

INFORME PRACTICA DE LABORATORIO 9

Santiago Nomesque – Jair Munevar

Universidad Sergio Arboleda

¿QUE USAMOS?

- Microcontrolador STM32F411CEU.
- ST LINK V2.
- Programa STMCUBE IDE.
- Led emisor infrarrojo.
- Led receptor infrarrojo.

ADC

El ADC (Convertidor Analógico a Digital) de la STM32F411CEU6 es un módulo de 12 bits que puede convertir señales analógicas en valores digitales, permitiendo al microcontrolador procesar entradas de sensores u otras fuentes analógicas. Este ADC tiene hasta 16 canales multiplexados, lo que le permite leer varias señales analógicas. Soporta diferentes modos de funcionamiento, como conversión continua o única, y puede ser disparado por eventos externos. Para este laboratorio se usaron 4 de los 16 canales.

¿QUE SE REALIZÓ?

El proyecto se enfocó en desarrollar un robot Micromouse capaz de navegar por un laberinto, identificar una meta asignada y posteriormente determinar el camino óptimo para llegar a ella. Como parte del desarrollo, se integraron varios subsistemas que incluyeron la implementación de un perfil trapezoidal de movimiento para los motores, controles PID para gestionar la velocidad y el giro del robot, y sensores infrarrojos para medir la distancia y centrar el robot dentro del laberinto. Además, se desarrolló una interfaz gráfica utilizando QT Creator para visualizar datos como RPM, distancias medidas y otros parámetros del robot, transmitidos a través de UART.

Durante las pruebas iniciales, se llevó a cabo la calibración de los sensores infrarrojos para garantizar lecturas precisas. Se estableció un esquema donde los sensores funcionaban secuencialmente para obtener mediciones consistentes, convirtiendo los valores ADC a distancias en milímetros mediante funciones específicas ajustadas para cada sensor. Estos valores se integraron con la lógica de control del robot y se visualizaron en la interfaz gráfica.

¿QUÉ SUCEDIÓ?

A pesar de los avances en la integración y el control del robot, no se logró implementar completamente el control PID de centrado del camino ni la resolución del laberinto, incluida la búsqueda de la salida y la identificación del camino más rápido. Las dificultades principales surgieron debido a problemas en la calibración de los sensores y limitaciones en la optimización del código de control. Además, la variabilidad en las características individuales de los sensores y las inconsistencias en las pruebas experimentales complicaron el desarrollo del sistema de navegación autónoma del robot.

Durante la implementación del robot Micromouse, se presentaron varios desafíos y hallazgos significativos. En primer lugar, al desarrollar la lógica para manejar las situaciones en las que los sensores detectaban paredes, se identificaron siete casos posibles:

Sin paredes detectadas.

Pared solo a la derecha.

Pared solo a la izquierda.

Pared solo enfrente.

Paredes enfrente y a la derecha.

Paredes enfrente y a la izquierda.

Paredes a la derecha, izquierda y enfrente.

Con base en estos casos, se estableció una lógica que priorizaba girar a la derecha. Sin embargo, al implementarla, se observó que el robot tendía a desviarse de manera significativa, lo que le impedía mantener una trayectoria recta consistente. Para mitigar este problema, se introdujo un sistema de odometría, que mejoró considerablemente el control del movimiento. No obstante, no se logró implementar el cálculo del delta angular en la odometría, lo cual limitó la precisión en los ajustes de dirección.

El control PID ayudó a reducir las desviaciones y permitió que el robot siguiera trayectorias más rectas. Sin embargo, se notó una ligera inclinación hacia la izquierda, probablemente debido a diferencias en el rendimiento de los motores. Adicionalmente, la velocidad inicial configurada era demasiado baja, lo que provocaba un desfasaje en el inicio de los motores. Este inconveniente fue corregido rápidamente ajustando tanto la velocidad mínima como la máxima, lo que permitió un funcionamiento más fluido y coordinado.

Por otra parte, no se logró implementar completamente el control PID para centrar al robot en el camino ni la resolución completa del laberinto, lo que incluía la búsqueda de la salida y la

identificación del camino óptimo hacia la meta. Estas limitaciones estuvieron relacionadas con problemas de calibración precisa de los sensores, restricciones de tiempo y complejidades en la integración de los sistemas.

A pesar de estas dificultades, los avances realizados en la integración de sensores, la lógica de control y los sistemas de navegación marcaron un progreso significativo, proporcionando una base sólida para futuras mejoras en el robot.

En el desarrollo del robot Micromouse, se utilizaron sensores infrarrojos para detectar las distancias hacia las paredes en diferentes direcciones, lo cual era fundamental para mantener al robot centrado en el laberinto y tomar decisiones de navegación. Los datos obtenidos y transformados se presentan en dos tablas: la primera muestra los valores crudos de los sensores en función de la distancia, mientras que la segunda convierte esos valores a voltajes normalizados. A continuación, se explican en detalle ambas tablas y su relevancia en el sistema.

SENSORES/DISTANCIA	S1	S2	S3	S4
5	3405	3887	1311	3853
10	2652	3511	1052	3262
15	2109	2890	890	2583
20	1780	2361	728	2117
25	1485	1810	624	1750
30	1311	1349	525	1381
35	1121	1096	470	1171
40	966	908	403	1010
45	849	763	374	889
50	758	680	343	765
55	663	587	301	682
60	618	520	294	641
65	540	474	270	546
70	496	405	249	513
75	452	386	230	471
80	413	353	215	424
85	398	314	198	406
90	367	290	195	375
95	342	280	193	345
100	312	271	191	319
105	294	255	186	300
110	291	232	179	296
115	278	218	171	284
120	261	205	165	263
125	249	197	163	251
130	236	195	156	235
135	227	196	150	229
140	215	194	148	213
145	206	189	142	204
150	202	181	140	196
155	198	173	135	195
160	195	165	133	193
165	193	163	131	192
170	190	156	126	191
175	186	154	125	189
180	180	147	124	183
185	174	146	120	179
190	171	145	116	171
195	165	139	115	168
200	162	122	114	162

Tabla 1: sensores y distancia.

La primera tabla incluye las mediciones obtenidas directamente de los sensores infrarrojos (S1, S2, S3 y S4) para diferentes distancias, medidas en milímetros (mm). Cada columna representa los valores obtenidos por un sensor específico:

S1: Sensor situado a la izquierda del robot.

S2: Sensor situado a la derecha del robot.

S3: Sensor frontal izquierdo.

S4: Sensor frontal derecho.

Observaciones clave:

Sensibilidad a la distancia: Los valores de los sensores disminuyen a medida que aumenta la distancia, lo cual refleja una disminución en la intensidad de la señal recibida. Por ejemplo, para S1, a una distancia de 5 mm, el valor es 3405, mientras que a 200 mm, el valor baja a 162.

Variabilidad entre sensores: Cada sensor tiene una respuesta diferente a la misma distancia. Por ejemplo, a 50 mm, S1 registra 849, mientras que S4 registra 889. Estas diferencias pueden atribuirse a variaciones en las características individuales de los sensores, como sensibilidad o alineación durante la instalación.

Zona no lineal: En distancias muy cortas (<50 mm), los valores de los sensores son altos y no decrecen de manera uniforme, lo que sugiere una mayor sensibilidad en esa zona. Este comportamiento podría complicar el control en trayectorias muy cercanas a las paredes.

Relevancia en el proyecto:

Estos valores crudos eran fundamentales para determinar la posición relativa del robot respecto a las paredes. Sin embargo, al ser números grandes y no lineales, se requería un proceso de normalización y conversión a unidades manejables, como voltajes, para ser utilizados en los algoritmos de control.

VOLTSS1	VOLTS2	VOLTS3	VOLTS4
2,74428274	3,13203247	1,05636324	3,10514348
2,13679127	2,82898836	0,84742879	2,62873662
1,69932708	2,32866081	0,7171582	2,08133
1,43455669	1,90269026	0,58630403	1,70581131
1,19702066	1,45854583	0,50310142	1,41016929
1,05643996	1,08687287	0,42278732	1,11299334
0,90302148	0,88362249	0,37854808	0,94352299
0,77836826	0,73168534	0,32455288	0,81384785
0,68405145	0,61494176	0,30161103	0,71629106
0,61090468	0,54795684	0,27659158	0,61627622
0,53390222	0,47301179	0,24269254	0,54923689
0,49803493	0,41940261	0,2369106	0,51646349
0,43491349	0,38187437	0,21740278	0,43963205
0,40005677	0,32625961	0,20081902	0,41359575
0,36449525	0,31066323	0,18503861	0,3791899
0,3330019	0,28430821	0,17345967	0,34145955
0,32091398	0,25310766	0,15981742	0,32751634
0,29589861	0,23339646	0,15714286	0,30232995
0,2759568	0,22590274	0,15553114	0,27795979
0,25142857	0,21808511	0,15418388	0,25678197
0,23692308	0,20567589	0,15006475	0,24175824
0,23427488	0,18689752	0,14416426	0,23834305
0,22404226	0,17551441	0,13816895	0,22871418
0,21059915	0,16546058	0,13296703	0,2123223
0,20095733	0,15875458	0,13103097	0,20193939
0,18983852	0,15714286	0,12572926	0,18928919
0,18327244	0,15794872	0,12087912	0,18462245
0,1731642	0,15601569	0,11909026	0,17176755
0,16637787	0,15266269	0,11443223	0,16465991
0,16300427	0,14579343	0,11242382	0,1580731
0,15956044	0,13914444	0,108896	0,15714286
0,15714286	0,13309918	0,10717949	0,15553114
0,15553114	0,13102777	0,10563284	0,15472527
0,15326483	0,12559991	0,10153846	0,15369398
0,14959337	0,12442595	0,1007326	0,15202525
0,14510731	0,11846936	0,10015699	0,14771351
0,14031869	0,11765568	0,09648306	0,14461703
0,13758691	0,11680548	0,09322708	0,13796285
0,1327052	0,11177211	0,09267399	0,13521878
0,13086479	0,09813768	0,09171046	0,13033507

Tabla 2: voltajes de los sensores.

La segunda tabla presenta los valores de los sensores convertidos a voltajes (en unidades relativas). Este paso fue crucial para integrar los datos en el control PID y otros algoritmos de navegación. Los voltajes se obtuvieron aplicando una fórmula que mapea los valores crudos a un rango manejable, probablemente entre 0 y un voltaje máximo de referencia.

Observaciones clave:

Rango de voltajes: Los valores varían entre aproximadamente 2.74 V (distancia mínima, S1) y 0.13 V (distancia máxima, S4). Esto confirma que los valores se normalizaron para facilitar su uso en cálculos.

Consistencia en la conversión: Aunque los valores crudos de los sensores variaban significativamente, en esta tabla se observa que las diferencias entre sensores para una misma distancia son menos pronunciadas. Por ejemplo, a 50 mm, los valores son:

S1: 0.9034 V

S2: 0.8138 V

S3: 0.3784 V

S4: 0.8452 V

Esto sugiere que el proceso de normalización mejoró la coherencia de los datos.

Zonas críticas: Los valores de voltaje en distancias cortas presentan cambios más abruptos. Esto podría haber causado dificultades en el control preciso del robot, especialmente al navegar en áreas angostas o realizar maniobras cerca de las paredes.

Relevancia en el proyecto:

Estos valores de voltaje sirvieron como entradas directas para los controladores del robot, incluyendo el sistema de odometría y los PID de velocidad y giro. Sin embargo, la persistencia de pequeñas diferencias entre sensores incluso después de la normalización pudo haber contribuido a la desviación observada en las pruebas.

Las tablas representan la base de los datos obtenidos por los sensores y su conversión para ser utilizados en el sistema de control. Aunque proporcionaron información valiosa para el desarrollo del robot, también revelaron varias limitaciones que afectaron el desempeño:

Desviaciones en el centrado: A pesar de la normalización, las diferencias residuales entre los sensores contribuyeron a que el robot se desviara ligeramente hacia la izquierda. Esto pudo deberse a desajustes en los sensores o a diferencias en el desgaste de los motores.

Complejidad en distancias cortas: Los datos no lineales en distancias menores a 50 mm complicaron la implementación del control PID de centrado, lo que dificultó mantener una trayectoria recta en el laberinto.

Impacto en el control PID: Aunque el uso de voltajes permitió una integración más sencilla con los algoritmos de control, la falta de ajuste fino en la calibración de los sensores limitó el desempeño del sistema.

A pesar de estos desafíos, el trabajo con las tablas permitió identificar áreas de mejora y establecer una base sólida para ajustes futuros, como mejorar la calibración de los sensores o implementar filtros para reducir las variaciones entre mediciones.

En la fase de validación de la función de edometría, se detectó una inconsistencia en la asignación de variables. Esta discrepancia en la nomenclatura condujo a una propagación de errores en los cálculos subsiguientes, generando resultados numéricos erróneos. Tras corregir la nomenclatura de las variables, la función se comportó conforme a lo especificado. Este hallazgo subraya la relevancia de una rigurosa definición de variables desde el inicio de cualquier proceso de modelado, a fin de evitar la propagación de errores y garantizar la fiabilidad de los resultados.

Luego de percatarse de los errores y empezar a arreglar todo se decidieron graficar 3, las cuales se pueden observar en la Imagen 1, **Imagen 2** y **Imagen 3**.

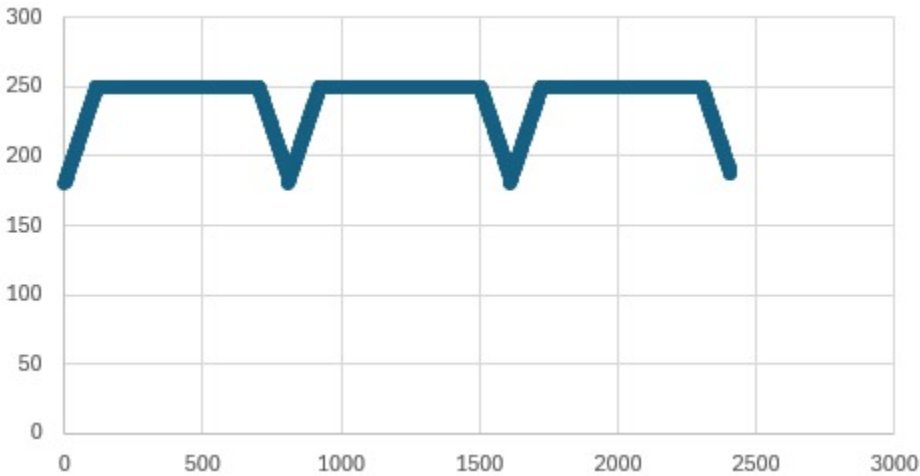


Imagen 1: Forma ideal perfil de velocidad trapezoidal.

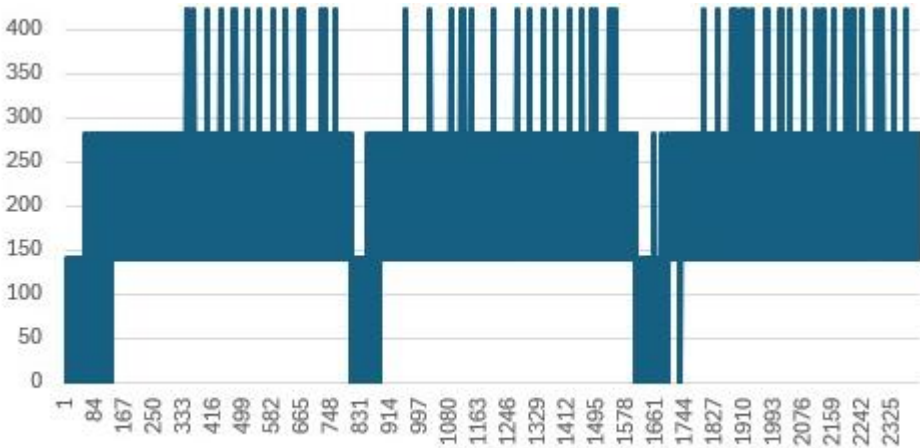


Imagen 2: Forma real perfil de velocidad trapezoidal.

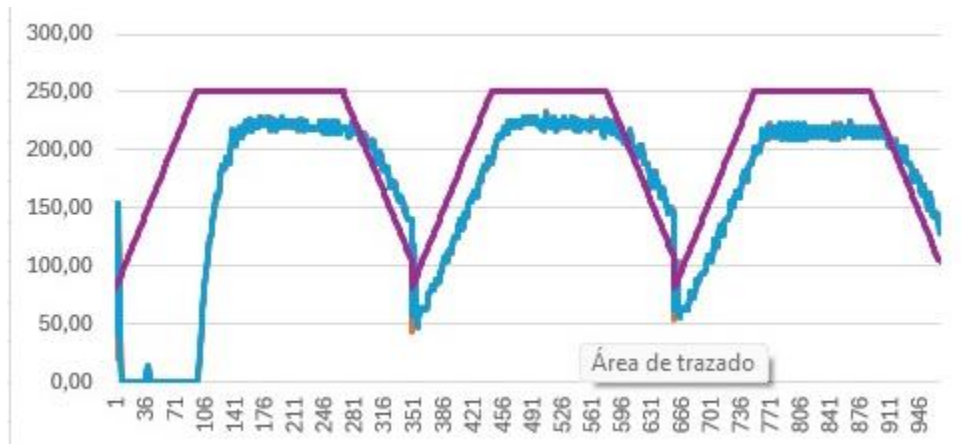


Imagen 3: Comparación forma ideal y forma real perfil de velocidad trapezoidal aplicando el filtro FIR.

Con la imagen 2 nos percatamos de que se le podían aplicar los filtros FIR (Respuesta Impulsiva Finita) son herramientas digitales utilizadas para modificar señales, como el audio o las imágenes. Funcionan como tamices que permiten pasar ciertas frecuencias y bloquean otras. Gracias a esto las gráficas de las funciones empezaron a dar más acercadas a lo ideal como se ve en la imagen 1 quedando de la forma esperada como se observa en la imagen 3 comparando la forma ideal (grafico de color morado) con la forma real aplicando el filtro FIR (grafico azul).

Para garantizar el desempeño eficiente del robot micromouse en la resolución del laberinto, se diseñaron perfiles de velocidad trapezoidales que se optimizaron mediante la aplicación de un filtro FIR para suavizar las señales, y un controlador PID para ajustar las acciones correctivas en tiempo real. Estos mecanismos permitieron mantener una trayectoria más estable y precisa.

Además, se implementó una estrategia para centrar al robot dentro del laberinto, utilizando la pared izquierda como referencia principal. Durante las pruebas, se observó que el motor izquierdo, al ser controlado con el PID, presentaba un desempeño ligeramente inferior al esperado, posicionándose un poco por debajo del nivel ideal. En contraste, el motor derecho logró un comportamiento más cercano a lo esperado. Aunque el sistema logró corregir de manera óptima el error respecto a la pared izquierda, no se alcanzaron resultados equivalentes con la pared derecha.

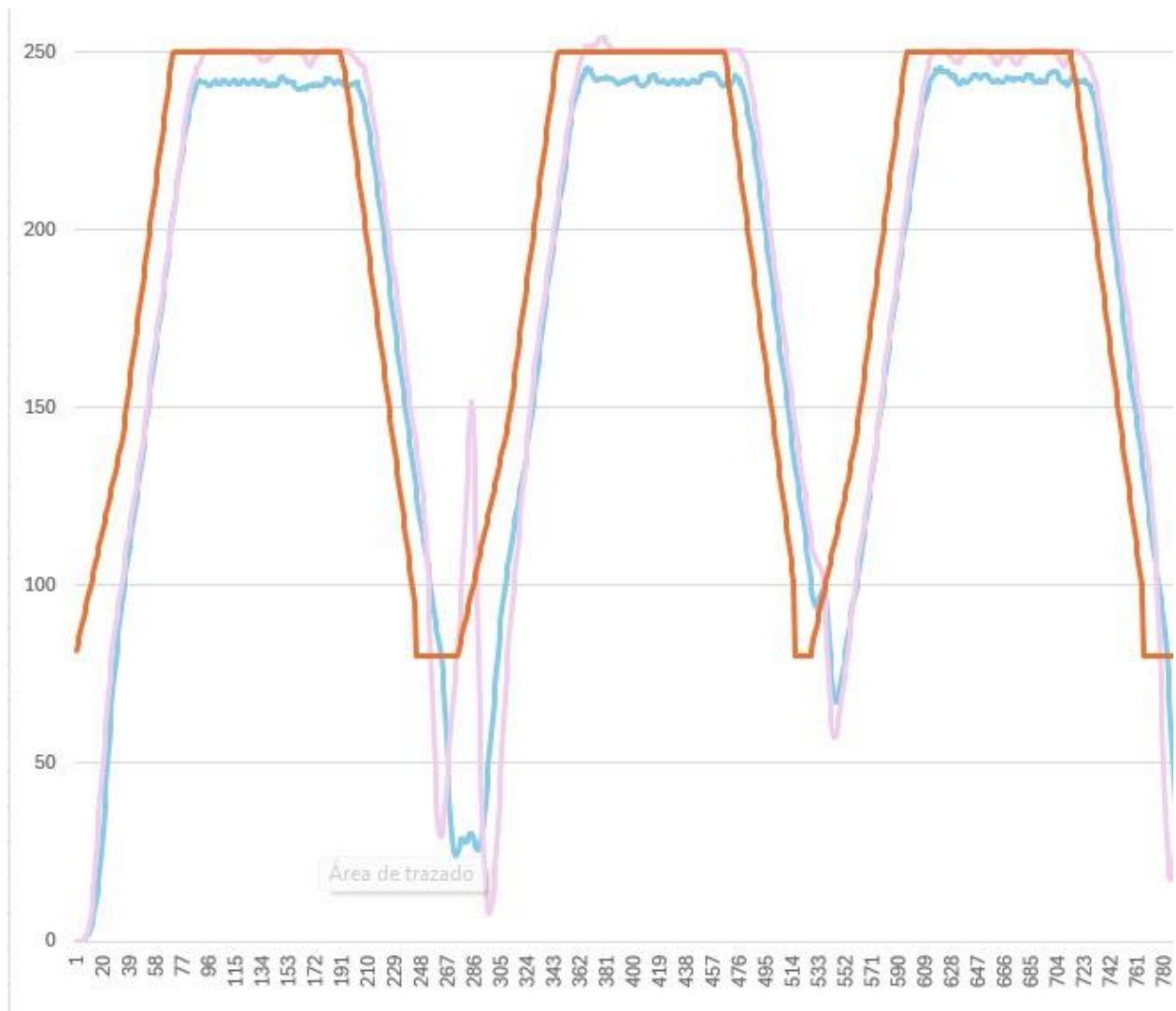


Imagen 4: Comparación forma ideal y forma real perfil de velocidad trapezoidal aplicando el filtro FIR y PID de ambos motores.

En la imagen 4, se muestran los perfiles de velocidad para ambos motores, donde la curva azul representa el motor izquierdo y la rosa el motor derecho. Estos gráficos evidencian que el motor izquierdo responde mejor al perfil de velocidad diseñado, logrando un mayor nivel de precisión en el control. Esto refleja la eficacia de la integración del filtro FIR y el controlador PID en el ajuste de las señales de control, permitiendo mejorar la adherencia a los perfiles establecidos y reduciendo los errores derivados de las desviaciones de posición.

DIAGRAMAS DE FLUJO

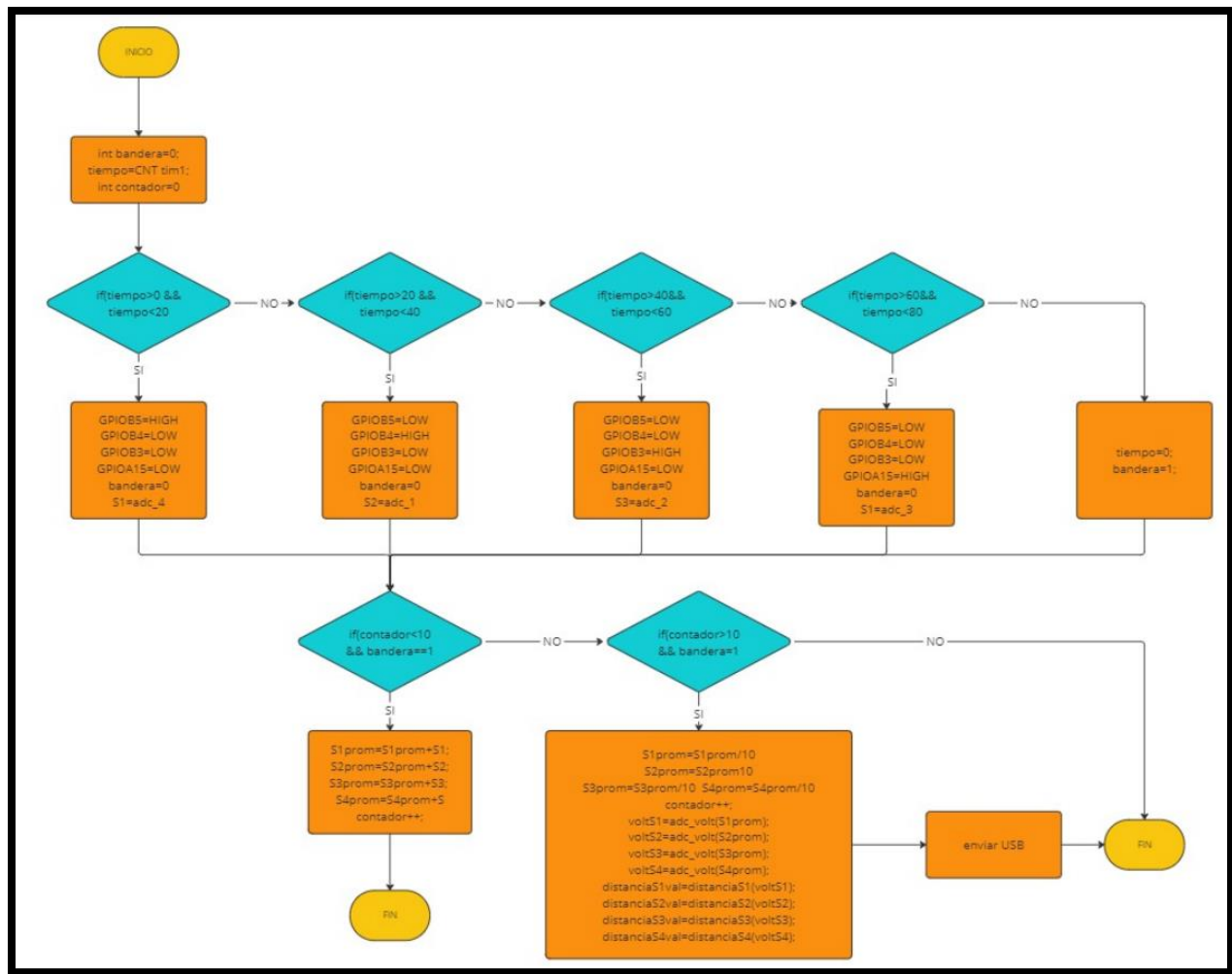


Imagen 5: Diagrama de flujo del código de la STM32 para la lectura de datos con el ADC

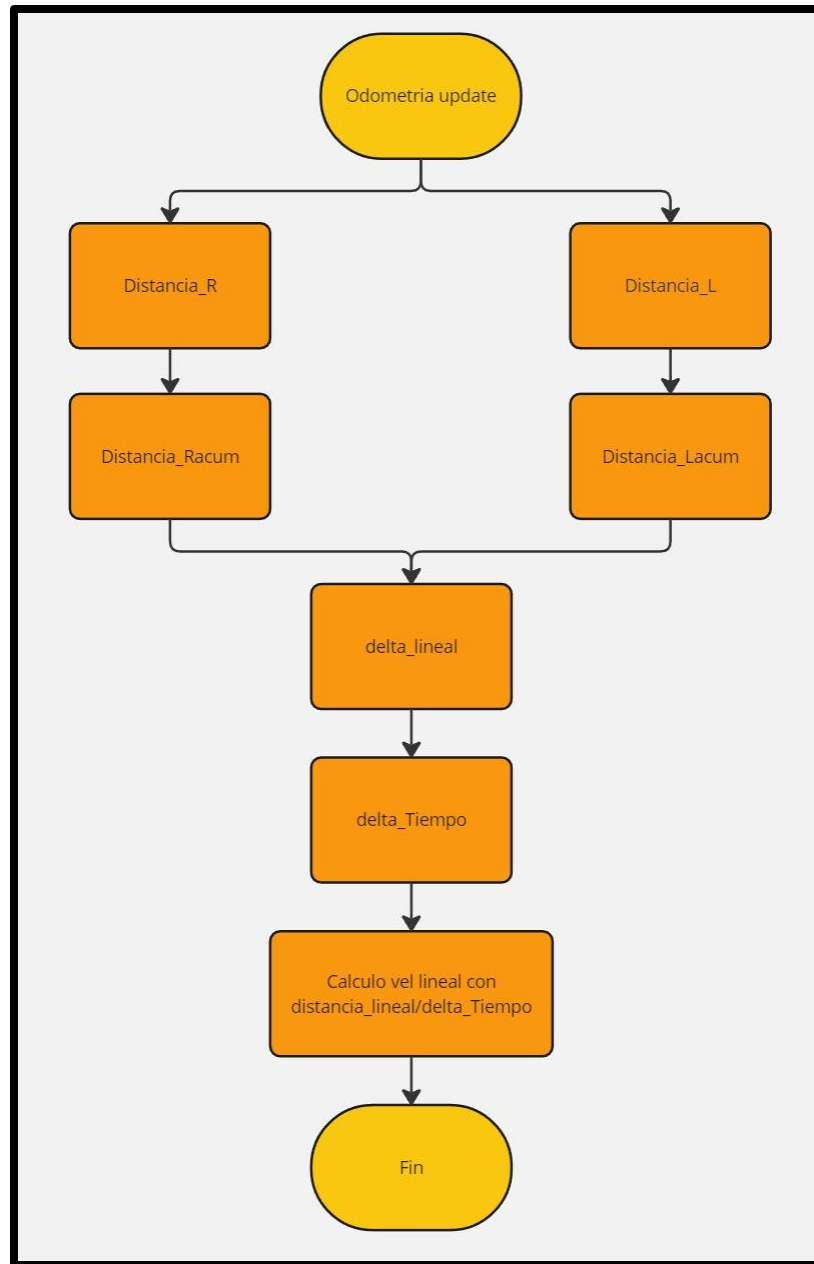


Imagen 6: Diagrama Edometría update.

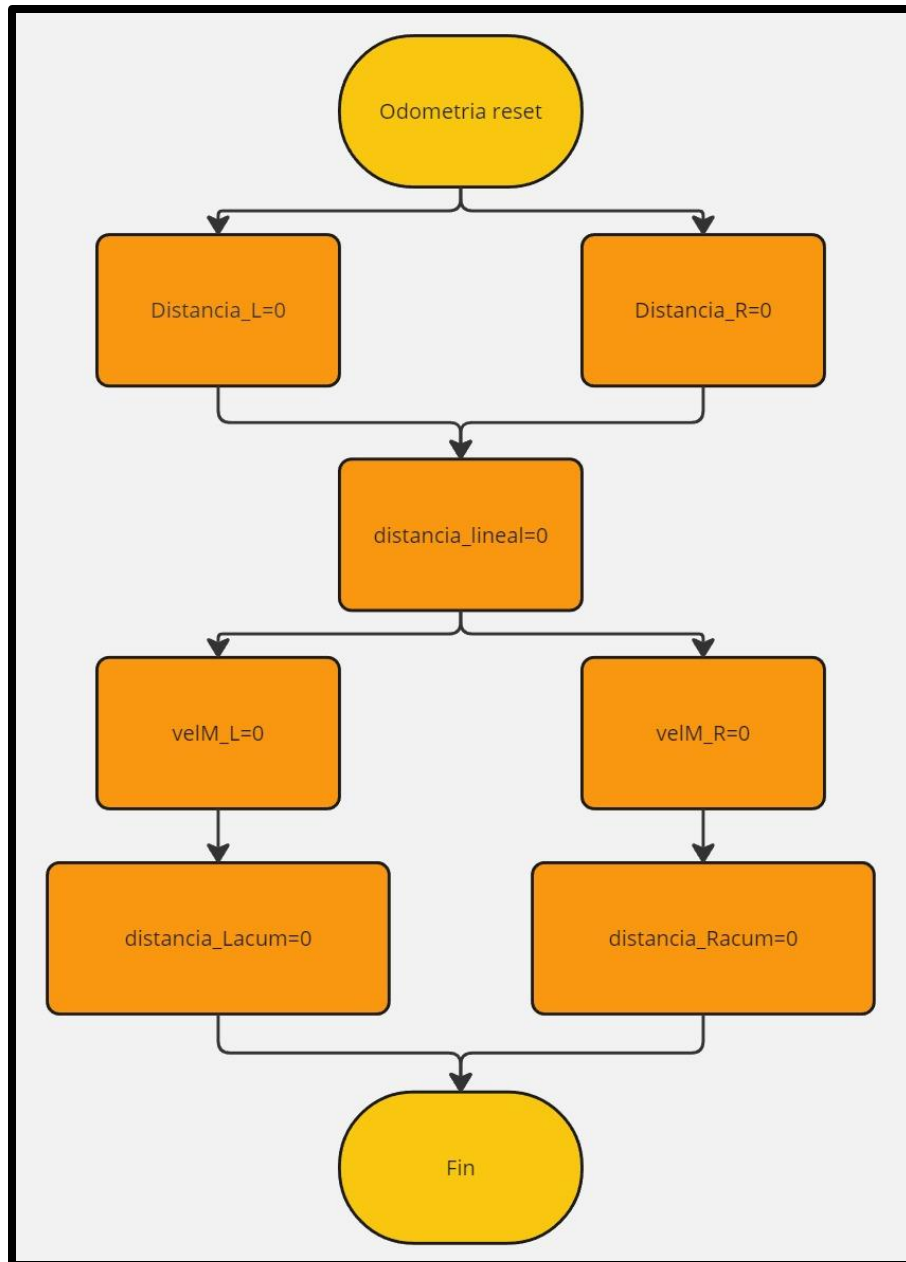


Imagen 7: Diagrama Edometría reset.

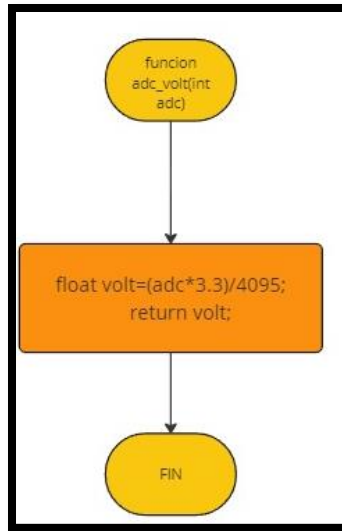


Imagen 8: Diagrama de flujo del código de la función para la conversión de valor ADC a Voltaje

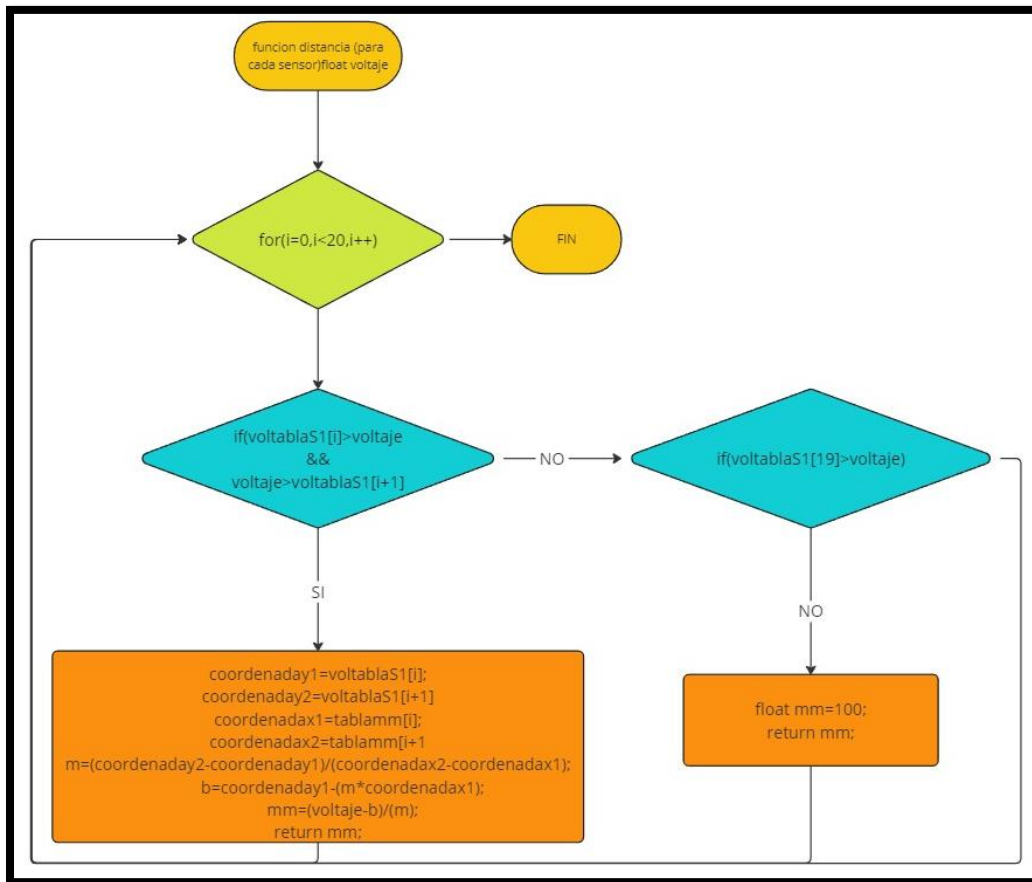


Imagen 9: Diagrama de flujo del código de la función para la conversión de Voltaje a mm

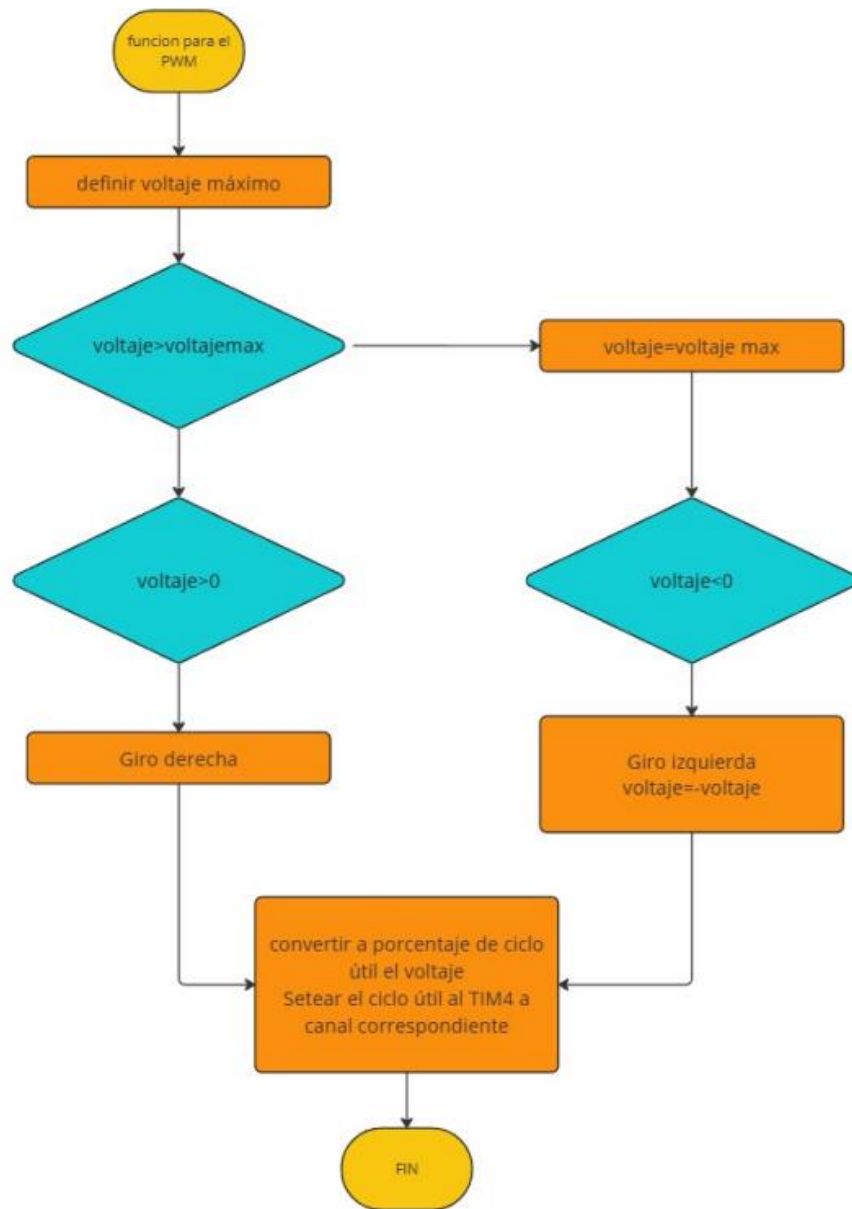


Imagen 10: Diagrama de flujo de la función del PWM.

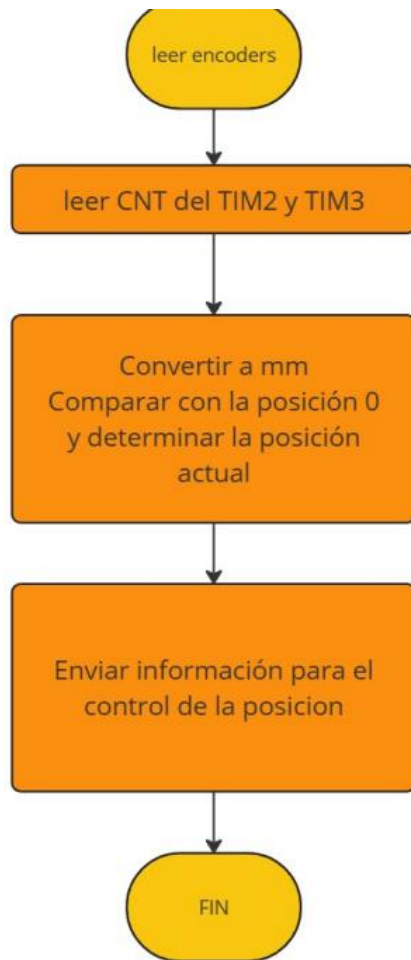


Imagen 11: Diagrama de flujo de la lectura de los encoders.

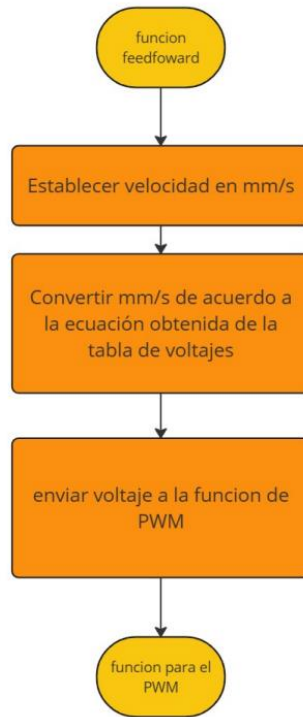


Imagen 12: Diagrama de flujo de la función feedforward.

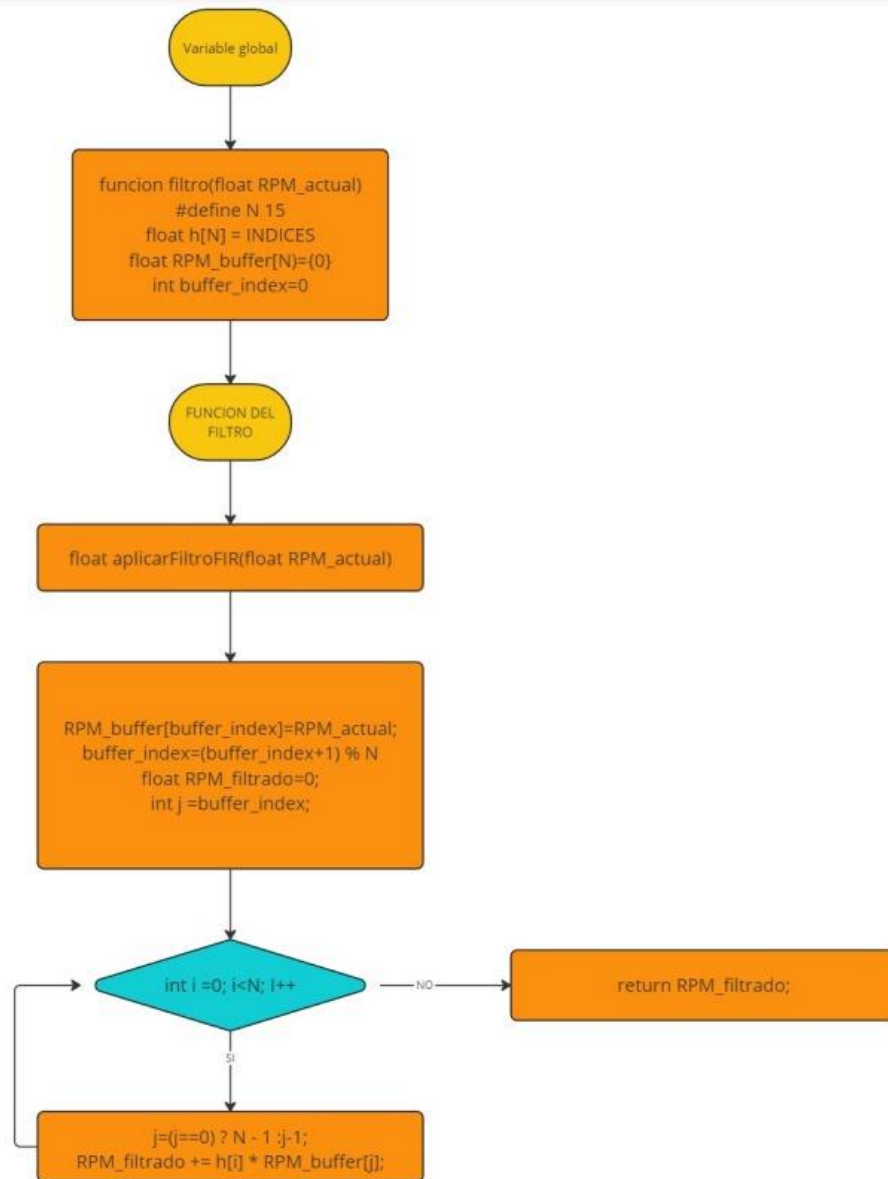


Imagen 13: Diagrama de flujo del código de la STM32 para filtrar la señal

ESQUEMÁTICO

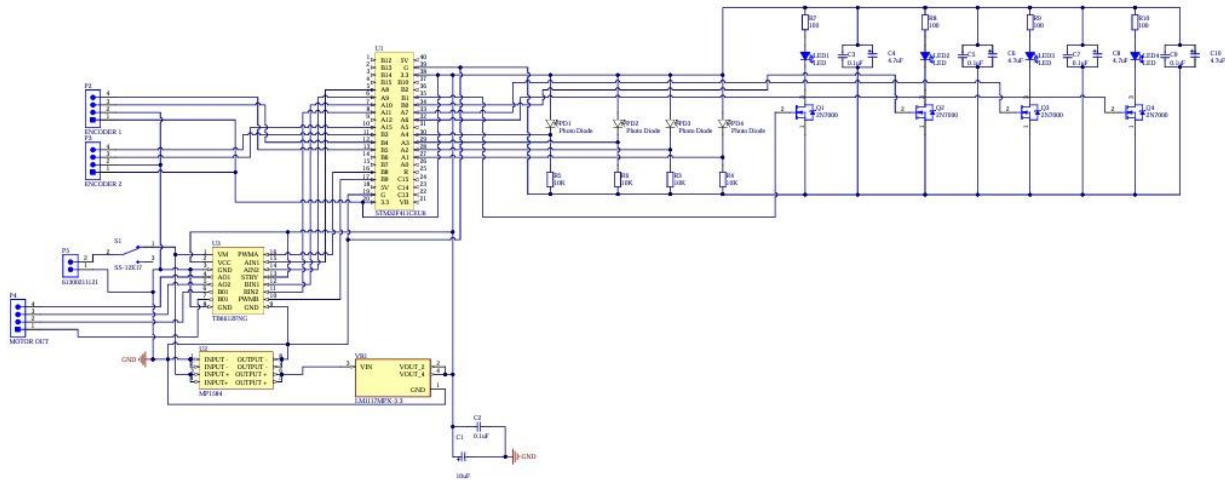


Imagen 14: Esquemático usado en la elaboración del laboratorio.

CONCLUSIONES

- Se logró implementar con éxito diversos subsistemas, como el uso de sensores infrarrojos, odometría, y controladores PID para mejorar el movimiento y la navegación del robot Micromouse. Sin embargo, la integración completa del control PID de centrado y la resolución del laberinto no se alcanzaron, indicando que aún hay espacio para optimizar el sistema.
- La calibración insuficiente de los sensores infrarrojos fue uno de los principales desafíos encontrados. Las diferencias en las lecturas de los sensores afectaron la capacidad del robot para mantener trayectorias consistentes y precisas, especialmente en áreas críticas como distancias cortas a las paredes.
- Aunque el uso de odometría y control PID mejoró la rectitud del movimiento, persistieron desviaciones significativas, como una inclinación hacia la izquierda. Esto se atribuyó a variaciones en el rendimiento de los motores y a diferencias residuales entre sensores incluso después de la normalización.
- La conversión de valores crudos a voltajes normalizados fue clave para facilitar su integración con los algoritmos de control. No obstante, las pequeñas inconsistencias y no linealidades en los datos normalizados dificultaron el control preciso del robot, evidenciando la necesidad de un ajuste más fino y de posibles filtros de datos.
- A pesar de las limitaciones encontradas, el trabajo desarrollado proporcionó una base importante para futuros avances. La experiencia adquirida en integración de sensores, controladores y lógica de navegación es fundamental para iteraciones futuras que podrían abordar los problemas identificados y mejorar el desempeño del sistema.