

3. Diseño: Diseñar la estructura del robot teniendo en consideración sus especificaciones, así como las longitudes y masas de los componentes. Además, diseñar el PCB, que incluye el trazado de pistas de las conexiones eléctricas y la ubicación de los componentes.
4. Armado: Fabricar el PCB, posteriormente colocar los componentes en la estructura, haciendo uso de materiales de sujeción (tornillos, tuercas, rondanas de presión), además de realizar la conexión entre los componentes electrónicos a través de los cables con conectores tipo Molex.
5. Medición final: Obtener las longitudes finales del RPISDRSL entre el eje de los motorreductores y cada uno de los elementos del robot.
6. Cálculo: Obtener los parámetros necesarios involucrados en el marco teórico, tanto de la dinámica del RPISDRSL como de las ganancias referentes al controlador a implementar.
7. Migración: Embeber el algoritmo de control dentro del microcontrolador del RPISDRSL.
8. Adaptación de la comunicación inalámbrica con el módulo HC05.
9. Sintonización: Finalmente, realizar el ajuste fino de las ganancias para la correcta sintonización del controlador para realizar el recorrido indicado.

4. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, así como la discusión e interpretación de los mismos.

4.1. Diseño del RPISDRSL y montaje de los materiales

La distribución de los componentes se muestra en la Figura 12 y a continuación se detalla:

1. Piso superior del RPISDRSL de la Figura 12: En la placa superior, específicamente en la parte superior-central de la placa, se encuentra la batería, encima de la batería se encuentra el PCB y el módulo bluetooth, a la derecha de la batería se encuentra el *MPU* y a la izquierda de la batería está el interruptor. Por último, en la parte inferior de la placa superior se encuentra el puente H.
2. Piso inferior del RPISDRSL de la Figura 12: Por debajo de la placa inferior se encuentran los motores con sus *encoders*, llantas y también los sensores infrarrojos para la detección de línea.

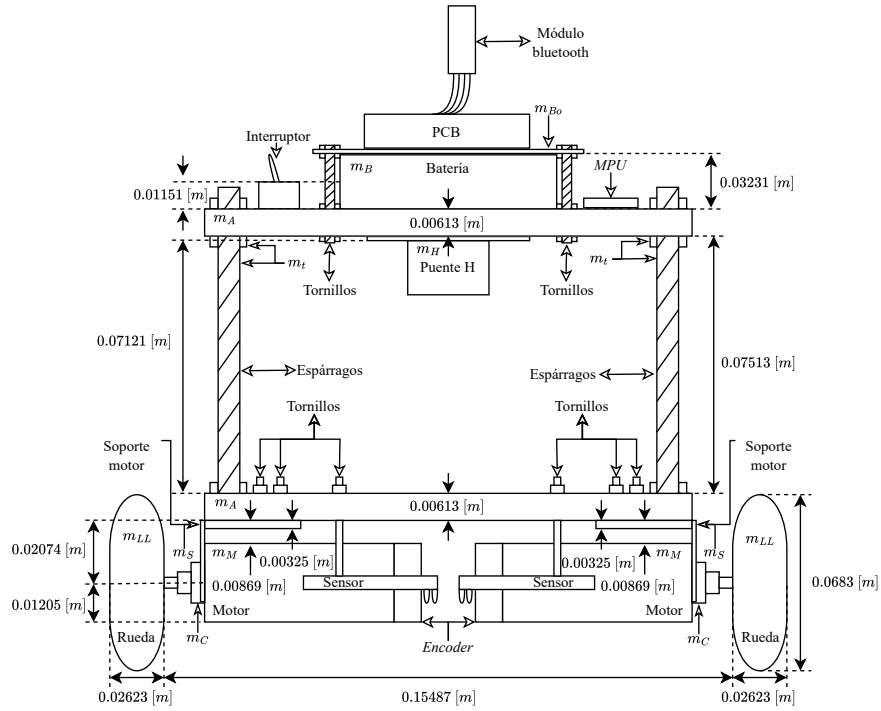


Figura 12: Diagrama de distribución de componentes del RPISDRSL.

4.2. Cálculo del momento de inercia del RPISDRSL

Para el cálculo de inercias del RPISDRSL se necesita medir la masa de los componentes, estas mediciones las podemos observar en el Cuadro 6, la masa de cada uno de los componentes está expresada en kilogramos $[kg]$.

Cuadro 6: Masa de los componentes del RPISDRSL.

Componente	Masa $[kg]$
Motor	$m_M = 0.095$
Cople de rueda	$m_C = 0.004$
Espárrago con tuercas y arandelas	$m_t = 0.020$
Soporte del motor	$m_S = 0.015$
Tarjeta puente H	$m_H = 0.024$
Batería	$m_B = 0.111$
PCB	$m_{Bo} = 0.031$
Placa de impresión 3D	$m_A = 0.038$
Llanta	$m_{LL} = 0.033$
Masa total del robot	$m_T = 0.739$

También se necesitan las distancias de los componentes con respecto a los ejes de los motores, todas las mediciones de los componentes están expresadas en metros $[m]$ y las podemos observar en el Cuadro 7.

Cuadro 7: Distancias del RPISDRSL.

Componente	Distancia [m]
Distancia del eje de los motores a la placa inferior (piso inferior)	$x_1 = 0.02074$
Distancia del eje de los motores al puente H	$x_2 = 0.09808$
Distancia del eje de los motores al centro de los espárragos	$x_3 = 0.06443$
Distancia del eje de los motores a la placa superior (piso superior)	$x_4 = 0.10813$
Distancia del eje de los motores al centro de masa de la batería	$x_5 = 0.11964$
Distancia del eje de los motores al PCB	$x_6 = 0.14044$
Distancia del eje de los motores al soporte del motor	$x_7 = 0.01749$
Mitad de la distancia entre el centro de las llantas	$b = 0.09055$

La masa del RPISDRSL, sin considerar los motores, está dada por:

$$M_p = 4m_t + 2m_s + 2m_A + m_B + m_H + m_{Bo} = 0.3460 [kg] \quad (49)$$

El centro de masa del péndulo está dado por:

$$C_z = \frac{2m_s x_7 + m_A x_1 + m_B x_5 + m_H x_2 + 4m_t x_3 + m_A x_4 + m_{Bo} x_6}{M_p} = 0.07739 [m] \quad (50)$$

En la Figura 13 se utiliza el método de la balanza donde se puede notar como están distribuidas las masas en el RPISDRSL.

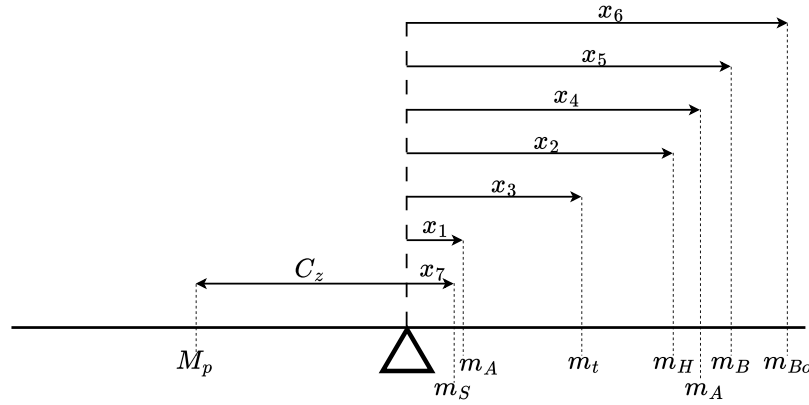


Figura 13: Método de la balanza aplicado al RPISDRSL.

En el Cuadro 8 se presentan los cálculos de los momentos de inercia alrededor del eje y asumiendo que el RPISDRSL rota alrededor de su centro de masa.

Cuadro 8: Cálculo de inercias del RPISDRSL.

I_{yy} de componentes	Operación	Resultados [kgm^2]
$I_{yy_carcasas}$	$\frac{2*m_M}{2} C_z^2$	5.6905×10^{-04}
I_{yy_postes}	$4m_t \frac{ C_z - x_3 ^2}{12}$	3.6754×10^{-06}
I_{yy_bat}	$m_B(C_z - x_5)^2 + \frac{m_B(0.02303^2 + 0.03582^2)}{12}$	1.1946×10^{-04}
$I_{yy_microcontrolador}$	$\frac{m_{Bo}0.050^2}{12} + m_{Bo}(x_6 - C_z)^2$	8.3749×10^{-05}
$I_{yy_ac_inferior}$	$\frac{m_A(0.05)^2}{12} + m_A(C_z - x_1)^2$	1.7939×10^{-04}
$I_{yy_ac_superior}$	$\frac{m_A(0.05)^2}{12} + m_A(x_4 - C_z)^2$	1.5455×10^{-05}
$I_{yy_puente_H}$	$m_H(x_2 - C_z)^2$	2.4994×10^{-06}
I_{yy}	Sumatoria de todos los momentos de inercia anteriores	9.7328×10^{-04}

4.3. Diseño y construcción del Printed Circuit Board (PCB)

La Figura 14 presenta el diagrama de conexiones eléctricas para la construcción del PCB.

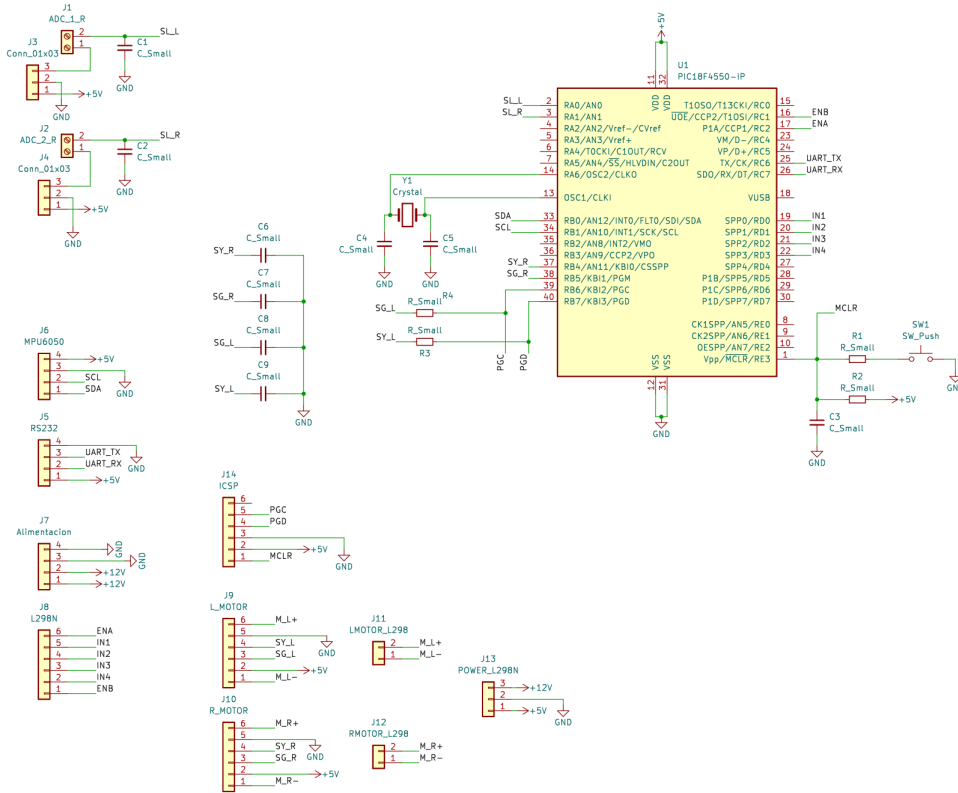


Figura 14: Diagrama esquemático del PCB.

La Figura 15 muestra las pistas y la ubicación de los componentes del PCB.

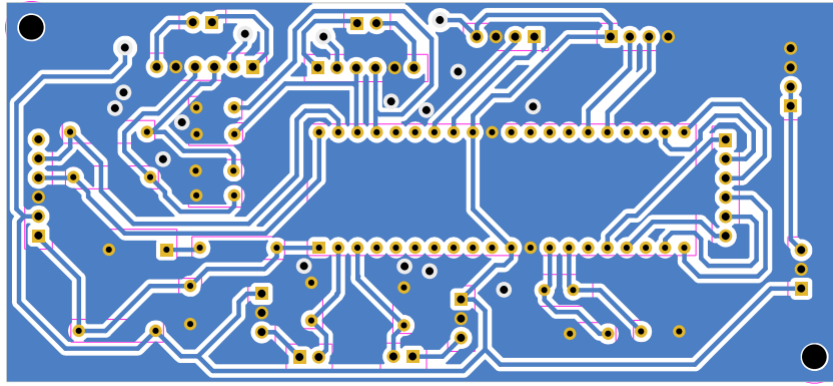


Figura 15: Pistas del PCB.

La Figura 16 exhibe el modelo 3D del PCB diseñado en KiCad, por lo tanto, los tamaños, formas y colores de los componentes pueden variar.

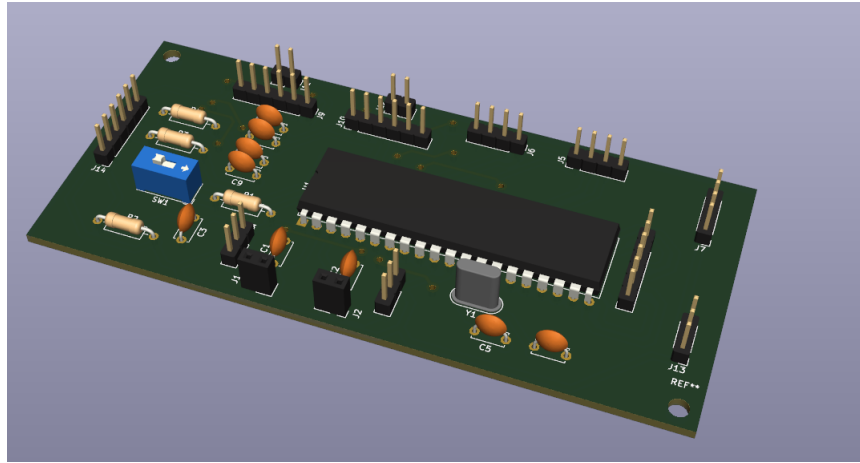


Figura 16: Modelo 3D del PCB.

4.4. Cálculo de las ganancias del controlador

Los datos anteriores de masas y distancias fueron empleados como valores de entrada en el *script* de Octave y así poder obtener las ganancias teóricas calculadas para el RPISDRSL, posteriormente, de manera experimental se ajustaron las ganancias mostradas en el Cuadro 9, las cuales fueron usadas para recorrer un segmento de la pista de pruebas.

Las ganancias k_p y k_v fueron obtenidas de manera empírica al observar el seguimiento del RPISDRSL sobre la línea blanca.

La velocidad traslacional con la que se completó la vuelta a la pista de pruebas, fue $v_d = 0.04 \left[\frac{m}{s} \right]$.

Cuadro 9: Ganancias obtenidas para realizar el recorrido de un segmento de la pista de pruebas.

Nombre de la ganancia	Valor
k_1	0.3182
k_2	3.4694
k_3	2.6024
k_4	4.7150
k_p	0.08
k_v	0.008

4.5. Resultados experimentales

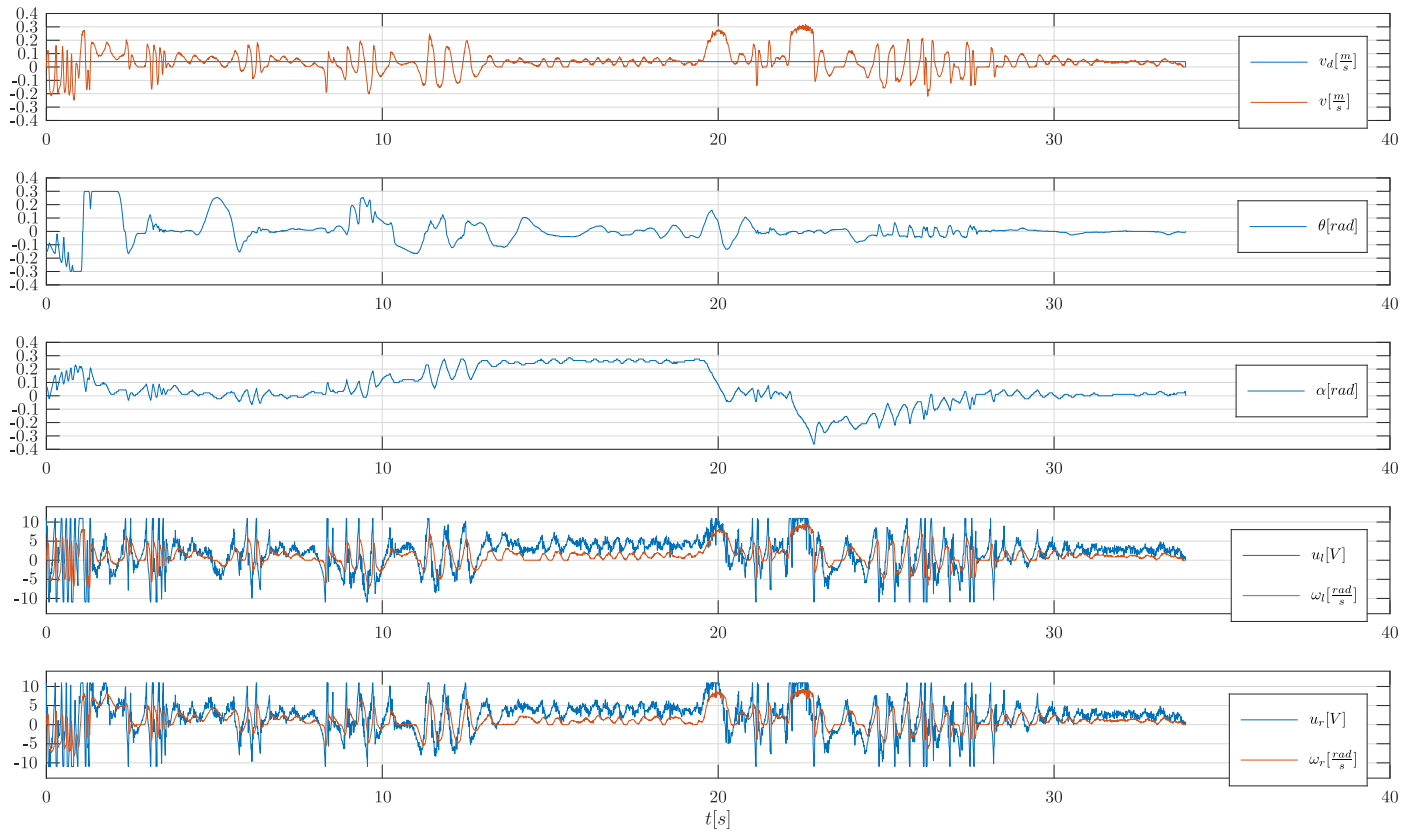


Figura 17: Señales obtenidas del RPISDRSL al realizar una prueba en un segmento de la pista de pruebas.