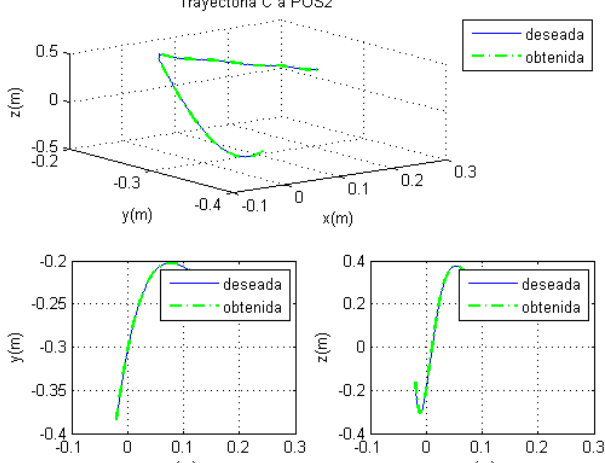
ANEXO D.GRÁFICAS TRAYECTORIAS: COMPARACIÓN ENTRE EL POLINOMIO QUE SE OBTUVO MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL Y RESPUESTA DEL MG

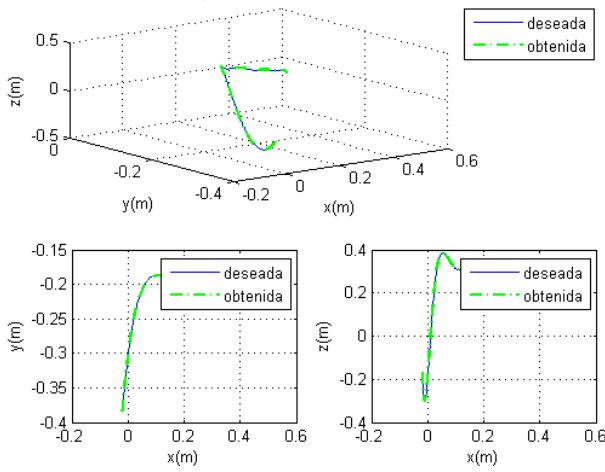
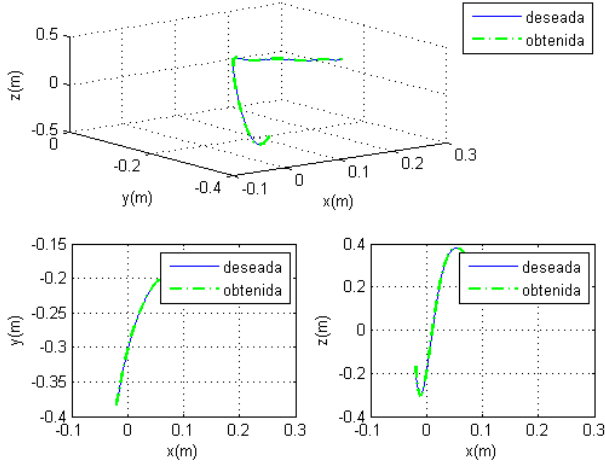
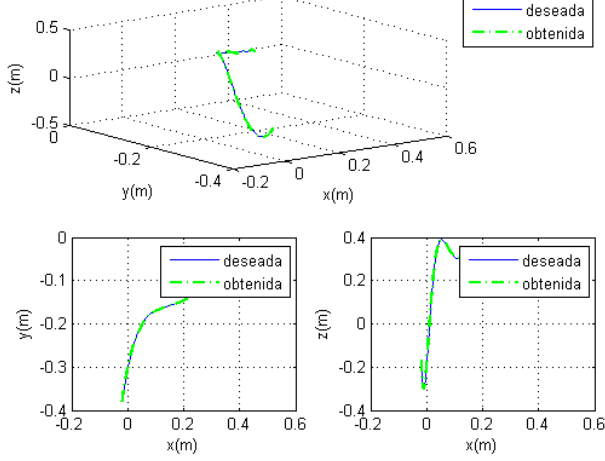
Gráfica de las trayectorias propuestas en coordenadas cartesianas	Coeficientes Polinomios		
	Plano xy	Plano xz	Centrado y escalado
<p style="text-align: center;">Trayectoria A a POS1</p> 	<p>p1_1 = 0.0015486 p2_1 = -0.010027 p3_1 = 0.020188 p4_1 = -0.0095229 p5_1 = -0.010119 p6_1 = -0.015516 p7_1 = -0.27212</p>	<p>p1_2 = 0.040838 p2_2 = -0.11861 p3_2 = -0.048367 p4_2 = 0.37467 p5_2 = -0.26246 p6_2 = -0.082025 p7_2 = 0.28527</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.058005 sigma1 = 0.14324 Ecua plano xy mu2 = 0.058005 sigma2 = 0.14324</p>
<p style="text-align: center;">Trayectoria A a POS2</p> 	<p>p1_1 = -0.0014782 p2_1 = -0.0010732 p3_1 = 0.018069 p4_1 = -0.018883 p5_1 = -0.0094321 p6_1 = -0.012069 p7_1 = -0.27073</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631 Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>

<p>Trayectoria A a POS3</p> 	<p>p1_1 = - 0.0001504 1 p2_1 = - 0.0037315 p3_1 = - 0.018146 p4_1 = - 0.025166 p5_1 = - 0.0089935 p6_1 = - 0.01807 p7_1 = - 0.26262</p>	<p>p1_2 = 0.038714 p2_2 = - 0.11318 p3_2 = - 0.045072 p4_2 = 0.36164 p5_2 = - 0.26315 p6_2 = - 0.073071 p7_2 = 0.28451</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.057717 sigma1 = 0.14283 Ecua plano xy mu2 = 0.057717 sigma2 = 0.14283</p>
<p>Trayectoria A a POS4</p> 	<p>p1_1 = - 0.001274 p2_1 = - 0.0088343 p3_1 = - 0.019782 p4_1 = - 0.016525 p5_1 = - 0.013771 p6_1 = - 0.26407</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = - 0.10494 p3_2 = - 0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = - 0.2494 p6_2 = - 0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631 Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>
<p>Trayectoria A a POS5</p> 	<p>p1_1 = - 0.0018548 p2_1 = - 0.013384 p3_1 = - 0.031935 p4_1 = - 0.029178 p5_1 = - 0.047573 p6_1 = - 0.25324</p>	<p>p1_2 = 0.038839 p2_2 = - 0.11338 p3_2 = - 0.045404 p4_2 = 0.36208 p5_2 = - 0.26301 p6_2 = - 0.073189 p7_2 = 0.28443</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.057717 sigma1 = 0.14283 Ecua plano xy mu2 = 0.057767 sigma2 = 0.14293</p>

<p>Trayectoria A a POS6</p> 	<p>p1_1 = 0.0014454 p2_1 = 0.0028924 p3_1 = -0.027279 p4_1 = 0.040695 p5_1 = 0.042667 p6_1 = -0.25753;</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631</p> <p>Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>
<p>Trayectoria B a POS1</p> 	<p>p1_1 = 0.0024635 p2_1 = -0.0066416 p3_1 = -0.0002088 4 p4_1 = 0.0091033 p5_1 = -0.026025 p6_1 = -0.26748</p>	<p>p1_2 = 0.040422 p2_2 = -0.11708 p3_2 = -0.04942 p4_2 = 0.37332 p5_2 = -0.2612 p6_2 = -0.081861 p7_2 = 0.28514</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.058005 sigma1 = 0.14324</p> <p>Ecua plano xy mu2 = 0.058005 sigma2 = 0.14324</p>
<p>Trayectoria B a POS2</p> 	<p>p1_1 = 0.00199 p2_1 = -0.0035841 p3_1 = -0.0041787 p4_1 = 0.0071206 p5_1 = -0.023965 p6_1 = -0.27113</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631</p> <p>Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>

<p style="text-align: center;">Trayectoria B a POS3</p> 	<pre>p1_1 = - 0.0049344 p2_1 = 0.015847 p3_1 = - 0.0009151 3 p4_1 = - 0.035592 p5_1 = 0.027298 p6_1 = 0.016049p 7_1 = - 0.26389;</pre>	<pre>p1_2 = 0.040298 p2_2 = - 0.11689 p3_2 = - 0.048933 p4_2 = 0.37246 p5_2 = - 0.26125 p6_2 = - 0.081499 p7_2 = 0.28519</pre>	<pre>Ecua plano xy mu1 = 0.057717 ; sigma1 = 0.14293 Ecua plano xy mu2 = 0.057717 sigma2 = 0.14283</pre>
<p style="text-align: center;">Trayectoria B a POS4</p> 	<pre>p1_1 = 0.0047048 p2_1 = - 0.009491 p3_1 = - 0.011711 p4_1 = 0.0312 p5_1 = 0.0050288 p6_1 = - 0.26448</pre>	<pre>p1_2 = 0.037136 p2_2 = - 0.10494 p3_2 = - 0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = - 0.2494 p6_2 = - 0.05003 p7_2 = 0.28189</pre>	<pre>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631 Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</pre>
<p style="text-align: center;">Trayectoria B a POS5</p> 	<pre>p1_1 = 0.0063134 p2_1 = - 0.012872 p3_1 = - 0.019024 p4_1 = 0.049934 p5_1 = 0.03506 p6_1 = - 0.25428;</pre>	<pre>p1_2 = 0.038839 p2_2 = - 0.11338 p3_2 = - 0.045404 p4_2 = 0.36208 p5_2 = - 0.26301 p6_2 = - 0.073189 p7_2 = 0.28443</pre>	<pre>Ecua plano xy mu1 = 0.057717 sigma1 = 0.14283 Ecua plano xy mu2 = 0.057767 sigma2 = 0.14293</pre>

<p style="text-align: center;">Traectoria B a POS6</p> 	<p>p1_1 = 0.0074242 p2_1 = -0.015433 p3_1 = -0.019209 p4_1 = 0.055369 p5_1 = 0.033925 p6_1 = -0.25793; p7_2 = 0.28189</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037246 sigma1 = 0.11631 Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>
<p style="text-align: center;">Traectoria C a POS1</p> 	<p>p1_1 = 0.0071344 p2_1 = -0.035019 p3_1 = 0.047154 p4_1 = 0.010676 p5_1 = -0.053706 p6_1 = 0.014553 p7_1 = -0.013969 p8_1 = -0.27083;</p>	<p>p1_2 = 0.040462 p2_2 = -0.11719 p3_2 = -0.049416 p4_2 = 0.37346 p5_2 = -0.26129 p6_2 = -0.081846 p7_2 = 0.28515</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.057968 sigma1 = 0.14328 Ecua plano xy mu2 = 0.058005 sigma2 = 0.14324</p>
<p style="text-align: center;">Traectoria C a POS2</p> 	<p>p1_1 = 0.01472 p2_1 = -0.042121 p3_1 = 0.012512 p4_1 = 0.035938 p5_1 = -0.040797 p6_1 = -0.26935;</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037209 sigma1 = 0.11635 Ecua plano xy mu2 = 0.037246 sigma2 = 0.11631</p>

<p>Trayectoria C a POS3</p> 	<p>p1_1 = 0.021713 p2_1 = -0.065031 p3_1 = 0.016411 p4_1 = 0.074571 p5_1 = -0.021784 p6_1 = -0.26589</p>	<p>p1_2 = 0.040338 p2_2 = -0.11699 p3_2 = -0.048929 p4_2 = 0.3726 p5_2 = -0.26134 p6_2 = -0.081483 p7_2 = 0.2852</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.05768 sigma1 = 0.14287 Ecua plano xy mu2 = 0.05768 sigma2 = 0.14287</p>
<p>Trayectoria C a POS4</p> 	<p>p1_1 = -0.0090088 p2_1 = 0.035374 p3_1 = -0.028779 p4_1 = -0.034638 p5_1 = 0.051374 p6_1 = 0.0053518 p7_1 = -0.26535</p>	<p>p1_2 = 0.037136 p2_2 = -0.10494 p3_2 = -0.038195 p4_2 = 0.31706 p5_2 = -0.2494 p6_2 = -0.05003 p7_2 = 0.28189</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.037209 sigma1 = 0.11635 Ecua plano xy</p>
<p>Trayectoria C a POS5</p> 	<p>p1_1 = 0.023953 p2_1 = -0.069581 p3_1 = 0.0089108 p4_1 = 0.094698 p5_1 = 0.0080434 p6_1 = -0.25652;</p>	<p>p1_2 = 0.038839 p2_2 = -0.11338 p3_2 = -0.045404 p4_2 = 0.36208 p5_2 = -0.26301 p6_2 = -0.073189 p7_2 = 0.28443</p>	<p>Ecua plano xy mu1 = 0.05768 sigma1 = 0.14287 Ecua plano xy mu2 = 0.057767 sigma2 = 0.14293</p>

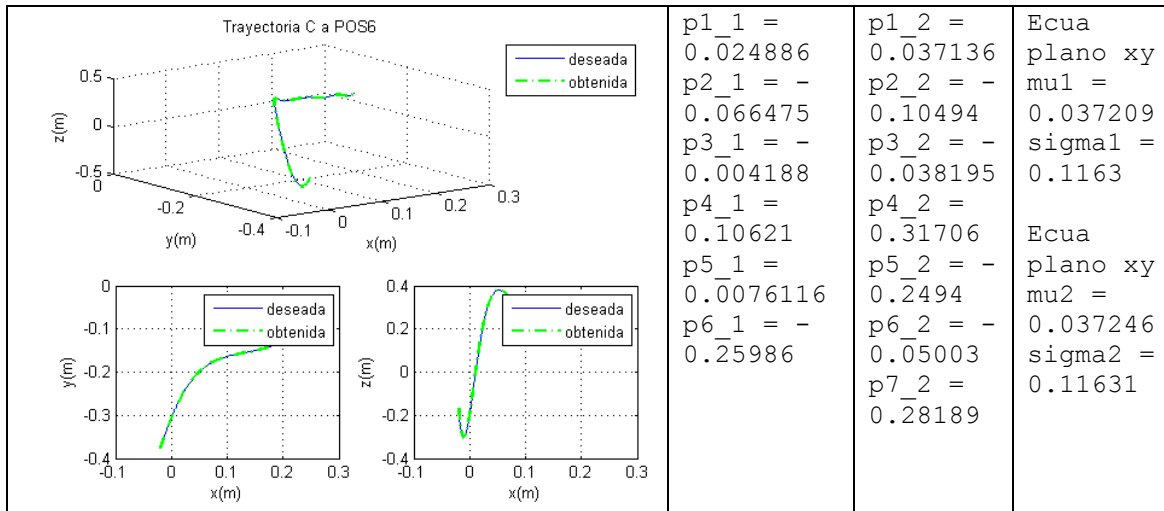


Tabla D. 1 Trayectorias Propuestas. Fuente elaboración propia

A continuación se presenta la ecuación general en la cual se pueden reemplazar dichos coeficientes:

$$Q_{a+1} = P_{1_a}z_1^n + P_{2_a}z_1^{n-1} + P_{3_a}z_1^{n-2} + \dots + P_{n-1_a}z_1 + P_{n_a}$$

Donde a es el número del polinomio al que pertenece el coeficiente. Así a=1 regresión de la articulación 2 respecto a la 1, a=2 regresión de la articulación3 respecto a la 1 y a=3 regresión de la articulación 4 respecto a la 1.

ANEXO E. TUTORIAL GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

Comprobar funcionalidad

Conectar Arduino Mega

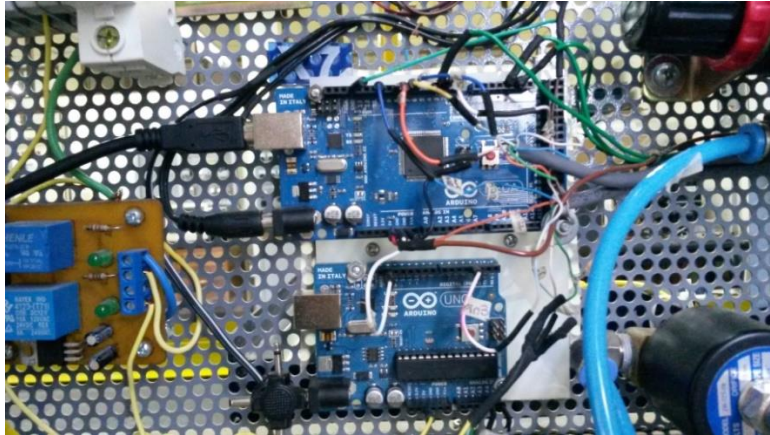


Figura E. 1 Arduino Mega ubicada en el panel de la planta de presión. Fuente elaboración propia

Abrir, verificar y cargar el programa 'encontrar_pos_xa5servos.ino' que se encuentra en la carpeta del mismo nombre.

```
encontrar_pos_xa5servos

// Sweep
// by BARRAGAN <http://barraganstudio.com>
// This example code is in the public domain.

#include <Servo.h>

Servo myservo;
Servo myservo1;
Servo myservo2;
Servo myservo3;
Servo myservo4;

int pos = 110;
int pos1 = 135;
```

Compilando el Sketch...

1 Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM4

Figura E. 2 Fuente ubicada en el panel de control. Fuente elaboración propia

Conectar cable de la fuente de poder



Figura E. 3 Fuente de poder. Fuente elaboración propia

Encender robot con botón cuadrado de color verde.



Figura E. 4 Interface hombre máquina. Fuente elaboración propia.

Una vez puesto en marcha el programa en Arduino abrir el monitor serial cliqueando el ícono de la lupa que aparece en la parte superior derecha del IDE como se muestra en la figura E.4

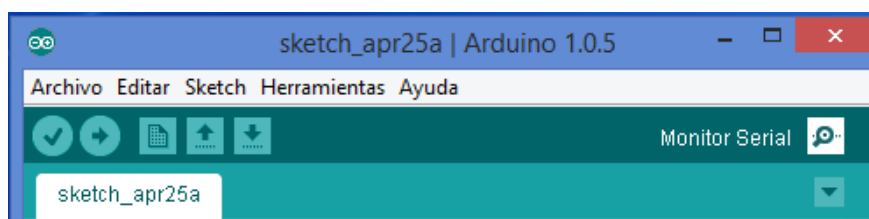


Figura E. 5 Monitor serial del IDE de Arduino. Fuente elaboración propia

Como ejemplo, se aprecian 5 puntos definidos remarcados e azul en la figura E.6.a y la figura E.6.b dichos puntos unidos mediante líneas fucsia, a las cuales se le denomina trayectorias parciales.

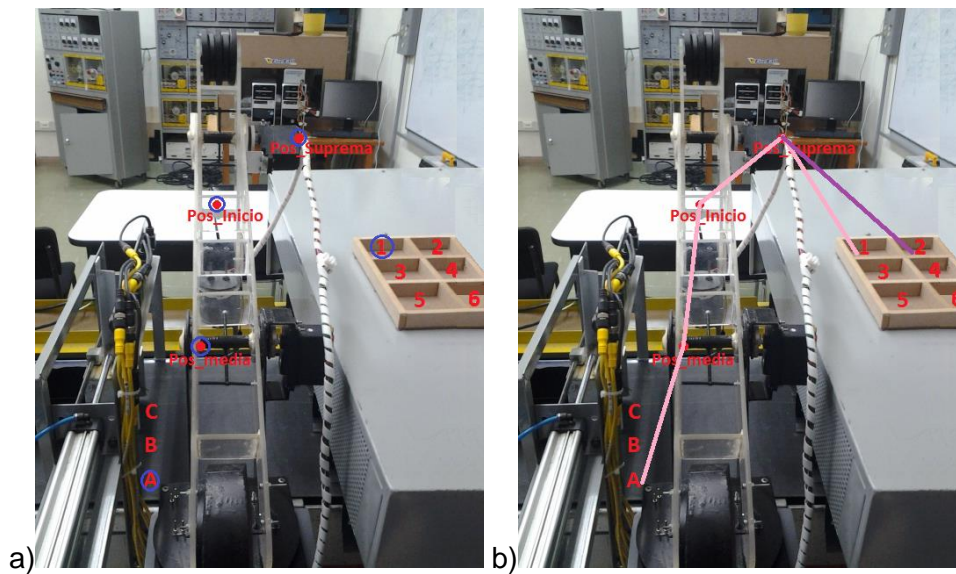


Figura E. 7 Definición de puntos en el espacio de trabajo limitado por la planta de clasificación.
Fuente elaboración propia

La trayectoria conformada por líneas fucsia se llamara trayectoria base. Después de definir dicha trayectoria se usara el modelo geométrico para verificar que el robot pueda realizar. Para ello abrir Matlab

Dirigirse a la carpeta

PRUEBA_mgdymgi_V22_TRAYECTcon regres_art para A1_B1_C1Liza

Abrir el archivo de simulink llamado 'Prueba_puntos_art.slx'. El diagrama de bloques correspondiente se aprecia en la figura E.7

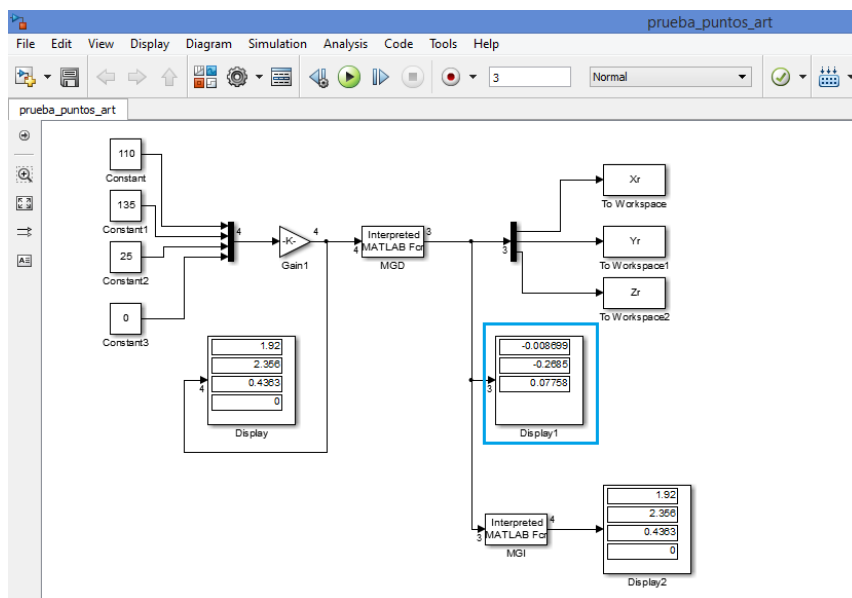


Figura E. 8 MG en Simulink. Fuente elaboración propia

Mediante este Simulink se pueden traducir las coordenadas articulares de los puntos que se han definido para la trayectoria, las cuales se ingresan en las entradas constantes, ello con el fin de conocer con precisión las coordenadas cartesianas, que se observan en el display remarcado en azul.

La obtención de coordenadas cartesianas también se puede hacer digitando la línea siguiente en el Command Window

```
>>mgd_antropo(a,b,c,d);
```

Donde a, b, c y d son valores articulares en radianes.

NOTA: los valores manejados en el monitor serial están dados en grados. Para convertir a radianes se utiliza la siguiente ecuación

$$Valor(rad) = valor(grad) * \frac{\pi}{180} \quad (1)$$

Una vez comprobados los valores cartesianos mediante el MGD (a partir de los articulares) se procede a ingresar dichos valores en Matlab para generar vectores que compongan la trayectoria.

Para ello abrir el script llamado 'Regresion_PosA_Pos1.m'

En este script inicialmente se definen los tres vectores correspondientes a X,Y e Z con los puntos de inicio, fin y el tamaño del paso, variable para que sean los tres de la misma longitud, como se muestra a continuación.

Definir un numero de pasos igual para X, Y e Z haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$Tamaño\ del\ paso = \frac{valor\ final - valor\ inicial}{numero\ de\ pasos}$$

Expresado en el script de la siguiente manera, remarcado en azul se escribe el valor menor, en rojo el mayor y en verde el tamaño del paso calculado en la ecuación anterior, como se observa en la figura E.8

```
%Lineas 3d entre dos puntos
%De A a media
X1 = [-6.74:0.078113207:-2.6]';
Y1 = [-28.92:0.235:-16.37]';
Y1_1 = sort(Y1,1,'descend');
Z1 = [-29.77:0.1512963:-21.6]';
```

Figura E. 9 Parámetros para definir los vectores. Fuente elaboración propia

Nota. Si la distancia medida entre dos puntos si el punto inicio es un valor mayor que el final seutilia la estructura explicada anteriormente Y seguido se aplica la función sort para invertir el vector, usando el modo descend. Su sintaxis es:

```
Y = sort(X,DIM,MODE);
```

Para mayor información consulte la ayuda de Matlab.

Estos parámetros deben ser actualizados con los datos obtenidos en Matlab.

Se debe tener en cuenta que para cada vector X, Y & Z debe coincidir el final del actual con el inicio del siguiente, como se muestra en la figura E.9.

```

5 %%
6 %Lineas 3d entre dos puntos
7 %De A a media
8 X1 = [-6.74:0.078113207:-2.6]';%X1 = [-6.74:0.124815:0]';
9 Y1 = [-28.92;0.235:-16.37]';
10 Y1_1 = sort(Y1,1,'descend');
11 Z1 = [-29.77:0.1512963:-21.6]';
12
13 %De posicion media a inicial
14 X2 = [-2.6:0.01634921:1.52]';%X2 = [0:0.00603175:1.52]';
15 Y2 = [-28.92;0.0032142859:-28.11]';
16 Z2 = [-21.6:0.11912699:8.42]';
17 %

```

Figura E. 10 Condición para una correcta concatenación. Fuente elaboración propia

Esto se hace las veces que sea necesario según el número de líneas o trayectorias parciales de las que se componga la trayectoria base.

Luego se concatenan los vectores ya definidos, como se muestra en la figura E.10.

```

30 %% CONCATENAR LOS VECTORES
31
32 X_T1_C = vertcat(X1,X2);
33 X_T2_C = vertcat(X_T1_C,X3);
34 X_T3_C = vertcat(X_T2_C,X4);
35
36 Y_T1_C = vertcat(Y1_1,Y2);
37 Y_T2_C = vertcat(Y_T1_C,Y3);
38 Y_T3_C = vertcat(Y_T2_C,Y4_1);
39
40 Z_T1_C = vertcat(Z1,Z2);
41 Z_T2_C = vertcat(Z_T1_C,Z3);
42 Z_T3_C = vertcat(Z_T2_C,Z4_1);
43
44 X_T3 = zeros(length(X_T3_C),1);
45 Y_T3 = zeros(length(X_T3_C),1);
46 Z_T3 = zeros(length(X_T3_C),1);

```

Figura E. 11 Vectores concatenados. Fuente elaboración propia

Los vectores concatenados deben poderse apreciar en una imagen como se muestra en la figura E.11 después correr el script.

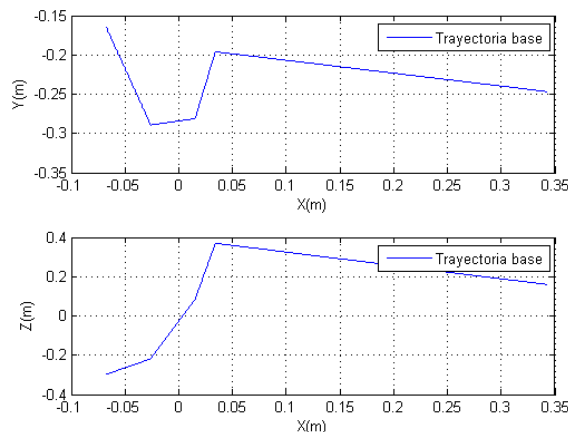


Figura E. 12 Trayectoria base. Fuente elaboración propia

Estas dos graficas describen el comportamiento de y & z con respecto a x , de forma que se tiene la trayectoria base en coordenadas cartesianas. En la parte superior de la figura E.11 se describe Y vs X , y en la inferior Z vs X .

Una vez se tenga completa la trayectoria base se abre el archivo llamado 'Trayect_sim.slx' el cual contiene el modelo geométrico del robot.

Verificación de la trayectoria propuesta

El archivo 'Trayect_sim.slx' que se muestra en la figura E.12 contiene los bloques necesarios para la verificación de la trayectoria.

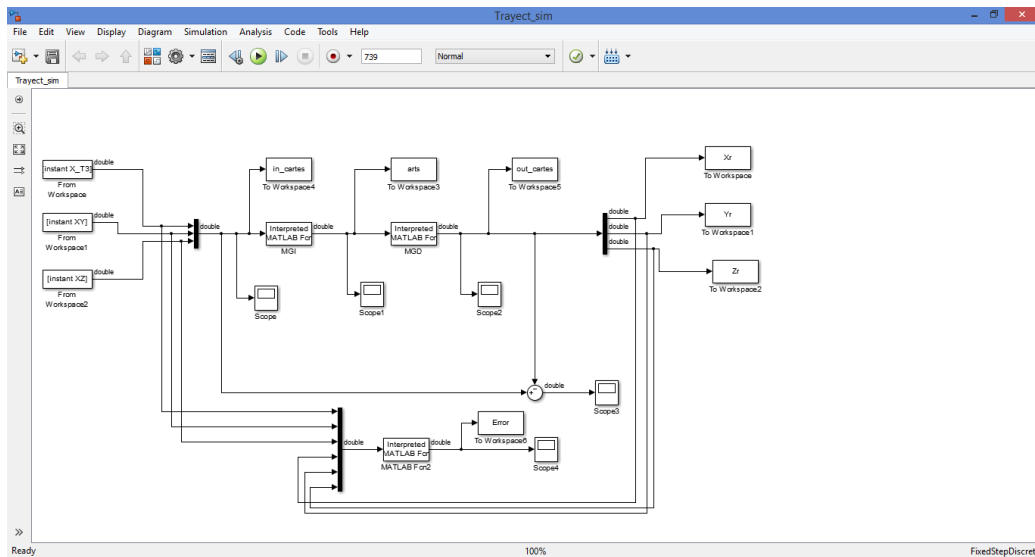


Figura E. 13 Implementación del modelo geométrico para prueba de trayectorias. Fuente elaboración propia

Para cargar la trayectoria en los bloques de entrada del archivo simulink se deben definir los parámetros mostrados en la figura E.13

```

%% Parametros para operación en simulink
for i=1:length(X_T3)
    instant(i,1)=i;
end
for i=1:length(X_T3)
    cons1(i,1)=X_T3(i);
    cons2(i,1)=XY(i);
    cons3(i,1)=XZ(i);
end

```

Z_T3_C	<739x1 double>
cons1	<739x1 double>
cons2	<739x1 double>
cons3	<739x1 double>
cuplas	<739x4 double>
cuplas_Base	<739x4 double>
i	739
instant	<739x1 double>
j	739
k	739
mu0	369.5000
mu1	2.2628
mu2	7.7632

Figura E. 14 Parámetros para cargar entradas a simulink. Fuente elaboración propia

Después de correr el script descrito anteriormente se comprueba que estén establecidos los parámetros del solver en simulink. Para ello ir a:

Simulation>Debug>Simulation Target for MATLAB &statedflow>solver.

En simulation time:

Colocar en Stop time el número de pasos que se obtiene como resultado de la última concatenación, como muestra el recuadro azul en la figura E.13

En solveroptions rectificar

Type: Fixed-step

Solver:discrete

Fixed-step size:1

Como se muestra en la figura E14.

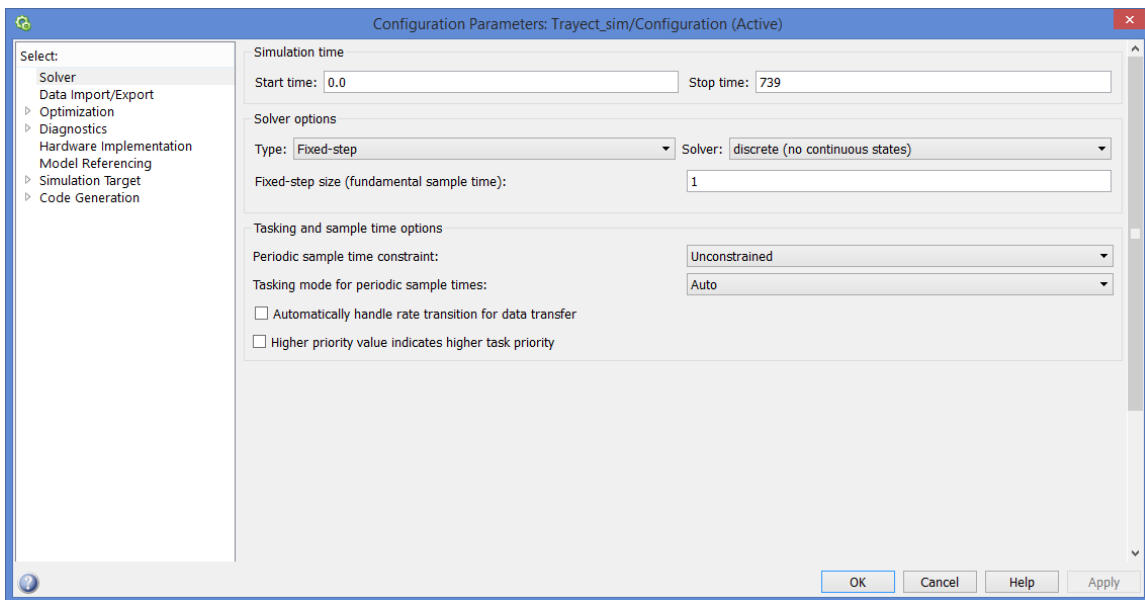


Figura E. 15 Parámetros de configuración del solver. Fuente elaboración propia

Pulsar Apply, OK. Y finalmente 'Run'.

Terminado el tiempo de simulación se tiene en cada osciloscopio las coordenadas cartesianas de entrada, las articulares y las cartesianas de salida respectivamente, como se puede apreciar en las figuras E.15, E16 y E17, o en la secciones 4.1.2 y 4.1.3 de la monografía.

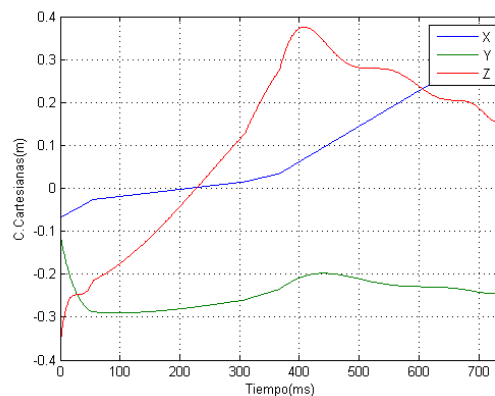


Figura E. 16 Coordenadas cartesianas deseadas. Fuente elaboración propia

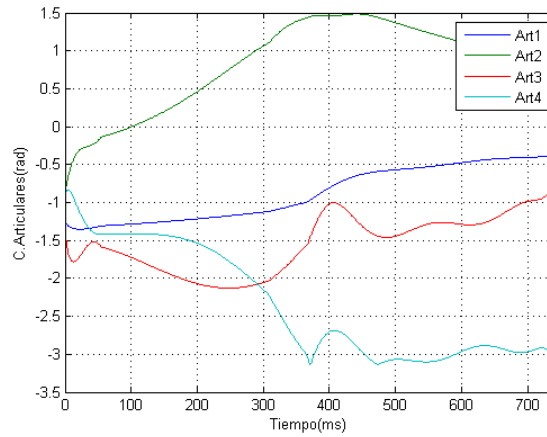


Figura E. 17 Coordenadas articulares. Fuente elaboración propia

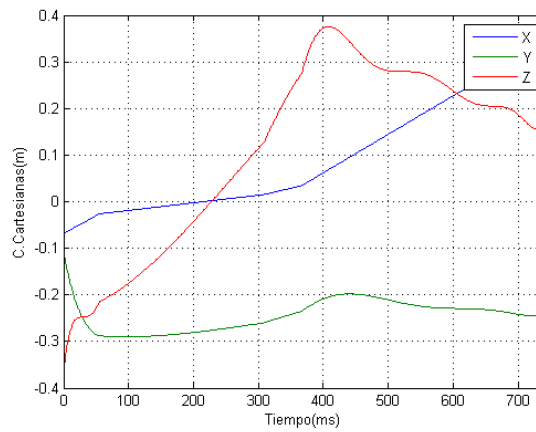


Figura E. 18 Coordenadas cartesianas obtenidas. Fuente elaboración propia

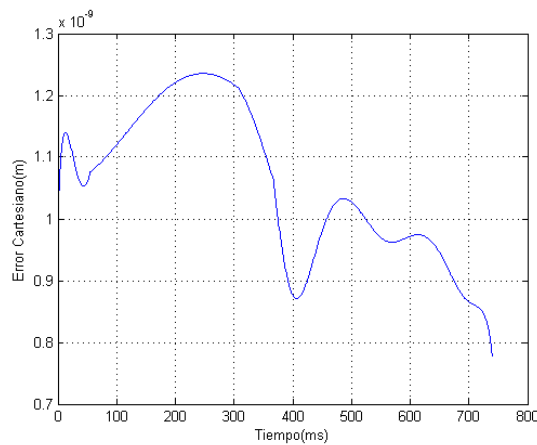


Figura E. 19 Error cartesiano aplicando offset al modelo simulado para coincidir con el real. Fuente elaboración propia

El cuarto osciloscopio muestra el error cartesiano que si esta en el rango de 10^{-9} , como se aprecia en la figura E.18, se puede pasar a la siguiente etapa.

Transcripción de coordenadas articulares a Arduino

A continuación se abre el archivo 'pintar2' y se corre para dibujar las coordenadas articulares por separado, como se muestra en la figura E.19

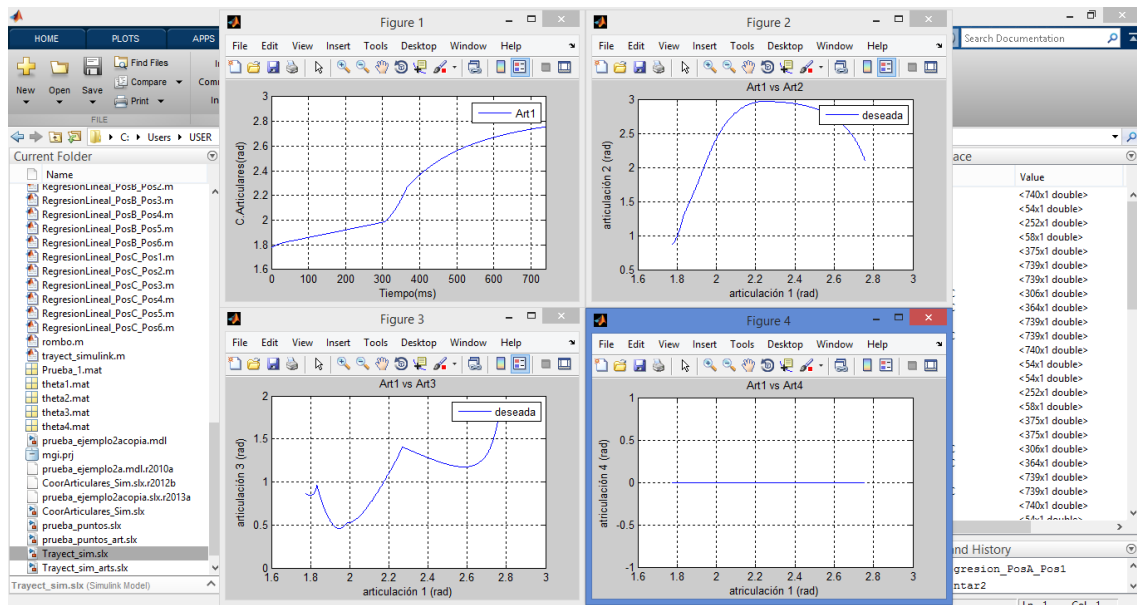


Figura E. 20 Coordenadas articulares. Fuente elaboración propia

Este archivo grafica theta1 con respecto a los pasos y theta2, theta3 y tetha4 con respecto a theta1. De cada grafica se obtendrá un polinomio, para ello se hace uso de la herramienta Basic fitting que se encuentra la pestaña tools de la barra de herramientas que posee cada figura, como se muestra en la siguiente imagen.

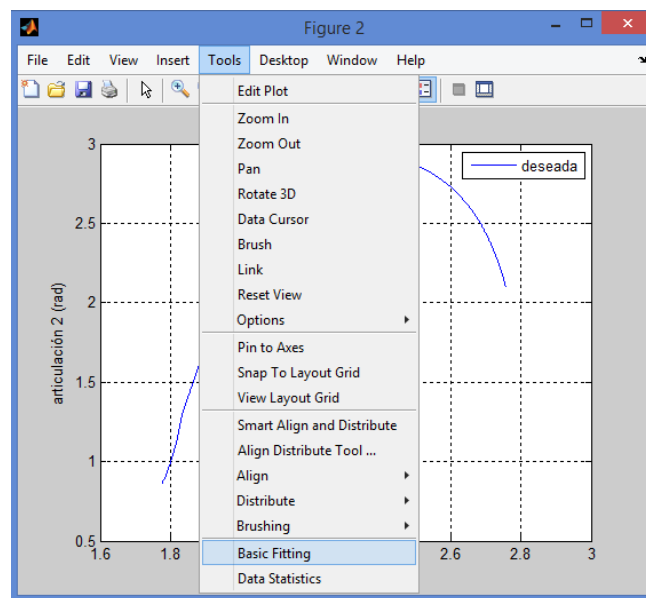


Figura E. 21 Herramienta Basic Fitting en Matlab. Fuente elaboración propia

Seleccionar centrado y escalizado, escoger el grado del polinomio que más se aproxime a la gráfica con la menor cantidad de oscilaciones, como se muestra en la figura E.21.

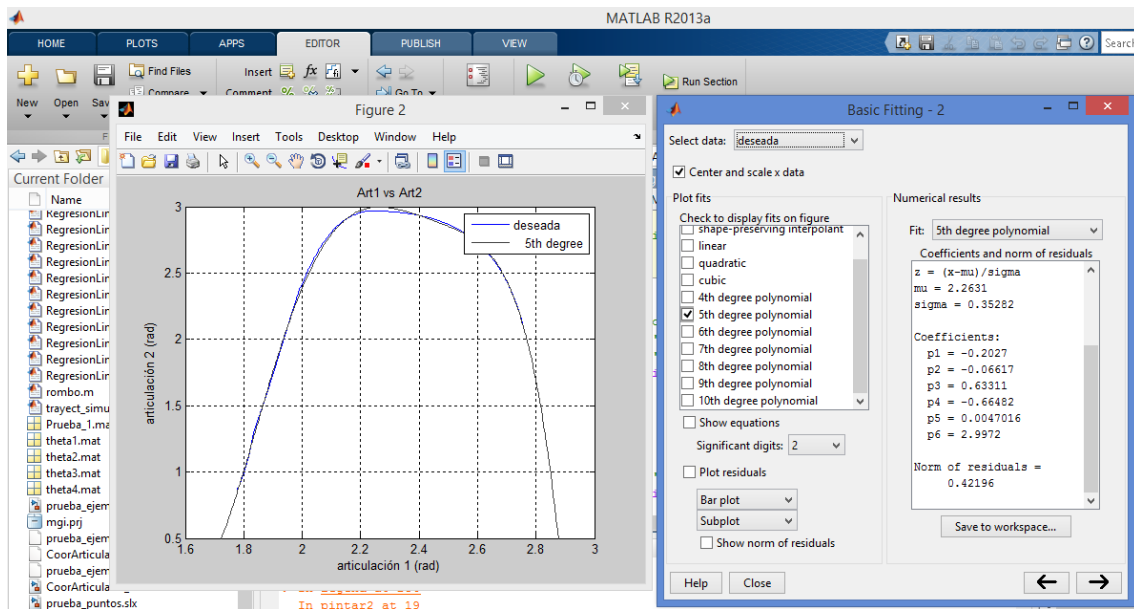


Figura E. 22 Obtención de polinomio. Fuente elaboración propia

Dar click en la flecha 'mostrar el panel siguiente' y pasar los valores de los coeficientes de los polinomios al script `Regresion_Articular_PosA_Pos1.m`, haciendo las modificaciones correspondientes a la ecuación (dentro del ciclo for) si el polinomio cambia de grado sin olvidar modificar μ y σ . Realizar este procedimiento para cada articulación.

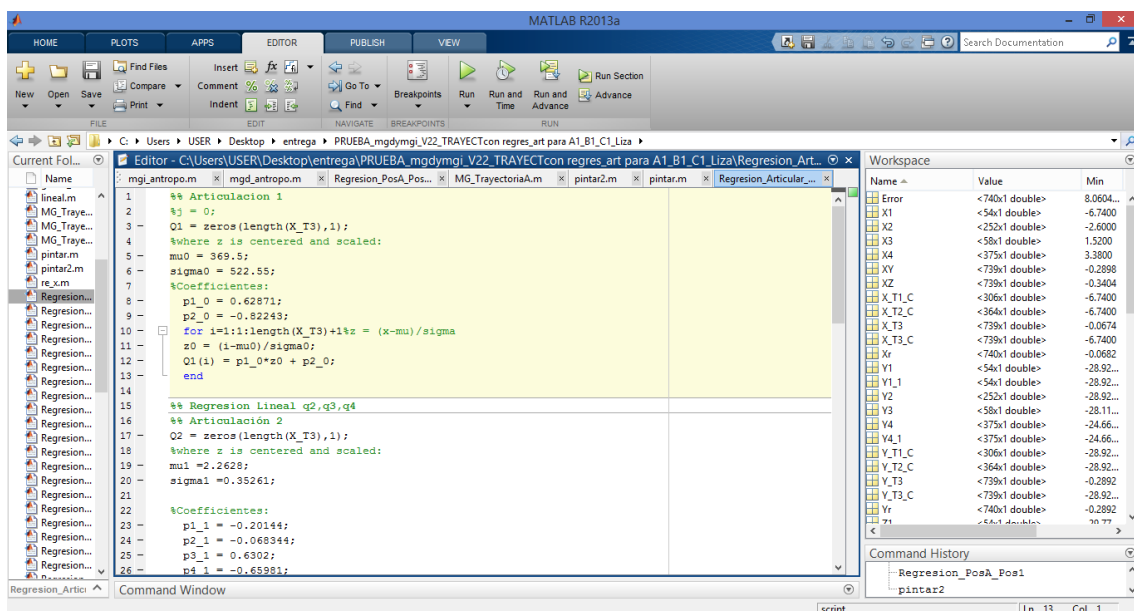


Figura E. 23 Script 'Regresión articular PosA_Pos1'. Fuente elaboración propia

Esto se hace para cada articulación, haciendo las modificaciones en el mismo script.

Para visualizar el resultado de cada regresión se puede realizar las gráficas de la figura E19 con el polinomio correspondiente como se muestra en las figuras E23, E24 y E25.

A modo de ejemplo, en la figura E.23 se muestra la gráfica para la primera articulación, correspondiente a una trayectoria ya definida, donde la variación es constante y en una sola dirección por lo que se aplica regresión lineal.

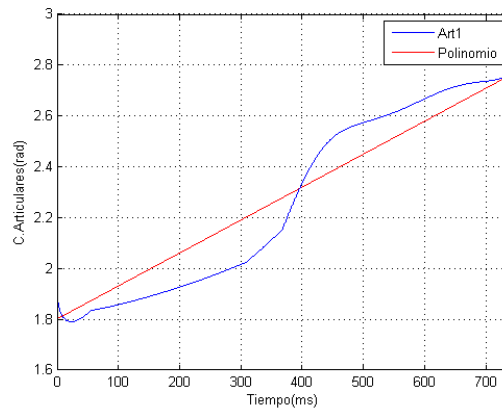


Figura E. 24 Primera coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia

También se puede observar en las figuras E.22 y E.23 donde los polinomios obtenidos corresponden a una trayectoria realizada en este trabajo de grado. Para nuevas trayectorias el resultado será diferente.

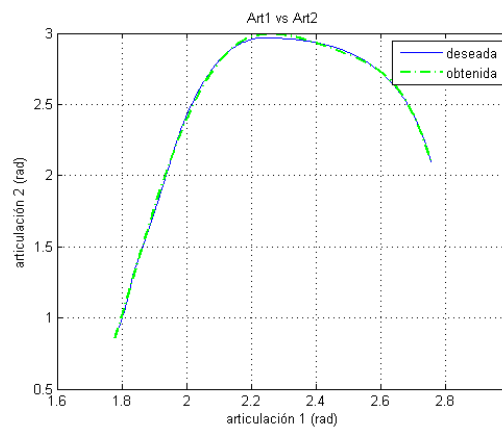


Figura E. 25 Segunda coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia

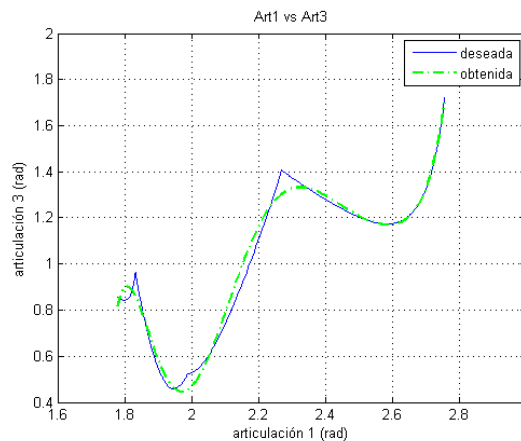


Figura E. 26 Tercera coordenada articular y regresión. Fuente elaboración propia

Las gráficas de los polinomios describen el comportamiento de cada articulación para que el efector final realice la trayectoria planteada. Por ello estas ecuaciones deben escribirse en el código a cargar en la tarjeta Arduino, ya que ella constituye el sistema de mando que gobernara los actuadores del robot.

Ingresar polinomios a Arduino

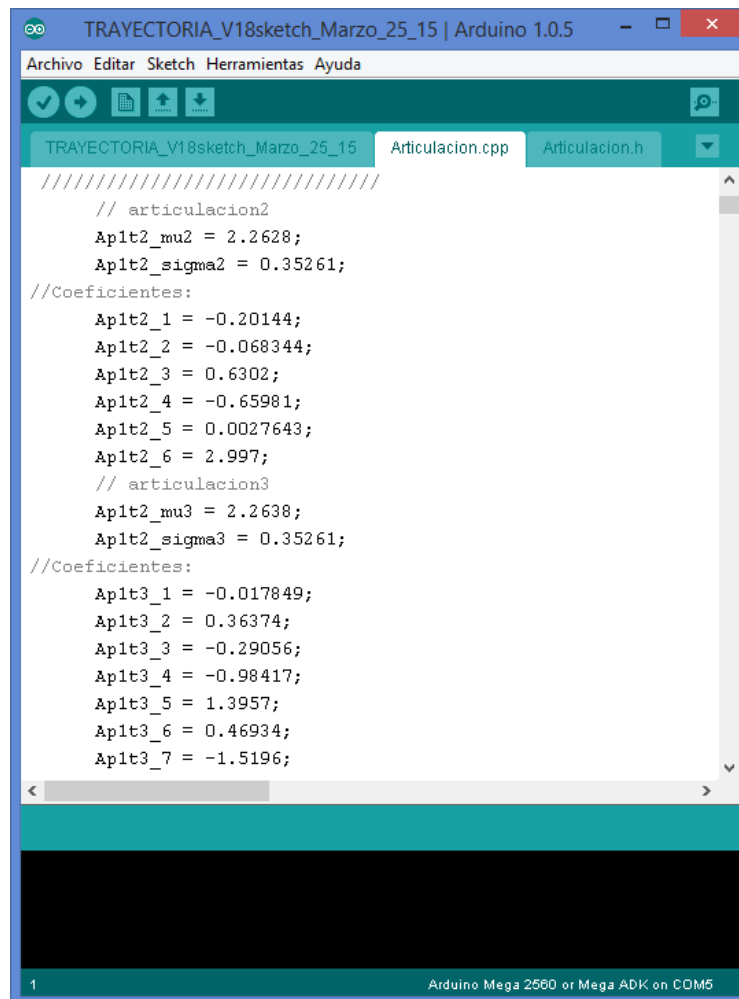
Para abrir el código en Arduino ir a la carpeta

VERSIONES DE TRAYECTORIA> TRAYECTORIA18

Hacer una copia de esta carpeta

Abrir el archivo 'TRAYECTORIA_V18sketch_Marzo_25_15.ino', ir la sesión del código que se muestra en la figura E.26 de Articulacion.cpp para modificar los coeficientes.

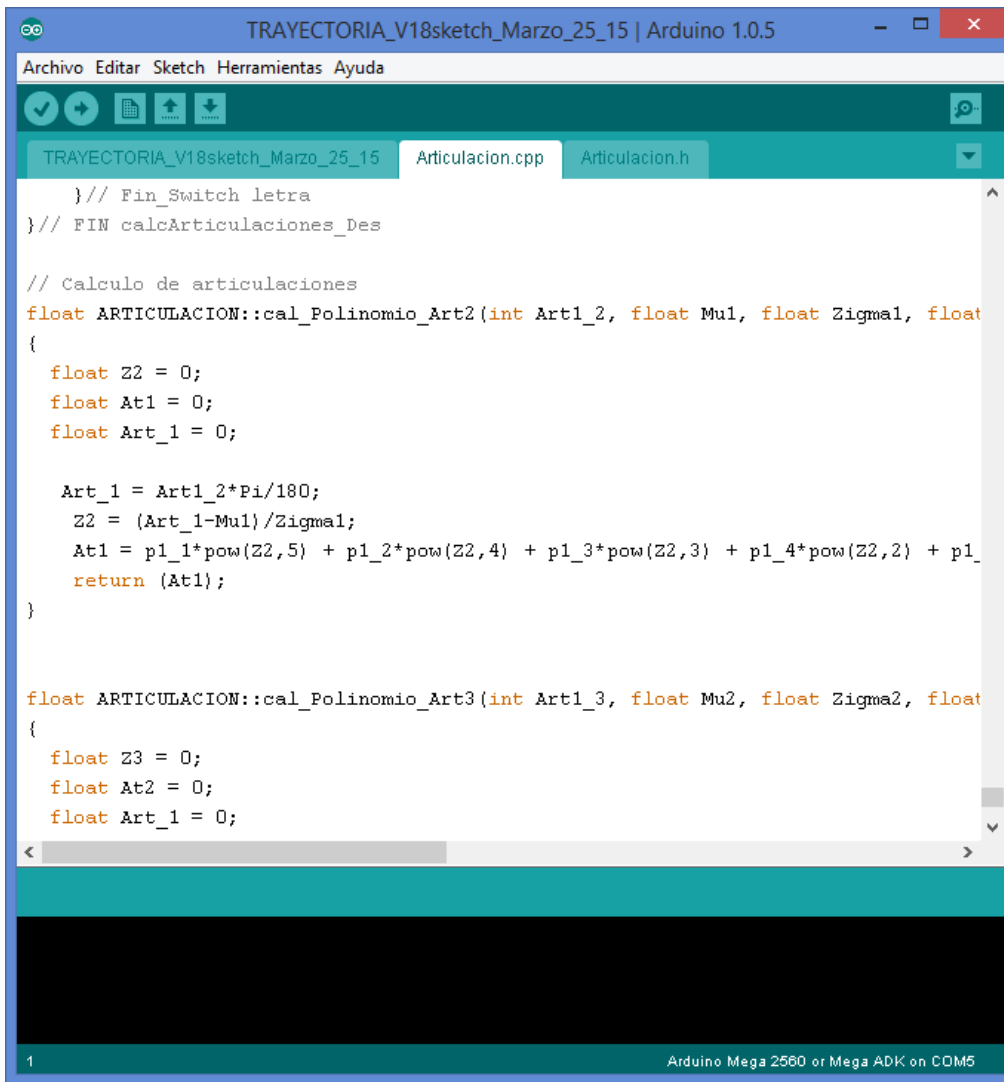
Nota: La carpeta contenedora del archivo .ino debe contener los archivos a Articulacion.h y Articulacion.cpp



```
////////////////////////////////////
// articulacion2
Aplt2_mu2 = 2.2628;
Aplt2_sigma2 = 0.35261;
//Coeficientes:
Aplt2_1 = -0.20144;
Aplt2_2 = -0.068344;
Aplt2_3 = 0.6302;
Aplt2_4 = -0.65981;
Aplt2_5 = 0.0027643;
Aplt2_6 = 2.997;
// articulacion3
Aplt2_mu3 = 2.2638;
Aplt2_sigma3 = 0.35261;
//Coeficientes:
Aplt3_1 = -0.017849;
Aplt3_2 = 0.36374;
Aplt3_3 = -0.29056;
Aplt3_4 = -0.98417;
Aplt3_5 = 1.3957;
Aplt3_6 = 0.46934;
Aplt3_7 = -1.5196;
```

Figura E. 27 Coeficientes en Arduino. Fuente elaboración propia

En la parte final del mismo archivo se encuentran las ecuaciones de los polinomios para variar el grado de los mismos, el inicio de esta parte se muestra en la figura E.27



```
    } // Fin_Switch letra
  } // FIN calcArticulaciones_Des

  // Calculo de articulaciones
  float ARTICULACION::cal_Polinomio_Art2(int Art1_2, float Mu1, float Zigma1, float
  {
    float Z2 = 0;
    float At1 = 0;
    float Art_1 = 0;

    Art_1 = Art1_2*Pi/180;
    Z2 = (Art_1-Mu1)/Zigma1;
    At1 = p1_1*pow(Z2,5) + p1_2*pow(Z2,4) + p1_3*pow(Z2,3) + p1_4*pow(Z2,2) + p1_
    return (At1);
  }

  float ARTICULACION::cal_Polinomio_Art3(int Art1_3, float Mu2, float Zigma2, float
  {
    float Z3 = 0;
    float At2 = 0;
    float Art_1 = 0;
  }

```

Figura E. 28 Polinomios en Arduino. Fuente elaboración propia

Si aumenta el grado de polinomio se debe ir a la pestaña Articulacion.h para declarar las variables que falten para completar el grado del polinomio, la sesión se muestra en la figura E.28

Nota: Si solo se genera una trayectoria se recomienda modificar todas las secciones correspondientes a Trayectoria A pos 1

```
class ARTICULACION
{
  private:
  ////////////////////////////////////////////////////
  /// Trayectoria A pos 1
  ////////////////////////////////////////////////////
  // articulacion2
  float Aplt2_mu2;
  float Aplt2_sigma2;
  //Coeficientes:
  float Aplt2_1;
  float Aplt2_2;
  float Aplt2_3;
  float Aplt2_4;
  float Aplt2_5;
  float Aplt2_6;

  // articulacion3
  float Aplt2_mu3;
  float Aplt2_sigma3;
  //Coeficientes:
```

Figura E. 29 coeficientes de polinomio. Fuente elaboración propia

Verificar las condiciones estipuladas en los estados de inicio (s3, s4, s5) y final de trayectoria (s7, s8, s9, s10, s11, s12) para que se cumplan las condiciones de parada y de abrir y cerrar pinza.

Se debe verificar mediante el monitor serial que los valores de las articulaciones en la condición (línea remarcada en rojo) coincidan con los valores estipulados en las funciones remarcadas en morado como se muestra en la figura E.30

```
TRAYECTORIA_V18sketch_Marzo_25_15 | Arduino 1.0.5
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
TRAYECTORIA_V18sketch_Marzo_25_15 Articulacion.cpp Articulacion.h
Serial.println(sw);
if (b_fin_A == 0)
{
  //llevar pinza desde pos_media hasta la pos donde se recojen las botellas
  Serial.print("yendo a posicion A");
  Serial.println("\t");

  Pos_Articular(110, 102, 97, 1);
  Pos_Articular_Fina(102, 53, 44);
  vble_uno = pos1;
  Serial.print("POSICION SERVO UNO");
  Serial.println(vble_uno);
  vble_dos = Art_2;
  Serial.print("POSICION SERVO DOS");
  Serial.println(vble_dos);
  if ((vble_uno == 102) && (vble_dos == 53)) b_fin_A = 1;
  Serial.println("*****");
  Serial.println("*****fin ESTADO TRES");
  Serial.println("*****");
}
break;
//***** ESTADO_4*****//
```

Figura E. 30 Configuración estados de parada. Fuente elaboración propia.

Este proceso debe repetirse para cada estado mencionado anteriormente si es modificado.

Nota: Referirse al diagrama de estados de la figura 3. 1 Máquina de estados para el proceso de clasificación de botellas, de la monografía.

Habiendo rectificado el correcto funcionamiento de la máquina de estados, se procede a verificar el programa, cargarlo en la tarjeta Arduino Mega, encender el robot como se explicó inicialmente, y probar.

ANEXO F. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA MÁQUINA DE ESTADOS IMPLEMENTADA IMPLEMENTACION DEL MODELO GEOMÉTRICO EN ARDUINO.

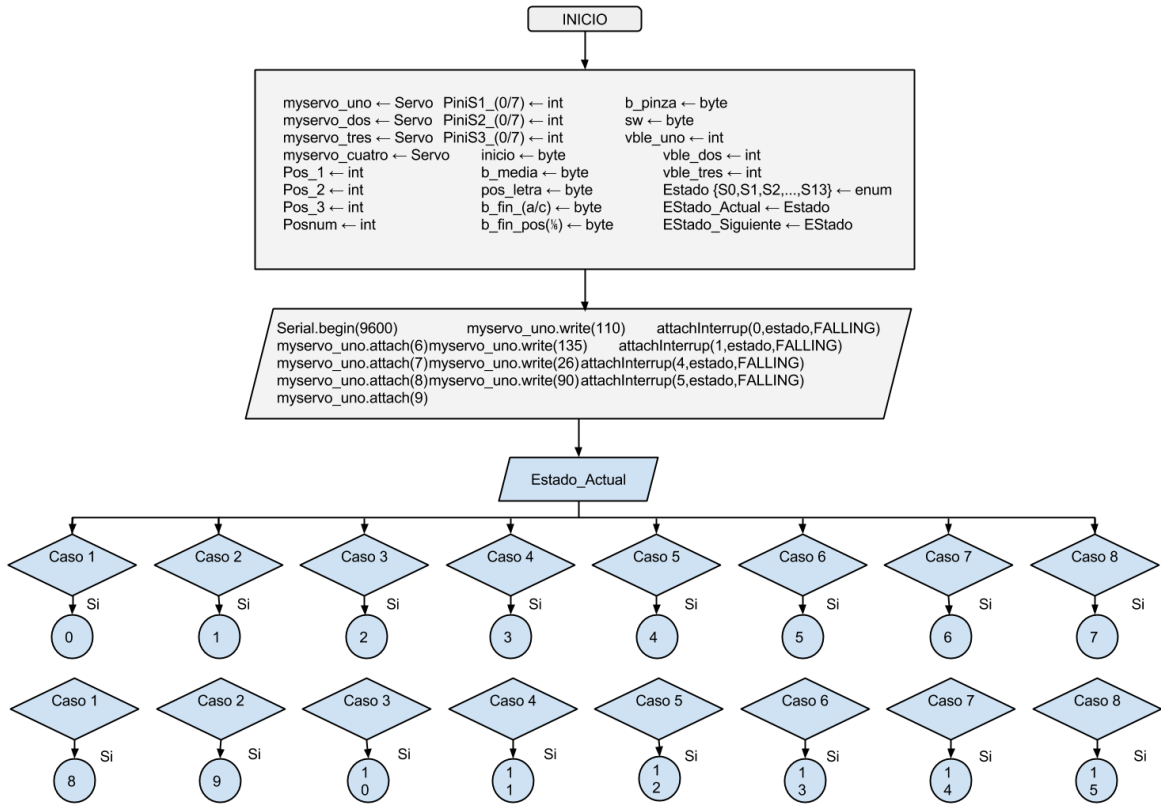


Figura F. 1 Diagrama máquina de estados parte 1. Fuente elaboración propia

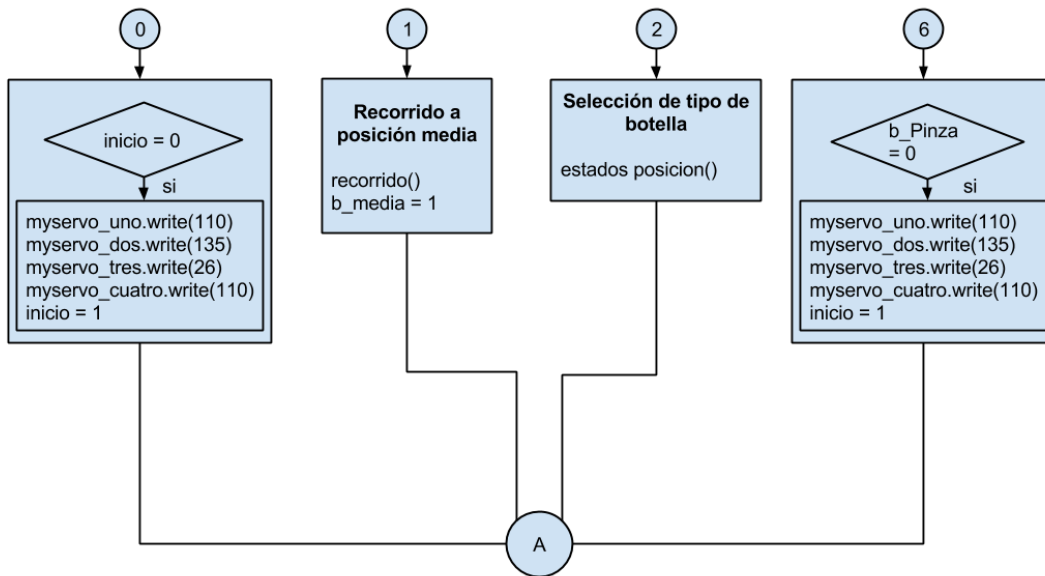


Figura F. 2 Diagrama máquina de estados parte 2. Fuente elaboración propia

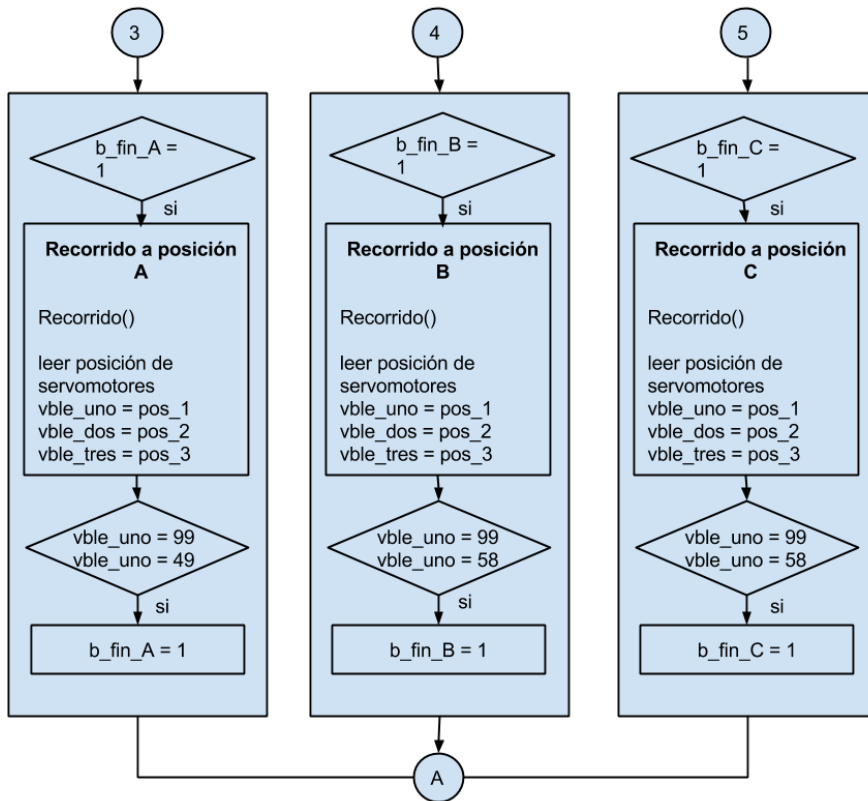


Figura F. 3 Diagrama máquina de estados parte 3. Fuente elaboración propia

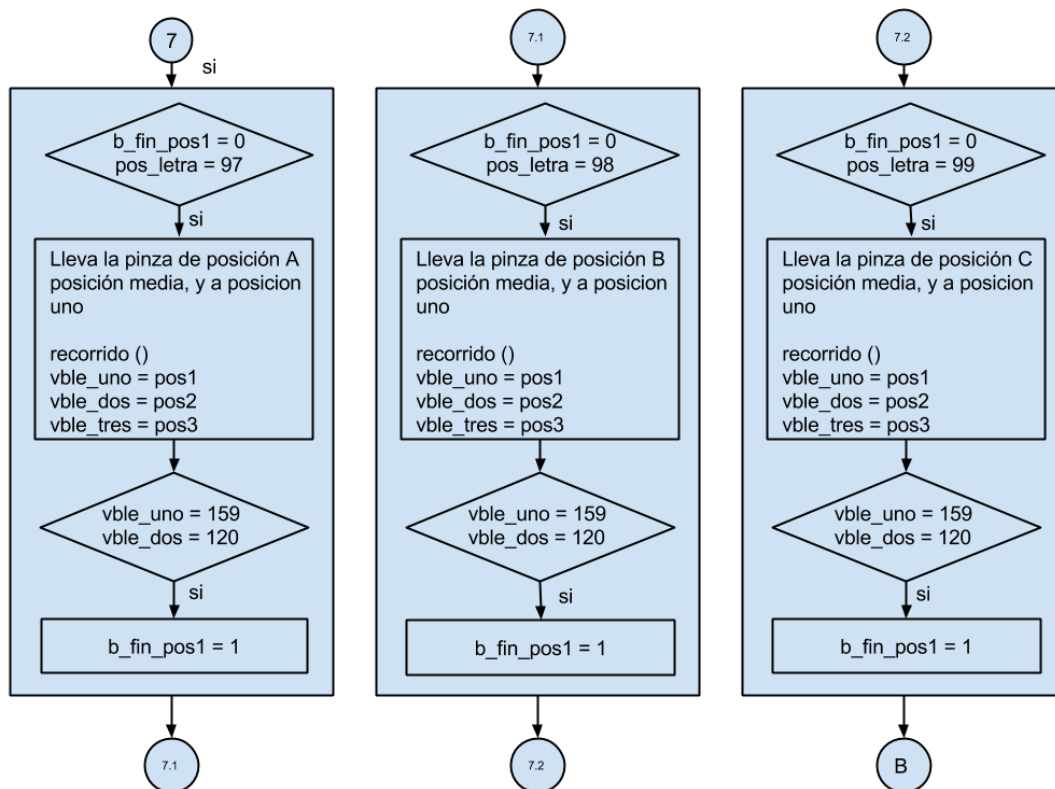


Figura F. 4 Diagrama máquina de estados parte 4. Fuente elaboración propia

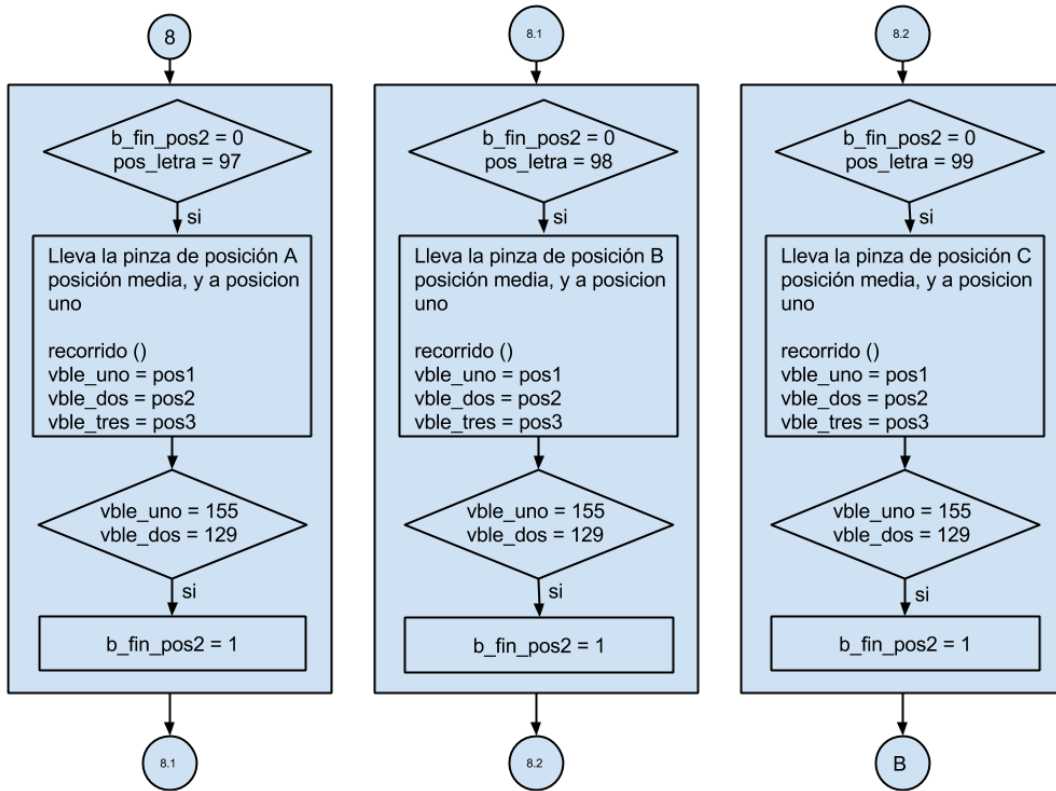


Figura F. 5 Diagrama máquina de estados parte 5. Fuente elaboración propia

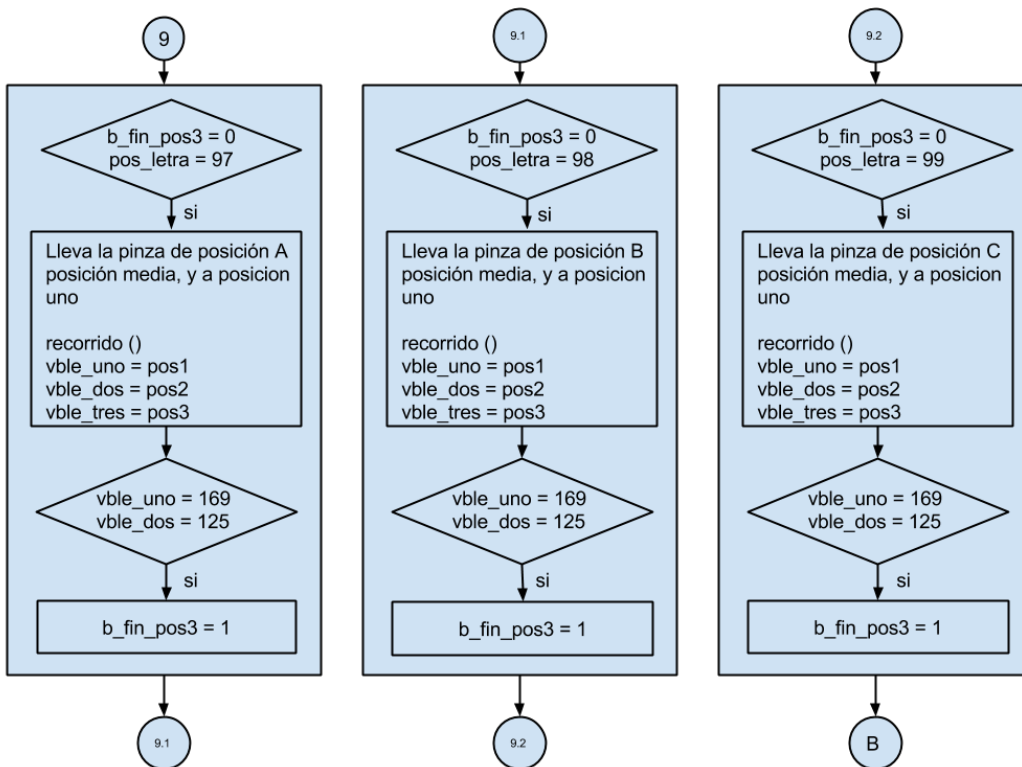


Figura F. 6 Diagrama máquina de estados parte 6. Fuente elaboración propia

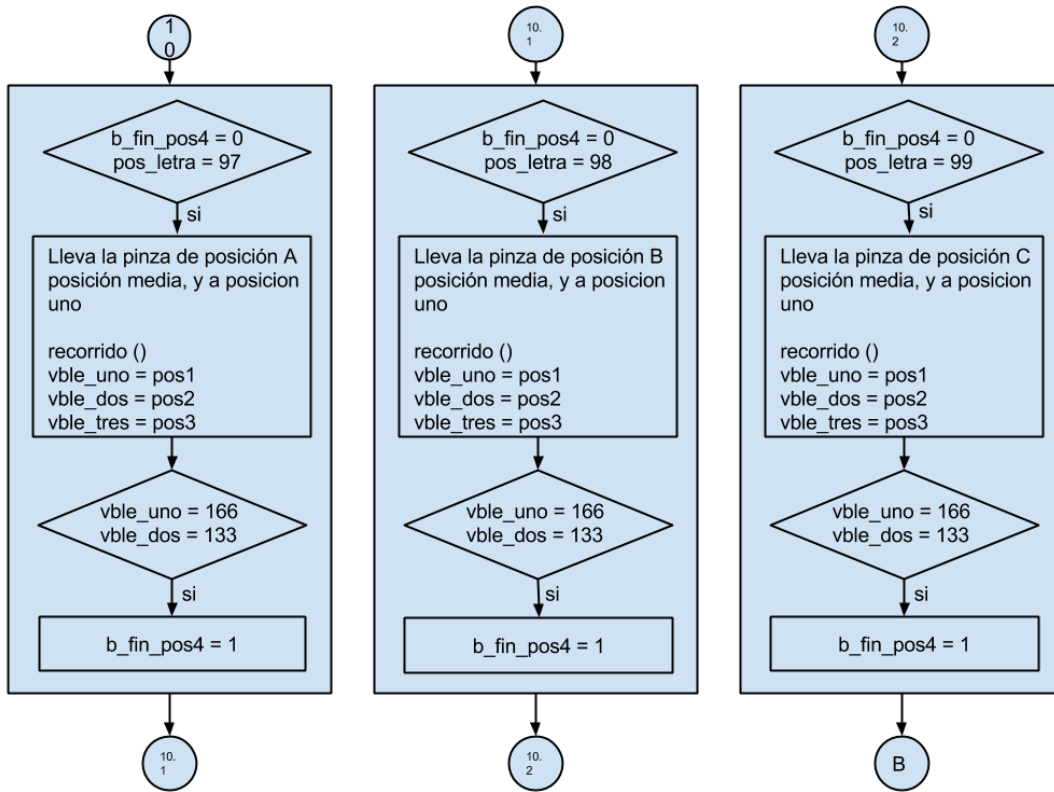


Figura F. 7 Diagrama máquina de estados parte 7. Fuente elaboración propia

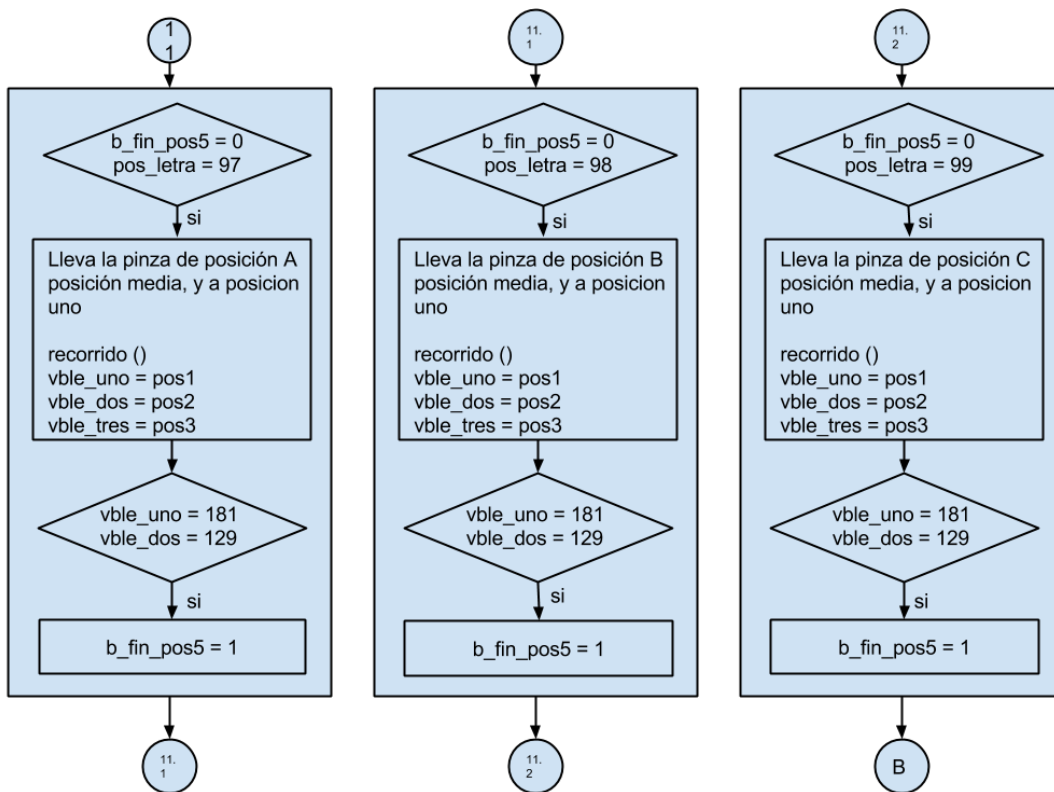


Figura F. 8 Diagrama máquina de estados parte 8. Fuente elaboración propia

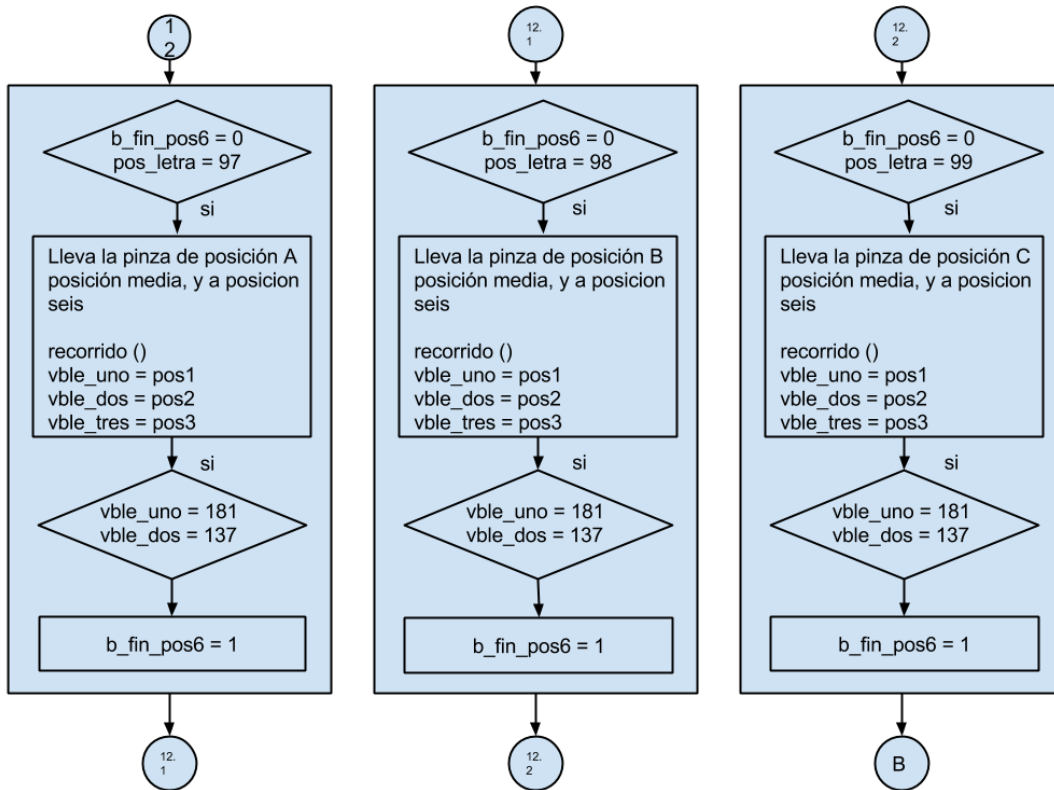


Figura F. 9 Diagrama máquina de estados parte 9. Fuente elaboración propia

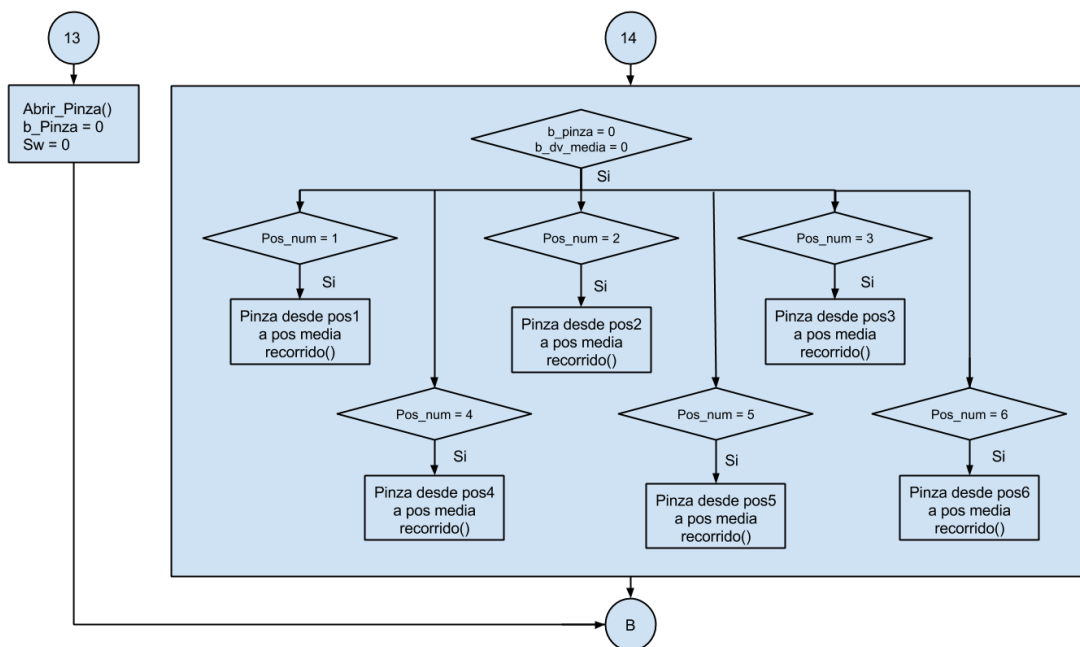


Figura F. 10 Diagrama máquina de estados parte 10. Fuente elaboración propia

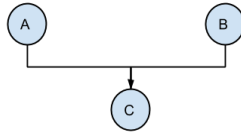


Figura F. 11 Diagrama máquina de estados parte 11. Fuente elaboración propia

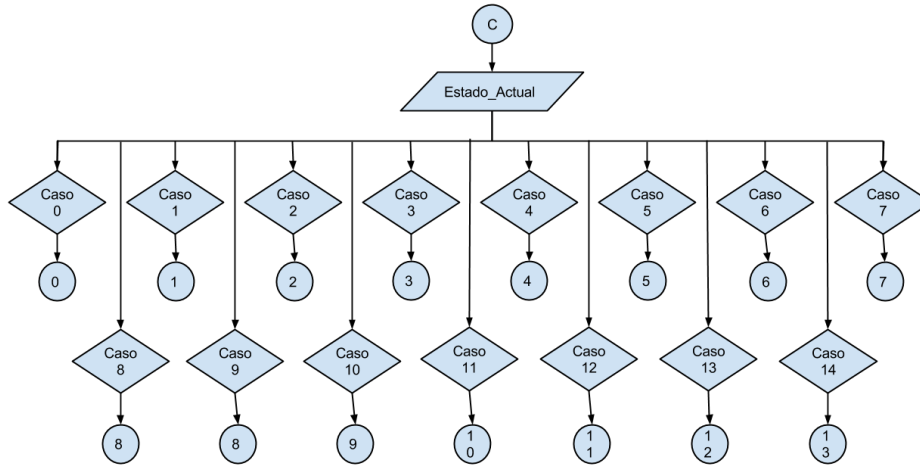


Figura F. 12 Diagrama máquina de estados parte 12. Fuente elaboración propia

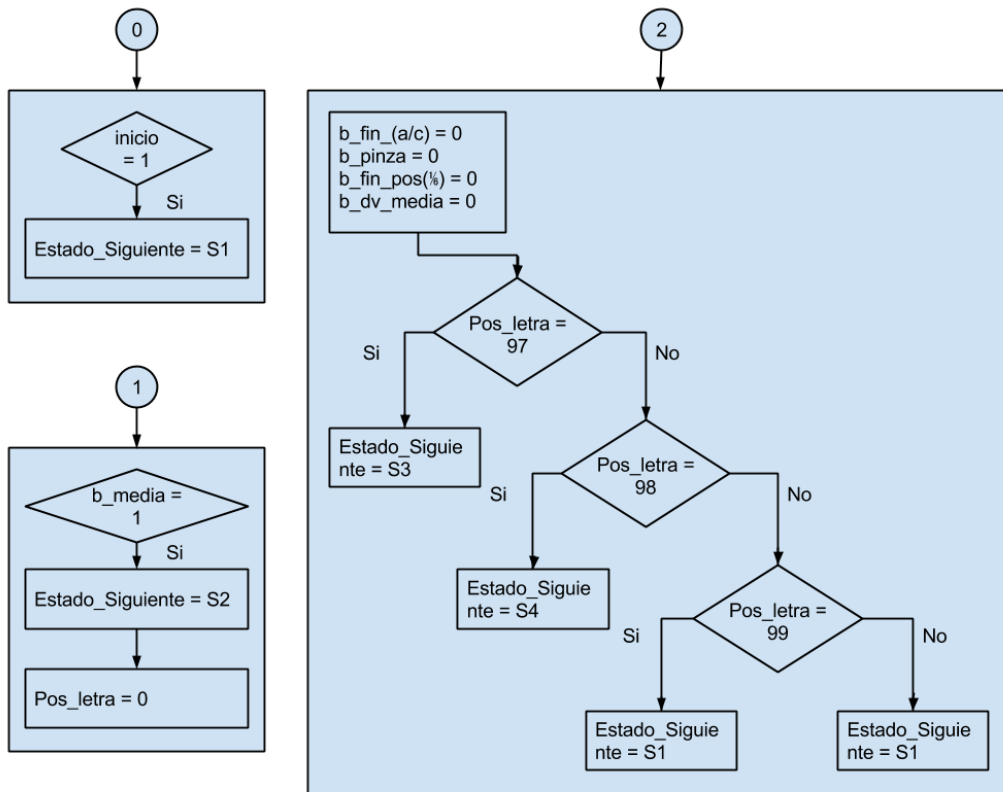


Figura F. 13 Diagrama máquina de estados parte 13. Fuente elaboración propia

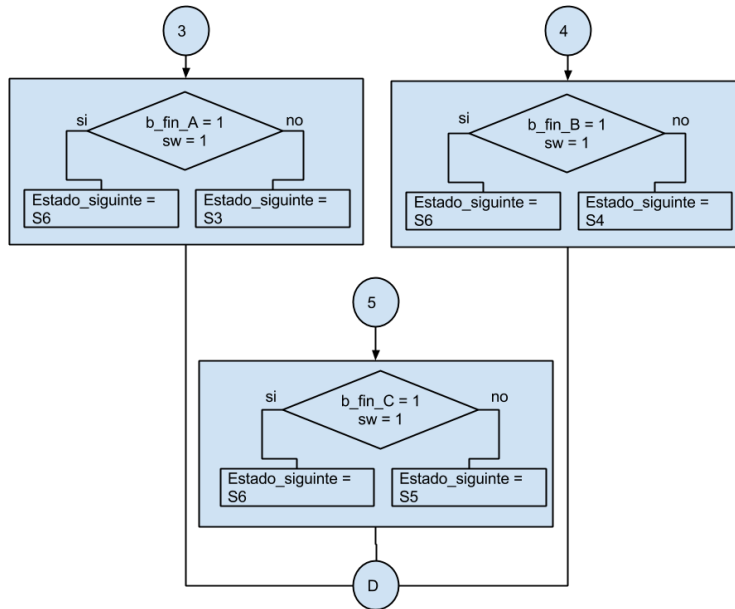


Figura F. 14 Diagrama máquina de estados parte 14. Fuente elaboración propia

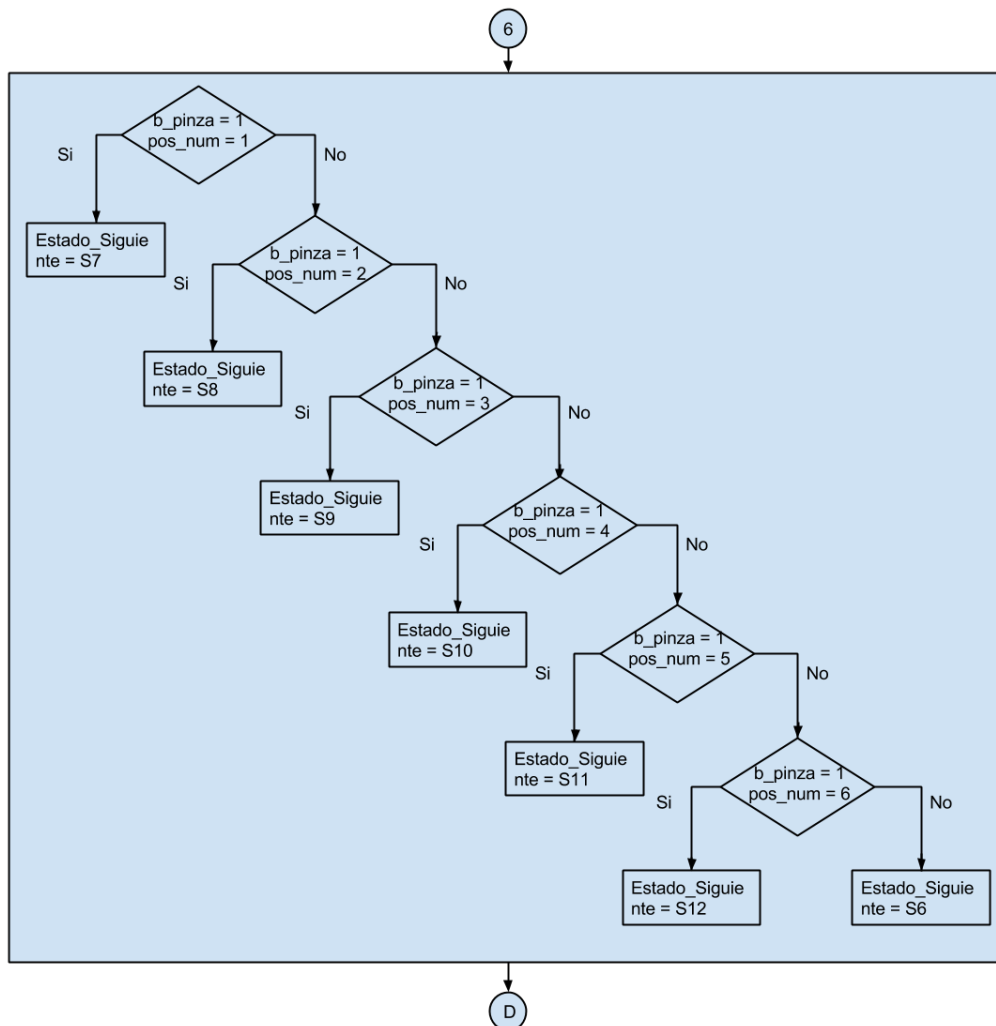


Figura F. 15 Diagrama máquina de estados parte 15. Fuente elaboración propia

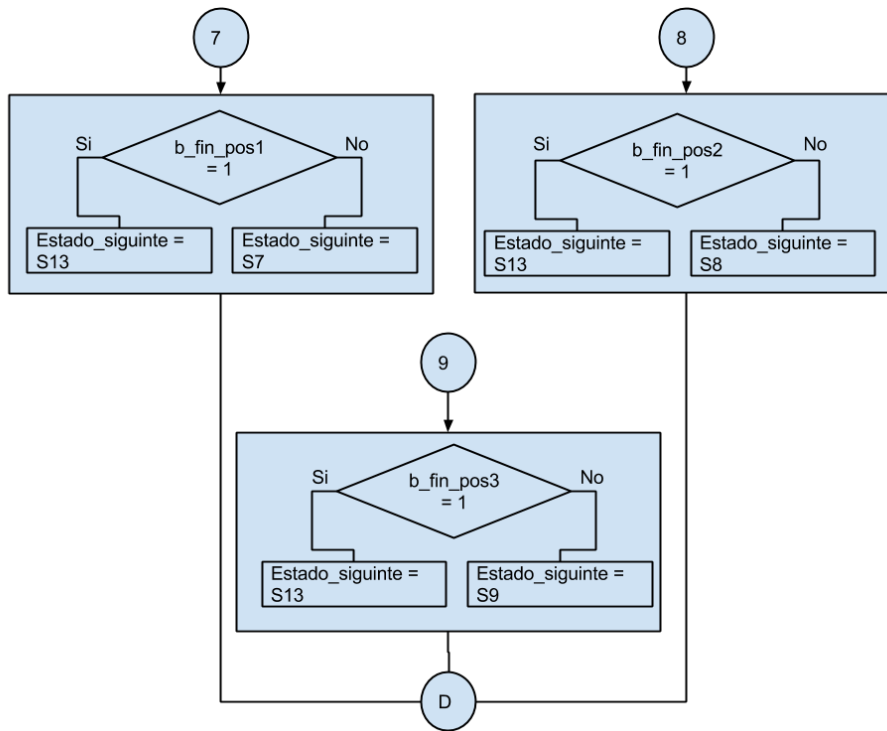


Figura F. 16 Diagrama máquina de estados parte 16. Fuente elaboración propia

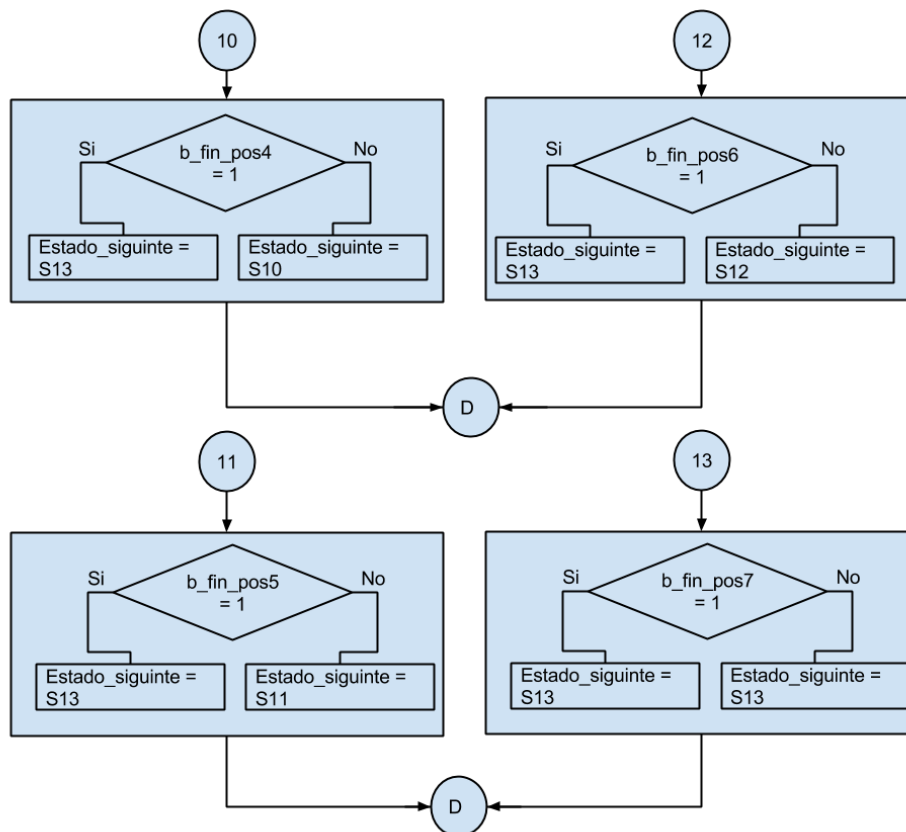


Figura F. 17 Diagrama máquina de estados parte 17. Fuente elaboración propia

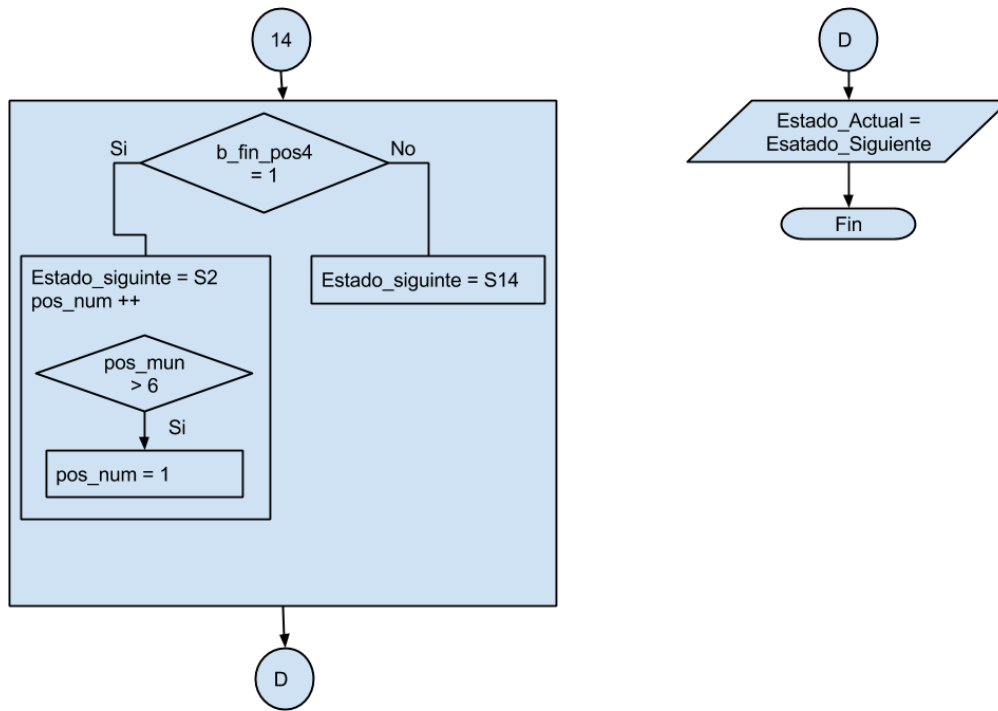


Figura F. 18 Diagrama máquina de estados parte 18. Fuente elaboración propia

ANEXO G. CALIBRACIÓN Y ADECUACION DE LA SEÑAL ADQUIRIDA MEDIANTE ACELERÓMETRO

Antes de proceder a la explicación del proceso de obtención de datos, e implementación de los cálculos en la tarjeta Arduino, es necesario referirse a conceptos físicos y matemáticos de las variables a tratar.

G.1 Cálculo de integración

Si el valor que se conoce es el de la aceleración de un objeto, para poder encontrar sus valores correspondientes en velocidad y posición se debe realizar un proceso de integración. Como muestran las ecuaciones (41) y (42) respectivamente.

$$v = \int (\bar{a}) dt \quad (2)$$

$$p = \int (\bar{v}) dt \quad (G2)$$

Con el método de integración usado se puede suponer que el área resultante es la combinación de dos áreas pequeñas, como se puede observar en la figura G.1.

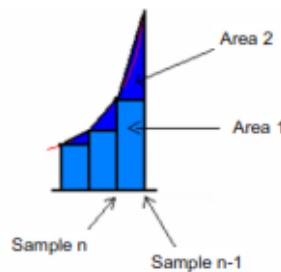


Figura G. 1 Área resultante como combinación de dos áreas. Fuente [26]

Donde el área inicial se toma como el valor del rectángulo y la segunda área, un triángulo, formado entre el muestreo anterior y el muestreo actual dividido entre dos. Bajo este concepto se puede realizar una interpolación de la señal por medio de la ecuación (G3).

$$Area_n = Muestra_n + \frac{|Muestra_n - Muestra_{n-1}|}{2} * T \quad (G3)$$

Donde T es el intervalo de tiempo en el cual se toman las muestras.

Así el error que se genera en cada proceso de muestreo es disminuido, y la acumulación del mismo es menor para la siguiente aproximación.

El acelerómetro utilizado es capaz de medir aceleraciones positivas o negativas, para lograr una mejor precisión en la medición de la aceleración se hace necesario encontrar un valor de referencia u "OFFSET", este se convertirá en el valor cero para el cálculo de la aceleración. Por lo tanto, valores por debajo del OFFSET se consideran desaceleración y por encima aceleración. El valor de referencia se obtiene en un proceso de calibración del acelerómetro. En la figura G.2 se puede apreciar estas condiciones.

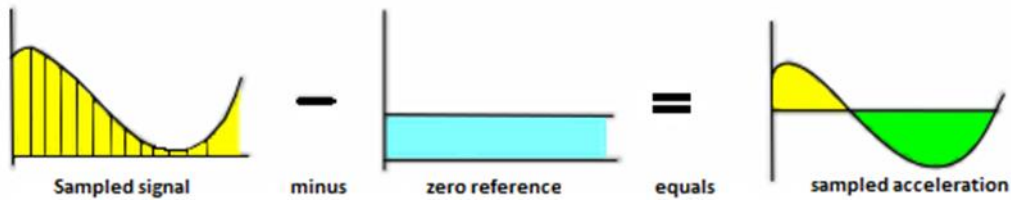


Figura G. 2 Valor de referencia para muestreo de señales [26].

Luego de efectuar un proceso de calibración de la señal de aceleración, es posible aplicar la fórmula de integración, donde se obtendrá una aproximación proporcional de la velocidad, a la que se le aplicara el proceso de integración nuevamente para obtener una aproximación proporcional de la posición. En la figura G.3 se puede observar el proceso que se debe seguir para la obtención de valores correspondientes a la velocidad y posición calculados. En A se observa una representación de la aceleración medida en el acelerómetro, en B la respuesta a un proceso de integración para obtener la velocidad y en C la obtención de la posición a partir de la velocidad.

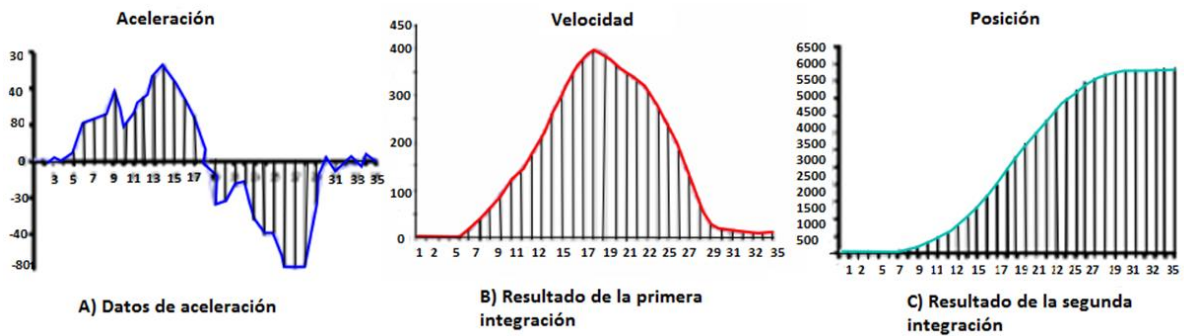


Figura G. 3 Graficas de aceleración, velocidad y posición. Fuente [26].

Para el desarrollo del software que realizara el proceso de integración para el cálculo de velocidad y posición a partir de valores de aceleración se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- La señal de aceleración posee ruido intrínseco, por lo tanto se debe aplicar un proceso de filtraje para disminuir el ruido de la señal.
- A pesar de haberse aplicado un filtro a la señal de aceleración, se pueden producir errores debido a ruido mecánico, por lo tanto es necesario aplicar otra etapa de filtraje de la señal, donde se debe seleccionar una ventana de corte en un rango por encima y por debajo del valor de referencia para la disminución de ruido mecánico.
- Se debe aplicar una rutina de calibración para la obtención de datos correctos, que debe realizarse al inicio de la aplicación, esto con el fin de que los datos de calibración sean lo más preciso posibles.
- El tiempo entre cada muestra debe ser siempre el mismo, ya que si se tienen valores de muestreo diferente se puede presentar errores en el cálculo de la integral.

A continuación se explica el algoritmo para el cálculo de velocidad y posición mediante integración.

Rutina de calibración

Estimación de OFFSET: Este valor se obtiene con el fin de eliminar componentes de desfase de aceleración en la señal del sensor debido a la aceleración gravitacional terrestre cuando este se encuentra estático.

Consiste en calcular un valor promedio en un instante de tiempo en el cual el dispositivo se encuentra en reposo siendo el eje "Z" afectado por la gravedad. Para el cálculo se toman 1024 muestras, cuyos valores serán sumados y divididos entre ese valor, en un tiempo aproximado de un segundo.

Una vez se obtiene el valor promedio, se resta a todas las muestras dejando notar valores positivos y negativos de la señal, que se leerán como aceleraciones y desaceleraciones respectivamente.

Filtro promedio: Este filtro permite obtener muestras del valor de aceleración promediado, es el más básico que se puede aplicar, aquí se toman 64 muestras de aceleración, se suman los valores y se divide el total entre la cantidad de muestras. Además se realiza un corrimiento de 2 bits para obtener el dato en una longitud de palabra de 8 bits lo cual elimina los bits menos significativos para eliminar ruido que pueda tener la señal.

Filtro Ventana: Este filtro consiste en colocar una ventana en un rango de la señal cercano a cero, de manera que los valores por arriba y por debajo del rango no sean tomados en cuenta para el proceso de cálculo de integración con el fin de evitar integración de ruido que puede afectar la toma de valores de velocidad y posición, este rango se define entre -10 a 10 grados. En la figura G.4 se aprecia el funcionamiento del filtro ventana.

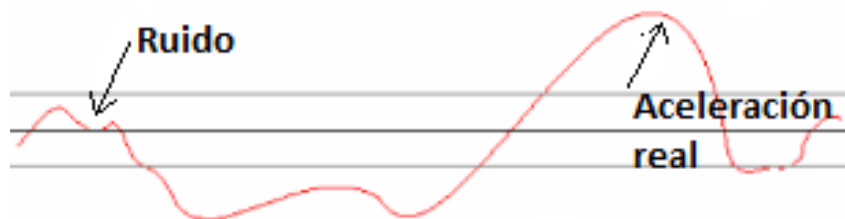


Figura G. 4 Aplicación de un filtro ventana. Fuente [26].

El Cálculo de velocidad y posición se realiza implementando el método del trapecio, usando datos de aceleración. El proceso de integración consiste en calcular primero la velocidad a partir de la aceleración y luego la posición a partir de la velocidad obtenida.

Mantenedor de valor: Esta función permite guardar el último valor de velocidad y posición, ya que se integran los instantes de aceleración relativos, se hace necesario guardar este último valor para que en el siguiente ciclo de integración se tenga en cuenta el anterior valor y continuar el proceso desde este punto.

A continuación en la figura G.5 se expone el diagrama de flujo en el cual se aprecia el procedimiento implementado para el cálculo de velocidad y posición a partir de la aceleración medida en el acelerómetro para los ejes X, Y, Z

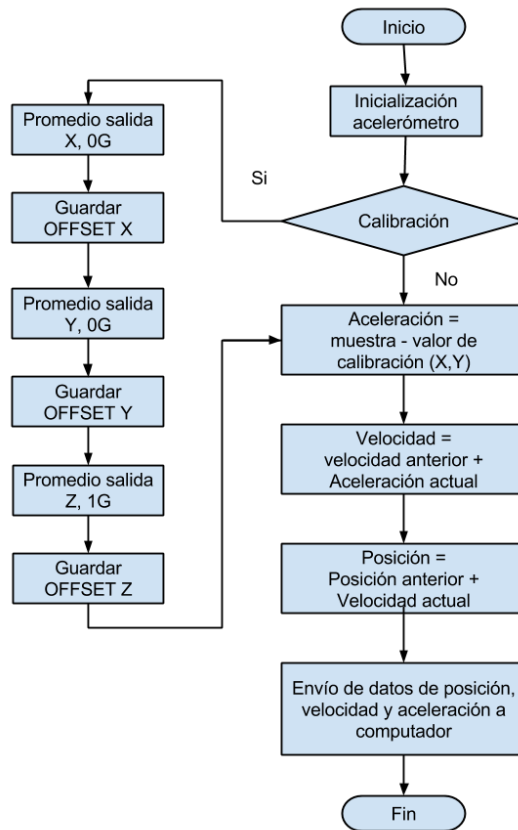


Figura G. 5 Diagrama de flujo para el cálculo de posición y velocidad a partir de la aceleración. Fuente elaboración propia

G.2 Medición de la inclinación:

Dispositivos como Smartphones o tabletas cambian la orientación de la pantalla haciendo uso del acelerómetro que tienen incorporado para el cálculo de la inclinación. Ya que en estos dispositivos la ubicación del acelerómetro varía, su sistema de referencia no tiene gran relevancia para el cálculo de la orientación.

Como un ejemplo se muestra la figura G.6 en la cual se puede apreciar la ubicación de un sistema de coordenadas de forma arbitraria.



Figura G. 6 Ubicación de ejes en un smartphone. Fuente [26].

- El eje X está alineado a lo largo del cuerpo del smartphone.
- El eje Y está alineado a la derecha, tanto para el eje x y z.

- El eje Z está alineado a lo ancho del smartphone, en este caso si el dispositivo está apoyado sobre la tapa la aceleración gravitacional actúa sobre este eje.

Ahora, dependiendo de la posición del smartphone cambia la orientación y rotación del acelerómetro, este proceso se puede describir por medio de ángulos de rotación ϕ , inclinación θ y cabeceo ψ ; alrededor de los ejes x, y, z respectivamente.

Para tener un marco de referencia con el cual se pueda calcular los parámetros mencionados anteriormente, es conveniente manejar el sistema brindado por la aceleración gravitacional terrestre, donde si a alguno de los ejes del acelerómetro le afecta directamente la aceleración gravitacional se obtiene un valor de una gravedad. Continuando con la analogía del smartphone, este dispositivo se encuentra referenciado con el sistema de coordenadas brindado por la aceleración gravitacional terrestre, así será el eje afectado respecto al cual se calculara el valor de giro por lo que se puede definir la aceleración gravitacional experimentada en el acelerómetro como:

$$G_p = \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = R(g - a_r) \quad (\text{G4})$$

Dónde:

R: describe la matriz de orientación relativa del smartphone con respecto a la aceleración gravitacional terrestre.

g: describe el campo gravitacional

ar: aceleración lineal medida

Ahora, si se tiene el smartphone en la posición en la cual la aceleración gravitacional afecta directamente al eje Z del acelerómetro se puede asumir que:

$$G_p = \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = R_g = R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{G5})$$

De esta forma se puede decir que la aceleración que experimenta el dispositivo está dada por la multiplicación de la matriz de orientación por el vector de aceleración en cada eje del acelerómetro.

Estimación de los componentes de rotación de la matriz R

La orientación de un acelerómetro puede ser definida por la rotación en: giro, inclinación y cabeceo desde una posición inicial. Las matrices que describen la rotación en giro, inclinación, y cabeceo, teniendo en cuenta el campo gravitacional terrestre, bajo un sistema de rotación definido como en la figura 3.27 se pueden expresar como:

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G6})$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{G7})$$

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{G8})$$

Para ángulos ϕ en giro, θ en inclinación, ψ en cabeceo, alrededor de X, Y, Z respectivamente.

Reemplazando en la ecuación (53) las matrices anteriores se obtiene la siguiente modificación:

$$R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{G9})$$

Donde al cambiar la posición de las matrices de orientación se obtienen diferentes resultados, las combinaciones posibles que se pueden realizar se muestran a continuación, junto con el vector de resultado:

Primera combinación:

$$R_{xyz} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G10})$$

Segunda combinación:

$$R_{yxz} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_y(\phi)R_x(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta\cos\phi \\ \sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G11})$$

Tercera combinación:

$$R_{xzy} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_x(\phi)R_z(\theta)R_y(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\psi\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi + \cos\phi\sin\psi\sin\theta \\ \cos\phi\cos\theta + \sin\theta\sin\phi\sin\psi \end{pmatrix} \quad (\text{G12})$$

Cuarta combinación:

$$R_{yzx} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_y(\phi)R_z(\theta)R_x(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta \\ \cos\psi\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi \end{pmatrix} \quad (\text{G13})$$

Quinta combinación:

$$R_{zxy} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_z(\phi)R_x(\theta)R_y(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\sin\theta \\ \cos\psi\cos\theta\sin\phi + \sin\theta\sin\psi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G14})$$

Sexta combinación:

$$R_{zyx} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\cos\psi\sin\theta \\ \cos\psi\sin\phi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G15})$$

Se puede apreciar que existen seis combinaciones posibles de matrices de rotación y seis diferentes vectores de resultado que permiten medición gravitacional. En consecuencia los ángulos de giro, rotación y cabeceo no tienen coherencia sin definir primero cuál de estas rotaciones debe ser aplicada.

De las combinaciones nombradas se pueden descartar cuatro inmediatamente al ser inadecuadas para determinar la orientación del smartphone.

Ya que la salida del acelerómetro tiene 3 componentes, pero la magnitud del vector siempre debe ser igual a una gravedad en la ausencia de aceleración lineal, se tienen dos grados de libertad. El vector del acelerómetro no concuerda sobre la superficie de la esfera con radio 1g, donde esto no tiene solución para tres valores únicos de giro, inclinación y cabeceo, por lo tanto las secuencias desde la ecuación 3.33 a la ecuación 3.40 resultan en salidas del acelerómetro en función de los tres ángulos de rotación y por lo tanto estas funciones no pueden ser solucionadas.

Por otro lado las secuencias encontradas en las ecuaciones 3.29 a 3.32 sólo dependen del ángulo de giro e inclinación y por lo tanto se puede obtener una solución. La ausencia del ángulo de cabeceo es entendible físicamente ya que una rotación de este ángulo sobre el eje z del smartphone estando alineado con el eje de aceleración gravitacional es completamente insensible a la rotación alrededor del campo gravitacional y por lo tanto no es útil para determinar la rotación.

Tomando lo anterior se puede apreciar que las ecuaciones 3.30 y 3.32 no presentan el ángulo de rotación cabeceo, ya que la solución solo depende de los ángulos de giro e inclinación. A continuación se presenta un análisis matemático sobre estas ecuaciones 3.30 y 3.32.

$$\frac{G_p}{\|G_p\|} = \begin{pmatrix} -\sin\theta\cos\phi \\ \sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\phi \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{G16})$$

Solucionando la ecuación anterior para determinar el giro y cabeceo se tiene:

$$\tan\phi_{xyz} = \left(\frac{G_{py}}{G_{pz}} \right) \quad (\text{G17})$$

$$\tan\theta_{xyz} = \left(\frac{-G_{px}}{-G_{px}\sin\phi + G_{pz}\cos\phi} \right) = \frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \quad (\text{G18})$$

Solucionando los ángulos giro y cabeceo desde la ecuación... y utilizando el vector yxz se tiene

$$\tan\phi_{yxz} = \frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \quad (\text{G19})$$

$$\tan\theta_{yxz} = \left(\frac{-G_{px}}{G_{pz}} \right) \quad (\text{G20})$$

En el diagrama de flujo de la figura 3.28 se puede apreciar el proceso que se implementa para el cálculo de giro mediante la aceleración sensada por el acelerómetro, el cual es necesario para mantener el efector final en una posición horizontal en el tiempo en el que el robot ejecute una tarea.

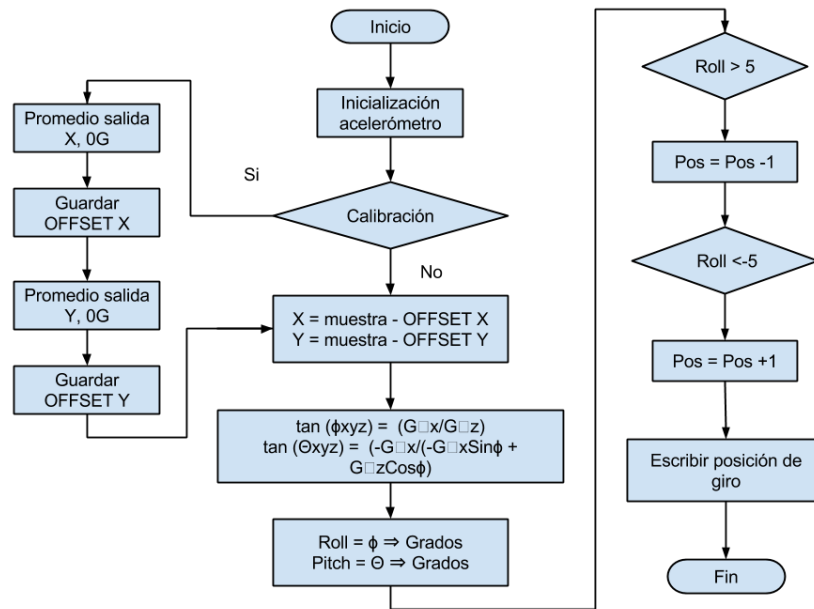


Figura G. 7 Diagrama de flujo para el cálculo de ángulos de giro. Fuente elaboración propia.

ANEXO H. GRÁFICAS TRAYECTORIAS: COMPARACIÓN ENTRE EL POLINOMIO QUE SE OBTUVO MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL, RESPUESTA DEL MODELO Y LA MEDIDA POR EL ACELERÓMETRO.

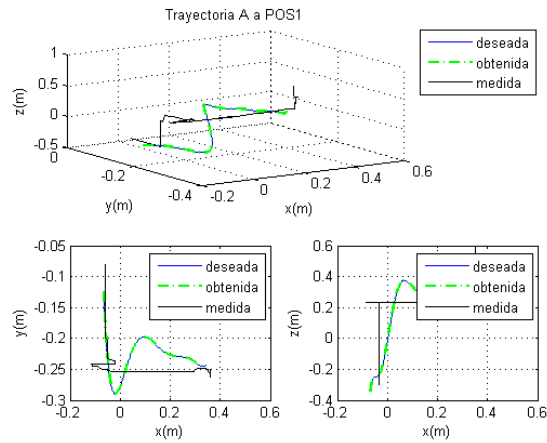


Figura H. 1 Trayectoria #1 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia

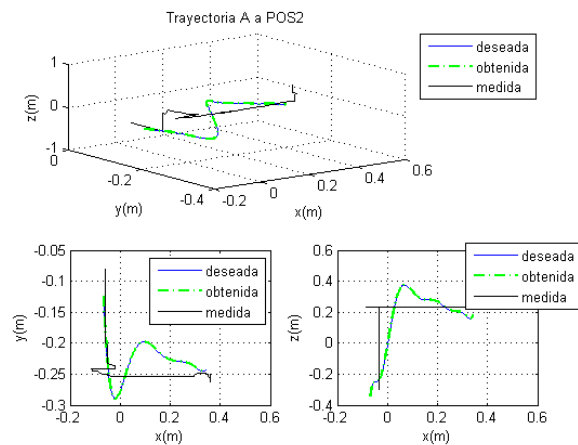


Figura H. 2 Trayectoria #2 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia

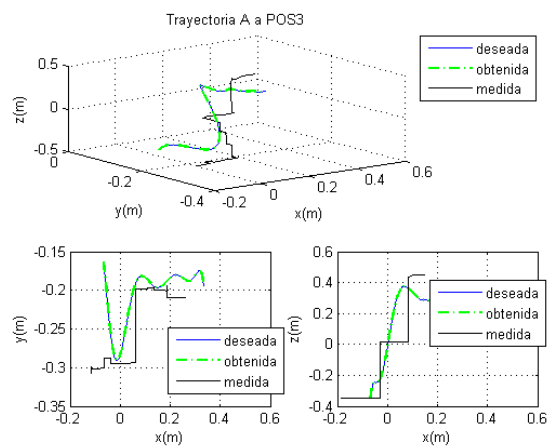


Figura H. 3 Trayectoria #3 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia

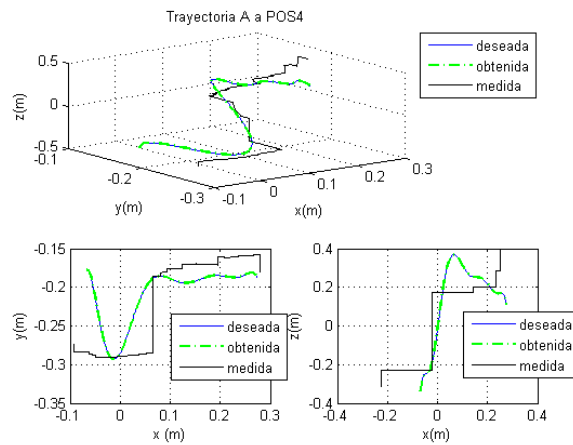


Figura H. 4 Trayectoria #4 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia

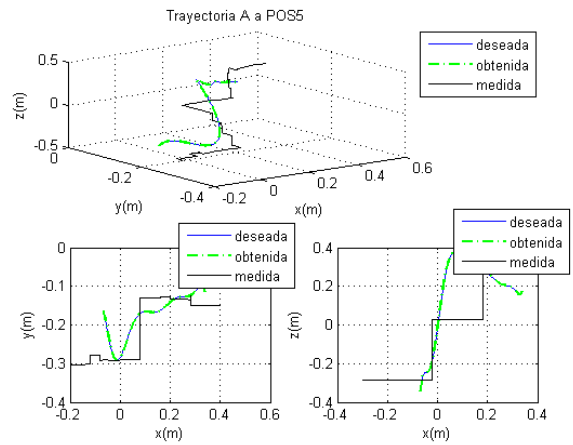


Figura H. 5 Trayectoria #5 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia

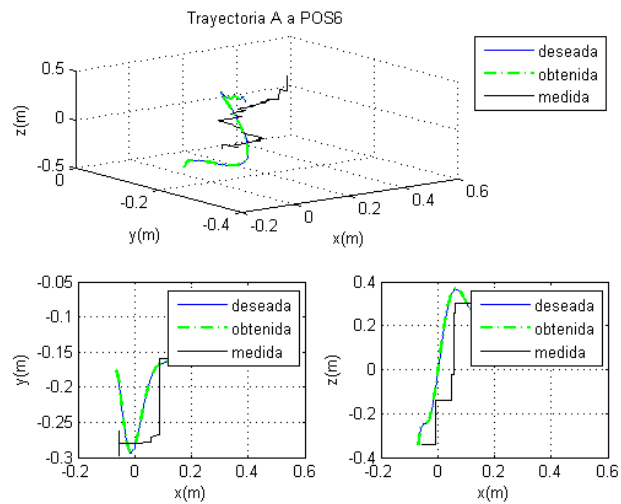


Figura H. 6 Trayectoria #6 deseada, obtenida y medida. Fuente elaboración propia