

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO
SEDE ANDINA



Laboratorio de Electrónica Analógica

Informe

Control analogico satelital

Profesor: Juan Pablo Adriach

Alumnos: Simón Aulet

Juan Nicolás Roccasalvo

Nuria Belén Paredes

SAN CARLOS DE BARILOCHE, FEBRUARY 2026

Tabla de contenidos

1	Introducción	4
2	Metodología	4
3	Introducción	5
4	Control térmico	6
5	Orientación solar	12
6	Despliegue de paneles	16
7	Verificación despliegue	20
8	Sistema de selección y detección de orientación	24
8.1	Latch de selección	24
8.2	Sensor de orientación grosera	25
9	Filtro Activo	26
10	Control térmico	33

Índice de figuras

3.1	PCB Terminado	5
4.1	Ploteo de límites para histéresis	7
4.2	Circuito implementado en LTSpice	8
4.3	Salida de inverting schmitt trigger	8
4.4	Salida de non-inverting schmitt trigger	9
4.5	Salida sin histéresis	9
4.6	Medición características de la histéresis	9
4.7	Esquemático	10
4.8	Controles manuales en PCB	11
5.1	Simulación del LDR	12
5.2	Salida del LDR	13
5.3	Esquemático de detección de orientación	14
5.4	Selectores e indicador de eclipse en el PCB	15

5.5	Sensores exteriores de luz	15
6.1	Diagrama en bloques del despliegue.	16
6.2	Circuito oscilador sinusoidal	17
6.3	Circuito oscilador sinusoidal	18
6.4	Prueba en osciloscopio	19
7.1	Esquemático completo	21
7.2	Circuito completo en LTSpice	22
7.3	Forma de onda de entrada y salida del signal-to-pulse	23
7.4	Forma de onda de entrada, reset y salida del 555	23
7.5	Forma de onda de lógica de alarma	24
8.1	Esquemático completo	25
8.2	Circuito del sensor de orientación basado en LDR	26
9.1	Topología Sallen Key	27
9.2	Bode filtro activo	30
9.3	Modulación AM 1	31
9.4	Armónicos	32
9.5	Modulación AM 2	32
9.6	Desfasaje	33
10.1	Example image 1x1	34

Indice de Tablas

Listings

4.1	Simulación histeresis	6
9.1	Simulación filtro	29

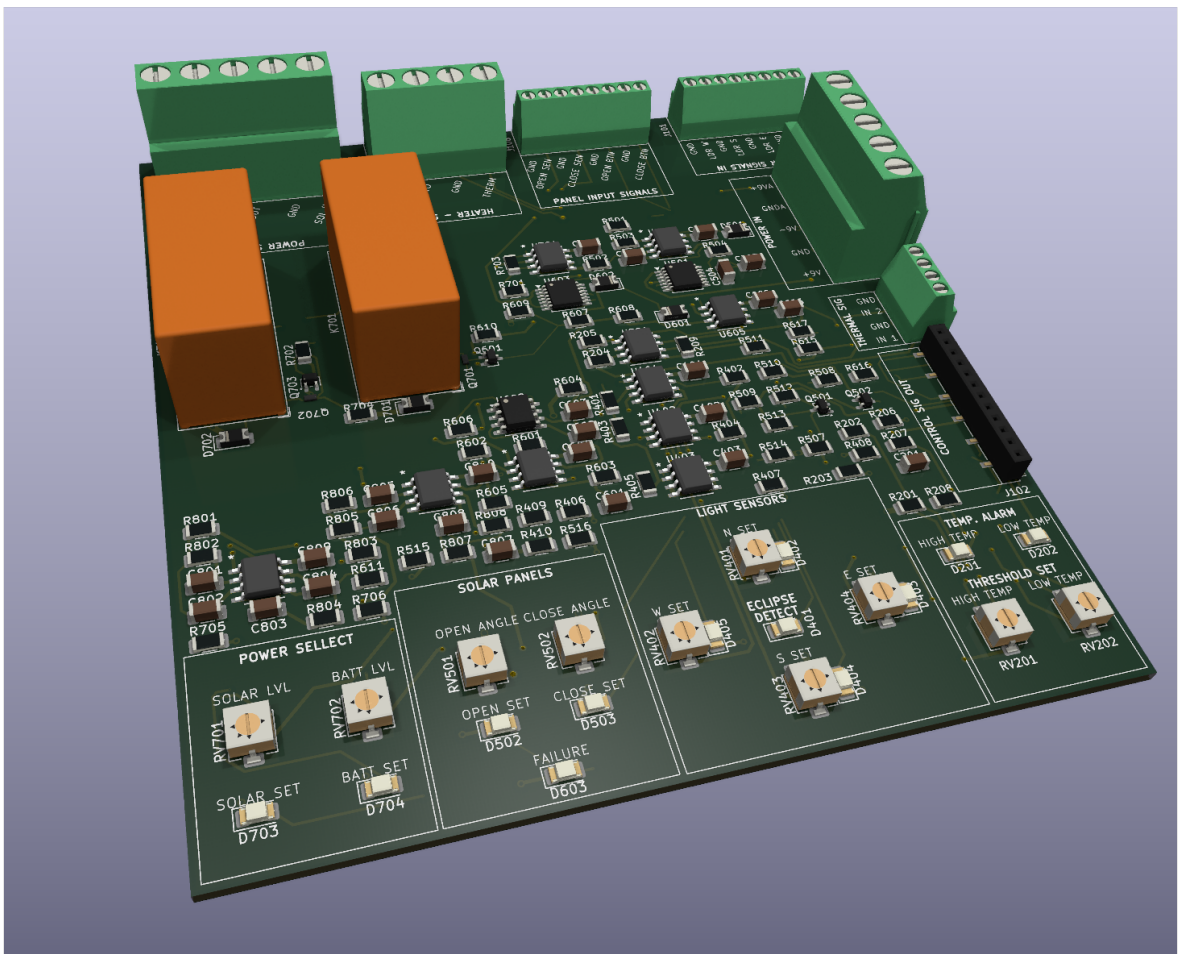
1 Introducciún

2 Metodologòa

There are no definite rules for label prefixes, but you can use the following as a guideline.

3 Introducci3n

Diseamos la computadora de a bordo de un sistema de control satelital completamente anal3gico. El desarrollo del proyecto se desglos3 en 14 laboratorios, cada uno de los cuales aport3 componentes relevantes para el aprendizaje del diseo anal3gico. Esto incluy3 la implementaci3n de funciones espec3ficas para la placa, la implementaci3n de conceptos de teor3a de control, la integraci3n de sistemas electr3nicos, previa simulaci3n y, finalmente, la puesta a punto.



H3nhr 3.1: PCB Terminado

4 Control térmico

Objetivo

Implementación

Simulaciones

Planteo matemático

Para las simulaciones se parte de la ecuación de schmitt trigger:

$$V_{inL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OL} - V_{ref}) + V_{ref}$$
$$V_{inH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{ref} + V_{ref})$$
$$H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{OL})$$

Para elegir los valores, se simula el sistema de ecuaciones en Python

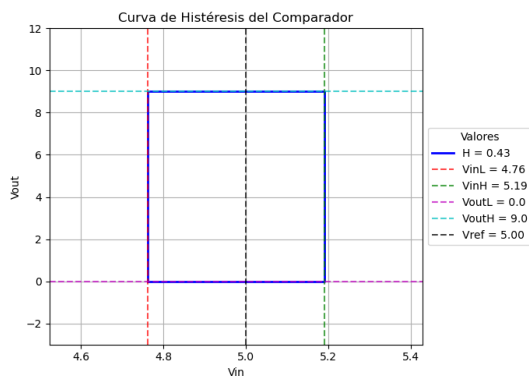
Listing 4.1: Simulacion histeresis

```
1
2 from sympy import symbols, Eq, solve
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 #Generacion de simbolos
6 VinL, VinH, H, R1, R2, VOL, VOH, Vref = symbols('VinL
7 VinH H R1 R2 VOL VOH Vref')
8
9 #Implementacion de ecuaciones
10 eq_min = Eq(VinL, R1/(R1+R2) * (VOL - Vref) + Vref)
11 eq_max = Eq(VinH, R1/(R1+R2) * (VOH - Vref) + Vref)
12 eq_H = Eq(H, R1/(R1+R2) * (VOH - VOL))
13
14 #Se sobreescriben los valores conocidos dejandose 3
15 incognitas
16 VinL_val = VinL
```

```

15 VinH_val = VinH
16 H_val    = H
17 R1_val   = 5e3
18 R2_val   = 100e3
19 VOL_val  = 0
20 VOH_val  = 9
21 Vref_val = 5
22
23 #Se resuelve el circuito para v superior, inferior e
histeresis
24 sol = solve(
25     (eq_min.subs({R1: R1_val, R2:R2_val, VOL:VOL_val,
26                   Vref:Vref_val})),
27     eq_max.subs({R1: R1_val, R2:R2_val, VOH:VOH_val,
28                 Vref:Vref_val})),
29     eq_H.subs({R1: R1_val, R2:R2_val, VOH:VOH_val, VOL
30               :VOL_val})),
31     (VinL, VinH, H)
32 )

```



El código nos determina límites de voltaje para encendido y apagado (V_{in}) de la salida del amplificador, así como los valores superiores e inferior de voltaje que son VCC y 0 respectivamente. El ancho resulta en $430mV$

Figura 4.1: Ploteo de límites para histéresis

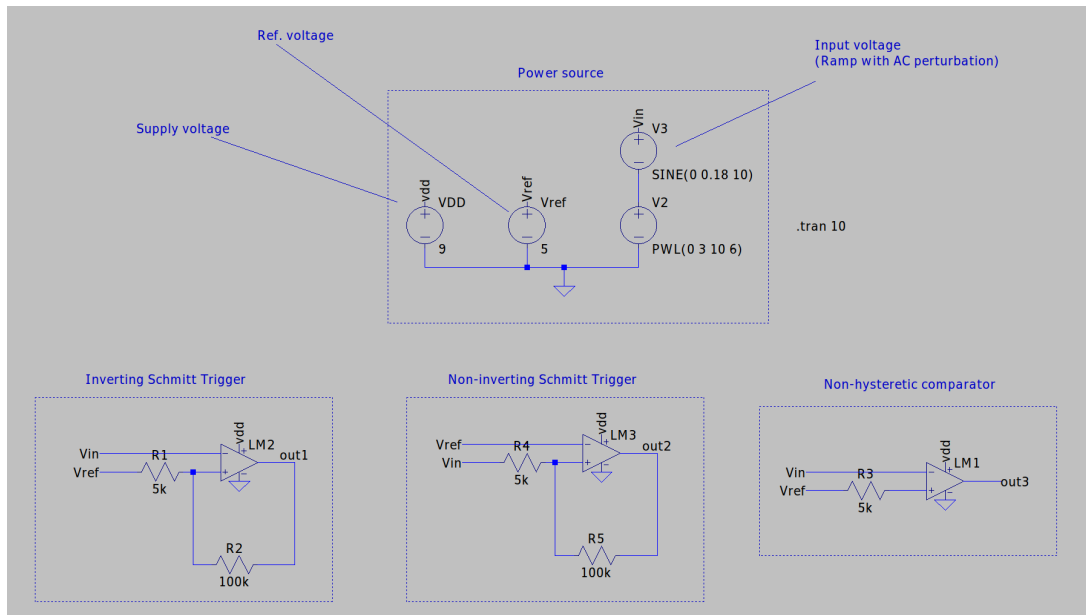
Simulación en LTSpice

A partir de esto, se realizan las simulaciones en LTSpice. No del circuito final, si no de los tres casos posibles de funcionamiento del schmitt trigger:

- Histéresis con inversión

- Históresis sin inversiún
- Comparador sin históresis

El circuito implementado en LTSpice es el siguiente:

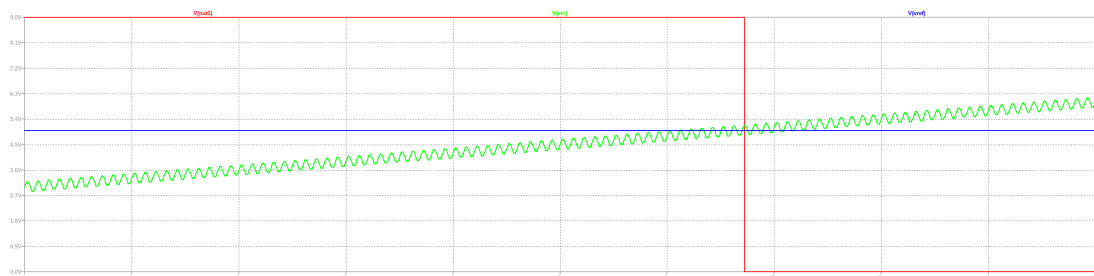


Honh 4.2: Circuito implementado en LTSpice

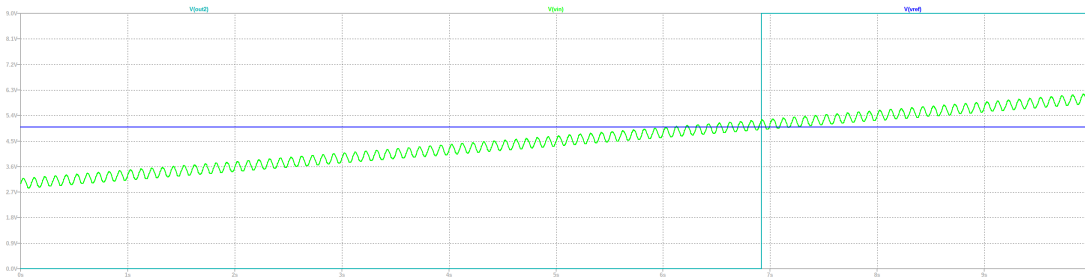
Se puede apreciar cómo se hacen 3 circuitos para cada uno de los casos detallados más arriba

Resultados simulaciún

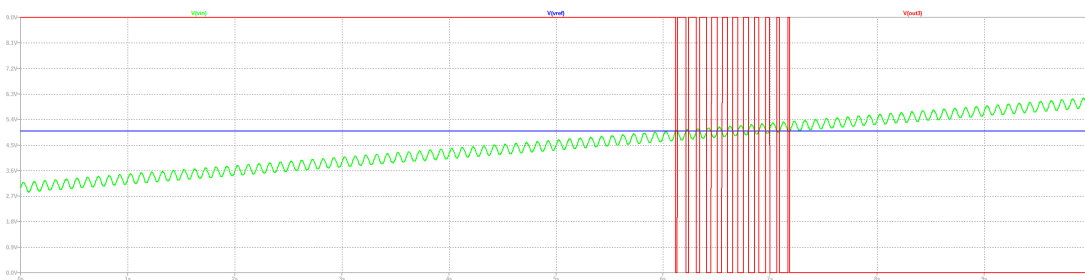
A continuaciún, se muestran los resultados de cada simulaciún realizada. Las primeras tres imógenes muestran la forma de onda de los 3 casos medidos.



Honh 4.3: Salida de inverting schmitt trigger

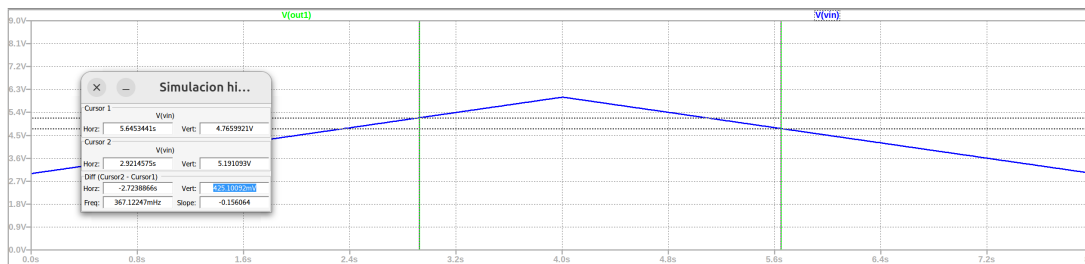


Honh 4.4: Salida de non-inverting schmitt trigger



Honh 4.5: Salida sin histõresis

Finalmente, se incluye una prueba de la amplitud de la histõresis para verificar que la simulaci³n concuerda con los calculos te³ricos



Honh 4.6: Medici³n caracterõsticas de la histõresis

Se usan marcadores para determinar el ancho de la histõresis (H). Ese valor se resalta en azul en la ventana de marcadores. Se puede apreciar que da $425mV$, totalmente en l³nea con lo simulado en Python

An³lisis y consideraciones de diseõo

El ancho de histõresis obtenido fue aproximadamente $H \approx 430mV$ en la entrada del comparador. Dado que el sensor LM35 posee una sensibilidad de $10mV/^{\circ}C$ y la etapa amplificadora tiene una ganancia de 5, esto implica que el ancho real de histõresis en temperatura es:

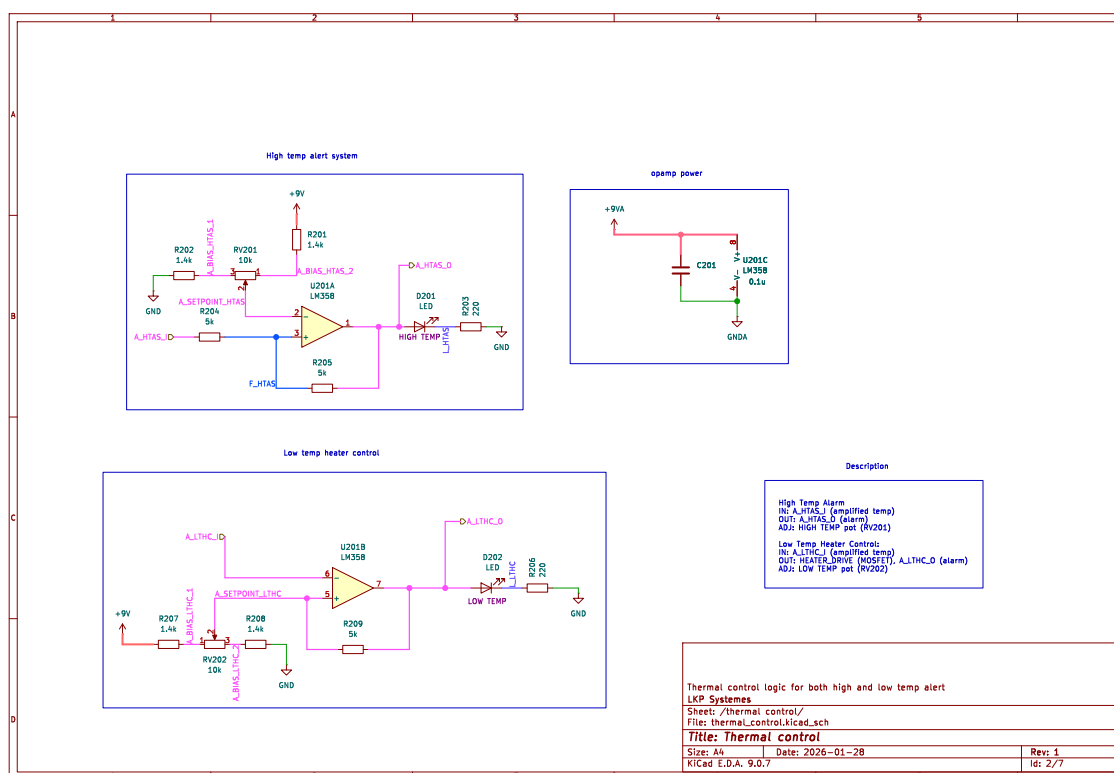
$$\Delta T = \frac{H}{5 \cdot 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}} \approx 8.6^\circ\text{C}$$

Este valor resulta adecuado para evitar conmutaciones erráticas debidas a pequeñas fluctuaciones o ruido cercano al umbral.

Por otro lado, en la implementación práctica deben considerarse tolerancias de resistencias y no idealidades del LM358, como tensión de saturación no perfectamente rail-to-rail y pequeño offset de entrada. Estas variaciones pueden generar leves diferencias respecto a los valores teóricos, aunque no afectan demasiado el funcionamiento general del sistema.

En conjunto, el dise o presenta un comportamiento coherente con el an lisis teórico, la simulaci n y la práctica experimental.

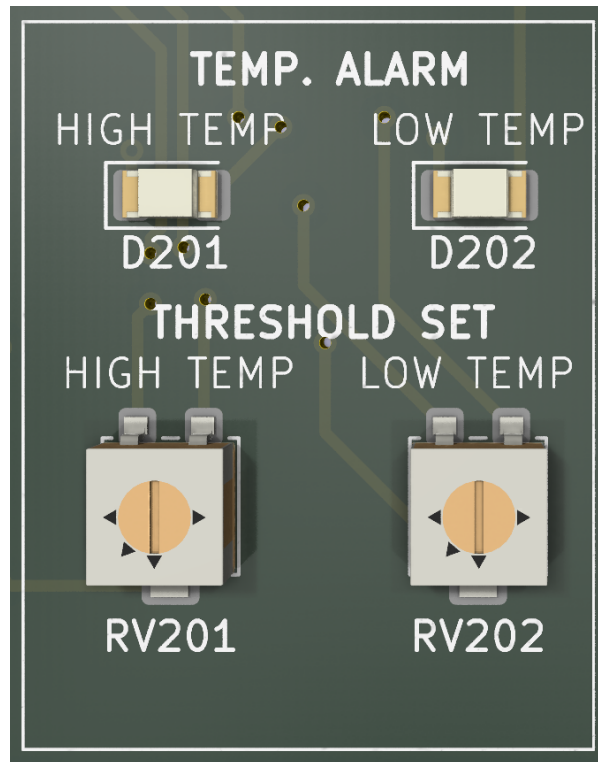
Implementación en PCB



H nh 4.7: Esquemático

Para la implementación en el PCB se diseñan 2 bloques diferentes correspondientes a dos laboratorios. Ambos bloques encienden una señal de control en el board principal y envían una señal de control a la salida. High temp alert system envía señal de control cuando la temperatura está por encima del valor establecido y low temp heater control hace lo inverso.

El setpoint de temperatura se establece mediante potenciómetros analógicos ubicados en el main board. En la figura se muestra el sector del PCB donde se ubican los potenciómetros para setear high y low temp respectivamente más los LED indicadores.



Hình 4.8: Controles manuales en PCB

Evaluación de la etapa de control térmico

La etapa de control térmico permitió validar el funcionamiento del sistema desde el sensor hasta la señal de salida. El análisis teórico de los umbrales y del ancho de histéresis mostró coherencia con las simulaciones realizadas, y el armado del modelo confirmó un comportamiento estable del comparador ante variaciones próximas al punto de disparo.

La incorporación de histéresis resultó fundamental para evitar oscilaciones no deseadas, garantizando una conmutación limpia y predecible en condiciones cercanas al umbral.

5 Orientación solar

Objetivo

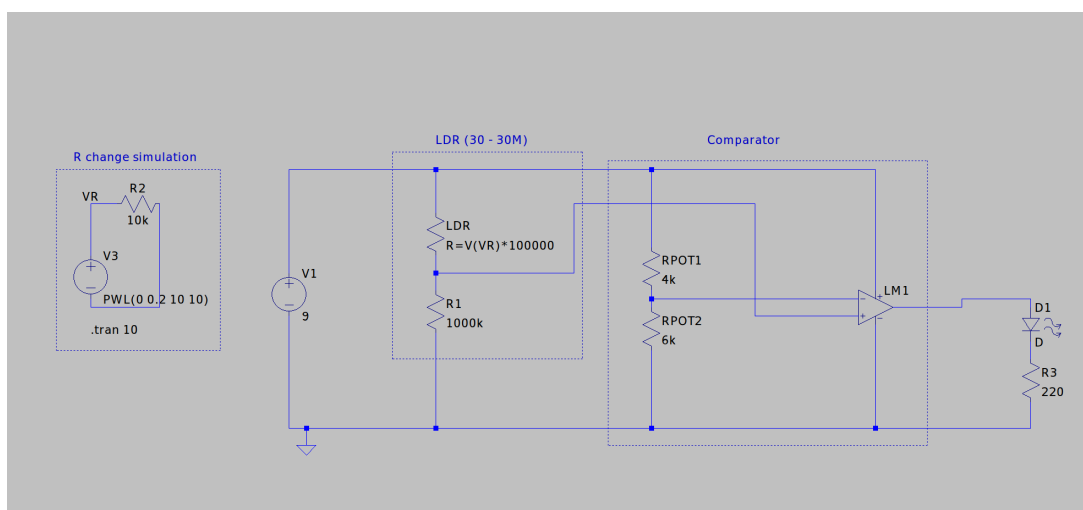
Determinar la orientación del satélite y el evento de un eclipse mediante la luz recibida en sensores luminicos, activando salidas de control correspondientes

Implementación

4 sensores LDR se ubican en los puntos cardinales del satélite. Cada sensor es un mini PCB individual que se conecta por cables al board principal. Potenciómetros en este board permiten calibrar la sensibilidad de luz para activar la salida.

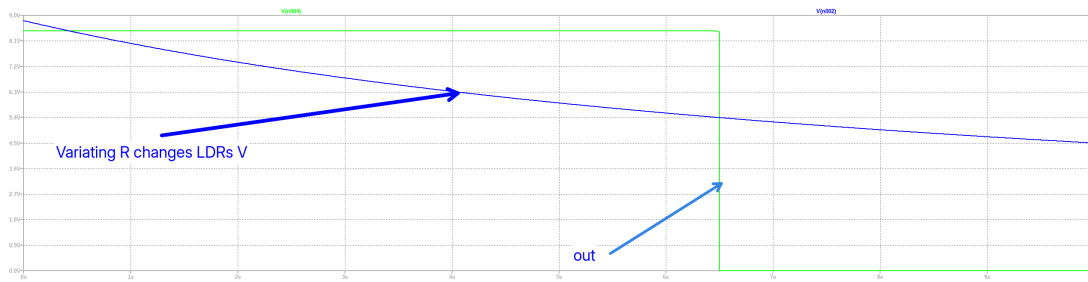
Simulación

Siendo un circuito muy simple, se realiza unicamente una simulación en la cual se hace variar una resistencia (simulando el LDR) cuyo valor depende de una fuente de voltaje $R = V(VR) \cdot 1M\Omega$. El circuito se muestra a continuación



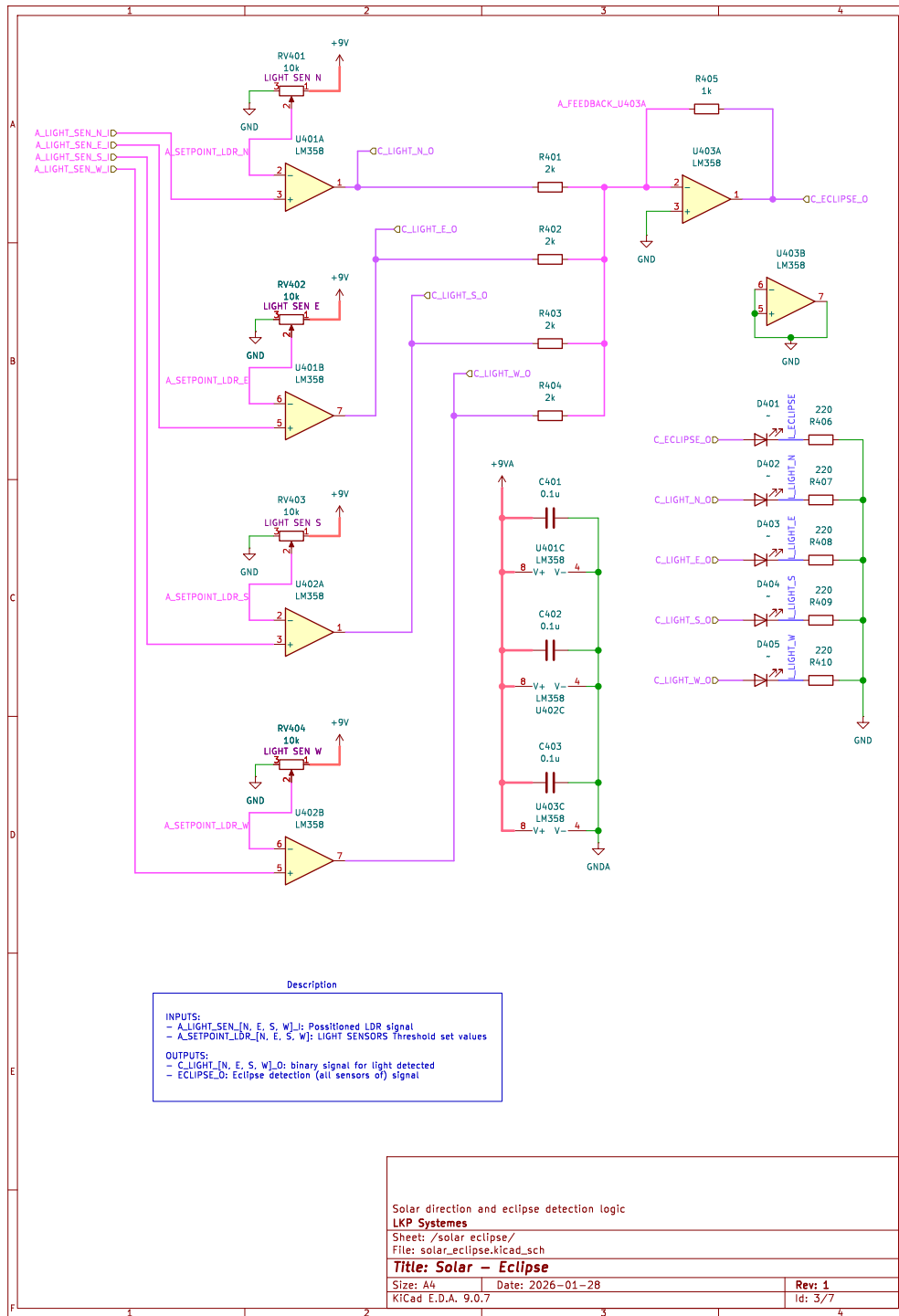
Hönh 5.1: Simulación del LDR

La salida es un simple comparador:



Hình 5.2: Salida del LDR

Para el esquemático, se usa el mismo circuito comparador 4 veces. Notese que se tienen 4 LEDs, 4 Setpoints y una salida de Eclipse. La detección de eclipse se ajusta mediante un setpoint que se setea al punto en el cual los 4 sensores están apagados (las cuatro salidas en alto)



Hình 5.3: Esquemático de detección de orientación

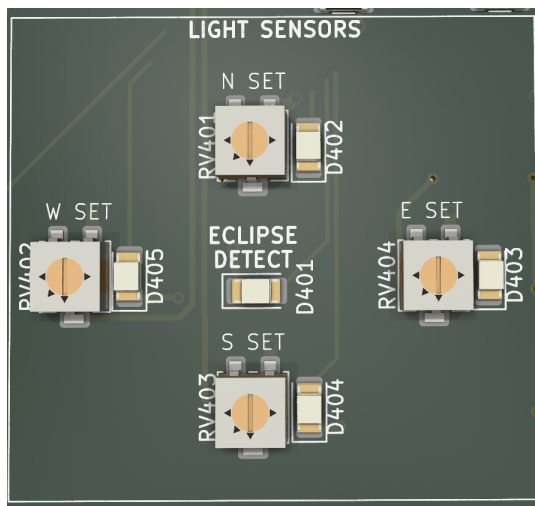
Consideraciones de funcionamiento

El uso de cuatro sensores LDR ubicados en los puntos cardinales permite obtener una estimación de la orientación relativa del satélite respecto a la fuente luminosa. Una mayor iluminación sobre un sensor implica una menor resistencia del LDR correspondiente, generando una variación en la tensión de entrada del comparador y activando la salida asociada.

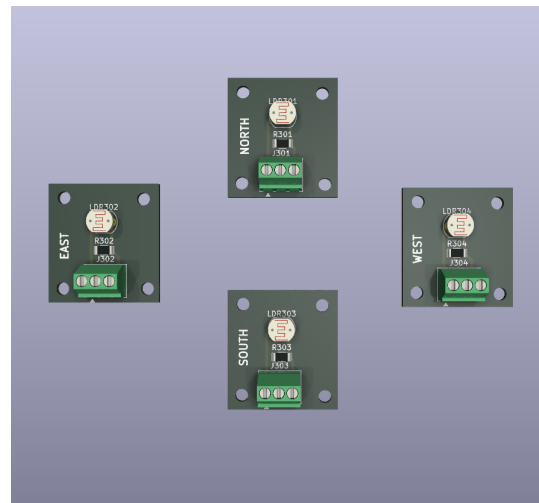
La detección de eclipse se define cuando los cuatro sensores presentan niveles de iluminación por debajo del umbral configurado. En esta condición, las cuatro salidas individuales permanecen en el mismo estado lógico, lo que permite activar una señal global de eclipse. Debe considerarse que los LDR presentan una respuesta no lineal y dependiente de la intensidad luminosa, así como variaciones entre dispositivos. Por este motivo, se incorporan potenciómetros de ajuste que permiten calibrar los umbrales de disparo y compensar diferencias entre sensores.

De este modo, el sistema permite una detección de condiciones de iluminación y orientación básica mediante un esquema analógico simple.

En cuanto al PCB, se agruparon los setpoints para los LDR en un sector junto con el LED indicador de detección de eclipse. Los 4 sensores se implementan en 4 PCBs separados con conectores para las señales hacia el main board



Honh 5.4: Selectores e indicador de eclipse en el PCB



Honh 5.5: Sensores exteriores de luz

6 Despliegue de paneles

Objetivo

Diseñar un sistema de control para el despliegue automático de paneles solares o antenas. Relación con Sistemas Reales: Este circuito representa el mecanismo de despliegue de paneles solares o antenas en satélites, que deben activarse de forma precisa y detenerse automáticamente al alcanzar su posición final.

Implementación

El despliegue es realizado por un servomotor, donde su debido control nos garantiza la precisión en la activación, y recorrido final (control PWM). El sistema de despliegue se conforma de tres etapas, donde la primera tal como lo dice la gráfica es de oscilación, la segunda de activación y la última es la física.



Hình 6.1: Diagrama en bloques del despliegue.

La idea en esta implementación es diseñar un controlador analógico para un servomotor, la única manera de lograrlo es mediante el conocido PWM, en otras palabras es hacerle llegar una determinada cantidad de pulsos por segundo para su activación y modularlos para su control en grados. Para ello decidimos transformar una señal sinusoidal en una de pulso cuadrado mediante un amplificador operacional en una configuración de comparador.

Oscilador

Ecuación que rige el funcionamiento de un oscilador:

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1-A\beta}$$

A diferencia de un feedback convencional con entrada de referencia y salida, el oscilador se caracteriza por no poseer entrada es decir, tenemos un bloque de ganancia A con una salida V_o realimentada mediante un bloque de ganancia de β hacia el bloque A directamente, sin pasar por ningún sumador entre medio.

Esta caracterización hace que la ecuación de ganancia de feedback necesite a $A\beta = 1$ para hacer la ganancia infinita y entrar en el bucle de oscilación. Entonces para que la placa cumpla con este requisito de un sencillo despeje tenemos que la ganancia de feedback

expresada con Laplace queda en:

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_f(s)} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

R_1 y R_f están asociadas a la parte de realimentación negativa del amplificador.

$$\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{RCs}{R^2C^2s^2 + 3RCs + 1} = 1$$

si sustituimos jw por s en la ecuación obtenemos que:

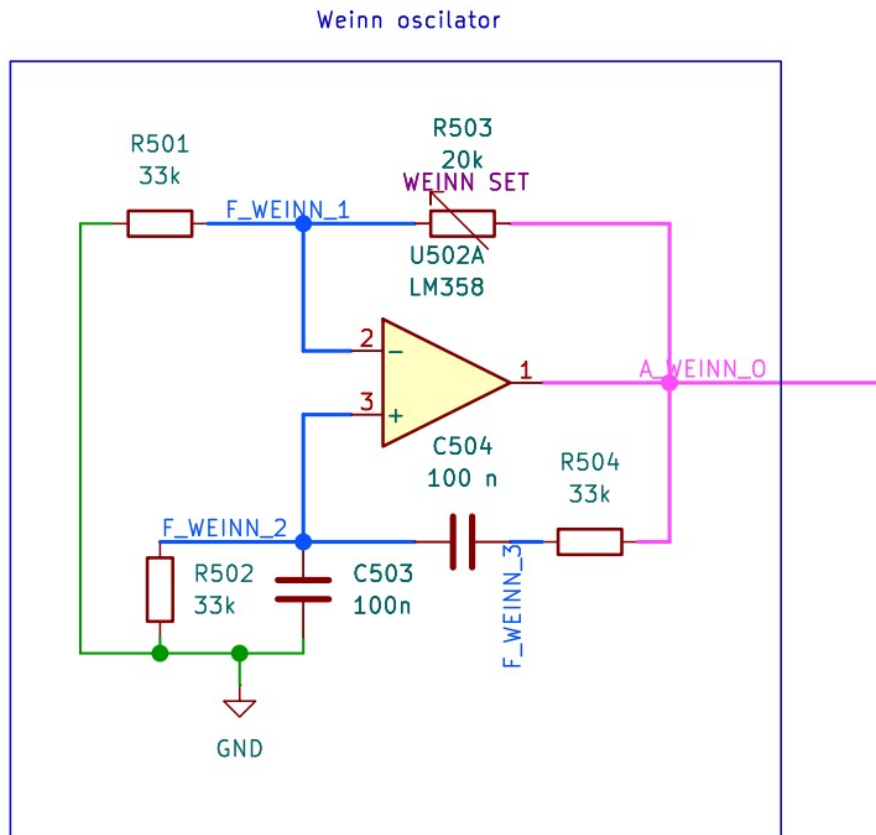
$$\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{RC(jw)}{R^2C^2(jw)^2 + 3RC(jw) + 1} = 1$$

Luego de despejar de la parte imaginaria w , quedamos en los siguientes valores: $1 +$

$$\frac{R_f}{R_1} = 3$$

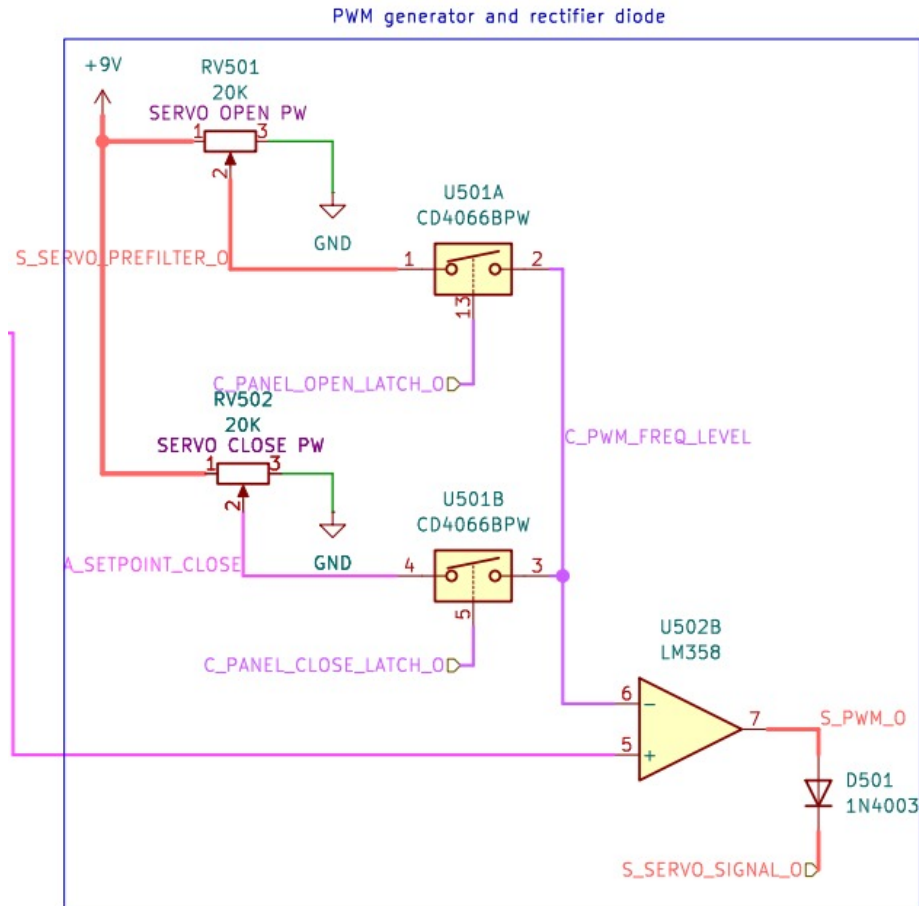
donde necesariamente nos queda que $\frac{R_f}{R_1} = 2$

Lo cual para la práctica impone esta condición de frontera para garantizar la estabilidad del oscilador, es decir que no diverga ni converga la onda en ningún periodo de operación. Por recomendación del profesor la resistencia de R_f fue implementada por preset para poder dar ese ajuste fino que en cálculos no se puede manejar a causa de las perturbaciones externas.



Hình 6.2: Circuito oscilador sinusoidal

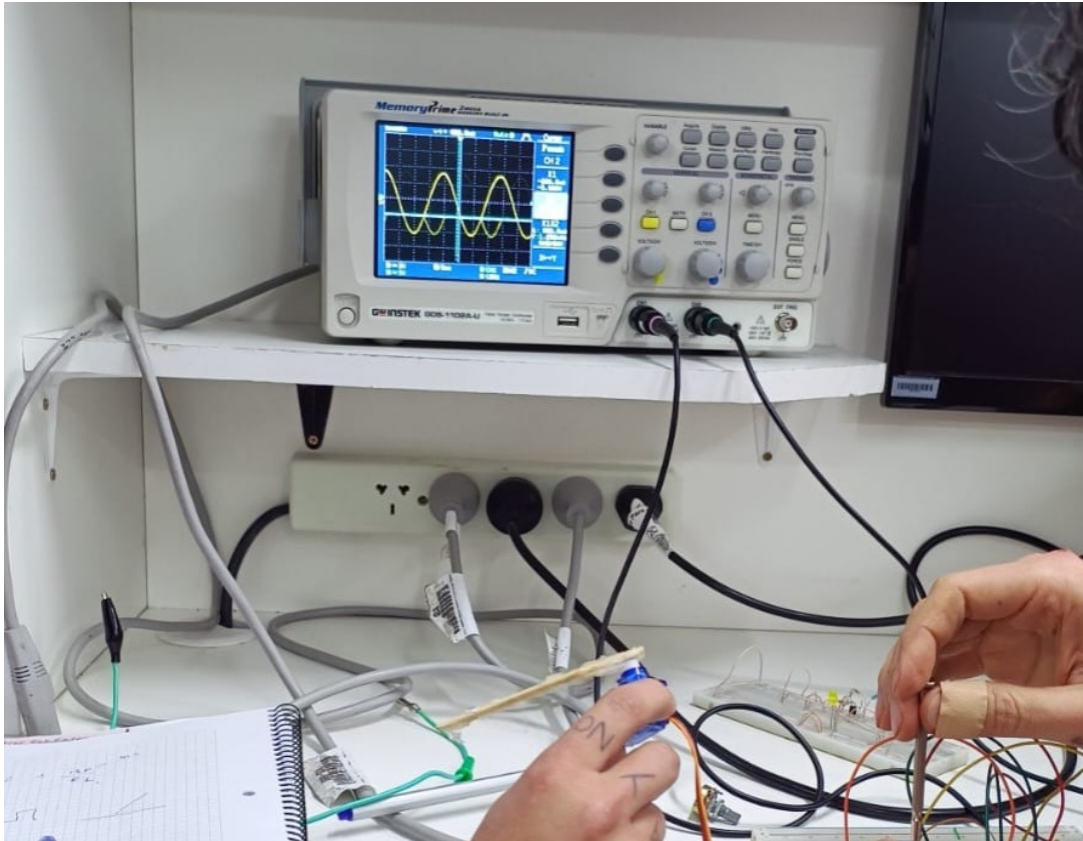
Comparador



Honh 6.3: Circuito oscilador sinusoidal

El comparador consta de una señal de referencia en la pata inversora que compara constantemente con la tensión de la señal sinusoidal inyectada en la pata no inversora, entonces cuando la señal alcanza y supera el voltaje de comparación, la salida permanece en estado alto en toda la fracción de la cresta que hasta que este voltaje es menor a la referencia, entonces obtenemos el pulso cuadrado, que se repite cada 50Hz, ya que la comparación aparece en este periodo de 20mS. Modulando el pulso con un preset que ajuste la referencia estamos sobrados para hacer todo el barrido del servomotor ya que el rango de valores de 0 a 180° equivale a 1 a 2mS en la señal.

Pruebas de laboratorio



Honh 6.4: Prueba en osciloscopio

Seteamos los valores de resistencias y capacitivos en la parte de feedback a un mismo R y un mismo C para poder despejar una única frecuencia de oscilacion en este caso la frecuencia de operación es 50Hz para mover el servomotor.

Análisis del control PWM

El servomotor utilizado requiere una señal PWM con frecuencia cercana a 50 Hz (período aproximado de 20 ms). Dentro de cada período, el ancho de pulso determina la posición angular del eje, siendo típicamente 1 ms el extremo mínimo y 2 ms el máximo (0° a 180°).

La señal sinusoidal generada por el oscilador Wien es convertida en una señal cuadrada mediante un comparador. La tensión de referencia aplicada al comparador determina el punto de cruce con la señal senoidal y, por lo tanto, el ancho del pulso generado.

Al variar dicha referencia mediante un preset, se modifica el tiempo durante el cual la señal permanece en nivel alto dentro de cada período de 20 ms, permitiendo controlar la posición del servomotor de manera analógica.

Este enfoque permite implementar un control PWM simple sin necesidad de micro-controladores, utilizando solo bloques analógicos.

Problemas y conclusiones

En el oscilador Puente Wien la ganancia $R_F/R_1 = 2$ tenía que ser un valor exacto al principio con un valor teórico exacto no pudimos llegar a la oscilación como tal que primero nos aparecía una línea continua en el osciloscopio (convergencia rápida) o directamente no aparecía nada (divergencia rápida). La recomendación del profesor de colocar el preset fue de gran utilidad para visualizar el punto justo de oscilación en pantalla a medida que íbamos girando la perilla.

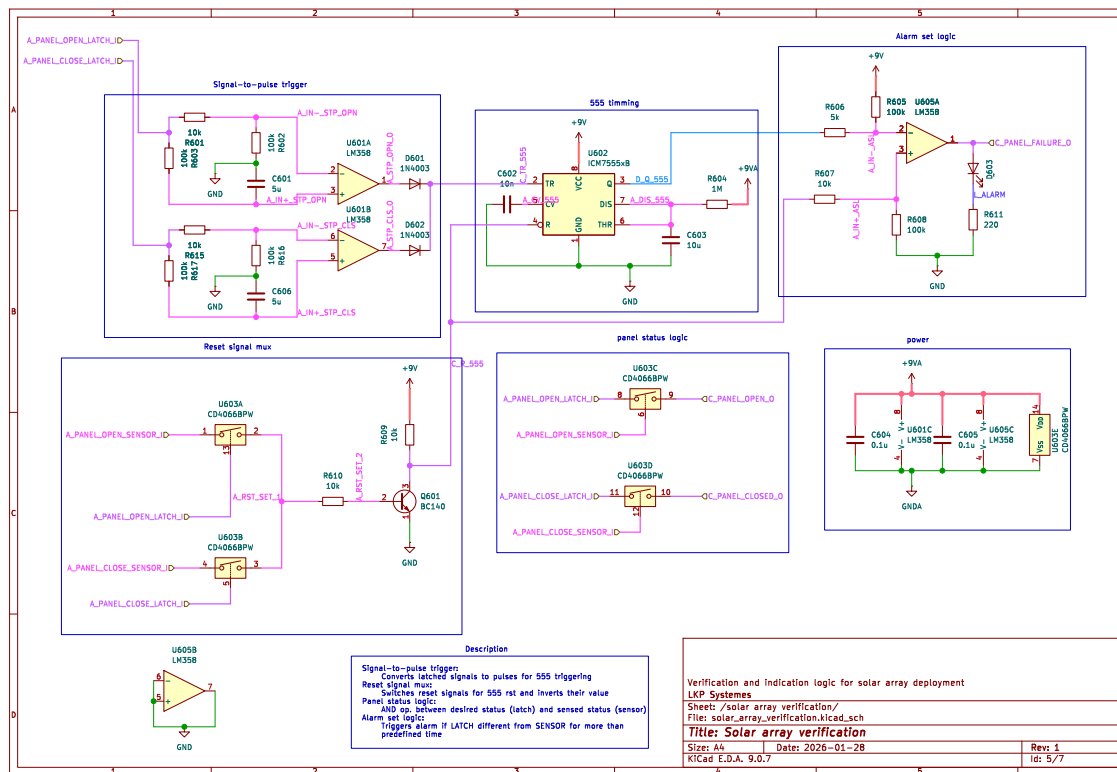
7 Verificación despliegue

Objetivo

Hacer un sistema de verificación analógica de despliegue exitoso de paneles solares.

Implementación

Para verificar el correcto despliegue, se comparan dos señales: La señal de selección `A_PANEL_OPENCLOSE_LATCH_I` con la señal de sensor `A_PANEL_OPENCLOSE_SENSOR`. Al haber un cambio en la señal de control de selección se dispara un timer. Si la señal de selección (latcheada) tiene una diferencia con la señal de sensor durante un tiempo mayor al establecido con el timer 555, se asume un error y se envía señal de alarma. Si las señales se igualan antes que el timer llegue a su límite, se asume correcto funcionamiento. A continuación se muestra el esquemático con cada bloque:



Honh 7.1: Esquematico completo

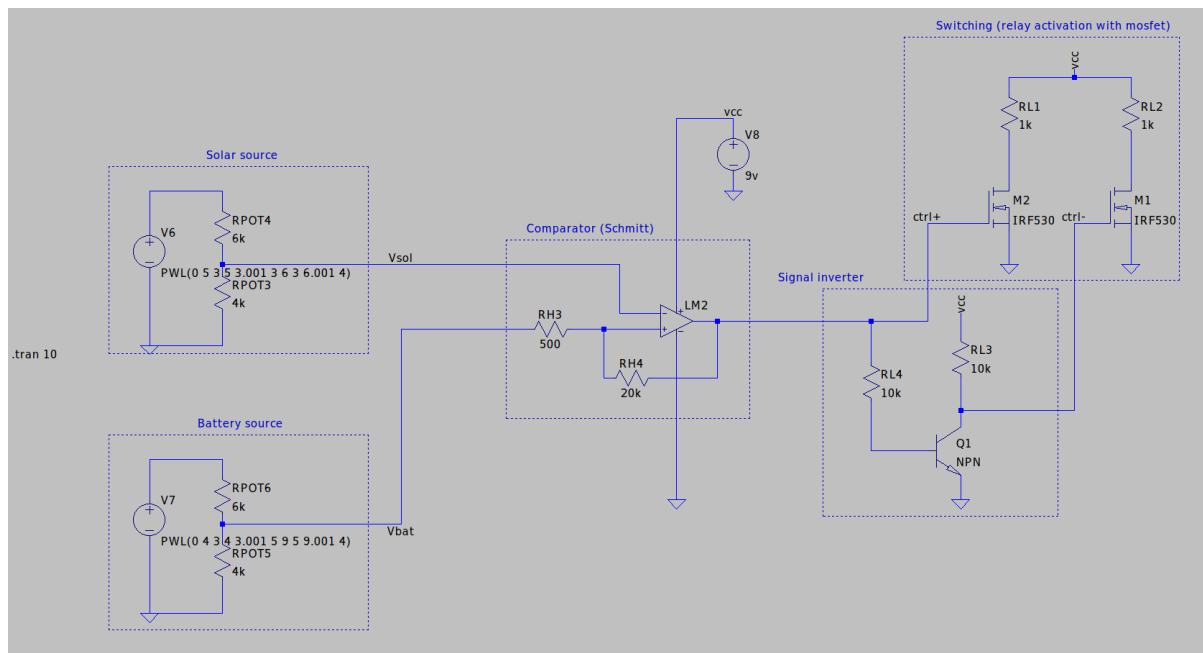
- **Signal-to-pulse trigger:** La función de este bloque es convertir la señal continua de selección en un pulso invertido para activar el 555 ya que éste necesita pulsos para activarse. Para lograrlo, se usa un capacitor el cual, al llegar una señal continua al comparador, genera una diferencia temporal manteniéndose la entrada negativa a mayor voltaje que la positiva. Esto hace que el opamp tenga una salida baja. Luego, una vez el capacitor se estabiliza la salida vuelve a estado alto. En las simulaciones se puede ver este funcionamiento. El sistema se duplica para poder activar el timer con ambas entradas; apertura y cierre de paneles.
- **555 timing:** Timer 555 configurado en modo monoestable con una duración de 10 segundos approx.
- **Reset signal mux:** La señal de reset es tomada de los sensores. Cuando un sensor se activa (el panel está en posición) se activa el reset. Cuando se selecciona apertura paneles, el mux deja pasar la señal del sensor de apertura. De esta manera, cuando el panel está totalmente abierto, el sensor de apertura se activa y a su vez activa

el reset. Como el reset es activo bajo, esta señal se invierte en el mismo mux con el transistor $Q601$. Idem para cierre.

- **Alarm set logic:** Activa la alarma cuando la salida Q del timer esté en bajo (activa) y el reset no esté activado. Esto indica que se superó el tiempo de espera para apertura. Si el sensor indica que el panel llegó a su posición, el reset se activa (bajo) y el comparador se mantiene en cero. Si el timer se agota antes que el sensor llegue a la posición, el comparador da salida en alto activando la alarma.
- **Panel status logic:** Indicador que informa el estado de los paneles. Cuando el latch selecciona apertura y el sensor indica que está abierto, sale la señal de panel abierto. Lo mismo para cerrado

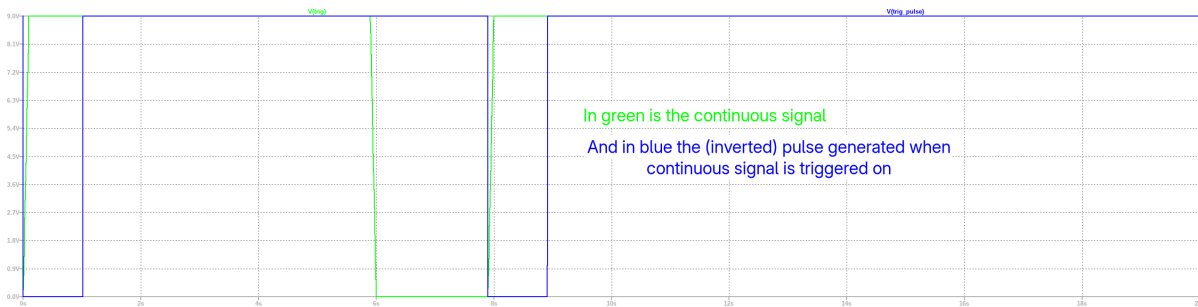
Simulaciones

Se arma el circuito en LTSpice para una sola señal como se muestra a continuación.



Hombre 7.2: Circuito completo en LTSpice

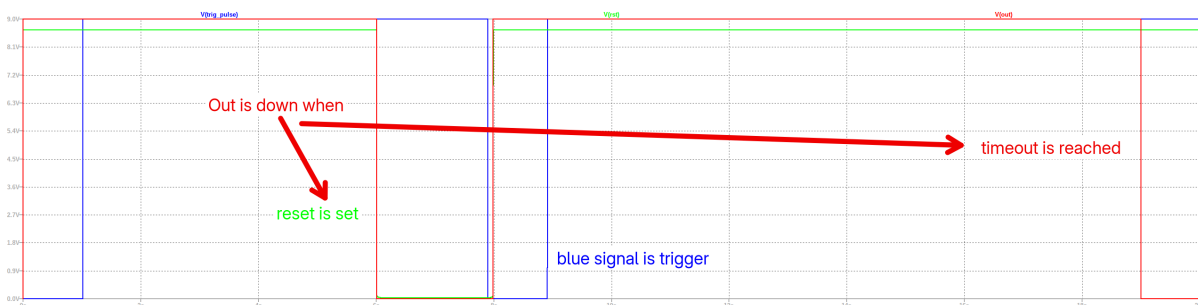
En la primera simulación se puede ver el latch-to-pulse funcionando. Inicialmente, la señal continua (verde) está en estado bajo y pasa a alto, generando un pulso (invertido) en la salida (azul). Luego a los 6 segundos la señal continua pasa a estado bajo sin que se altere la salida. A los 8 segundos la continua pasa a estado alto, generando otro pulso negativo en la salida.



Hình 7.3: Forma de onda de entrada y salida del signal-to-pulse

Luego pasamos a la salida del 555. La waveform roja es la salida (activo bajo). Al inicio se dispara el 555 con un pulso de trigger (azul) y a los 6 segundos se activa el reset. Esto genera una salida activa pero no se dispara la alarma por el bloque alarm-logic explicado m̀os arriba.

Luego, a los 5 segundos, se vuelve a activar el timer simulando otro cambio. Esta la se˜al de reset no llega, frente a lo cual, en los 19 segundos, se activa la salida. La l̀gica de la alarma har̀ que, al activarse la salida del 555 y no el reset del sensor, se dispare la alarma.

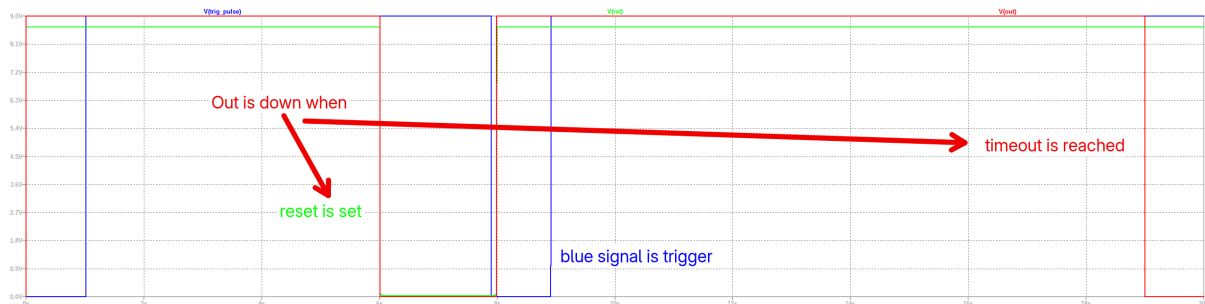


Hình 7.4: Forma de onda de entrada, reset y salida del 555

Finalmente, est̀ la l̀gica de la alarma, en la cual se hacen dos pruebas:

- A los 6 segundos, la salida y reset est̀n bajos (activos) frente a lo cual la alarma no se activa
- A los 19 segundos, Trigger est̀ bajo y reset alto, lo cual activa la alarma.

Esta waveform est̀ sincronizada con la anterior (es la misma simulaci3n), con lo cual se puede ver el funcionamiento completo.



Honh 7.5: Forma de onda de lógica de alarma

Principio de funcionamiento

Lo que hace este sistema es implementar una verificación temporal de coherencia entre la orden de despliegue y la respuesta física del mecanismo.

Cuando se emite una señal de apertura o cierre, el bloque signal-to-pulse genera un pulso que dispara el temporizador 555 en modo monoestable. A partir de ese momento empieza una ventana temporal durante la cual se espera que el sensor indique la posición alcanzada.

Si el sensor confirma la posición antes de que el temporizador expire, el reset interrumpe el conteo y el sistema considera la operación exitosa. Caso contrario, al agotarse el tiempo establecido, la lógica de alarma interpreta la diferencia entre orden y estado como una falla y activa la señal de error.

Esto nos permite detectar atascamientos mecánicos, fallas eléctricas o situaciones en las cuales el panel no alcanza la posición esperada dentro del tiempo previsto.

8 Sistema de selección y detección de orientación

8.1 Latch de selección

Para seleccionar entre dos estados de funcionamiento (plegado y desplegado) implementamos un latch con transistores NPN acoplados cruzadamente. De esta forma, el circuito constituye un biestable tipo SR, que es capaz de mantener el estado seleccionado hasta recibir un nuevo pulso de conmutación.

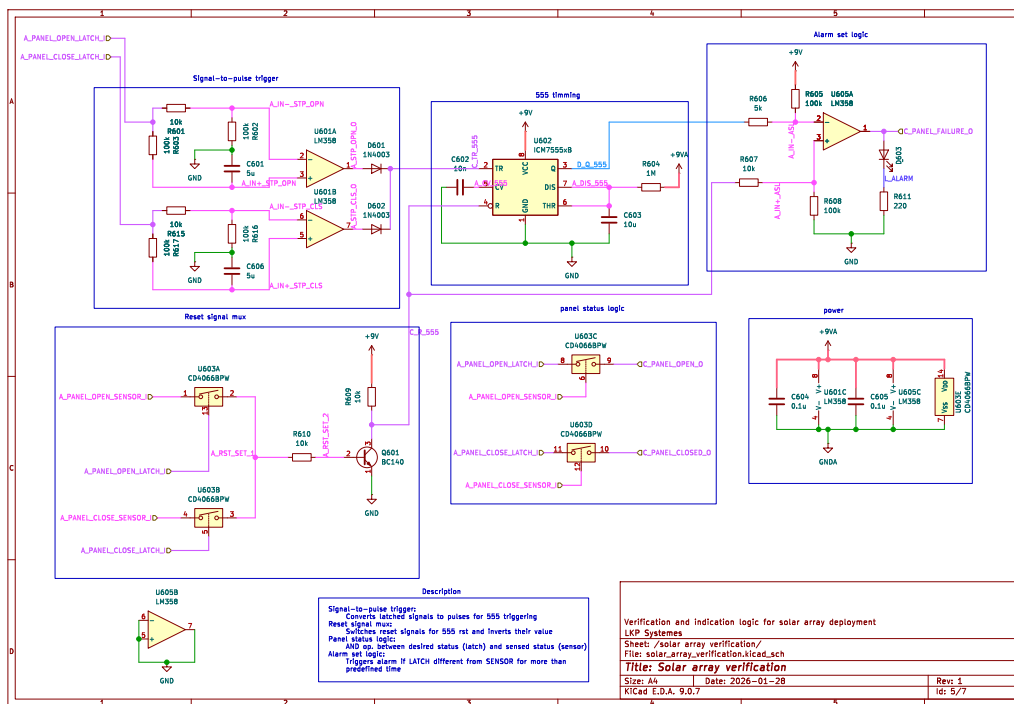
La conmutación se realiza mediante pulsos de tensión aplicados a cada una de las entradas. En la simulación, esos pulsos fueron modelados mediante fuentes de voltaje tipo PULSE.

d.yeah First item

e.yeah Second item

custom Third item

Con la simulación temporal verificamos el correcto funcionamiento del biestable. En ella se observa la conmutación estable entre ambos estados sin oscilaciones indeseadas.



Honh 8.1: Esquemático completo

8.2 Sensor de orientación grosera

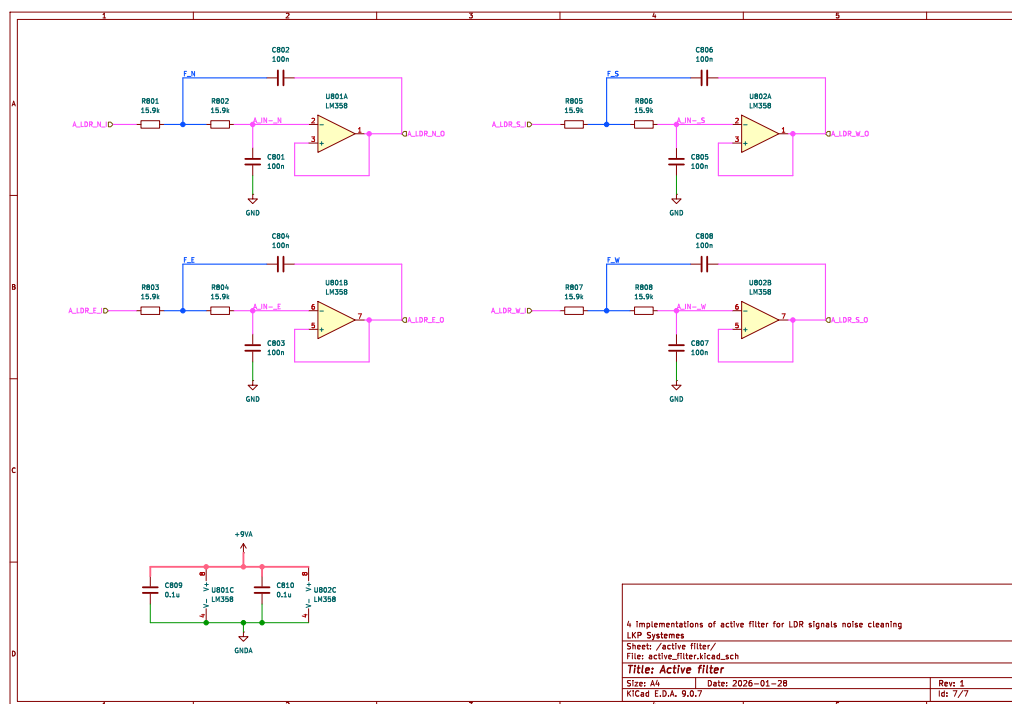
Para determinar la orientación del sistema respecto a la luz solar usamos un detector basado en sensores LDR.

Dispusimos cuatro LDR formando los vórtices de un cuadrado, aunque debido a su comportamiento idéntico simulamos solo uno de los canales.

El principio de funcionamiento se basa en utilizar la variación resistiva del LDR en función de la iluminación incidente. En la simulación esta variación fue modelada asignando al LDR una resistencia dependiente de tensión:

$$R_{LDR} = V(VR) \cdot 10000$$

donde la fuente auxiliar V_3 permite simular un cambio suave en la iluminación.
El circuito usa un comparador para determinar si el nivel de iluminación supera un umbral ajustable mediante un preset modelado por las resistencias $RPOT1$ y $RPOT2$.



Honh 8.2: Circuito del sensor de orientaciún basado en LDR

El anòlisis temporal muestra la variaciún progresiva del voltaje en el LDR y la correspondiente conmutaciún en la salida del comparador.

Debido a que la variaciún lumònica ocurre de manera lenta, no implementamos històre-sis en el comparador, ya que no se observaron oscilaciones en la zona de umbral.

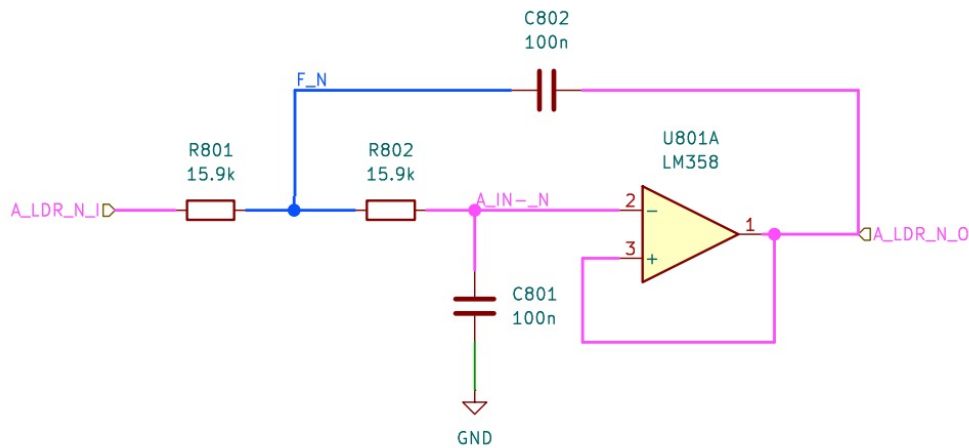
9 Filtro Activo

Objetivo

Diseñar, construir y validar experimentalmente un filtro activo pasabajos de segundo orden utilizando un amplificador operacional, con el objetivo de atenuar ruido de alta frecuencia en seales provenientes de sensores satelitales (temperatura, iluminación y corriente). Se comparó la frecuencia de corte teórica con la medida en el experimento y se analizó el impacto en la calidad de la seál.

Implementacion

Se utilizó la topología Sallen-Key, ampliamente utilizada para la implementación de filtros activos (op amp) de segundo orden. El orden dos del sistema se debe a que tenemos dos componentes almacenadores de energía (capacitores C_1 y C_2), lo que introduce dos polos en la función de transferencia. La imagen a continuación describe como es la topología en cuestión.



Hinh 9.1: Topología Sallen Key

En este caso, para obtener los valores de los componentes decidimos despejarlos a partir de la función transferencia:

$$H(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

donde:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

y Q es el factor de calidad del filtro.

Para simplificar el diseño elegimos una configuración simétrica:

$$R_1 = R_2$$

$$C_1 = C_2$$

lo que nos permite definir una única frecuencia de corte:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Mediante el seteo de características que necesitábamos, definimos una frecuencia de corte de aproximadamente:

$$f_c = 100 \text{ Hz}$$

lo que equivale a:

$$\omega_0 = 2\pi f_c \approx 628 \text{ rad/s}$$

Con los valores seleccionados:

$$R = 15.92 \text{ k}\Omega, \quad C = 100 \text{ nF}$$

se verifica:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \approx 628 \text{ rad/s}$$

Buscamos además una ganancia cercana a la unidad en banda pasante. Por otro lado, la ganancia del amplificador operacional en configuración no inversora está dada por:

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

Simulación

A continuación, realizamos la simulación de un script en python con la librería `python-control` para poder visualizar el diagrama de Bode en magnitud y fase a partir de la función transferencia del circuito:

$$H(s) = \frac{1.01}{2.534 \times 10^{-6} s^2 + 0.001368 s + 1}$$

Estimación de parámetros:

$$R_1 = mR$$

$$R_2 = \frac{R}{m}$$

$$C_1 = nC$$

$$C_2 = C/n$$

$$w_0 = 2 * \pi * f_0$$

Investigando al respecto, decidimos que lo más conveniente era definir una única R y una única C para así poder despejar una única frecuencia de corte. Para poder completar los valores de los esquemáticos escalamos las resistencias y capacitores por las constantes 'm' y 'n' respectivamente.

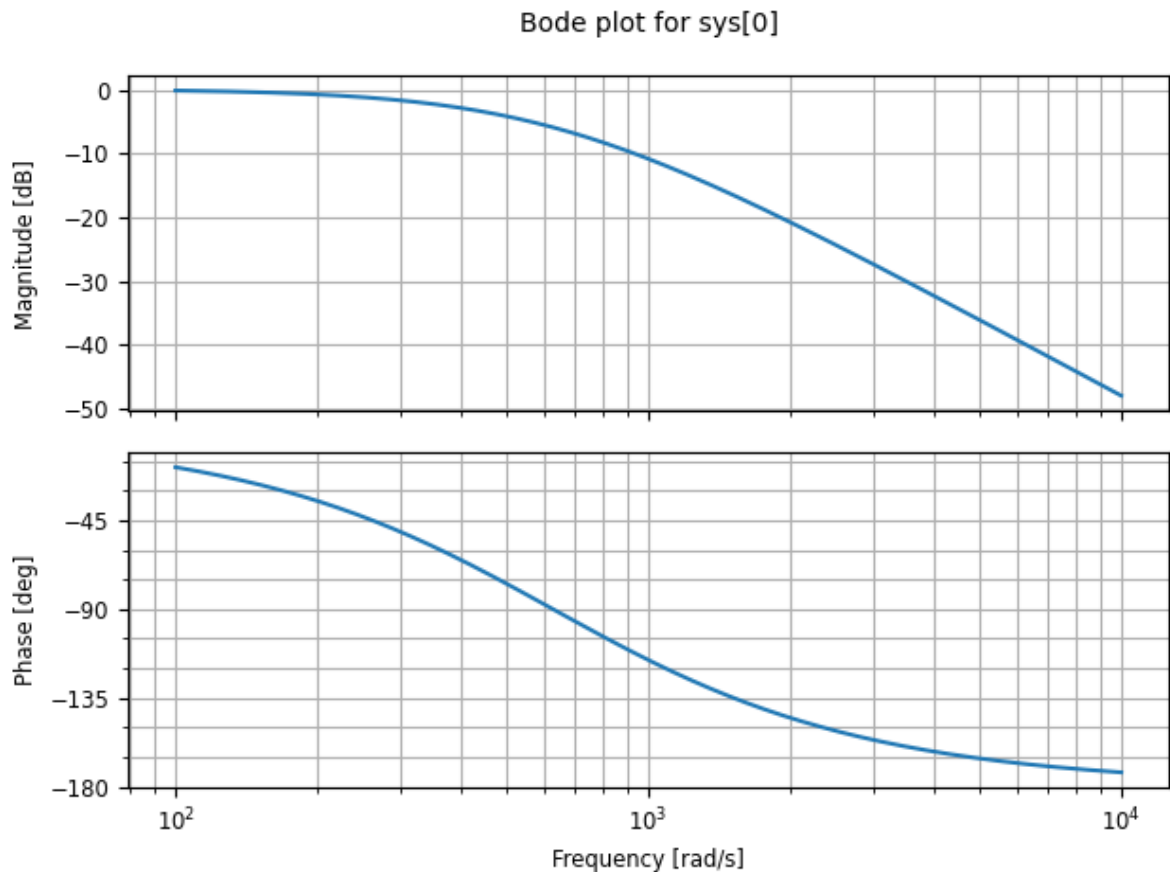
Probamos valores de resistencias y capacitores que tengan sentido con los materiales a disposición, y, para la magnitud unitaria del Bode, forzamos a que la ganancia en la función transferencia sea 1.01. Dicha ganancia fue obtenida del mismo esquemático en función a las resistencias:

$$K = \frac{R_3 + R_4}{R_3} = 1.01$$

Listing 9.1: Simulación filtro

```
1 import control as ct
2 import sympy as sp
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 %matplotlib qt6
6
7 R1=15.92*(10**3)
8 R2=15.92*(10**3)
9 R3=100*(10**3)
10 R4=1*(10**3)
11 C1=100*(10**(-9))
12 C2=100*(10**(-9))
13
14 K=(R3+R4)/R3
15
16 num=[0,0,K]
17 den=[R1*R2*C1*C2,R1*C1+R2*C1+R1*C2*(1-K),1]
18
19 H=ct.tf(num,den)
20
```

```
21 plt.figure()  
22 ct.bode_plot(H,dB=True)  
23  
24 plt.show()
```



Honh 9.2: Bode filtro activo

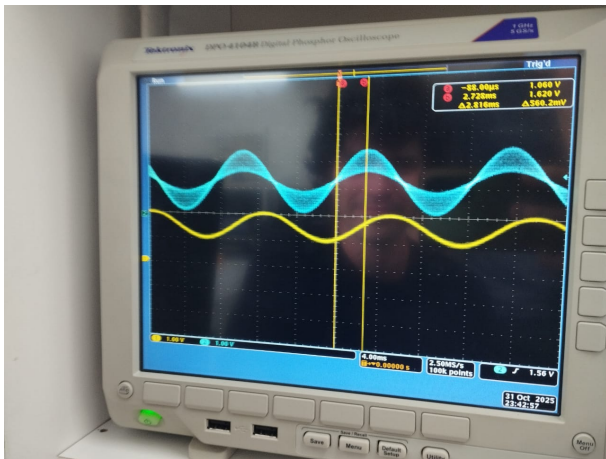
De la simulaci3n obtuvimos el Bode en fase y en magnitud, de los cuales podemos ver que se cumple con el criterio de corte a 200rad/s y adem3s se aprecia que a una superior a 100 rad/s el filtro desfazar3 nuestra se3al de salida respecto a la de entrada.

Pruebas de laboratorio

Sometimos al filtro a diferentes entradas para poder validar y corroborar su comportamiento descrito por los diagramas de Bode.

Modulación AM

Decidimos probar el filtrado con una senoidal modulada en AM mediante un generador de funciones, dicha portadora contenía altas frecuencias y la envolvente bajas frecuencias para corroborar su debido funcionamiento.

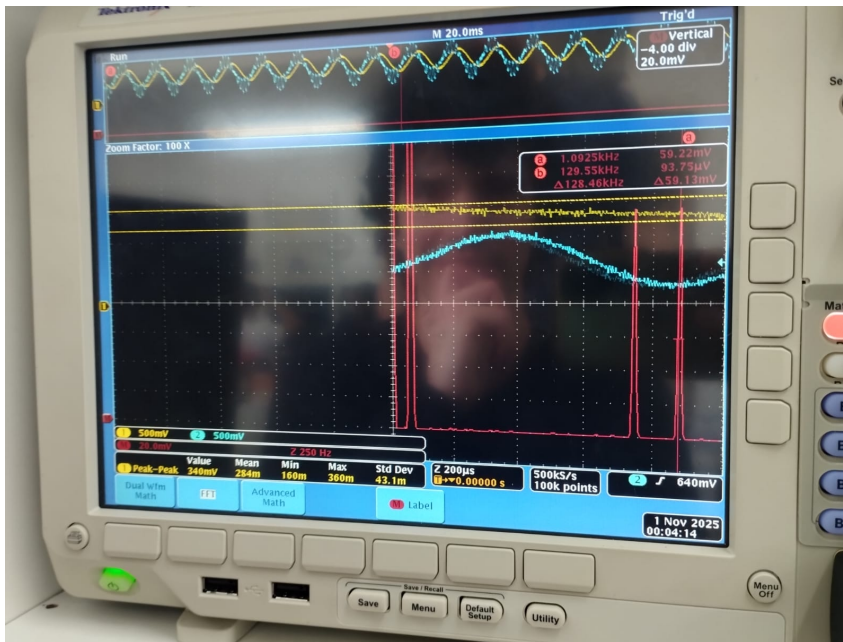


Hình 9.3: Modulación AM 1

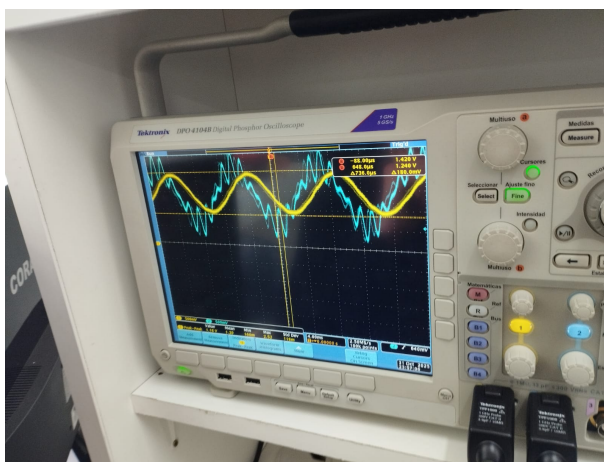
El osciloscopio muestra lo que esperábamos, una señal filtrada(amarillo), un poco desfasada en fase y también atenuada en magnitud, la atenuación corresponde a aproximadamente 7 decibels que es la transición de la frecuencia de corte.

Armónicos

Empleamos el osciloscopio para analizar las componentes frecuenciales de la señal periódica en la señal modulada, a modo de verificar que efectivamente introducimos unas componentes de alta frecuencia.



Hörnh 9.4: Armónicos

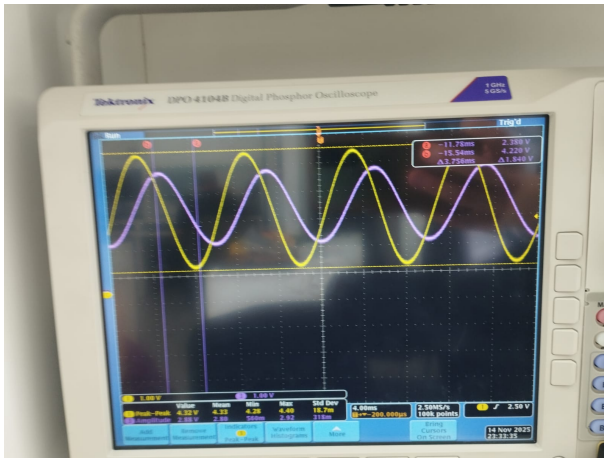


Hörnh 9.5: Modulaci6n AM 2

Esta segunda figura es una prueba con una entrada modulada a una frecuencia un poco mas baja.

Desfasaje

Ingresamos al sistema con una seřal sin modular casi a la frecuencia de corte para visualizar la atenuacion en la magnitud y el cambio de fase correspondiente.



Honh 9.6: Desfasaje

10 Control térmico

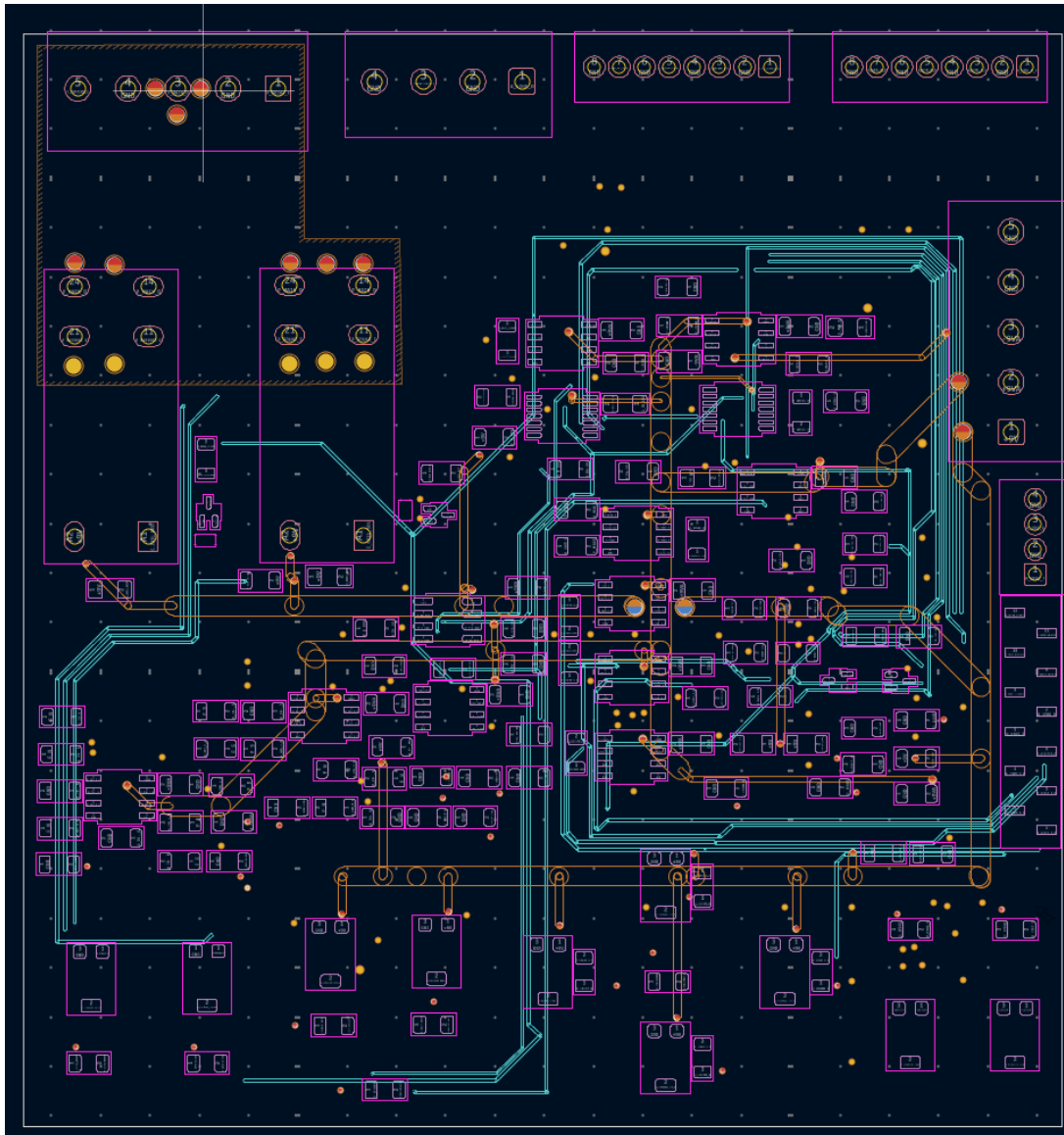
Prueba de inserción de control térmico

d.yeah First item

e.yeah Second item

custom Third item

lalalalalalaaaa



Hình 10.1: Example image 1x1